PRIEDAI

A Priedas. Skaičiavimai pagal 1 metodą

A.1 priedas. Skaičiavimai pagal 1 metodą (Breccolotti et al., 2015)

(Breccolotti et al., 2015). Betono natūralių užpildų pakeitimo perdirbtais kiekis - 0%

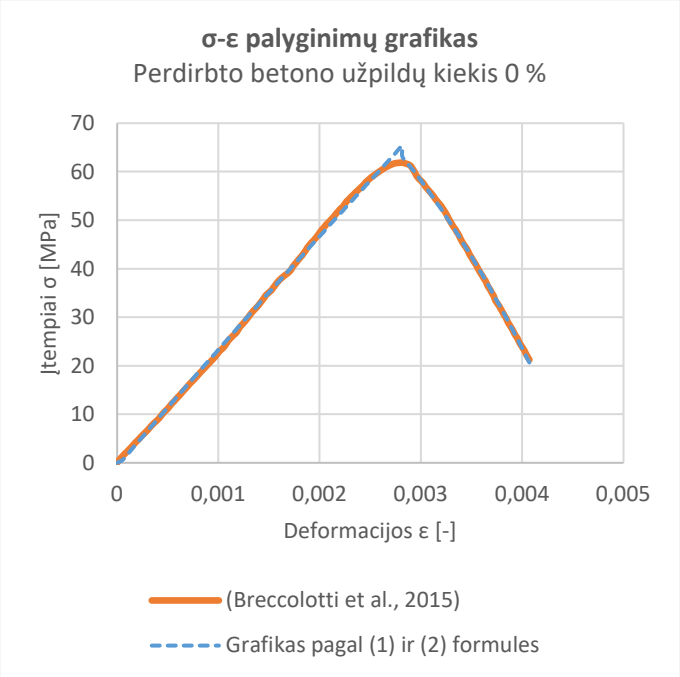
Įtempių formulės gautos iš tendencijų linijų:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left(-326908 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{2} + 24375 \cdot \varepsilon_{c.c1} - 0.7269\right)\text{MPa} \quad (1)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(-6380353 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{2} + 10104 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 85\right)\text{MPa} \quad (2)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0$ $\varepsilon_{c1} := 0.00281518817204301$ $\varepsilon_{cu} := 0.00407086999022482$



A.1. 1 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.1. 1 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00108	0.00107	0.00001
60%	0.00159	0.00163	0.00004
80%	0.00208	0.00220	0.00012

Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00397	0.00398	0.00001
60%	0.00366	0.00359	0.00007
80%	0.00331	0.00320	0.00011

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 3.549 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.147 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002423$

$k_c = 0.405$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left(-326908 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 24375 \cdot y_{c.c} - 0.7269\right) MPa \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 56.41 \cdot MPa$$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 61.913MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = -326908 \cdot \varepsilon_{c1.1}^{\,2} + 24375 \cdot \varepsilon_{c1.1} - 0.7269 \text{ solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.0010609253504909393451 \\ 0.073501336815011281463 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.0010609253504909393451$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 23.343 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$(\alpha_c) = 0.911$

$d := h - d_1$

$(d) = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{sl}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$(x) = 0.032\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$(F_c) = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{sl}$

$(F_{sy}) = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$(M_c) = 5.819 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{sl} \cdot d$

$(M_{sy}) = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -194.538 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 194.538 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 4.182$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 4.182 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 6.69 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 69.686 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 43.568 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 8.568 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.889 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.13145058087981904331 \\ -0.18655913525739500386 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.131 \\ -0.187 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.131 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 8.665 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 194.538 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.243 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas ivertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\left(\varepsilon_{c0.c} := 0.000\right) \qquad \left(\varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3}\right) \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \left(\varepsilon_{cu1} := 0.0035\right) \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \left(\varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}\right)$$

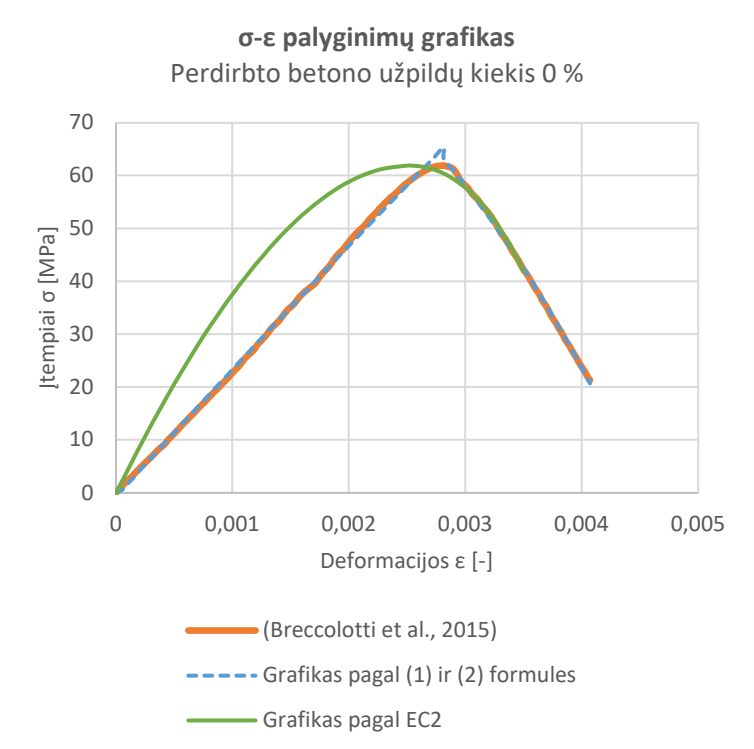
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 38.015 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.621$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.1. 2 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$$S_{\varepsilon.c} = 3.204 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$$A_{\varepsilon.c} = 0.153 \cdot \text{MPa}$$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00209674$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 59.41 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.96$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$(x_\xi := d \cdot \xi_{lim})$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$(d) = 0.445\,m$

$(\xi_{lim}) = 0.556$

$(x_\xi) = 0.247\,m$

$(x) = 0.03\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad (F_c) = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$ $\quad (F_{sy}) = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$ $\quad M_{R.EC2} = 194.885 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad (M_c) = 5.472 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad (M_{sy}) = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -194.885 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 194.885\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 194.538 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 194.885 \cdot kN \cdot m$

- ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Įlinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos įlinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 5.261 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{sl} = 4.23 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{sl}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.14079315622459998255 \\ 0.10695405682739849719 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.141 \\ 0.107 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.107 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{sl}) \cdot (d - x_{II})^2 = 5.853 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{y.EC2} := M_{R.EC2} = 194.885 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.243 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{y.EC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC1})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Iinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1} \, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2} \, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}))) \, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 2.093 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.105 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002$

$k_c = 0.333$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$\sigma_{cc1}(y_{cc}) := \left(-326908 \cdot y_{cc}^{2} + 24375 \cdot y_{cc} - 0.7269\right) MPa$ $\sigma_{cc1}(y_{cc}) = 46.712 \cdot MPa$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 61.913 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 4.878 \cdot MPa$

Tamprumo modulis:

$E_{cmACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 36.982 \cdot GPa$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{cc1}(y_{cc})}{f_{cm}}$ Gautos reikšmės:

$(\alpha_c) = 0.754$

$d := h - d_1$

$(d) = 0.445\,m$

$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$

$(x) = 0.039\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $(F_c) = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $(F_{sy}) = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $(M_c) = 5.787 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $(M_{sy}) = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -194.57 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 194.57 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 194.538 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 194.885 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 194.57 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_1 = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 50.817 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 194.57 \cdot kN \cdot m$ $dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.188 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 5.408 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.348 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.14301733810894856562 \\ 0.10823271923095966974 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.10823271923095966974 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 5.988 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

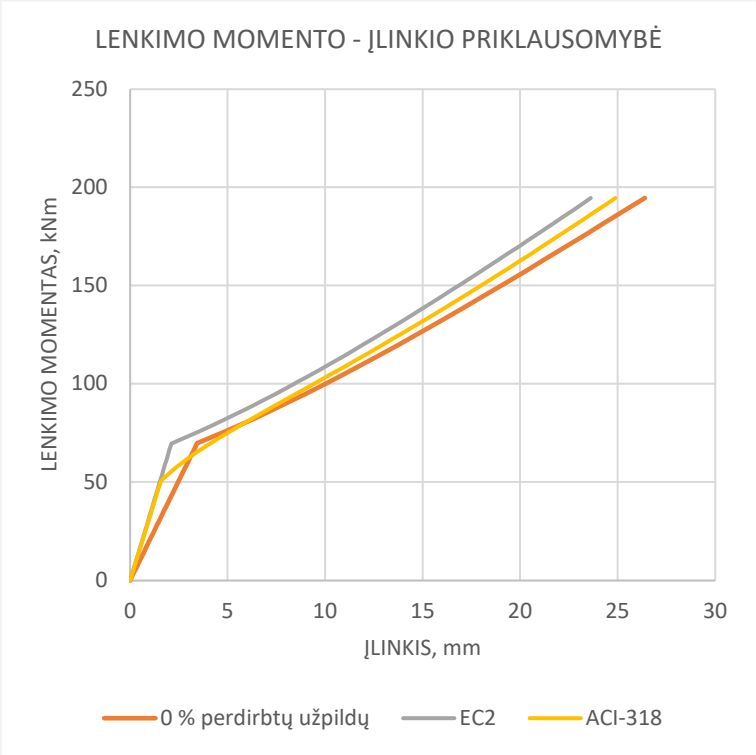
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.1. 3 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Breccolotti et al., 2015). Betono natūralių užpildų pakeitimo perdirbtais kiekis - 50%

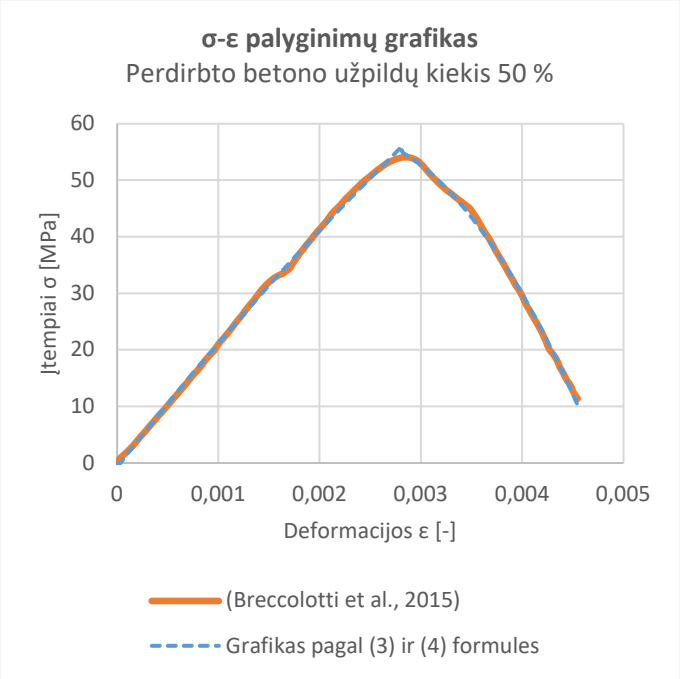
Įtempių formulės gautos iš tendencijų linijų:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left(-972274 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{2} + 22857 \cdot \varepsilon_{c.c1} - 0.6925\right) \text{MPa} \quad (3)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(-8303636 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{2} + 36921 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 16.18\right) \cdot \text{MPa} \quad (4)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0$ $\varepsilon_{c2.c} := 0.002815188$ $\varepsilon_{cu} := 0.004547939$



A.1. 4 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.1. 2 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00098	0.00102	0.00004
60%	0.00158	0.00157	0.00001
80%	0.00201	0.00215	0.00014
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00425	0.00428	0.00003
60%	0.00393	0.00393	0.00000
80%	0.00357	0.00349	0.00008

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 3.823 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.147 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002601$

$k_c = 0.428$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left(-972274 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 22857 \cdot y_{c.c} - 0.6925\right) MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 52.174 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 54.039MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left(-972274 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 22857 \cdot \varepsilon_{c1.1} - 0.6925\right) \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.0010202641589249986022 \\ 0.022488540972138878453 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.0010202641589249986022$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 21.186 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$(\alpha_c) = 0.965$

$d := h - d_1$

$(d) = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$(x) = 0.035\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$(F_c) = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$(F_{sy}) = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$(M_c) = 6.655 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$(M_{sy}) = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -193.702 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 193.702 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.937$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.937 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 6.297 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 65.59 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 41.007 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 9.44 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 7.59 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.13679765502181822193 \\ -0.19751620153642426399 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.137 \\ -0.198 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.137 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 9.343 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 193.702 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.406 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$(\varepsilon_{c0.c} := 0.000)$ $\left(\varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3}\right)$ $d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10}$ $(\varepsilon_{cul} := 0.0035)$ $d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$

$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1}$ $(\varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul})$

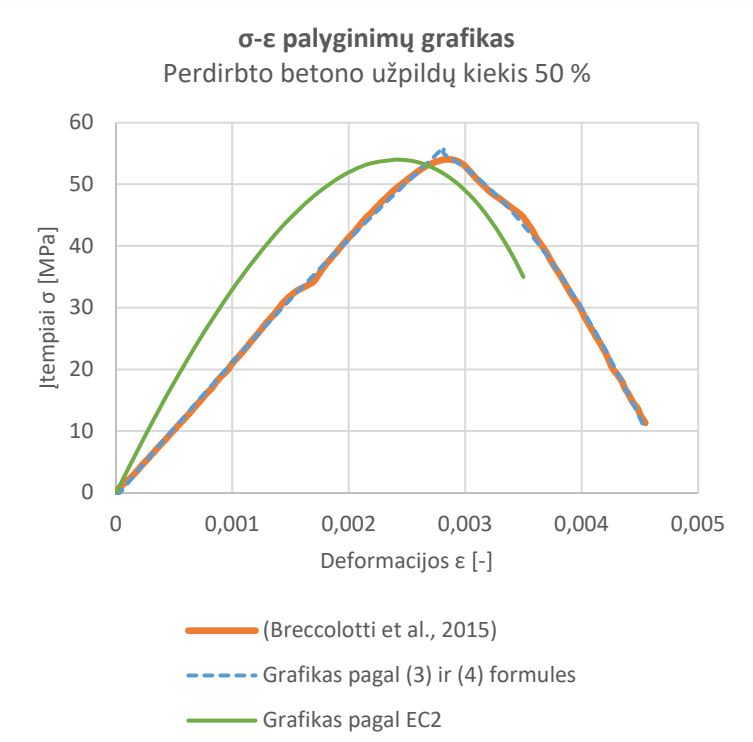
Tamprumo modulis:

$$E_{cmEC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 36.495 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cmEC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.71$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.1. 5 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$(S_{c.c}) = 2.8 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$(A_{c.c}) = 0.136 \cdot \text{MPa}$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}} \qquad (y_c) = 0.00206561$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad (\sigma_{c.yc}(y_c)) = 52.562 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.973$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$(x_\xi := d \cdot \xi_{lim})$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{sl}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$(d) = 0.445\,m$

$(\xi_{lim}) = 0.556$

$(x_\xi) = 0.247\,m$

$(x) = 0.034\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$(F_c) = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{sl}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$(F_{sy}) = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 194.034 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{sl} \cdot d$

$(M_c) = 6.322 \cdot kN \cdot m$

$(M_{sy}) = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -194.034 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 194.034\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 193.702 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 194.034 \cdot kN \cdot m$

- ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Įlinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos įlinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 5.48 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.406 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.14410041973102392769 \\ 0.10885187759598643356 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.144 \\ 0.109 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.109 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.053 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{y.EC2} := M_{R.EC2} = 194.034 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.406 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{y.EC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Iinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.841 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.093 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001988$

$k_c = 0.337$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$\sigma_{cc1}(y_{cc}) := \left(-972274 \cdot y_{cc}^{\ 2} + 22857 \cdot y_{cc} - 0.6925\right) MPa$ $\sigma_{cc1}(y_{cc}) = 40.897 \cdot MPa$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 54.039 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 4.558 \cdot MPa$

Tamprumo modulis:

$E_{cmACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 34.55 \cdot GPa$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{cc1}(y_{cc})}{f_{cm}}$

Gautos reikšmės:

$(\alpha_c) = 0.757$

$d := h - d_1$

$(d) = 0.445\,m$

$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$

$(x) = 0.044\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad (F_c) = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad (F_{sy}) = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad (M_c) = 6.691 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad (M_{sy}) = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -193.666 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 193.666 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 193.702 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 194.034 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 193.666 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 47.476 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 193.666 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.309 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 5.789 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{sl} = 4.654 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{sl}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.14867448894686835245 \\ 0.11144178975707595671 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.11144178975707595671 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{sl}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.332 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

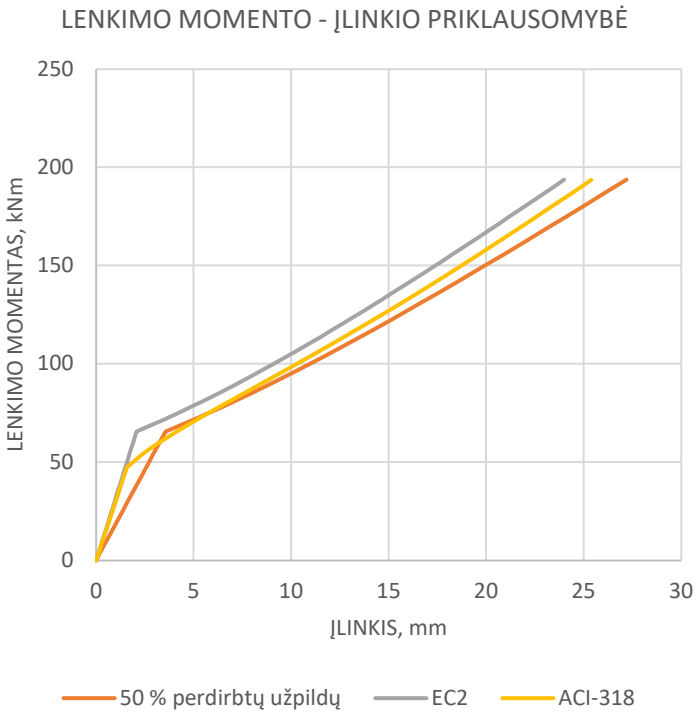
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.1. 6 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Breccolotti et al., 2015). Betono natūralių užpildų pakeitimo perdirbtais kiekis - 100%

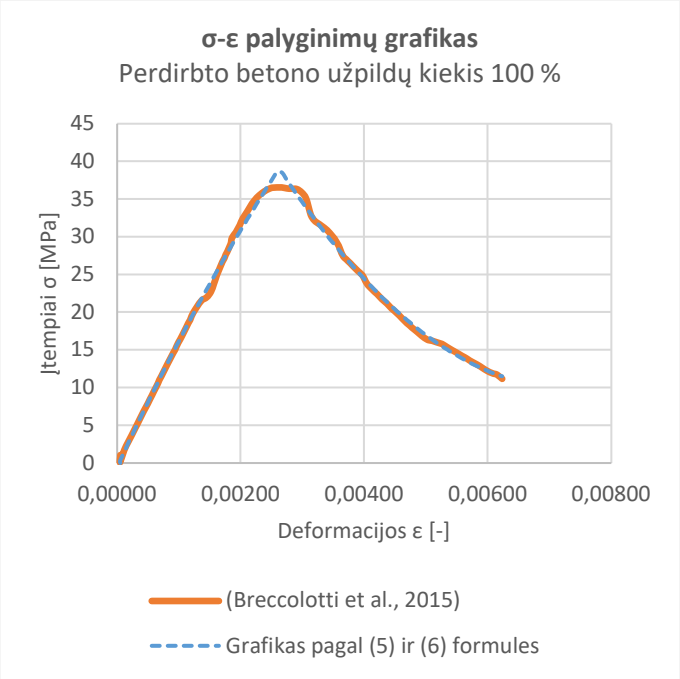
Įtempių formulės gautos iš tendencijų linijų:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left(-989946 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{2} + 17675 \cdot \varepsilon_{c.c1} - 0.5367\right) \text{MPa} \quad (5)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(1342236.74 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{2} - 19523.76 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 81.04\right) \cdot \text{MPa} \quad (6)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0$ $\varepsilon_{c2.c} := 0.002815188$ $\varepsilon_{cu} := 0.004547939$



A.1. 7 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.1. 3 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00089	0.00092	0.00004
60%	0.00143	0.00143	0.00000
80%	0.00188	0.00198	0.00010
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00541	0.00536	0.00004
60%	0.00425	0.00417	0.00008
80%	0.00352	0.00325	0.00026

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 2.864 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.109 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002621$

$k_c = 0.424$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left(-989946 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 17675 \cdot y_{c.c} - 0.5367\right) MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 38.992 \cdot MPa$

- Sios geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 36.52MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left(-989946 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 17675 \cdot \varepsilon_{c1.1} - 0.5367\right) \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.016952051424166349626 \\ 0.000902457811169095976256 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.000902457811169095976256$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 16.187 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$(\alpha_c) = 1.068$

$d := h - d_1$

$(d) = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$(x) = 0.046\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$(F_c) = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$(F_{sy}) = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$(M_c) = 8.81 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$(M_{sy}) = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -191.547 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 191.547 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.259$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.259 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.213 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 54.301 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 33.949 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 12.356 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 9.934 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.15247192029199689485 \\ -0.23194356110246037859 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.152 \\ -0.232 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.152 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s - A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 1.145 \times 10^{-3}\, m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 191.547 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.862 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$(\varepsilon_{c0.c} := 0.000)$ $\left(\varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3}\right)$ $d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10}$ $(\varepsilon_{cu1} := 0.0035)$ $d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$

$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1}$ $(\varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1})$

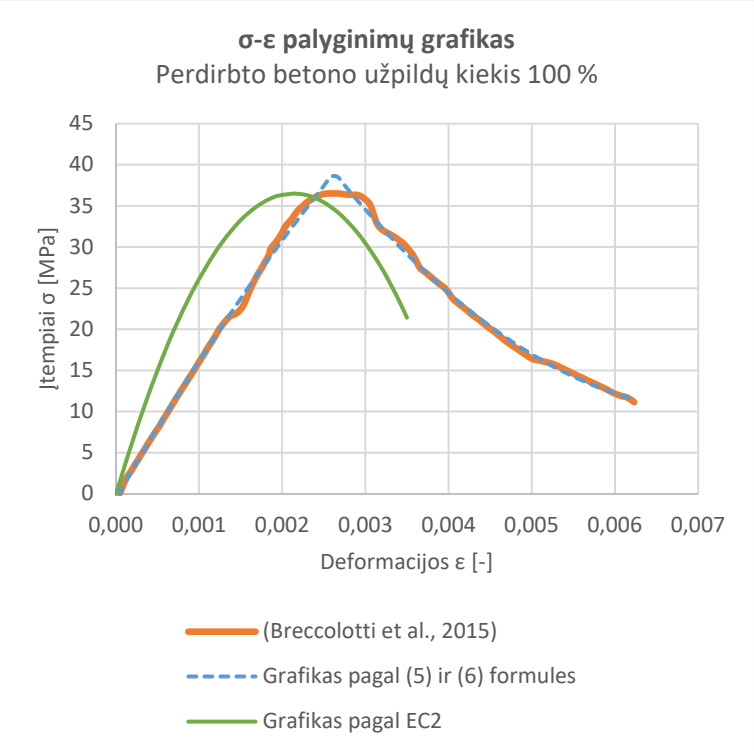
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 32.448 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.992$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.1. 8 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$\left(S_{s.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu} \right)$$

$(S_{s.c}) = 1.881 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$

Figūros plotas:

$$\left(A_{s.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu} \right)$$

$(A_{s.c}) = 0.095 \cdot \text{MPa}$

Figūros svorio centras:

$$\left(y_c := \frac{S_{s.c}}{A_{s.c}} \right) \qquad (y_c) = 0.00198168$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\left(\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \right) \qquad (\sigma_{c.yc}(y_c)) = 36.329 \cdot \text{MPa}$$

$$\left(\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.995 \right)$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$(x_\xi := d \cdot \xi_{lim})$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{sl}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$(d) = 0.445\,m$

$(\xi_{lim}) = 0.556$

$(x_\xi) = 0.247\,m$

$(x) = 0.05\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$(F_c) = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{sl}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$(F_{sy}) = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 190.674 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{sl} \cdot d$

$(M_c) = 9.682 \cdot kN \cdot m$

$(M_{sy}) = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -190.674 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 190.674\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 191.547 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 190.674 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 6.164 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.956 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15411795086708792695 \\ 0.11447243074021812371 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.154 \\ 0.114 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.114 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.664 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$(M_{y.EC2} := M_{R.EC2} = 190.674 \cdot kN \cdot m) \qquad \left(dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.862 \cdot kN \cdot m\right)$

$(M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{y.EC2})$

$\left(\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{IIEC2}}\right)$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Iinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1} \, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2} \, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}))) \, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.388 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.07 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001972$

$k_c = 0.343$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left(-989946 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 17675 \cdot y_{c.c} - 0.5367\right) MPa$ $\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 30.462 \cdot MPa$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 36.52 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 3.747 \cdot MPa$

Tamprumo modulis:

$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 28.403 \cdot GPa$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$

Gautos reikšmės:

$(\alpha_c) = 0.834$

$d := h - d_1$

$(d) = 0.445\,m$

$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$

$(x) = 0.059\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad (F_c) = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad (F_{sy}) = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad (M_c) = 9.125 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad (M_{sy}) = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -191.231 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 191.231 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 191.547 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 190.674 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 191.231 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 39.029 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 191.231 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.61 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.042 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.956 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16640700296149368726 \\ 0.12111591126562287345 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.12111591126562287345 \cdot m$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.419 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Iškis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

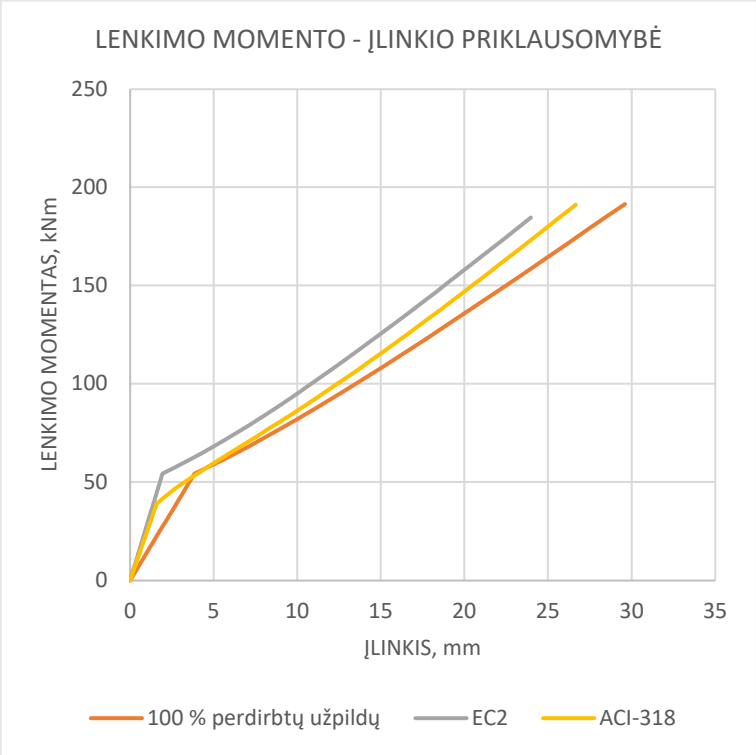
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Iškis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

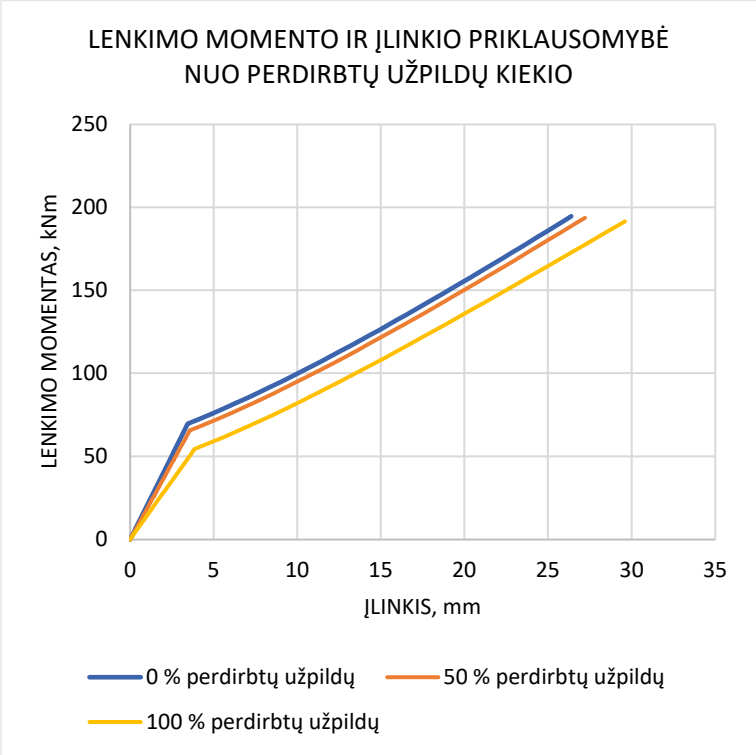
$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$

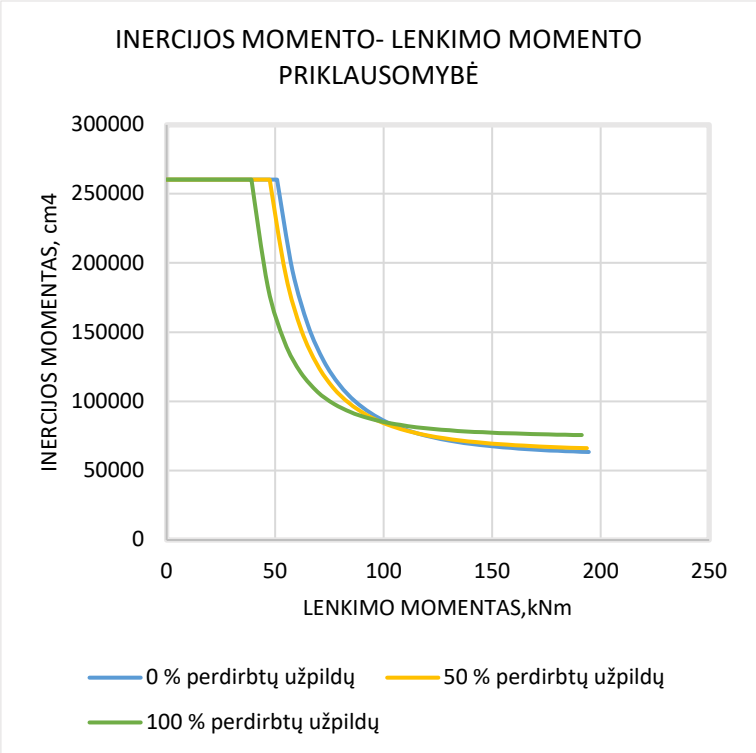


A.1. 9 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

Bendri rezultatai:



A.1. 10 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio



A.1. 11 pav. Inercijos momento – lenkimo momento priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio

(Belén et al., 2010). Matavimas tenzodavikliais.
Vandens/cemento santykis 0.65. Perdirbto betono užpildų kiekis - 0%

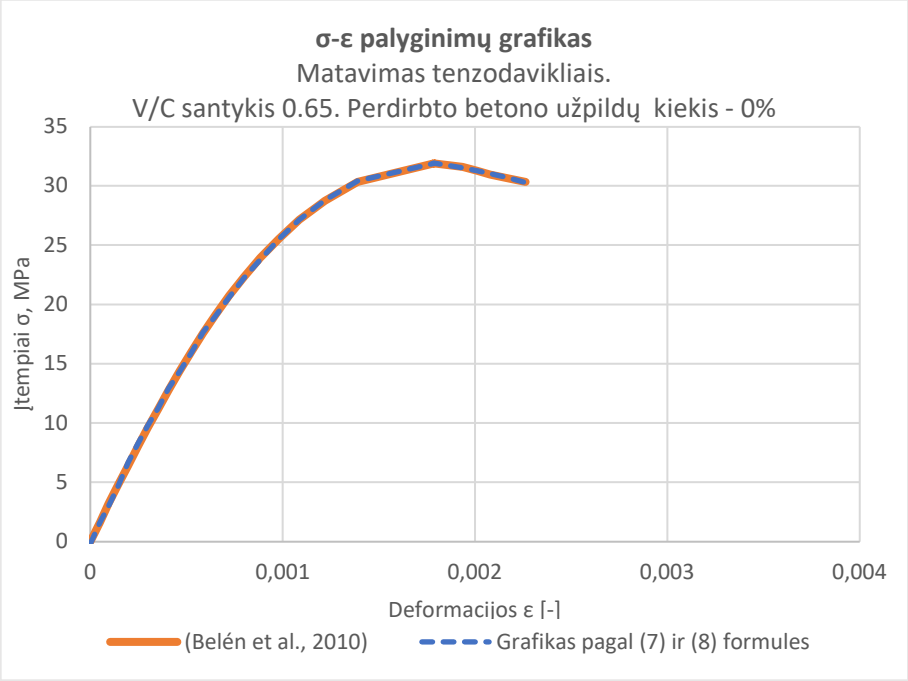
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-10235400.61 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{2} + 36268.99 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) - 0.22\right]\text{MPa} \quad (7)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(-2000000 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{2} + 4053.4 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 30.654\right)\text{MPa} \quad (8)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0$ $\varepsilon_{c1} := 0.001787$ $\varepsilon_{cu} := 0.002262$



A.2. 1 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 1 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00410	0.00404	0.00006
60%	0.00650	0.00655	0.00005
80%	0.00980	0.00983	0.00003
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
95%	0.02259	0.02244	0.00015

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 7.196 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.053 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001368$

$k_c = 0.395$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-10235400.61 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 36268.99 \cdot y_{c.c}\right) - 0.22\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 30.243 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 31.92MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-10235400.61 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 36268.99 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) - 0.22\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.003139274075777949808 3 \\ 0.000404211067789869956 78 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00040421106778986995678$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 31.587 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(\gamma_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.947$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.06\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 10.594 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.762 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 189.762 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.038$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.038 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.86 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 50.623 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 31.649 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.332 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.091 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.1565141484254094918 \\ 0.11578912355033988601 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.157 \\ 0.116 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.116 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.811 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 189.762 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.957 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$

$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cu1} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

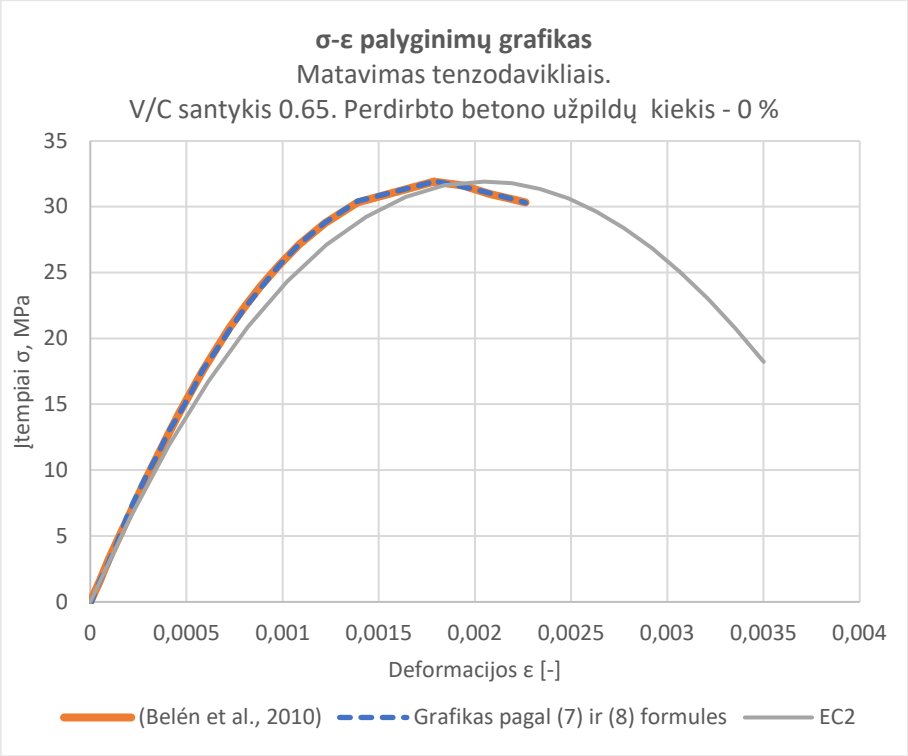
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 31.163 \cdot GPa$$

Itempiu-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.1$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 2 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{e.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{e.c} = 1.637 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{e.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{e.c} = 0.084 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{e.c}}{A_{e.c}} \qquad y_c = 0.00195507$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Įtempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 31.86 \cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.998$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.057\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{REC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{REC2} = 189.123 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 11.234 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.123 \cdot kN \cdot m$

$M_{REC2} = 189.123\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 189.762 \cdot kN \cdot m$

$M_{REC2} = 189.123 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 6.418 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.16 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15773599384562856724 \\ 0.11645648837637240458 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.158 \\ 0.116 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.116 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.886 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{RIEC2} = 189.123 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.957 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{I EC2}(M_{II EC2}) := \frac{M_{II EC2}}{E_{cm EC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{I EC2}(M_{II EC2}) := \rho_{I EC2}(M_{II EC2}) \qquad \alpha_{II EC2}(M_{II EC2}) := \rho_{II EC2}(M_{II EC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{II EC2}) := \zeta_{II EC2}(M_{II EC2}) \cdot \alpha_{II EC2}(M_{II EC2}) + (1 - \zeta_{II EC2}(M_{II EC2})) \cdot \alpha_{I EC2}(M_{II EC2})$$

Iinkis:

$$w_{II EC2}(M_{II EC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{II EC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.002262$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 7.225 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.053 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.00137$

$k_c = 0.394$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-10235400.61 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 36268.99 \cdot y_{c.c}\right) - 0.22\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 30.256 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 31.92 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.503 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 26.554 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.948$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.06\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 10.571 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.786 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.786 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 189.762 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.123 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.786 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^{5} \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 36.488 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 189.786 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.665 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.532 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.056 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.17303312092049695757 \\ 0.12458836946301183839 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.12458836946301183839 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralia ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.828 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Ilinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

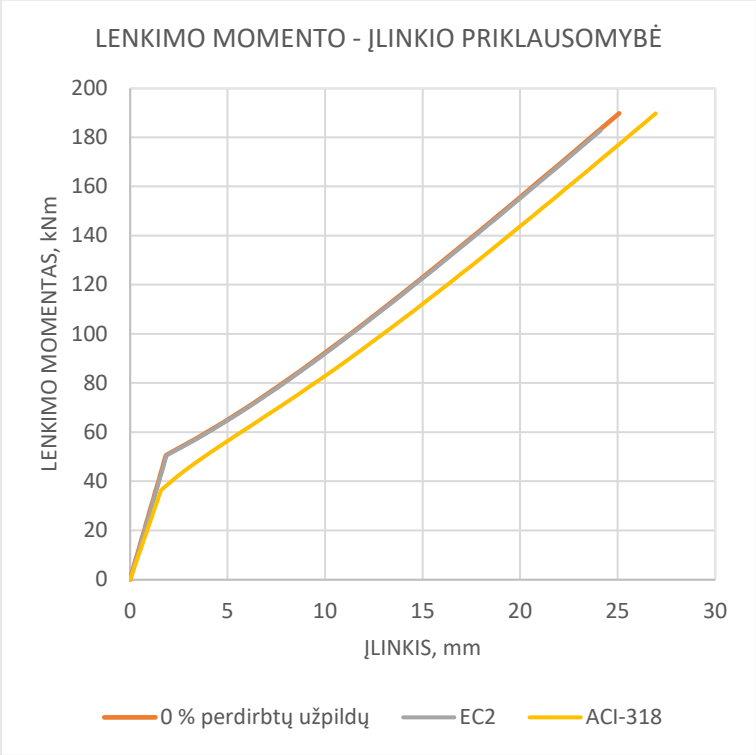
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Ilinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 3 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Belén et al., 2010). Matavimas tenzodavikliais.
Vandens/cemento santykis 0.65. Perdirbto betono užpildų kiekis 20%

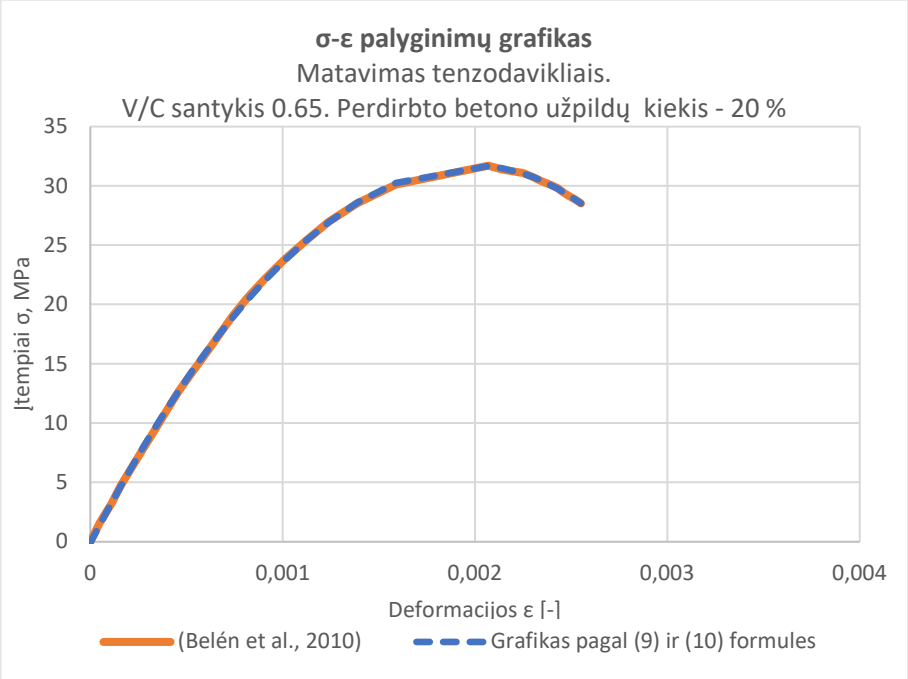
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-7775709.33 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 31467.40 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) - 0.13\right]\text{MPa} \quad (9)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left[\left(-10292247.07 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{\ 2} + 41025.22 \cdot \varepsilon_{c.c2}\right) - 9.17\right]\text{MPa} \quad (10)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0$ $\varepsilon_{c1} := 0.00207$ $\varepsilon_{cu} := 0.00255$



A.2. 4 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 2 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0,00046	0,00046	0,00000
60%	0,00074	0,00074	0,00000
80%	0,00112	0,00110	0,00002
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
95%	0,00239	0,00239	0,00000

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 9.08 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.059 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001545$

$k_c = 0.394$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-7775709.33 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 31467.40 \cdot y_{c.c}\right) - 0.13\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 29.923 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{yun} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 31.71MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left(-7775709.33 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 31467.40 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.003592864388543595 6751 \\ 0.000454020424729124 74434 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.000454020424729124 74434$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 27.937 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.944$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.06\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 10.685 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.672 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 189.672 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.028$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.028 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.843 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 50.446 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 31.538 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 7.159 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.756 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16800831539085857303 \\ 0.12196196767944686745 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.168 \\ 0.122 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.122 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.518 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 189.672 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.961 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas ivertinantis apkrovimo trukme:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cul} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul}$$

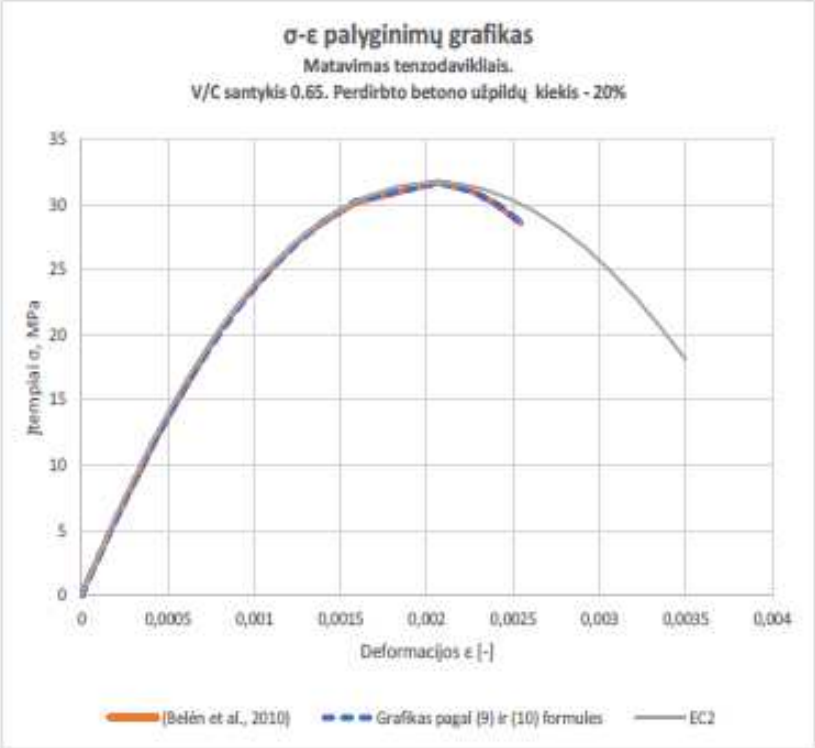
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 31.102 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.105$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 5 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{s.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{s.c} = 1.625 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{s.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{s.c} = 0.083 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{s.c}}{A_{s.c}} \qquad y_c = 0.0019538$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$

$\sigma_{c.yc}(y_c) = 31.654 \cdot MPa$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.998$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

Gautos reikšmės:

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$x_\xi = 0.247\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.057\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 189.04 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 11.317 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.04 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.04\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 189.672 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.04 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 6.431 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.17 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15791579446190134729 \\ 0.1165544661145656347 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.158 \\ 0.117 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.117 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.897 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{y.EC2} := M_{R.EC2} = 189.04 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.961 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{y.EC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.00255$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 9.08 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.059 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001545$

$k_c = 0.394$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-7775709.33 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 31467.40 \cdot y_{c.c}\right) - 0.13\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 29.923 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 31.71 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.491 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 26.466 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.944$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.06\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 10.685 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.672 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.672 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 189.672 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.04 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.672 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 36.368 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 189.672 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.665 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.557 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.076 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.17336548858682039113 \\ 0.12476058875381967721 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.12476058875381967721 \cdot m$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.849 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

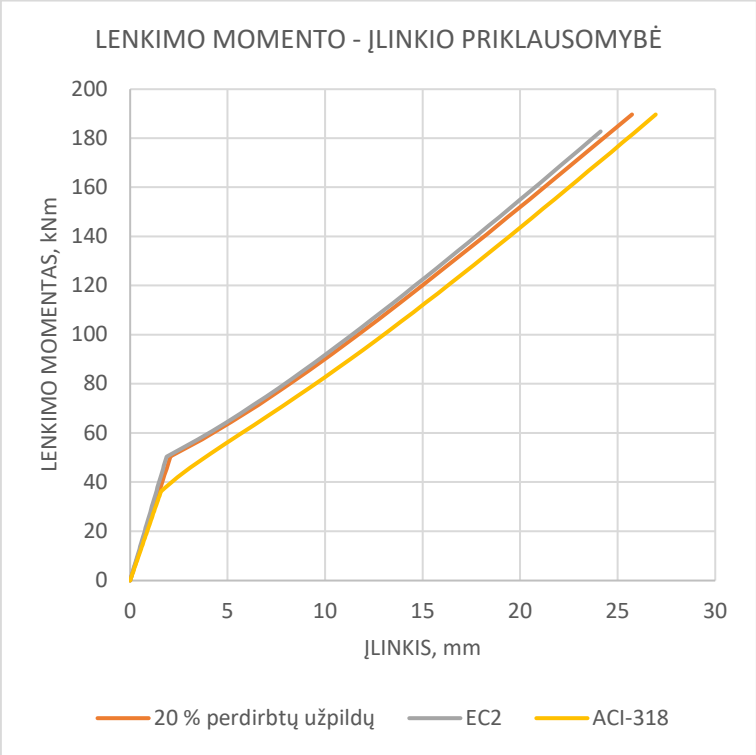
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 6 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

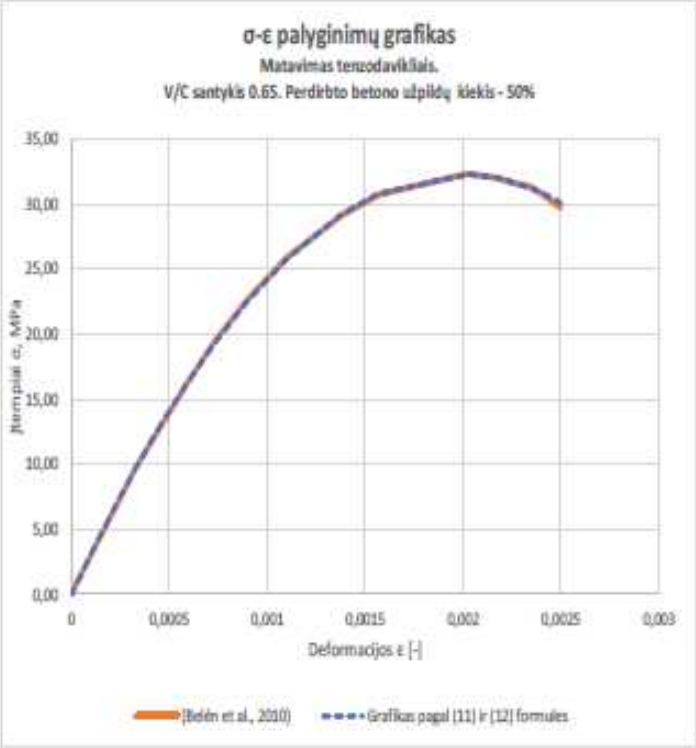
(Belén et al., 2010). Matavimas tenzodavikliais.
Vandens/cemento santykis 0.65. Perdirbto betono užpildų kiekis 50%

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left(-8168210.46 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 32571.36 \cdot \varepsilon_{c.c1} - 0.17\right)\text{MPa} \quad (11)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left[\left(-12070102.96 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{\ 2} + 49256.10 \cdot \varepsilon_{c.c2}\right) - 17.92\right]\text{MPa} \quad (12)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.00202 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.0025$



A.2. 7 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 3 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0,00046	0,00045	0,00001
60%	0,00073	0,00074	0,00001
80%	0,00110	0,00111	0,00001
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
95%	0,00241	0,00242	0,00001

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 8.928 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.059 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001519$

$k_c = 0.393$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left(\left(-8168210.46 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 32571.36 \cdot y_{c.c} - 0.17\right)\right) MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 30.455 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 32.35MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left(\left(-8168210.46 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 32571.36 \cdot \varepsilon_{c1.1} - 0.17\right)\right) \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.003533329448802232 1092 \\ 0.000454246552024759 31484 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.000454246552024759 31484$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 28.487 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.941$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.059\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 10.452 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.905 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 189.905 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.06$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.06 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.894 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 50.984 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 31.875 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 7.021 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.645 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16612355174031644857 \\ 0.12096568740301735076 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.166 \\ 0.121 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.121 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.402 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 189.905 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.946 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$

$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cu1} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

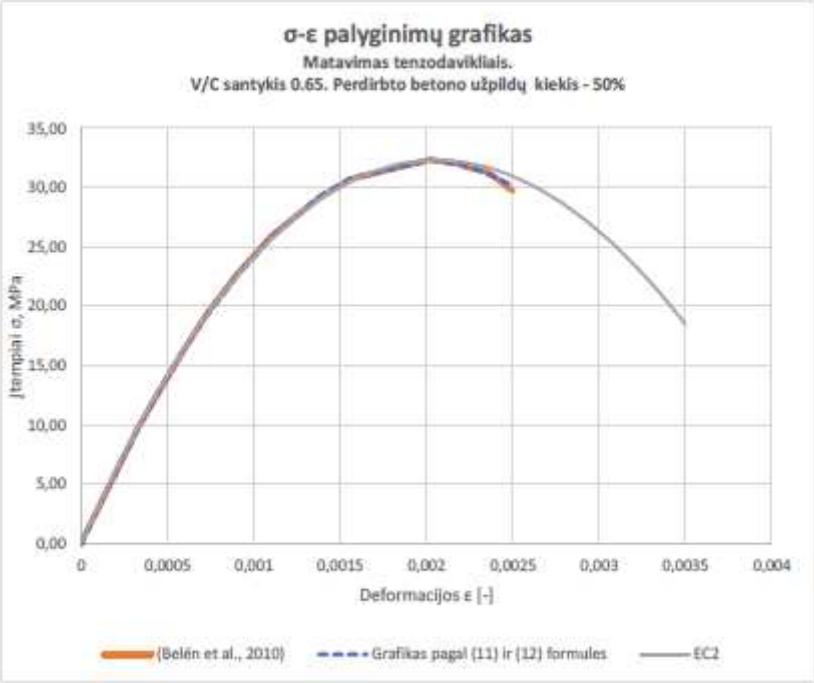
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 31.289 \cdot GPa$$

Itempiu-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.089$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 8 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 1.659 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{\varepsilon.c} = 0.085 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00195766$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 32.281 \cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.998$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\varepsilon_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \varepsilon_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\varepsilon_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.056\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 189.288 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 11.069 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.288 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.288\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 189.905 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.288 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{crfl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{crfl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 6.392 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.139 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15737219029264855989 \\ 0.11625806404875008279 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.157 \\ 0.116 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.116 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.864 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{REC2} = 189.288 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{crfl}}{20} = 6.946 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{crfl}, M_{crfl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{crfl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.0025$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 8.928 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.059 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001519$

$k_c = 0.393$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left(\left(-8168210.46 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 32571.36 \cdot y_{c.c} - 0.17\right)\right)\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 30.455 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$$f_c := f_{cm} = 32.35 \cdot \text{MPa}$$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.526 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 26.732 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.941$

$$d := h - d_1$$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.059\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 10.452 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.904 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.904 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 189.905 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.288 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.904 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_1 = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 36.733 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0 .. M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 189.904 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.659 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI} .. M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.482 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.015 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.172361510039567795 \\ 0.12423980232051035016 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.12423980232051035016 \cdot m$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.787 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

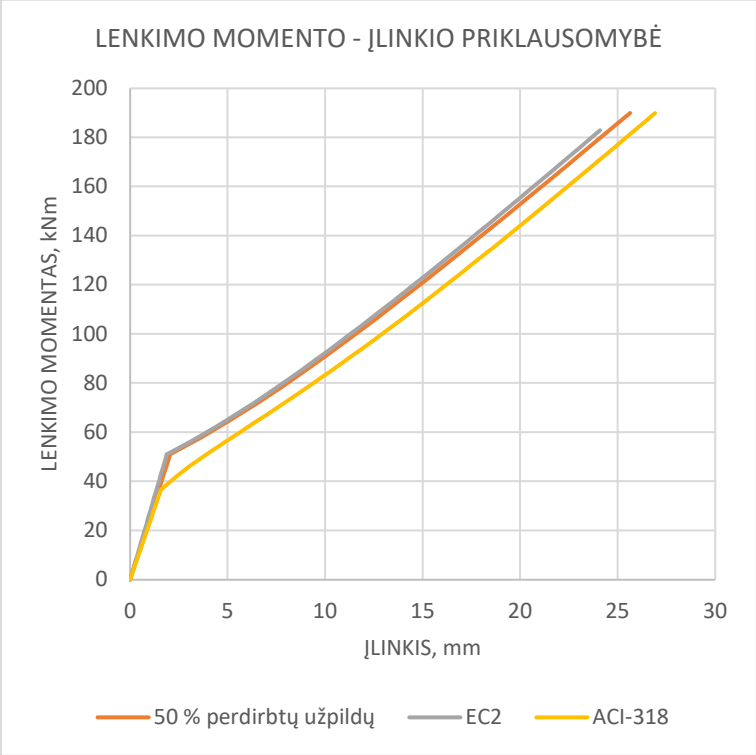
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 9 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

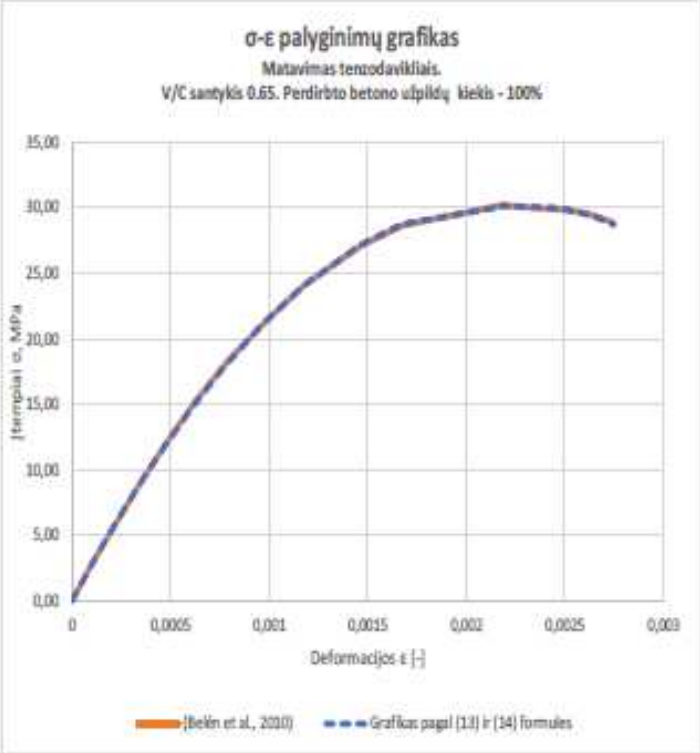
(Belén et al., 2010). Matavimas tenzodavikliais.
Vandens/cemento santykis 0.65. Perdirbto betono užpildų kiekis 100%

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-6621892.27 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 28227.47 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) - 0.01\right]\text{MPa} \quad (13)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left[\left(-6836735.64 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{\ 2} + 31259.80 \cdot \varepsilon_{c.c2}\right) - 5.53\right]\text{MPa} \quad (14)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.00218 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.00275$



A.2. 10 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 4 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0,00048	0,00048	0,00000
60%	0,00078	0,00079	0,00001
80%	0,00118	0,00118	0,00000

Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
95%	0,00275	0,00277	0,00002

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.019 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.061 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001666$

$k_c = 0.394$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6621892.27 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 28227.47 \cdot y_{c.c}\right) - 0.01\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 28.637 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{yn} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 30.13MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-6621892.27 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 28227.47 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) - 0.01\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.003780988576656084738 7 \\ 0.000481761230960462306 06 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00048176123096046230606$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 25.017 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.95$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.063\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 11.163 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.194 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 189.194 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 2.946$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 2.946 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.712 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 49.082 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 30.686 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 7.995 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.428 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.12772901341170634625 \\ -0.17915098881060600449 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.128 \\ -0.179 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.128 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 8.207 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 189.194 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 7.006 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cu1} := 0.0035 \quad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

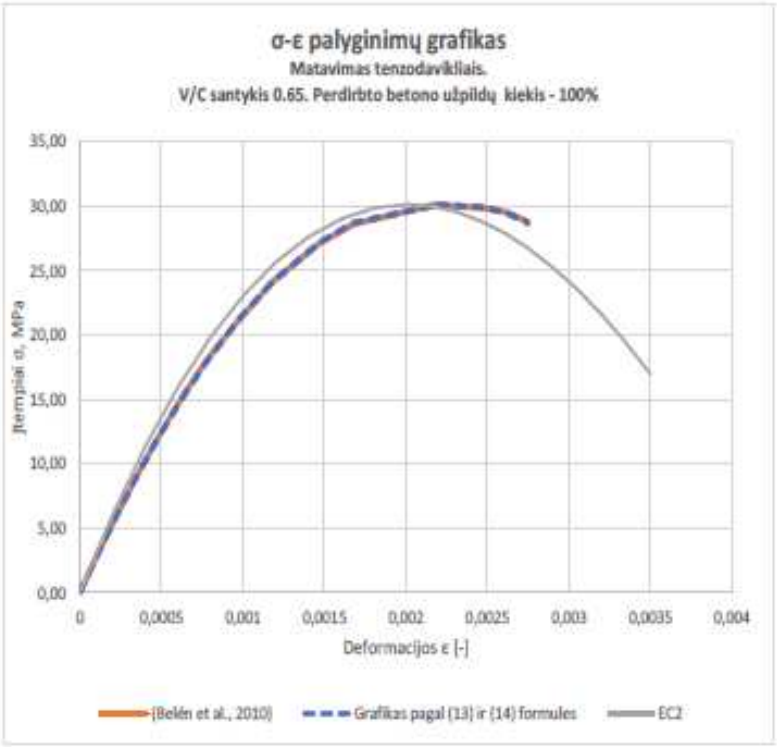
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 30.628 \cdot GPa$$

Itempiu-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.147$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 11 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{r.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{r.c} = 1.542 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{r.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{r.c} = 0.079 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{r.c}}{A_{r.c}} \qquad y_c = 0.00194403$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 30.1 \cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.999$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

Gautos reikšmės:

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$x_\xi = 0.247\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.06\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 188.381 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 11.976 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -188.381 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 188.381\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 189.194 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 188.381 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 6.53 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.25 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15931577101979395517 \\ 0.11731535317069554886 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.159 \\ 0.117 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.117 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralia ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.983 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{REC2} = 188.381 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 7.006 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.00275$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.019 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.061 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001666$

$k_c = 0.394$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6621892.27 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 28227.47 \cdot y_{c.c}\right) - 0.01\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 28.636 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 30.13 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_t := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.403 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 25.799 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.95$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.063\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 11.165 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.192 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.192 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 189.194 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 188.381 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.192 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_1 = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 35.45 \cdot kN \cdot m$$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$$M_y := M_{R.ACI} = 189.192 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.687 \cdot kN \cdot m$$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.752 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.233 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.1261003580303746982 \\ -0.17596338138523710008 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.1261003580303746982 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 8.01 \times 10^{-4}\, m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

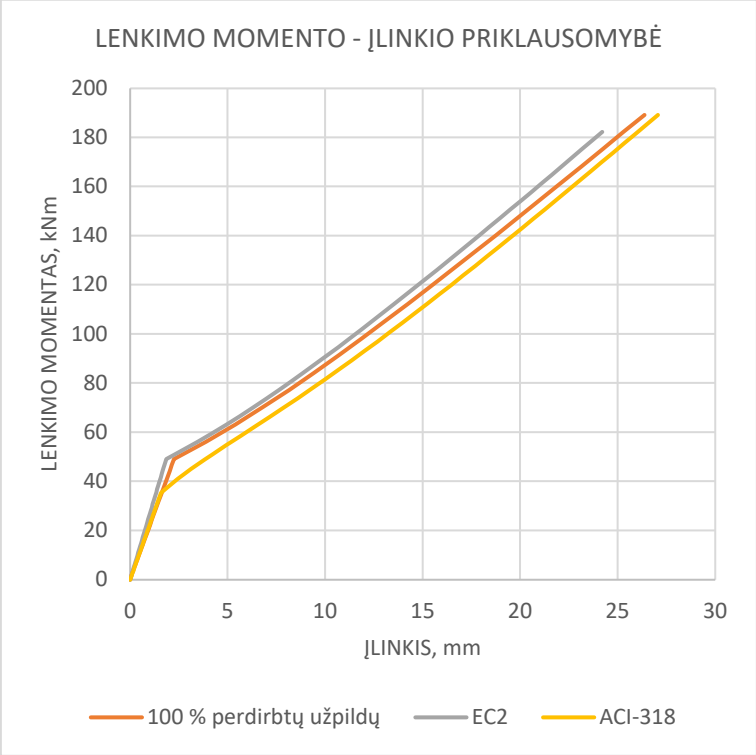
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

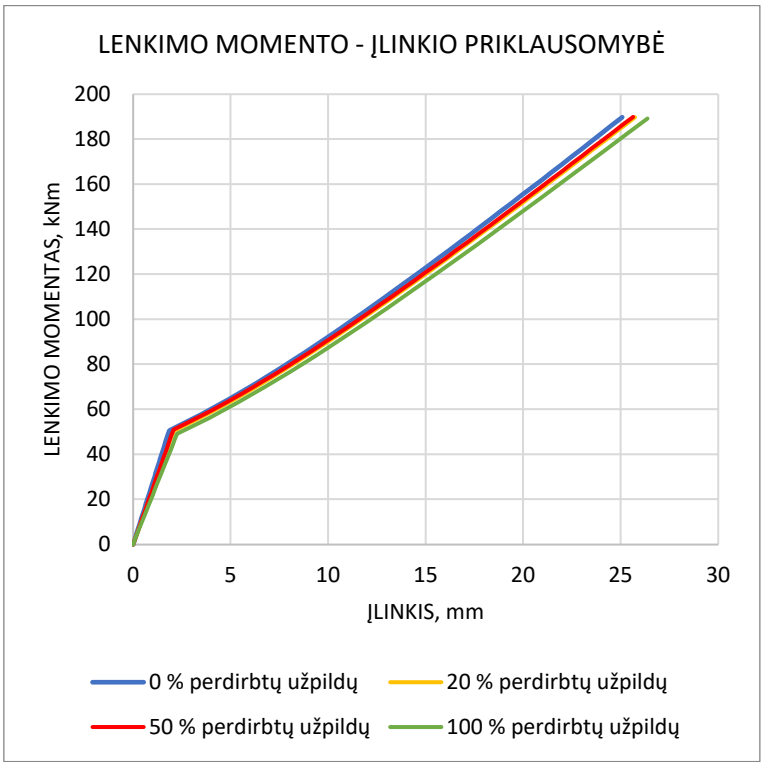
$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$

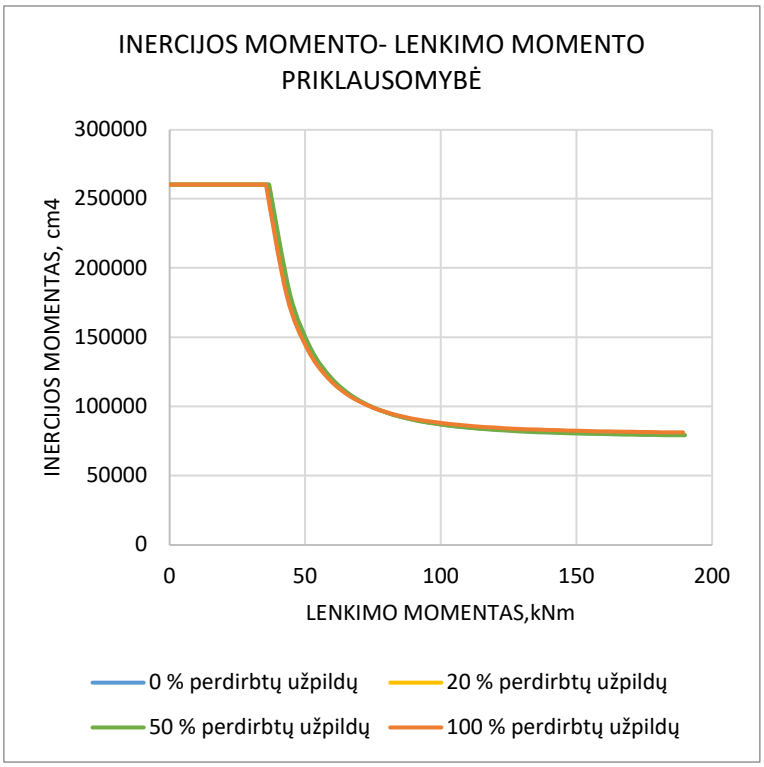


A.2. 12 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

Bendri rezultatai:



A.2. 13 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio



A.2. 14 pav. Inercijos momento – lenkimo momento priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio

(Belén et al., 2010). Matavimas poslinkio jutikliais.
Vandens/cemento santykis 0.65. Perdirbto betono užpildų kiekis 0%

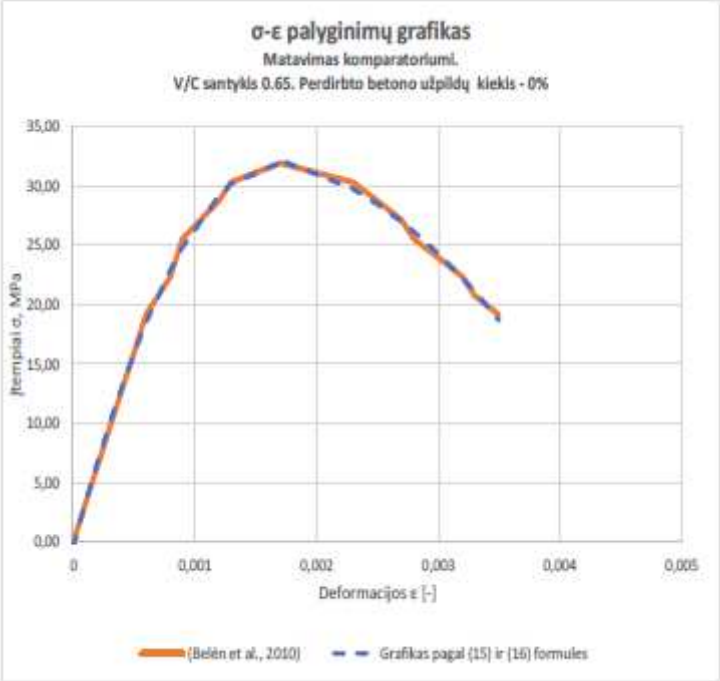
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-11315625.25 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 38280.79 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) - 0.46178\right]\text{MPa} \quad (15)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(-2856672.221 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{\ 2} + 7367.179617 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 27.904\right)\text{MPa} \quad (16)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.0017 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.0035$



A.2. 15 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 5 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00040	0.00039	0.00001
60%	0.00060	0.00063	0.00003
80%	0.00090	0.00095	0.00005
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
60%	0.00350	0.00252	0.00098
80%	0.00280	0.00232	0.00048

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} \left(\sigma_{c.c1}\left(\varepsilon_{c.c1}\right)\right) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} \left(\sigma_{c.c2}\left(\varepsilon_{c.c2}\right)\right) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} \left(\left(\sigma_{c.c1}\left(\varepsilon_{c.c1}\right)\right)\right) d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} \left(\sigma_{c.c2}\left(\varepsilon_{c.c2}\right)\right) d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.61 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.085 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001904$

$k_c = 0.456$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}\left(y_{c.c}\right) := \left[\left(-11315625.25 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 38280.79 \cdot y_{c.c}\right) - 0.46178\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}\left(y_{c.c}\right) = 31.403 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 31.92MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-11315625.25 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 38280.79 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) - 0.46178\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.002992276617308592 9852 \\ 0.000390726014384251 38503 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.0003907260143842513 8503$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 32.678 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.984$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.057\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 11.774 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -188.583 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 188.583 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.038$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.038 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.86 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 50.623 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 31.649 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.12 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.921 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15349450232427352642 \\ 0.11412812192766474352 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.153 \\ 0.114 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.114 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.626 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 188.583 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.898 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$

$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad \varepsilon_{cu1} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1}$$

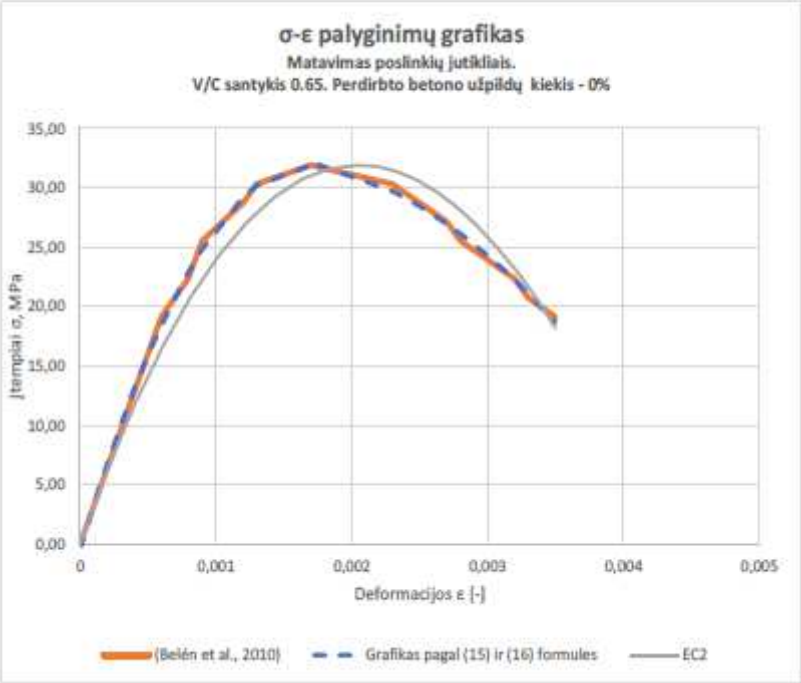
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 31.163 \cdot GPa$$

Itempiu-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.1$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 15 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{c.c} = 1.637 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{c.c} = 0.084 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}} \qquad y_c = 0.00195507$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 31.86 \cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.998$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.057\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 189.123 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 11.234 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.123 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.123\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 188.583 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.123 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Įlinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos įlinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 6.418 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.16 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15773599384562856724 \\ 0.11645648837637240458 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.158 \\ 0.116 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.116 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.886 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{RIEC2} = 189.123 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.898 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{I\,EC2}(M_{II\,EC2}) := \frac{M_{II\,EC2}}{E_{cm\,EC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{I\,EC2}(M_{II\,EC2}) := \rho_{I\,EC2}(M_{II\,EC2}) \qquad \alpha_{II\,EC2}(M_{II\,EC2}) := \rho_{II\,EC2}(M_{II\,EC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{II\,EC2}) := \zeta_{II\,EC2}(M_{II\,EC2}) \cdot \alpha_{II\,EC2}(M_{II\,EC2}) + (1 - \zeta_{II\,EC2}(M_{II\,EC2})) \cdot \alpha_{I\,EC2}(M_{II\,EC2})$$

Iinkis:

$$w_{II\,EC2}(M_{II\,EC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{II\,EC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.258 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.074 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001708$

$k_c = 0.431$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-11315625.25 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 38280.79 \cdot y_{c.c}\right) - 0.46178\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 31.911 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$$f_c := f_{cm} = 31.92 \cdot \text{MPa}$$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.503 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 26.554 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 1$

$$d := h - d_1$$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.056\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 10.941 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.416 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.416 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 188.583 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.123 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.416 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 36.488 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 189.416 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.646 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.532 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.056 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.17303312092049695757 \\ 0.12458836946301183839 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.12458836946301183839 \cdot m$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.828 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

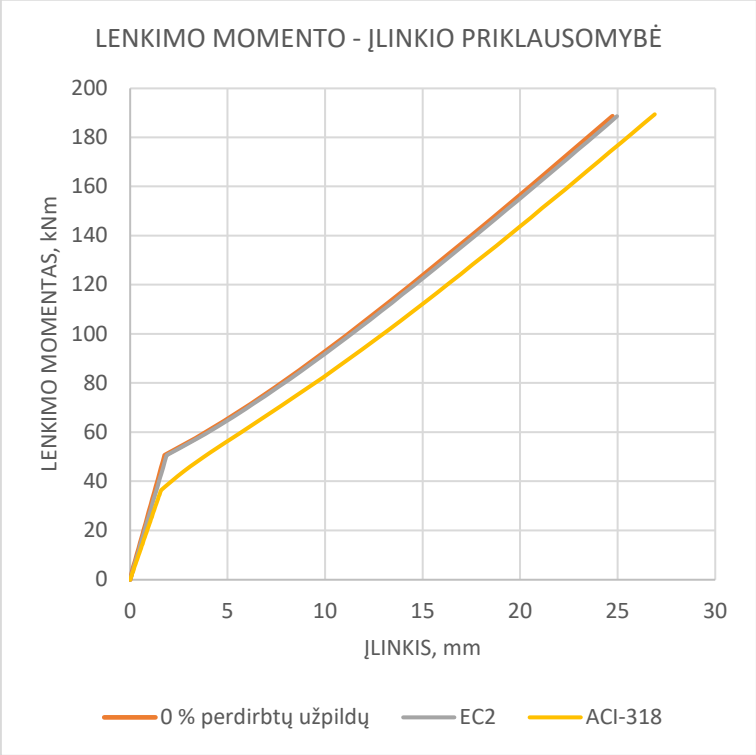
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 16 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė

(Belén et al., 2010). Matavimas poslinkio jutikliais.
Vandens/cemento santykis 0.65. Perdirbto betono užpildų kiekis 20%

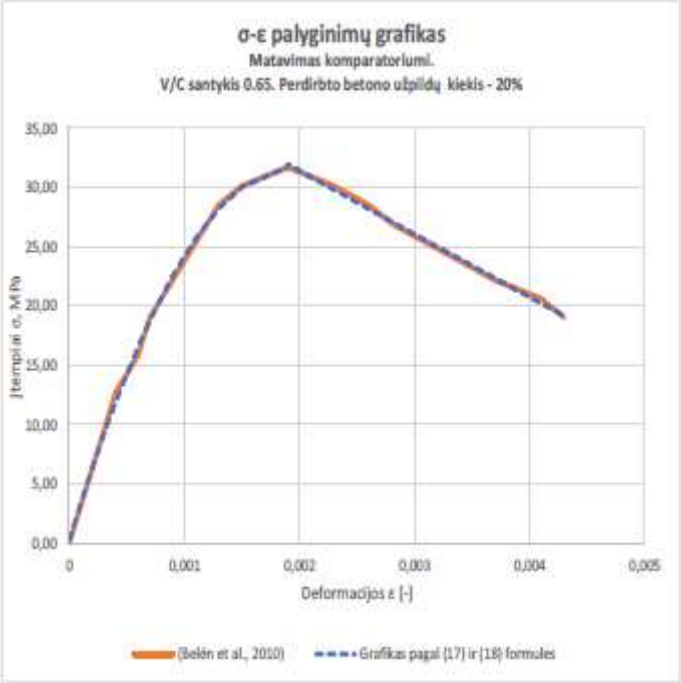
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-8217979.162 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 32189.44 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) + 0.24306\right]\text{MPa} \quad (17)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(34211 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{\ 2} - 5538.6 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 42.364\right)\text{MPa} \quad (18)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.0019 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.0043$



A.2. 17 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 6 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00040	0.00044	0.00004
60%	0.00070	0.00072	0.00002
80%	0.00110	0.00109	0.00001

Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
60%	0.00430	0.00430	0.00000
80%	0.00310	0.00309	0.00001

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 2.311 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.101 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002287$

$k_c = 0.468$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8217979.162 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 32189.44 \cdot y_{c.c}\right) + 0.24306\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 30.878 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 31.71MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-8217979.162 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 32189.44 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) + 0.24306\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.00043474365795507485228 \\ 0.0034822095692865106016 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00043474365795507485228$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 29.176 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(\gamma_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.974$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.058\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 12.294 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -188.063 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 188.063 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.028$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.028 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.843 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 50.446 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 31.538 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.855 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.511 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16384356401491596766 \\ 0.11975224884671916305 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.164 \\ 0.12 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.12 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.261 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 188.063 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.881 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cu1} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

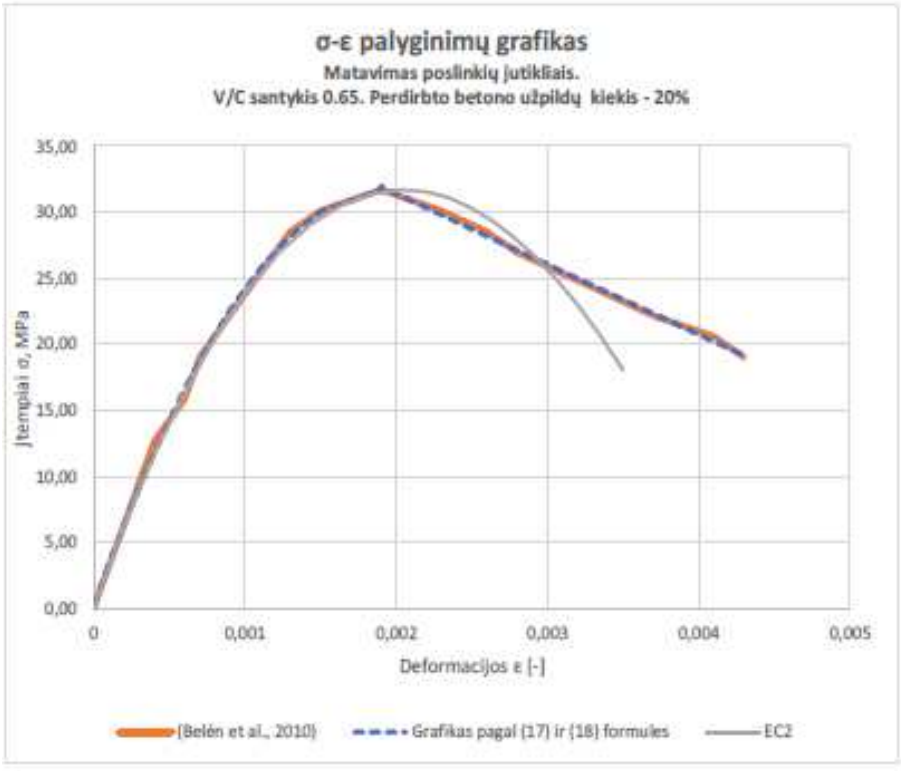
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 31.102 \cdot GPa$$

Itempiu-deformaciu kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.105$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 18 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{s.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{s.c} = 1.625 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$

Figūros plotas:

$$A_{s.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{s.c} = 0.083 \cdot \text{MPa}$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{s.c}}{A_{s.c}} \qquad y_c = 0.0019538$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 31.654 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.998$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.057\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 189.04 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 11.317 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.04 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.04\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 188.063 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.04 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 6.431 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.17 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15791579446190134729 \\ 0.1165544661145656347 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.158 \\ 0.117 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.117 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s - A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.897 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{RIEC2} = 189.04 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.881 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1} \, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2} \, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}))) \, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.249 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.072 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001742$

$k_c = 0.419$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempiu esančiu itempiu deformaciu grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8217979.162 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 32189.44 \cdot y_{c.c}\right) + 0.24306\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 31.378 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 31.71 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.491 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 26.466 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.99$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.057\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 10.84 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.517 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.517 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 188.063 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.04 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.517 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 36.368 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 189.517 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.657 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.557 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.076 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.17336548858682039113 \\ 0.12476058875381967721 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.12476058875381967721 \cdot m$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.849 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Ilinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

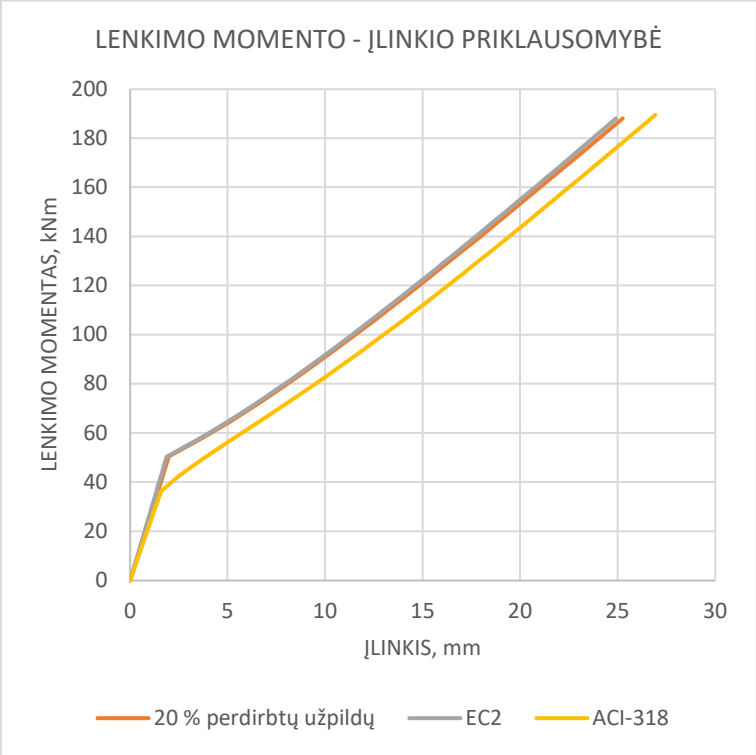
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Ilinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 19 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

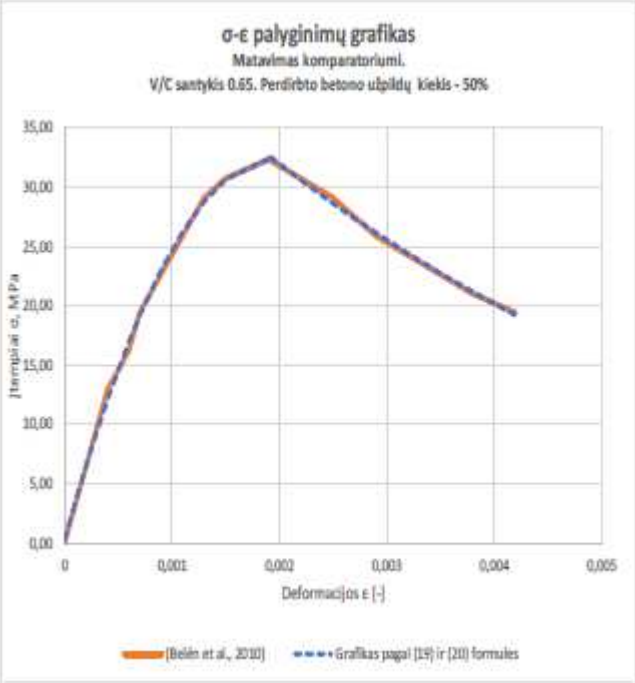
(Belén et al., 2010). Matavimas poslinkio jutikliais.
Vandens/cemento santykis 0.65. Perdirbto betono užpildų kiekis 50%

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-8383817.725 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{2} + 32839.47 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) + 0.2479\right]\text{MPa} \quad (19)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(513111 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{2} - 8969.3 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 47.842\right)\text{MPa} \quad (20)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.0019 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.0042$



A.2. 20 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 7 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00040	0.00044	0.00004
60%	0.00070	0.00072	0.00002
80%	0.00110	0.00109	0.00001
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
60%	0.00420	0.00420	0.00000
80%	0.00290	0.00290	0.00000

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 2.211 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.099 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002229$

$k_c = 0.469$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8383817.725 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 32839.47 \cdot y_{c.c}\right) + 0.2479\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 31.794 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 2.211 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.099 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002229$

$k_c = 0.469$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8383817.725 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 32839.47 \cdot y_{c.c}\right) + 0.2479\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 31.794 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 32.35MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-8383817.725 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 32839.47 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) + 0.2479\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.00043474003398798196475 \\ 0.0034822666421083784198 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00043474003398798196475$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 29.765 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.983$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.057\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 11.97 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -188.386 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 188.386 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.06$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.06 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.894 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 50.984 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 31.875 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.719 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.402 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{III})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{III}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16196342662696429402 \\ 0.11874475740577882503 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.162 \\ 0.119 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.119 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.146 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 188.386 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.87 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$

$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cul} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul}$$

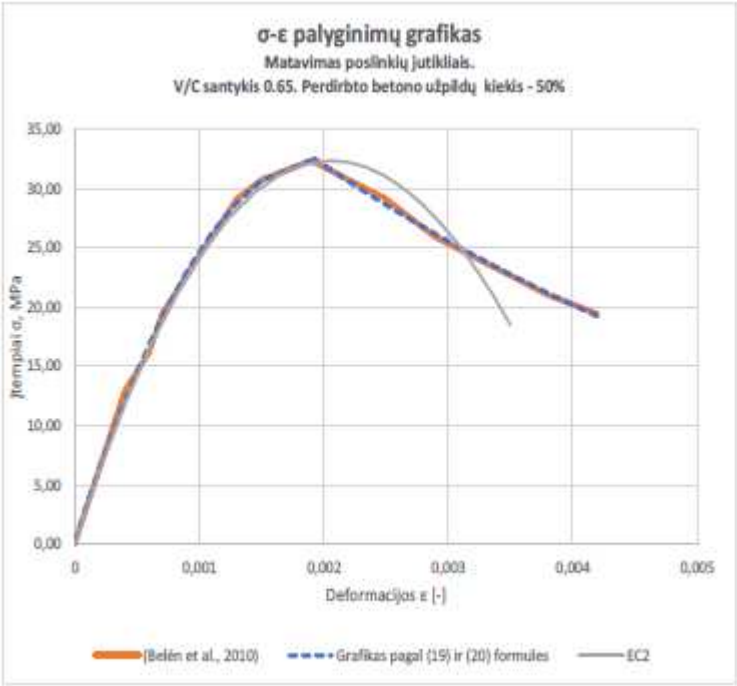
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 31.289 \cdot GPa$$

Itempiu-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.089$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 21 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{r.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{r.c} = 1.659 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{r.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{r.c} = 0.085 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{r.c}}{A_{r.c}} \qquad y_c = 0.00195766$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 32.281 \cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.998$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.056\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{REC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{REC2} = 189.288 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 11.069 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.288 \cdot kN \cdot m$

$M_{REC2} = 189.288\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 188.386 \cdot kN \cdot m$

$M_{REC2} = 189.288 \cdot kN \cdot m$

- ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Įlinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos įlinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 6.392 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.139 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15737219029264855989 \\ 0.11625806404875008279 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.157 \\ 0.116 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.116 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{II.EC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.864 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{y.EC2} := M_{R.EC2} = 189.288 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II.EC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.87 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.EC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II.EC2} .. M_{y.EC2}$

$\rho_{II.EC2}(M_{II.EC2}) := \frac{M_{II.EC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{II.EC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{II.EC2}(M_{II.EC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II.EC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.257 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.073 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001734$

$k_c = 0.422$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8383817.725 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 32839.47 \cdot y_{c.c}\right) + 0.2479\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 31.983 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$$f_c := f_{cm} = 32.35 \cdot \text{MPa}$$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.526 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 26.732 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.989$

$$d := h - d_1$$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.056\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 10.7 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.656 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.656 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 188.386 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 189.288 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.656 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^{5} \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 36.733 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 189.656 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.646 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.482 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.015 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.172361510039567795 \\ 0.12423980232051035016 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.12423980232051035016 \cdot m$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.787 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Ilinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

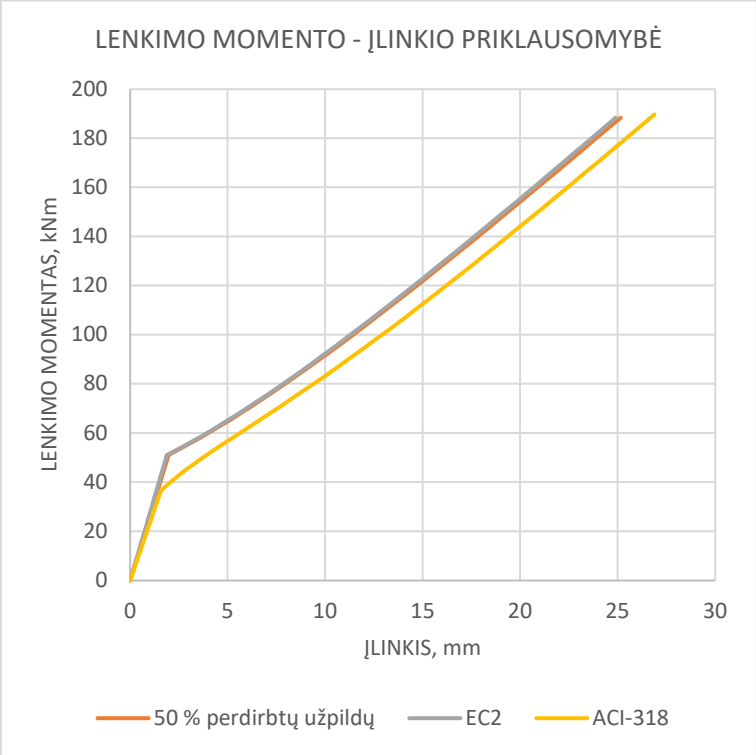
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Ilinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 22 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Belén et al., 2010). Matavimas poslinkio jutikliais.
Vandens/cemento santykis 0.65. Perdirbto betono užpildų kiekis 100%

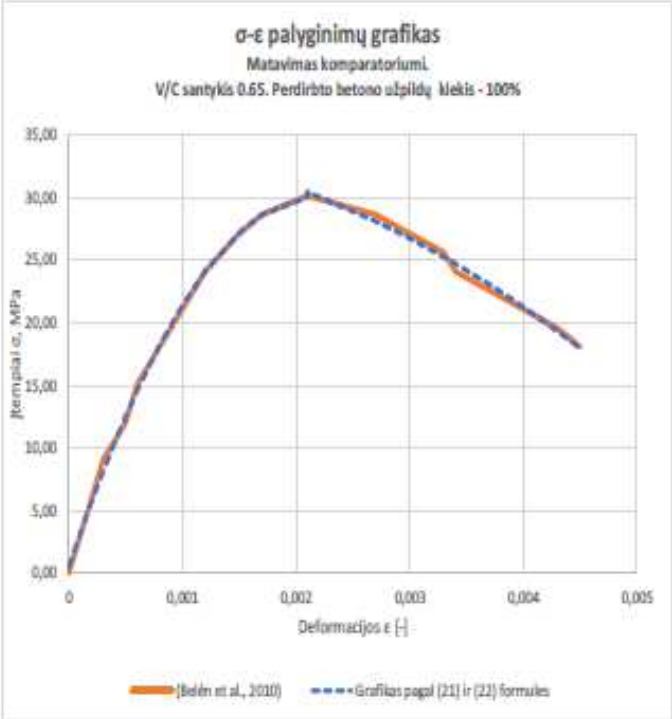
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-6220328.141 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 27091.32 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) + 0.554\right]\text{MPa} \quad (21)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(-726934 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{\ 2} - 405.24 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 34.51\right)\text{MPa} \quad (22)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.0021 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.0045$



A.2. 23 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 8 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00050	0.00048	0.00002
60%	0.00080	0.00080	0.00000
80%	0.00120	0.00122	0.00002
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
60%	0.00450	0.00450	0.00000
80%	0.00340	0.00347	0.00007

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 2.459 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.101 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002423$

$k_c = 0.462$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6220328.141 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 27091.32 \cdot y_{c.c}\right) + 0.554\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 29.677 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 30.13MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-6220328.141 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 27091.32 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) + 0.554\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.00047656263397453942337 \\ 0.003878725284267789122 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00047656263397453942337$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 25.289 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.985$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.061\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 12.611 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -187.746 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 187.746 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 2.946$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 2.946 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.712 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 49.082 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 30.686 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 7.908 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.358 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.12715321837716801132 \\ -0.1780203086812542618 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.127 \\ -0.178 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.127 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 8.137 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 187.746 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.933 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cu1} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

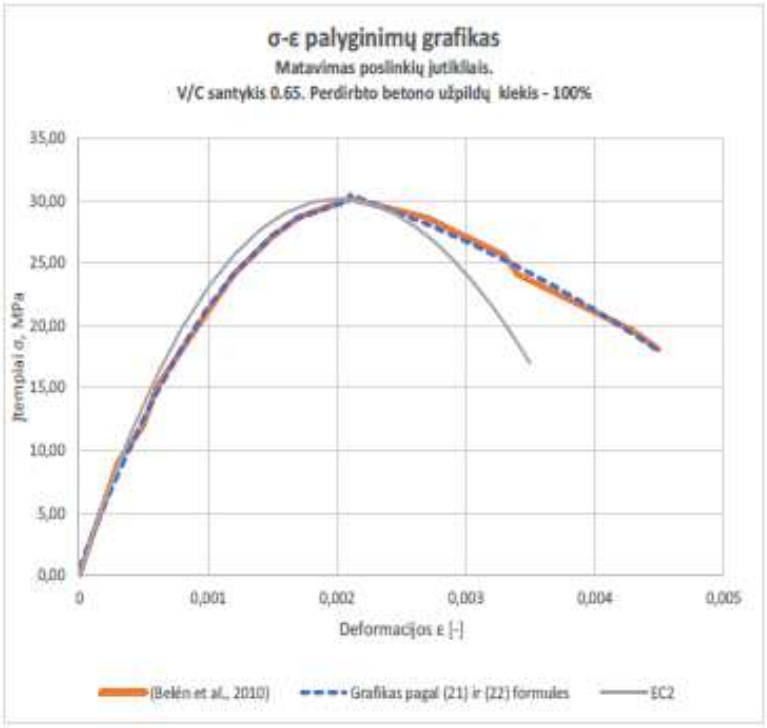
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 30.628 \cdot GPa$$

Itempiu-deformaciju kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.147$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 24 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 1.542 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{\varepsilon.c} = 0.079 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00194403$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 30.1 \cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.999$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.06\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 188.381 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 11.976 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -188.381 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 188.381\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 187.746 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 188.381 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Įlinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos įlinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 6.53 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{sl} = 5.25 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{sl}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15931577101979395517 \\ 0.11731535317069554886 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.159 \\ 0.117 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.117 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s - A_{sl}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.983 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{REC2} = 188.381 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.933 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.203 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.068 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001781$

$k_c = 0.406$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6220328.141 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 27091.32 \cdot y_{c.c}\right) + 0.554\right] MPa$ $\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 29.071 \cdot MPa$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 30.13 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 3.403 \cdot MPa$

Tamprumo modulis:

$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 25.799 \cdot GPa$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.965$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$

$x = 0.062\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 11.337 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -189.02 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.02 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 187.746 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 188.381 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 189.02 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 35.45 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 189.02 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.678 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.752 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.233 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.1261003580303746982 \\ -0.17596338138523710008 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.1261003580303746982 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 8.01 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Ilinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

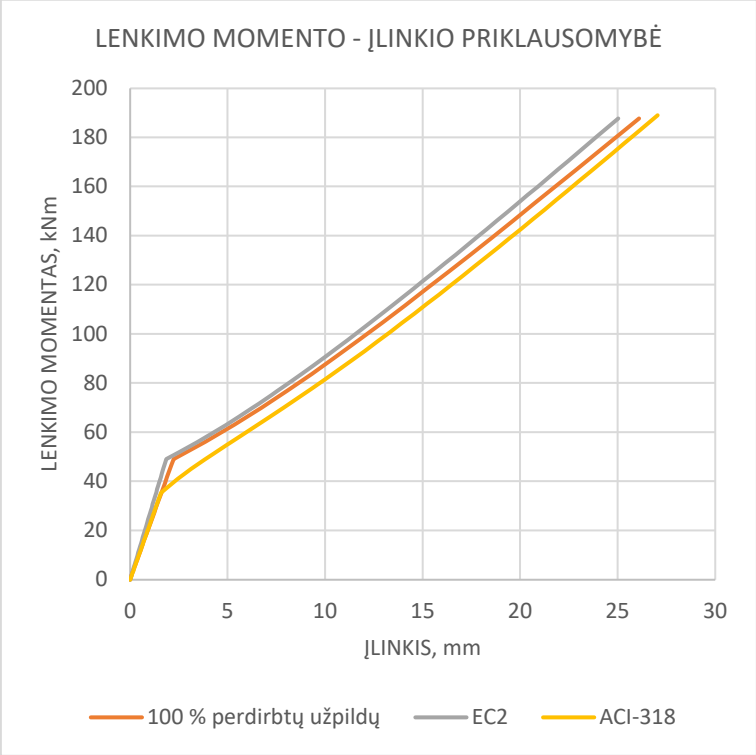
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

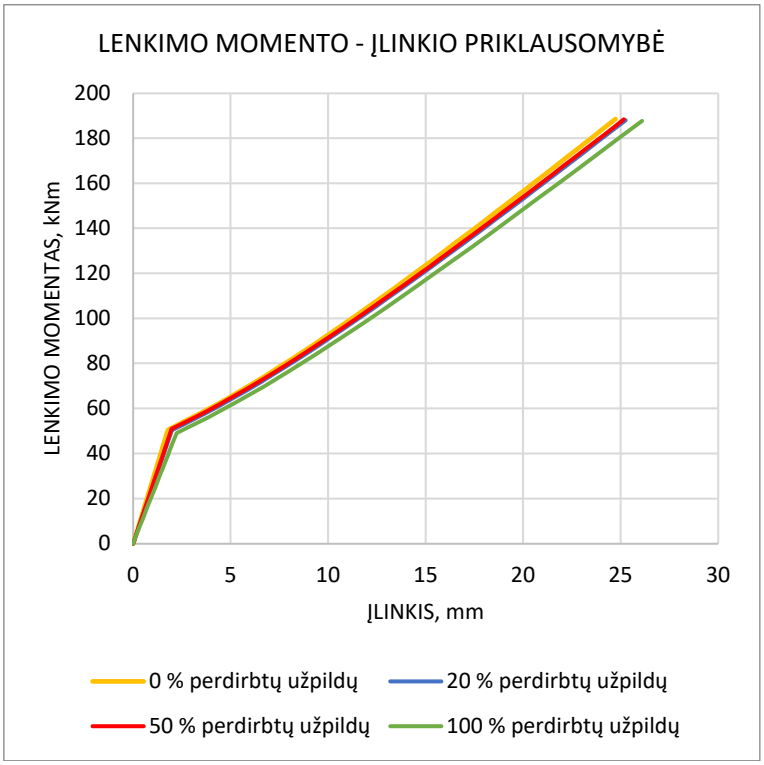
Ilinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

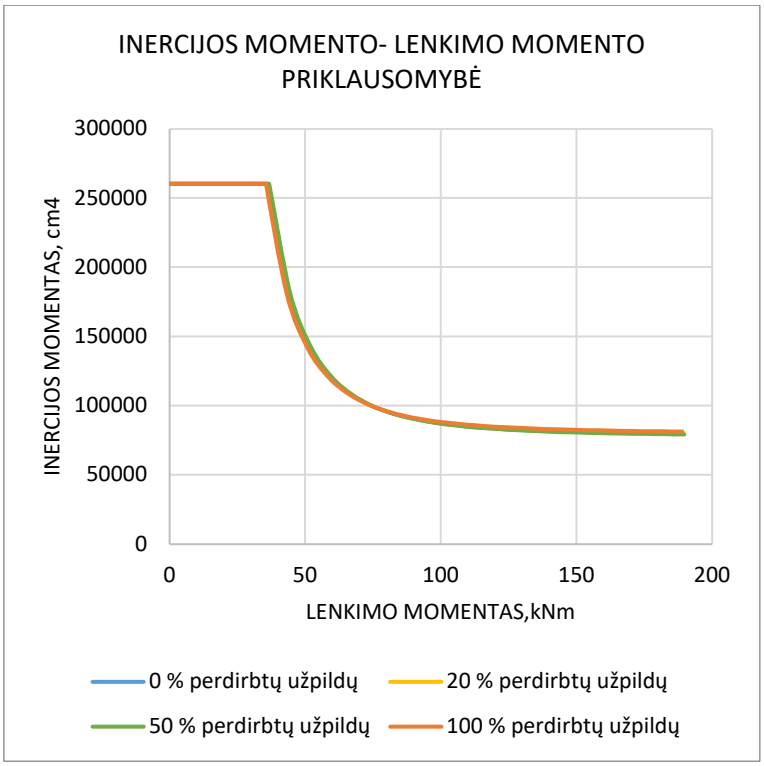
$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 25 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI



A.2. 26 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio



A.2. 27 pav. Inercijos momento – lenkimo momento priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio

(Belén et al., 2010). Matavimas tenzodavikliais.
Vandens/cemento santykis 0.5. Perdirbto betono užpildų kiekis 0%

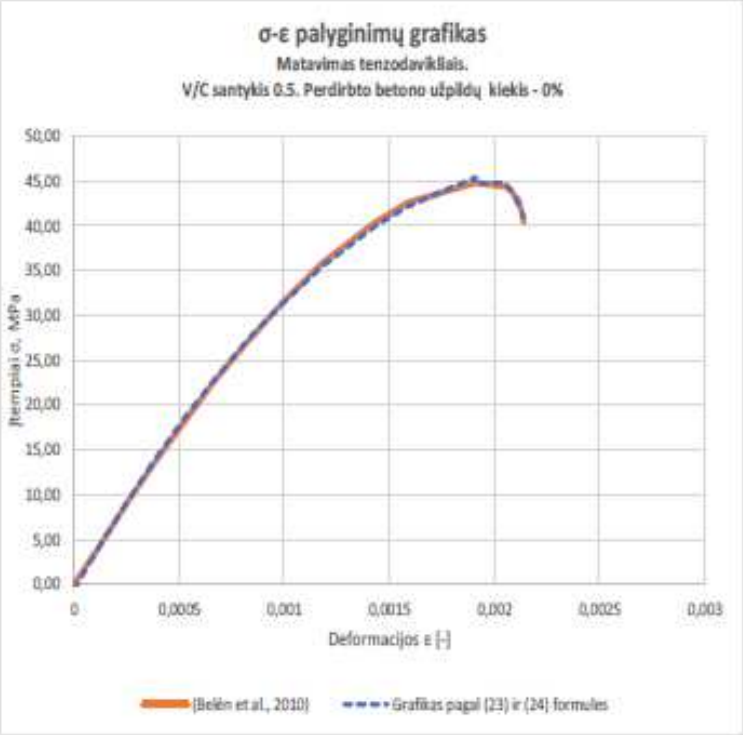
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-8888554.59 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{2} + 41053.99 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) - 0.61\right]\text{MPa} \quad (23)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(-185590904.80 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{2} + 735046.36 \cdot \varepsilon_{c.c2} - 682.10\right)\text{MPa} \quad (24)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.00191 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.00214$



A.2. 28 pav. σ – ε grafikų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00520	0.00514	0.00006
60%	0.00820	0.00825	0.00005
80%	0.01180	0.01227	0.00047
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
95%	0.02120	0.02098	0.00022

A.2. 29 pav. Deformacijų palyginimas

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 8.538 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.063 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001349$

$k_c = 0.37$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8888554.59 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 41053.99 \cdot y_{c.c}\right) - 0.61\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 38.589 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 44.81MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-8888554.59 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 41053.99 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) - 0.61\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.00050713798909686455023 \\ 0.004111609590648831763 3 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00050713798909686455023$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 35.343 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{cc})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.861$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.047\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 7.771 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.586 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 192.586 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.607$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.607 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.769 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 60.093 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 37.57 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.659 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.55 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.14675950621117208539 \\ 0.11036236778368901546 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.147 \\ 0.11 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.11 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.215 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 192.586 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.625 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \quad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \quad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cul} := 0.0035 \; d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1}$$

Tamprumo modulis:

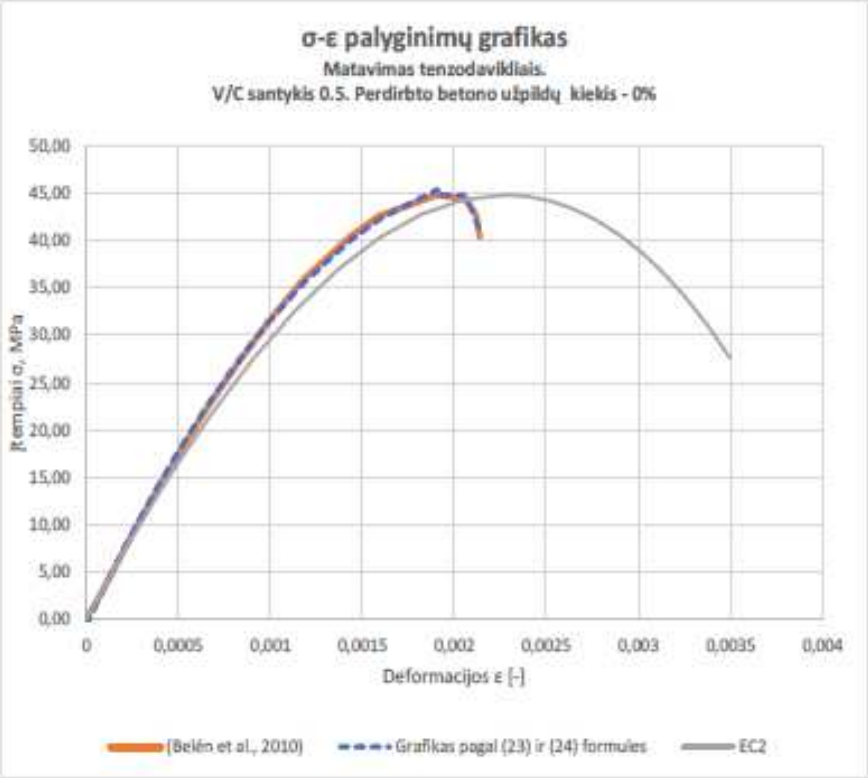
$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 34.501 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.839$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$

$$\sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$



A.2. 30 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{e.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{e.c} = 2.319 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{e.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{e.c} = 0.115 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{e.c}}{A_{e.c}} \qquad y_c = 0.00202434$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 44.174 \cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.986$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.041\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = -5.821 \times 10^{-14} \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 192.618 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 7.739 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.618 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 192.618\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 192.586 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 192.618 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 5.797 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.661 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.14879514262790636157 \\ 0.11150956570035523332 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.149 \\ 0.112 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.112 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{II.EC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.339 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{y.EC2} := M_{R.EC2} = 192.618 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II.EC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.625 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.EC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II.EC2} .. M_{y.EC2}$

$\rho_{II.EC2}(M_{II.EC2}) := \frac{M_{II.EC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{II.EC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{II.EC2}(M_{II.EC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II.EC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$\varepsilon_{cu} := 0.00214 \qquad \varepsilon_{cu} < 0.003$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1} \, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2} \, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}))) \, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 8.937 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.065 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001372$

$k_c = 0.359$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8888554.59 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 41053.99 \cdot y_{c.c}\right) - 0.61\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 38.988 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 44.81 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 4.15 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 31.462 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_c}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.87$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.046\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 7.462 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.895 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 192.895 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 192.586 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 192.618 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 192.895 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 43.232 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 192.895 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.483 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.357 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.111 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15687282532938791797 \\ 0.11598531173653414764 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.11598531173653414764 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.833 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

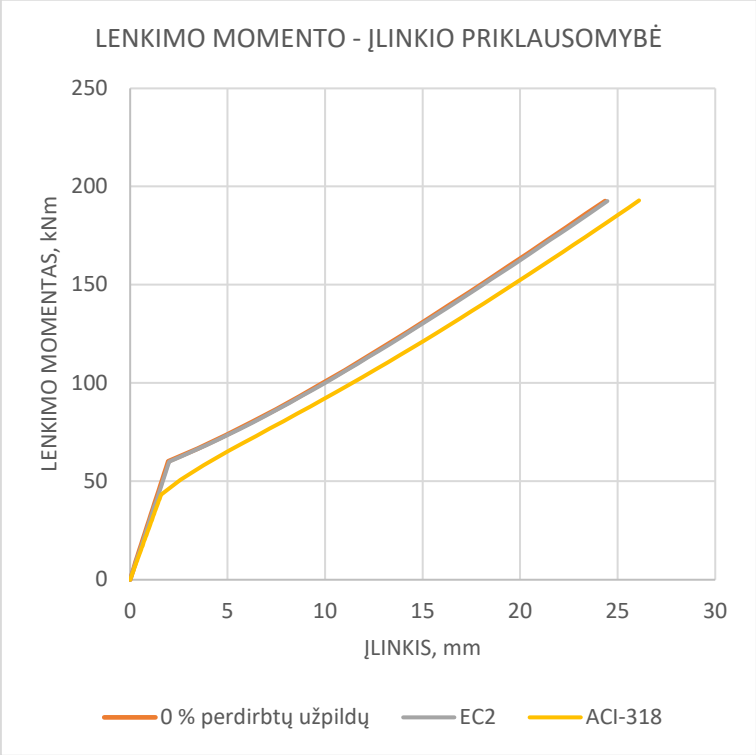
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 31 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Belén et al., 2010). Matavimas tenzodavikliais.
Vandens/cemento santykis 0.5. Perdirbto betono užpildų kiekis 20%

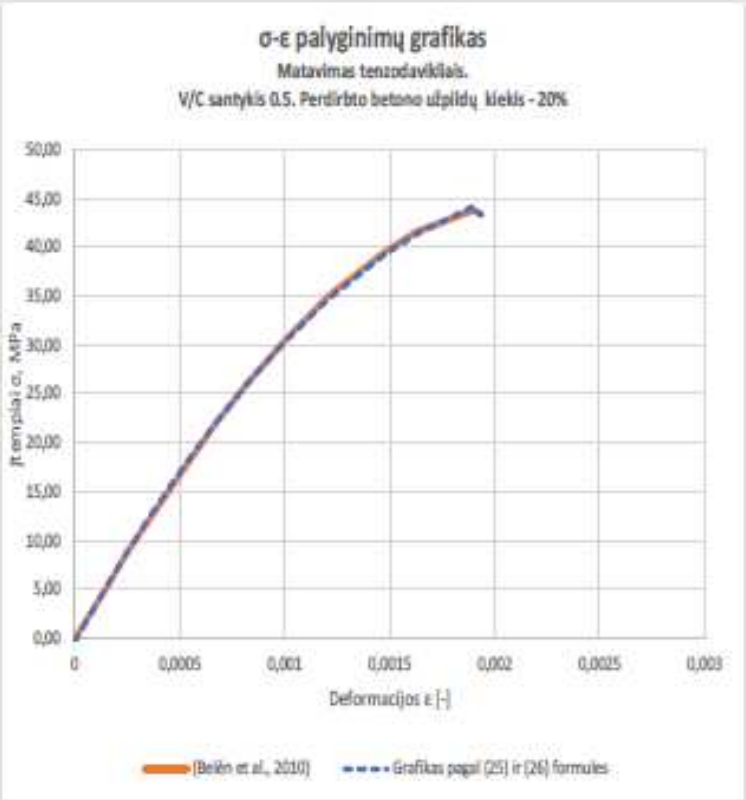
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-8113391.69 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 38871.23 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) - 0.45\right]\text{MPa} \quad (25)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(-11000 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 64.64\right)\text{MPa} \quad (26)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.0019 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.00194$



A.2. 32 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 9 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00530	0.00523	0.00007
60%	0.00830	0.00840	0.00010
80%	0.01210	0.01244	0.00034

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 6.497 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.052 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001238$

$k_c = 0.362$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8113391.69 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 38871.23 \cdot y_{c.c}\right) - 0.45\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 35.229 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 43.74MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-8113391.69 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 38871.23 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) - 0.45\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.00051759698652112327152 \\ 0.004273399366817760087 6 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00051759698652112327152$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 33.802 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.805$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.051\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 8.334 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.023 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 192.023 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.565$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.565 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.702 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 59.397 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 37.135 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.917 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.757 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15054716479585355283 \\ 0.11249065110925244312 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.151 \\ 0.112 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.112 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.446 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 192.023 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.631 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cu1} := 0.0035 \quad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

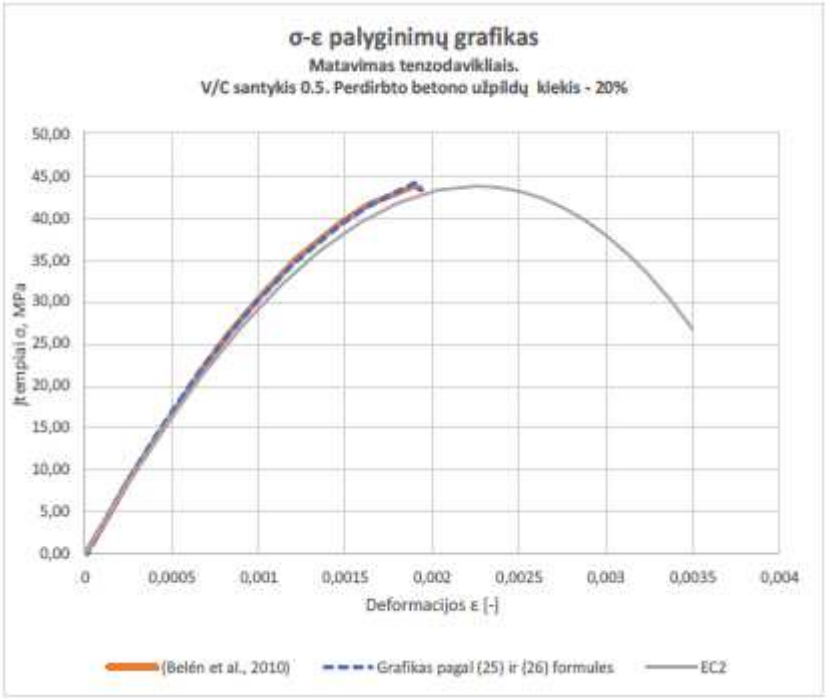
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 34.252 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.857$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 33 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{c.c} = 2.262 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{c.c} = 0.112 \cdot \text{MPa}$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}} \qquad y_c = 0.00201917$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c,yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$

$\sigma_{c,yc}(y_c) = 43.178 \cdot MPa$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c,yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.987$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

Gautos reikšmės:

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$\varepsilon_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$\varepsilon_{lim} = 0.556$

$x_\xi := d \cdot \varepsilon_{lim}$

$x_\xi = 0.247\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.042\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{REC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{REC2} = 192.411 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 7.946 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.411 \cdot kN \cdot m$

$M_{REC2} = 192.411\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 192.023 \cdot kN \cdot m$

$M_{REC2} = 192.411 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 5.839 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.695 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.14941324480727968906 \\ 0.1118563466074791983 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.149 \\ 0.112 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.112 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s - A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.377 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{REC2} = 192.411 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.631 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

$\alpha_{1EC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{1EC2}(M_{IIEC2})$ $\alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$

$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{1EC2}(M_{IIEC2})$

Iškis:

$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$\varepsilon_{cu} := 0.00194$ $\varepsilon_{cu} < 0.003$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 6.759 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.054 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001258$

$k_c = 0.352$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8113391.69 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 38871.23 \cdot y_{c.c}\right) - 0.45\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 35.61 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 43.74 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 4.1 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 31.084 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.814$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.051\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 8.005 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.352 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 192.352 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 192.023 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 192.411 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 192.352 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 42.713 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 192.352 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.482 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.434 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.173 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15796691365889900773 \\ 0.11658231154284594891 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.11658231154284594891 \cdot m$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.9 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

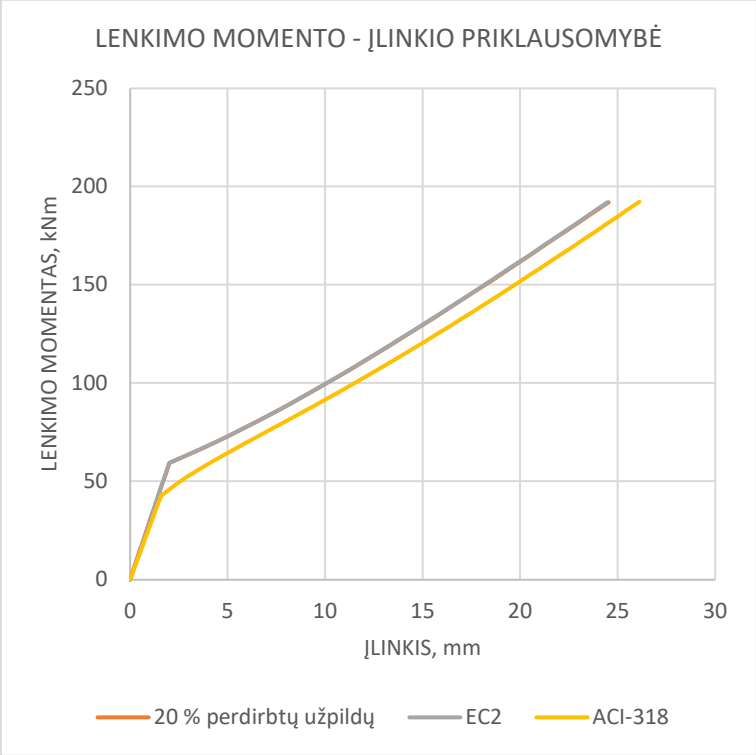
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 34 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

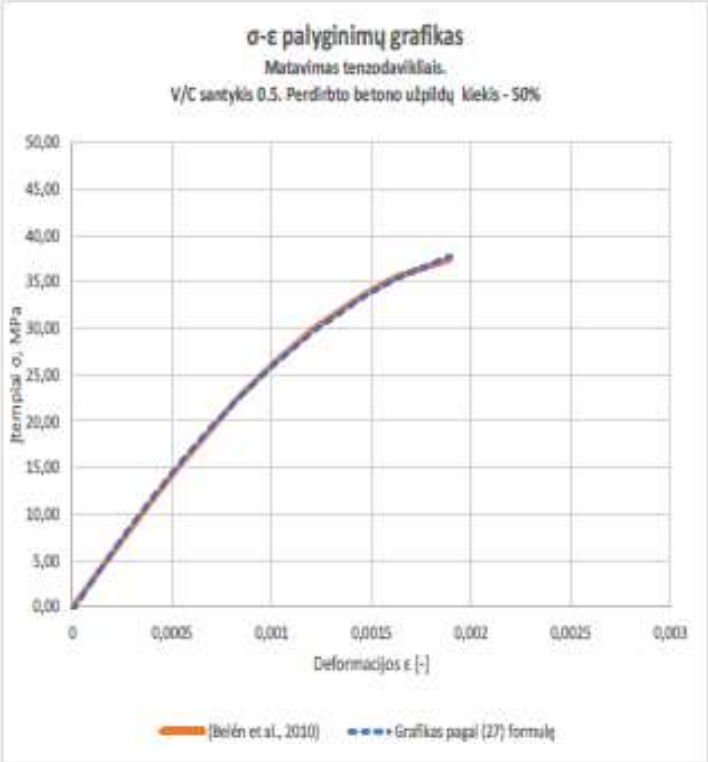
(Belén et al., 2010). Matavimas tenzodavikliais.
Vandens/cemento santykis 0.5. Perdirbto betono užpildų kiekis 50%

Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-6908658.37 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 33260.03 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) - 0.45\right]\text{MPa} \qquad (27)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0$ $\varepsilon_{c1} := 0.0019$ $\varepsilon_{cu} := 0.0019$



A.2. 35 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 10 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00530	0.00526	0.00004
60%	0.00830	0.00844	0.00014
80%	0.01210	0.01248	0.00038

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \left[\int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} \left(\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) \right) \cdot \varepsilon_{c.c1} \, d\varepsilon_{c.c1} \right]$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \left[\int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} \left(\left(\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) \right) \right) d\varepsilon_{c.c1} \right]$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 5.272 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.043 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001215$

$k_c = 0.36$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6908658.37 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 33260.03 \cdot y_{c.c} \right) - 0.45 \right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 29.766 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 37.45MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-6908658.37 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 33260.03 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) - 0.45\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.00052011066941759954 68 \\ 0.00429414243425700001 22 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00052011066941759954 68$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 28.802 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(\gamma_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.795$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.061\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 9.817 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -190.539 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 190.539 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.301$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.301 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.28 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 55 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 34.386 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.944 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.583 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16507073571938462101 \\ 0.12040649238568635399 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.165 \\ 0.12 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.12 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.337 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 190.539 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.777 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$\varepsilon_{c0.c} := 0.000$ $\quad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3}$ $\quad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10}$ $\quad \varepsilon_{cul} := 0.0035$ $\quad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$

$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1}$ $\quad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul}$

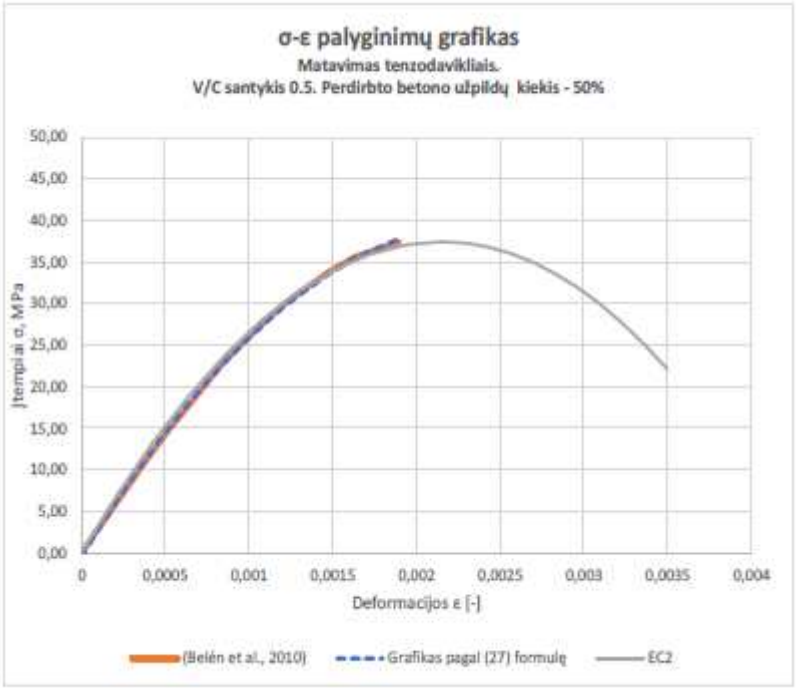
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 32.693 \cdot GPa$$

Įtempiu-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.973$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 36 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 1.93 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{\varepsilon.c} = 0.097 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.0019867\,8$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$

$\sigma_{c.yc}(y_c) = 37.223 \cdot MPa$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.994$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

Gautos reikšmės:

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$\varepsilon_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$\varepsilon_{lim} = 0.556$

$x_\varepsilon := d \cdot \varepsilon_{lim}$

$x_\varepsilon = 0.247\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.048\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{REC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{REC2} = 190.939 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 9.418 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -190.939 \cdot kN \cdot m$

$M_{REC2} = 190.939\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 190.539 \cdot kN \cdot m$

$M_{REC2} = 190.939 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 6.117 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.918 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15345240943576758958 \\ 0.11410484964593631049 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.153 \\ 0.114 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.114 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.623 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{REC2} = 190.939 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.777 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.0019 \qquad \varepsilon_{cu} < 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 5.08 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.042 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001197$

$k_c = 0.37$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6908658.37 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 33260.03 \cdot y_{c.c}\right) - 0.45\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 29.47 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 37.45 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_t := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.794 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 28.762 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.787$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.061\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 10.175 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -190.182 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 190.182 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 190.539 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 190.939 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 190.182 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^{5} \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 39.523 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 190.182 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.533 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.954 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.591 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16520096342455263001 \\ 0.12047576639563188772 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.12047576639563188772 \cdot m$$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.345 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Ilinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

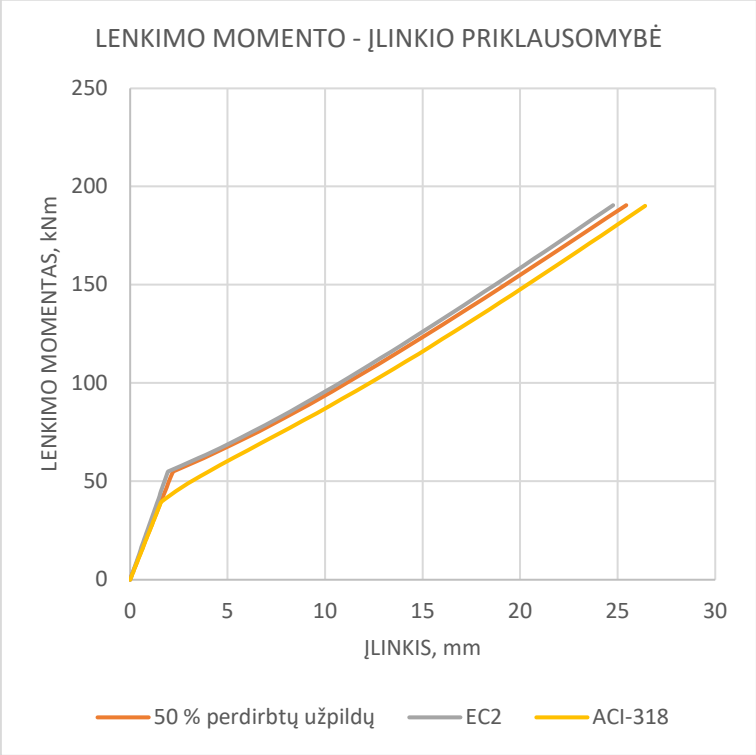
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Ilinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 37 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Belén et al., 2010). Matavimas tenzodavikliais.
Vandens/cemento santykis 0.5. Perdirbto betono užpildų kiekis 100%

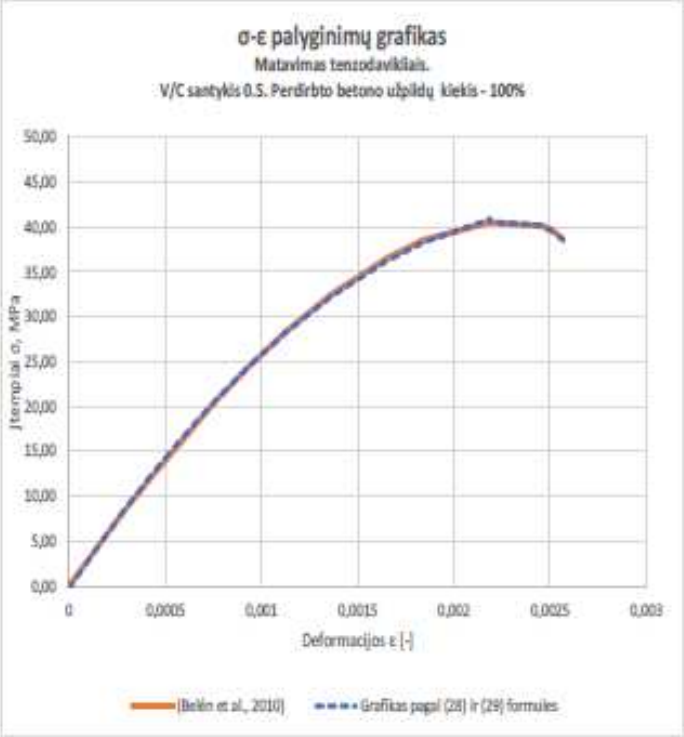
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-6155668.80 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 32333.77 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) - 0.38\right]\text{MPa} \quad (28)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(-33400926.80 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{\ 2} + 153915.78 \cdot \varepsilon_{c.c2} - 136.35\right)\text{MPa} \quad (29)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.00219 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.00257$



A.2. 38 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 11 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00590	0.00583	0.00007
60%	0.00930	0.00938	0.00008
80%	0.01360	0.01397	0.00037
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
95%	0.02570	0.02550	0.00020

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.134 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.07 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001608$

$k_c = 0.374$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6155668.80 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 32333.77 \cdot y_{c.c}\right) - 0.38\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 35.701 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{yn} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 40.54MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-6155668.80 \cdot \varepsilon_{c1.1}^{\,2} + 32333.77 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) - 0.38\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.000576556743328852528 78 \\ 0.004676125142350247 0355 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.0005765567433288525278$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 28.126 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.881$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.05\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 8.498 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -191.859 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 191.859 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.435$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.435 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.494 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 57.228 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 35.779 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 7.111 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.717 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16735505260079648526 \\ 0.1216173494299629945 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.167 \\ 0.122 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.122 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.478 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_Y := M_R = 191.859 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_Y - M_{cr.fl}}{20} = 6.732 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cul} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul}$$

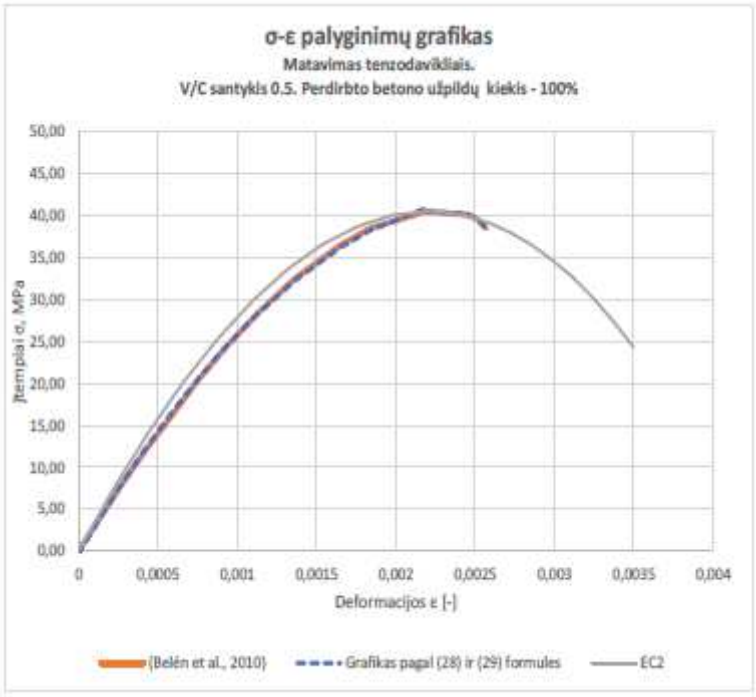
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 33.48 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.913$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 39 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{e.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{e.c} = 2.094 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{e.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{e.c} = 0.105 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{e.c}}{A_{e.c}} \qquad y_c = 0.00200313$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 40.169 \cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.991$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.045\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 191.724 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 8.633 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -191.724 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 191.724\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 191.859 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 191.724 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 5.974 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.803 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15137486916371027747 \\ 0.11295213842982985849 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.151 \\ 0.113 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.113 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.496 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{y.EC2} := M_{R.EC2} = 191.724 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.732 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{y.EC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$\varepsilon_{cu} := 0.00257$ $\varepsilon_{cu} < 0.003$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.134 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.071 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001608$

$k_c = 0.374$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6155668.80 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 32333.77 \cdot y_{c.c}\right) - 0.38\right]\text{MPa}$ $\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 35.702 \cdot \text{MPa}$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 40.54 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.948 \cdot \text{MPa}$

Tamprumo modulis:

$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 29.925 \cdot \text{GPa}$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.881$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$

$x = 0.05\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 8.498 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -191.859 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 191.859 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 191.859 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 191.724 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 191.859 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 41.121 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 191.859 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.537 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.683 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.373 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16146183696315361457 \\ 0.11847491972189625353 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.11847491972189625353 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.115 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

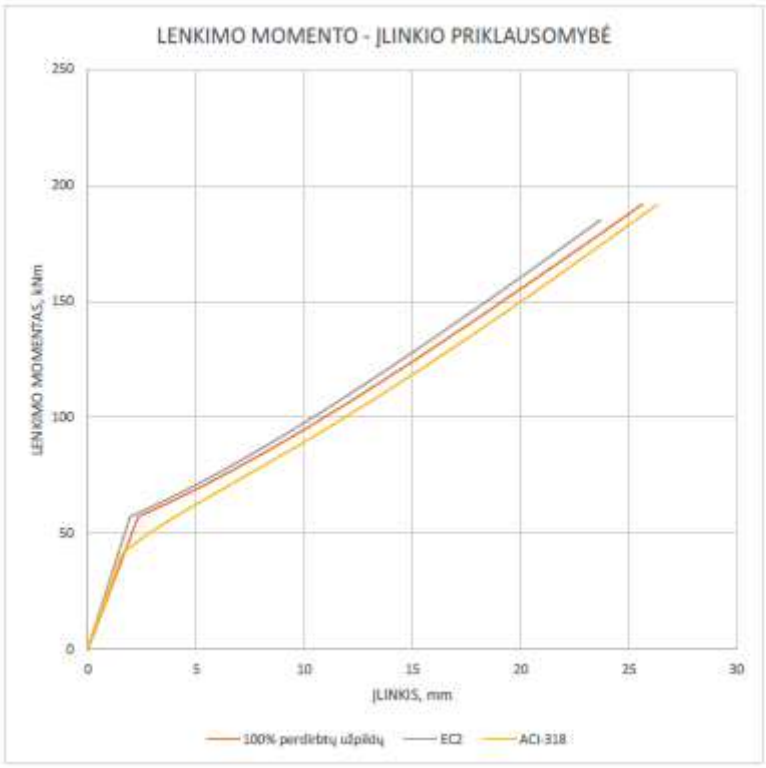
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

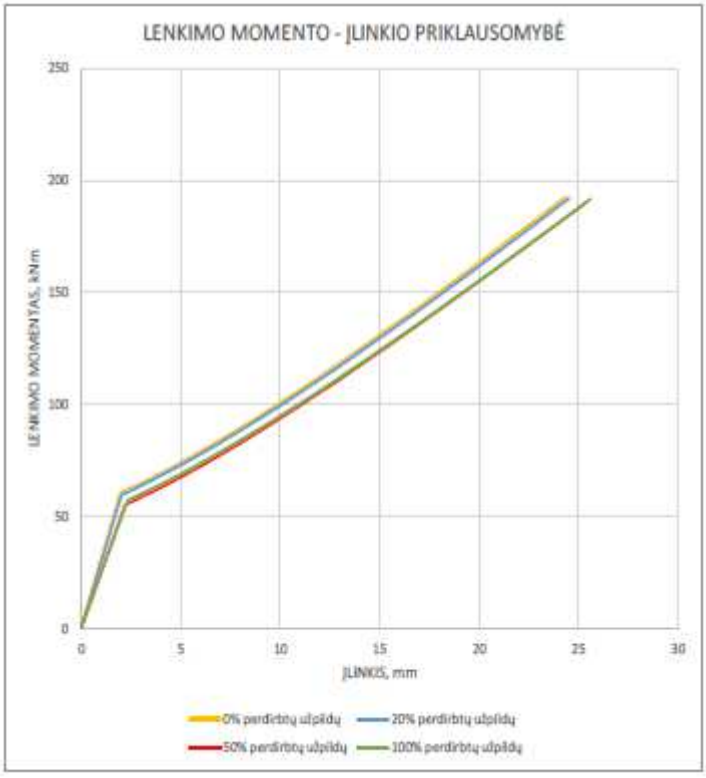
Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

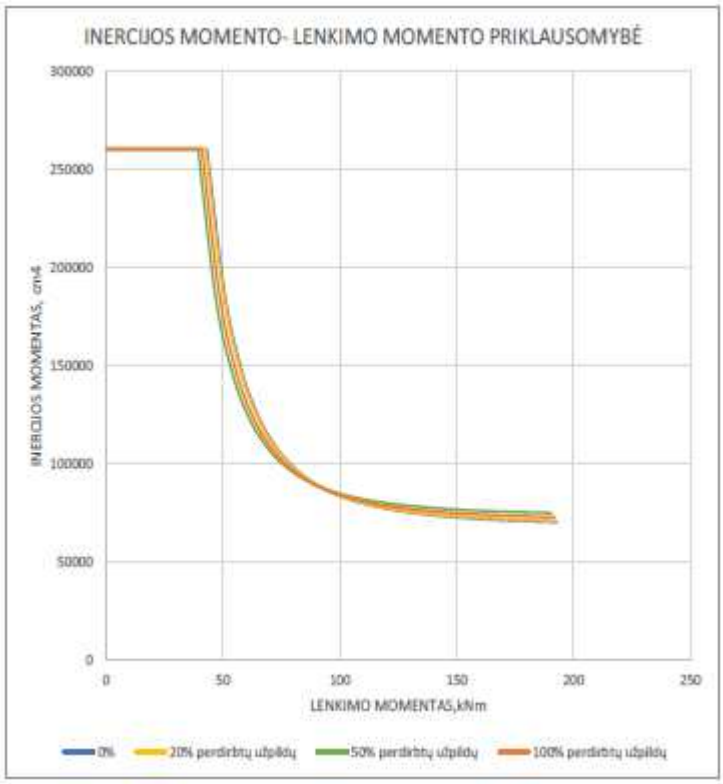
$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 40 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI



A.2. 41 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio



A.2. 42 pav. Inercijos momento – lenkimo momento priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio

(Belén et al., 2010). Matavimas poslinkio jutikliais.
Vandens/cemento santykis 0.5. Perdirbto betono užpildų kiekis 0%

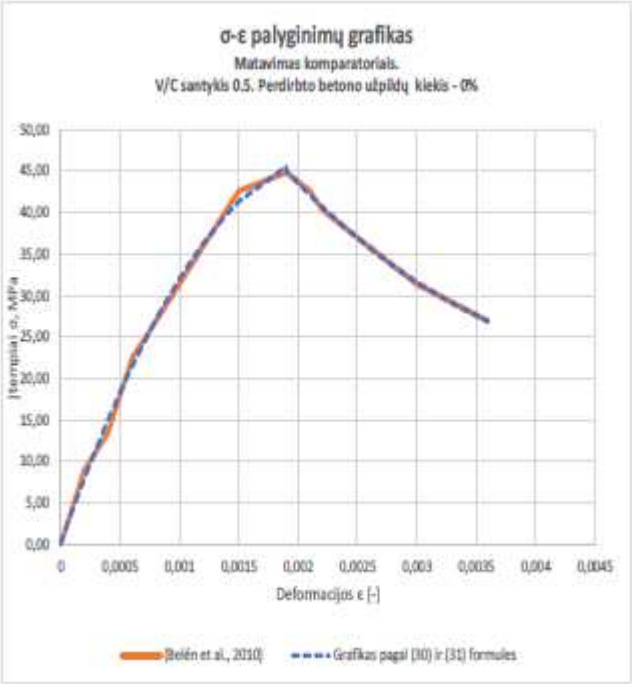
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-8850291.06 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{2} + 40685.25 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) + 0.181\right]\text{MPa} \quad (30)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(2551905.799 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{2} - 24670.32 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 82.63\right)\text{MPa} \quad (31)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.0019 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.0036$



A.2. 43 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 12 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00050	0.00050	0.00000
60%	0.00080	0.00081	0.00001
80%	0.00120	0.00121	0.00001

Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
60%	0.00360	0.00360	0.00000
80%	0.00260	0.00254	0.00006

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 2.224 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.113 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001976$

$k_c = 0.451$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8850291.06 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 40685.25 \cdot y_{c.c}\right) + 0.181\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 46.019 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 44.81MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-8850291.06 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 40685.25 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) + 0.181\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.004109169470402534458 5 \\ 0.000487882730951846761 14 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.000487882730951846761 14$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 36.738 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{cc})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 1.027$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.039\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 7.948 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.409 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 192.409 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.607$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.607 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.769 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 60.093 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 37.57 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.444 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.377 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.14355630798176805942 \\ 0.10854111354434026654 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.144 \\ 0.109 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.109 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.021 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 192.409 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.616 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$

$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cu1} := 0.003 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

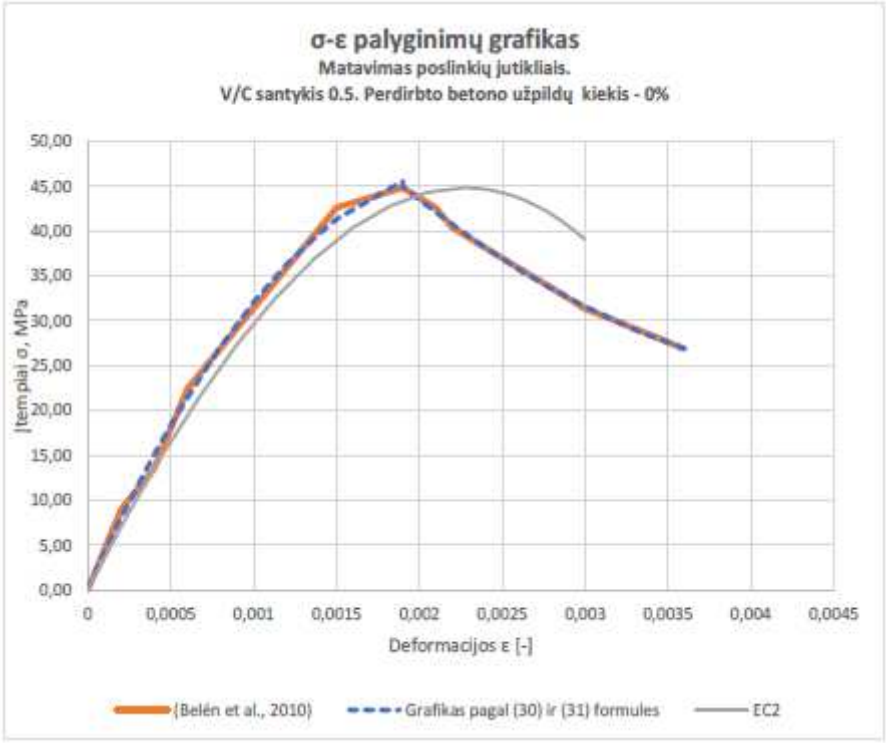
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 34.501 \cdot GPa$$

Itempiu-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.839$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 44 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{z.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{z.c} = 1.771 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$

Figūros plotas:

$$A_{z.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{z.c} = 0.098 \cdot \text{MPa}$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{z.c}}{A_{z.c}} \qquad y_c = 0.00181423$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 42.7 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.953$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\varepsilon_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \varepsilon_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\varepsilon_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.042\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 5.821 \times 10^{-14} \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 192.851 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 7.506 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.851 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 192.851\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 192.409 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 192.851 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Įlinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos įlinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 5.797 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{sl} = 4.661 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{sl}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.14879514262790636157 \\ 0.11150956570035523332 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.149 \\ 0.112 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.112 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{sl}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.339 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{REC2} = 192.851 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.616 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.683 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.097 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001741$

$k_c = 0.42$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempiu esančiu įtempiu deformaciu grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8850291.06 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 40685.25 \cdot y_{c.c}\right) + 0.181\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 44.189 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$$f_c := f_{cm} = 44.81 \cdot \text{MPa}$$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 4.15 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 31.462 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.986$

$$d := h - d_1$$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.041\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 7.7 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.657 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 192.657 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 192.409 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 192.851 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 192.657 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 43.232 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 192.657 \cdot kN \cdot m$ $dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.471 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.357 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.111 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15687282532938791797 \\ 0.11598531173653414764 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.11598531173653414764 \cdot m$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.833 \times 10^{-4}\, m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

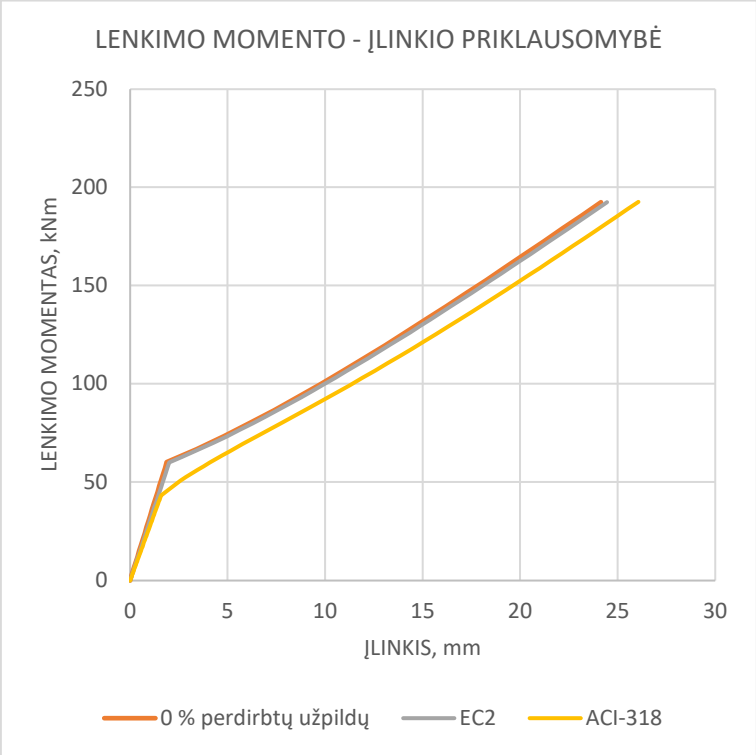
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 45 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Belén et al., 2010). Matavimas poslinkio jutikliais.
Vandens/cemento santykis 0.5. Perdirbto betono užpildų kiekis 20%

Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-8183842.4 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{2} + 39255.85 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) - 0.549\right]\text{MPa} \quad (32)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(3485171.05 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{2} - 28688 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 85.279\right)\text{MPa} \quad (33)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.0019 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.0037$



A.2. 46 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 13 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00050	0.00053	0.00003
60%	0.00080	0.00084	0.00004
80%	0.00120	0.00125	0.00005
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
60%	0.00370	0.00370	0.00000
80%	0.00240	0.00249	0.00008

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 2.251 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.111 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002029$

$k_c = 0.451$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8183842.4 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 39255.85 \cdot y_{c.c}\right) - 0.549\right]MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 45.412 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 43.74MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-8183842.4 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 39255.85 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) - 0.549\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.00051496097068129413609 \\ 0.0042817895141520892634 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00051496097068129413609$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 33.975 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 1.038$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.04\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 8.062 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.295 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 192.295 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.565$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.565 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.702 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 59.397 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 37.135 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.887 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.733 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15010793819774900745 \\ 0.11224523857015317413 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.15 \\ 0.112 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.112 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.419 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 192.295 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.645 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cul} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul}$$

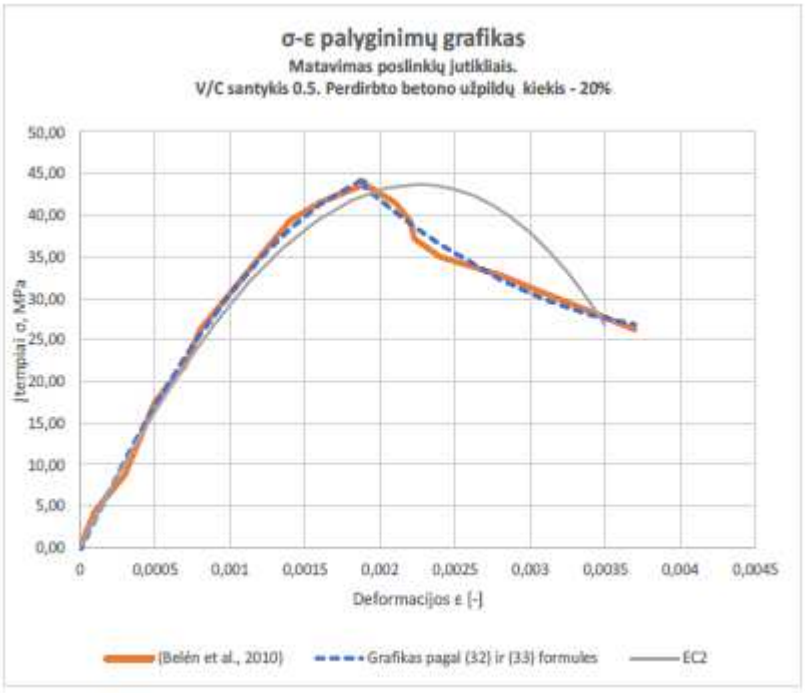
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 34.252 \cdot GPa$$

Itempiu-deformaciju kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.857$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 47 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{s.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{s.c} = 2.262 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$

Figūros plotas:

$$A_{s.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{s.c} = 0.112 \cdot \text{MPa}$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{s.c}}{A_{s.c}} \qquad y_c = 0.00201917$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 43.178 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.987$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.042\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 192.411 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 7.946 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.411 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 192.411\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 192.295 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 192.411 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 5.839 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.695 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.14941324480727968906 \\ 0.1118563466074791983 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.149 \\ 0.112 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.112 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.377 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{RIEC2} = 192.411 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.645 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Įlinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.622 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.093 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001749$

$k_c = 0.417$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-8183842.4 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 39255.85 \cdot y_{c.c}\right) - 0.549\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 43.08 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$$f_c := f_{cm} = 43.74 \cdot \text{MPa}$$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_t := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 4.1 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 31.084 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.985$

$$d := h - d_1$$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.042\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = -0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 7.846 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -192.511 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 192.511 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 192.295 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 192.411 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 192.511 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^{5} \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 42.713 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 192.511 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.49 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.434 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.173 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15796691365889900773 \\ 0.11658231154284594891 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.11658231154284594891 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s - A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.9 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

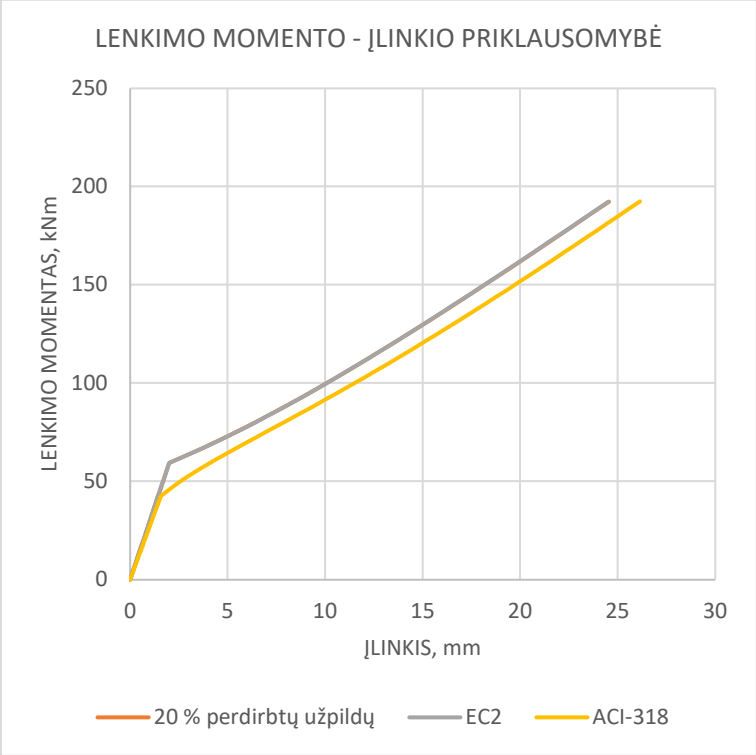
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 48 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Belén et al., 2010). Matavimas poslinkio jutikliais.
Vandens/cemento santykis 0.5. Perdirbto betono užpildų kiekis 50%

Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-6803418 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 32831 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) + 0.2116\right]\text{MPa} \quad (34)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(377551 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{\ 2} - 9804.6 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 55.234\right)\text{MPa} \quad (35)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.0019 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.004$



A.2. 49 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 14 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00050	0.00051	0.00001
60%	0.00080	0.00080	0.00000
80%	0.00120	0.00124	0.00004

Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
60%	0.00400	0.00389	0.00011
80%	0.00290	0.00284	0.00006

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 2.316 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.107 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002174$

$k_c = 0.457$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6803418 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 32831 \cdot y_{c.c}\right) + 0.2116\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 39.431 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 37.45MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-6803418 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 32831 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) + 0.2116\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.00050206640596977744958 \\ 0.004323596224196412 5449 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00050206640596977744958$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 29.837 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 1.053$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.046\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 9.388 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -190.969 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 190.969 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.301$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.301 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.28 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 55 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 34.386 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.703 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.389 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16173852417821661951 \\ 0.11862382293392278313 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.162 \\ 0.119 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.119 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.132 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 190.969 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.798 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cul} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul}$$

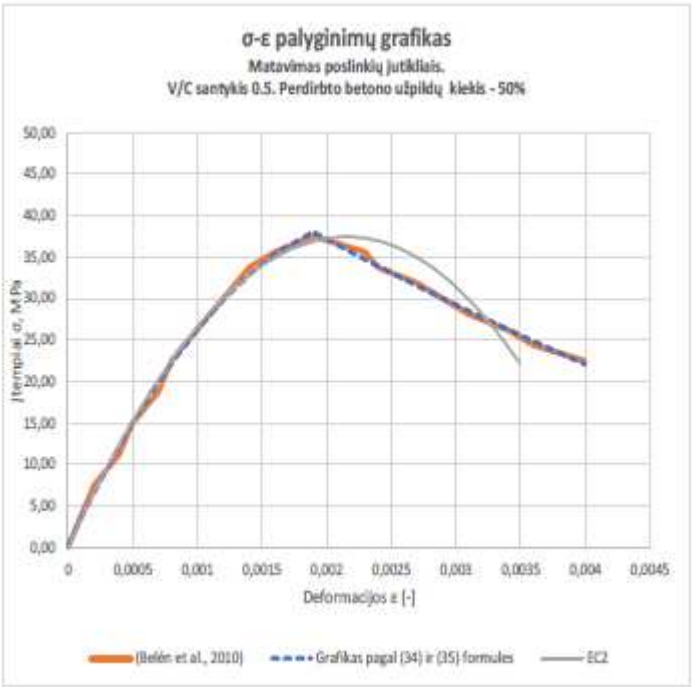
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 32.693 \cdot GPa$$

Itempiu-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.973$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 50 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{z.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{z.c} = 1.93 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$

Figūros plotas:

$$A_{z.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{z.c} = 0.097 \cdot \text{MPa}$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{z.c}}{A_{z.c}} \qquad y_c = 0.00198678$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 37.223 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.994$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.048\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 190.939 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 9.418 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -190.939 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 190.939\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 190.969 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 190.939 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 6.117 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.918 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15345240943576758958 \\ 0.11410484964593631049 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.153 \\ 0.114 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.114 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.623 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{REC2} = 190.939 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.798 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.437 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.081 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001764$

$k_c = 0.412$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6803418 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 32831 \cdot y_{c.c}\right) + 0.2116\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 36.958 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 37.45 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.794 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 28.762 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.987$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.049\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 9.037 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -191.32 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 191.32 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 190.969 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 190.939 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 191.32 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 39.523 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 191.32 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.59 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.954 \qquad A_{sq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.591 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16520096342455263001 \\ 0.12047576639563188772 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.12111591126562287345 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.345 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

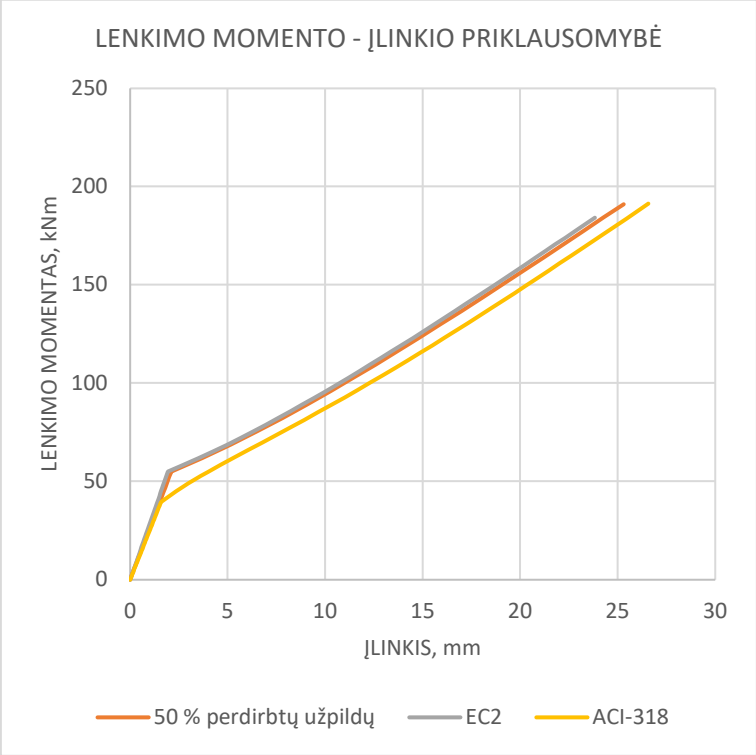
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.2. 51 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Belén et al., 2010). Matavimas poslinkio jutikliais.
Vandens/cemento santykis 0.5. Perdirbto betono užpildų kiekis 100%

Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-6338497.08 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 32570.93 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) - 0.03\right]\text{MPa} \quad (36)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := \left(-136148 \cdot \varepsilon_{c.c2}^{\ 2} - 6868.7 \cdot \varepsilon_{c.c2} + 56.607\right)\text{MPa} \quad (37)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.00220 \qquad \varepsilon_{cu} := 0.0044$



A.2. 52 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.2. 15 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0,00060	0,00057	0,00003
60%	0,00090	0,00092	0,00002
80%	0,00140	0,00138	0,00002
Įtempių lygis	Besileidžiančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
60%	0,00440	0,00429	0,00011
80%	0,00330	0,00325	0,00005

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} \left(\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})\right) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} \left(\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})\right) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} \left(\left(\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})\right)\right) d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} \left(\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})\right) d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 3.068 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.128 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.002405$

$k_c = 0.453$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6338497.08 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 32570.93 \cdot y_{c.c}\right) - 0.03\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 41.641 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 40.54MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0,4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-6338497.08 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 32570.93 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) - 0.03\right] \text{solve}, \varepsilon_{c1.1} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.0005597657109166186692 2 \\ 0.0045788230726566633429 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.0005597657109166186692 2$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 28.969 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 1.027$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.043\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 8.828 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -191.528 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 191.528 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.435$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.435 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.494 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 57.228 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 35.779 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.904 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.551 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16451762348978332019 \\ 0.12011193709837123797 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.165 \\ 0.12 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.12 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.303 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 191.528 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.715 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cul} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul}$$

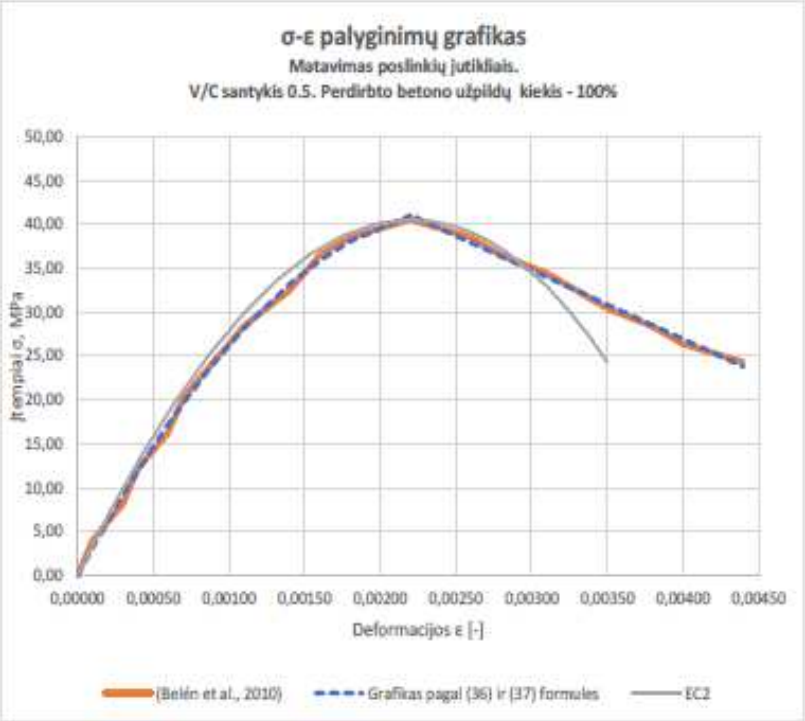
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 33.48 \cdot GPa$$

Itempiu-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.913$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.2. 53 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{s.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{s.c} = 2.094 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$

Figūros plotas:

$$A_{s.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{s.c} = 0.105 \cdot \text{MPa}$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{s.c}}{A_{s.c}} \qquad y_c = 0.00200313$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 40.169 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.991$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\varepsilon_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \varepsilon_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\varepsilon_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.045\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 191.724 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 8.633 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -191.724 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 191.724\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 191.528 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 191.724 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 5.974 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{sl} = 4.803 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{sl}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15137486916371027747 \\ 0.11295213842982985849 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.151 \\ 0.113 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.113 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{sl}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.496 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{REC2} = 191.724 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.715 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1} \, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2} \, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}))) \, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 1.568 \times 10^{-4} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.087 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001812$

$k_c = 0.396$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-6338497.08 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 32570.93 \cdot y_{c.c}\right) - 0.03\right]\text{MPa} \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 38.176 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$$f_c := f_{cm} = 40.54 \cdot \text{MPa}$$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_t := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.948 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 29.925 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.942$

$$d := h - d_1$$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.047\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 8.412 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -191.945 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 191.945 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 191.528 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 191.724 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 191.945 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_1 = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 41.121 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\quad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 191.945 \cdot kN \cdot m$ $\quad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.541 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.683 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.373 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16146183696315361457 \\ 0.11847491972189625353 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.11847491972189625353 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.115 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

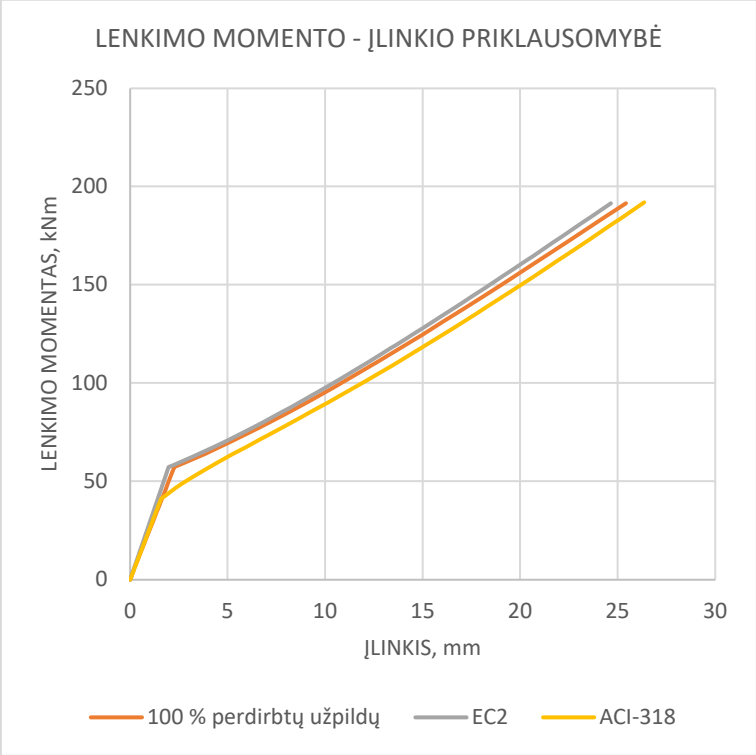
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

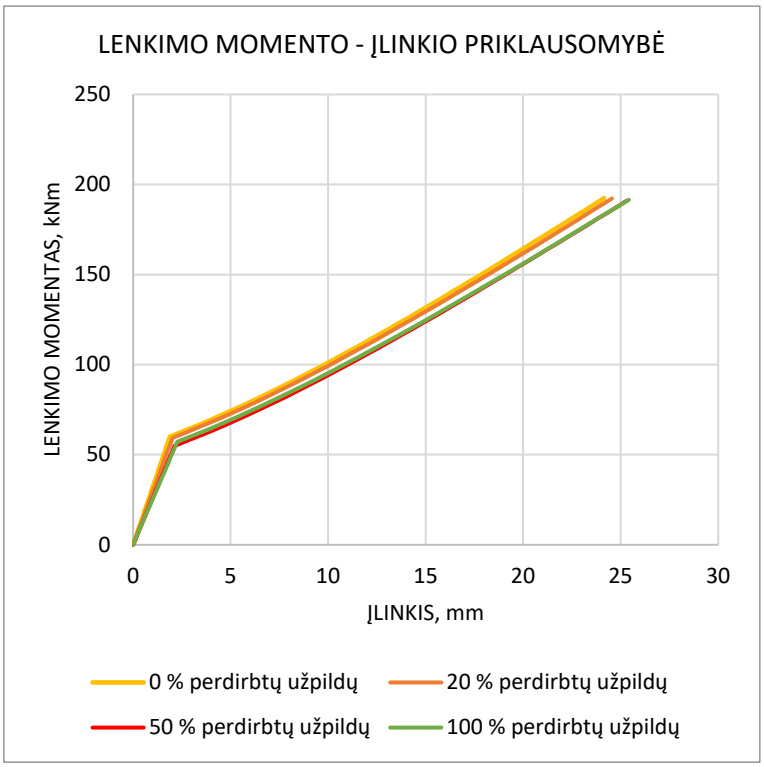
$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$

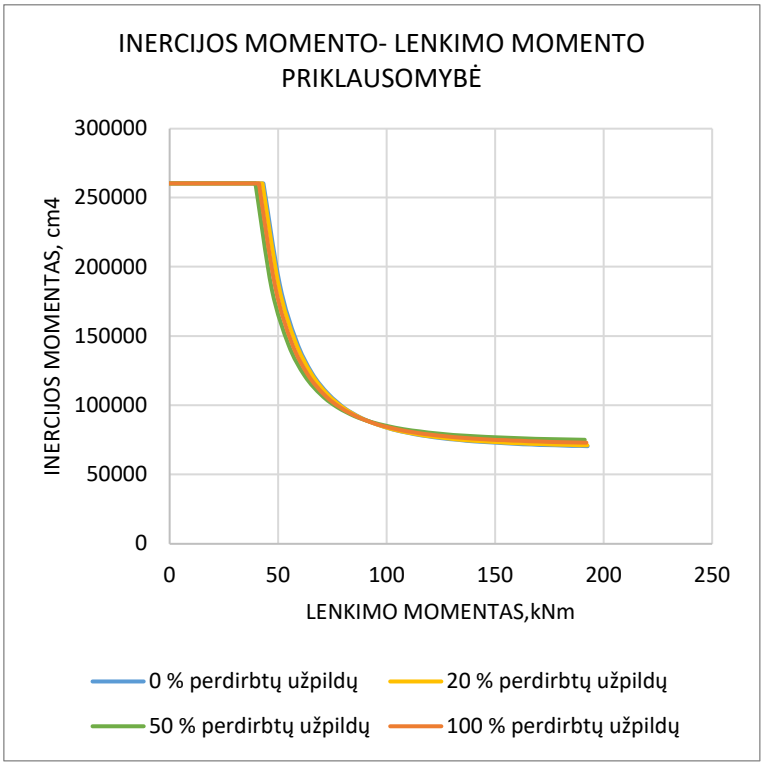


A.2. 54 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

Bendri rezultatai:



A.2. 55 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio



A.2. 56 pav. Inercijos momento – lenkimo momento priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio

A.3 priedas. Skaičiavimai pagal 1 metodą (Martínez-Lage et al., 2012)

(Martínez-Lage et al., 2012). Betono natūralių užpildų pakeitimo perdirbtais kiekis - 0%

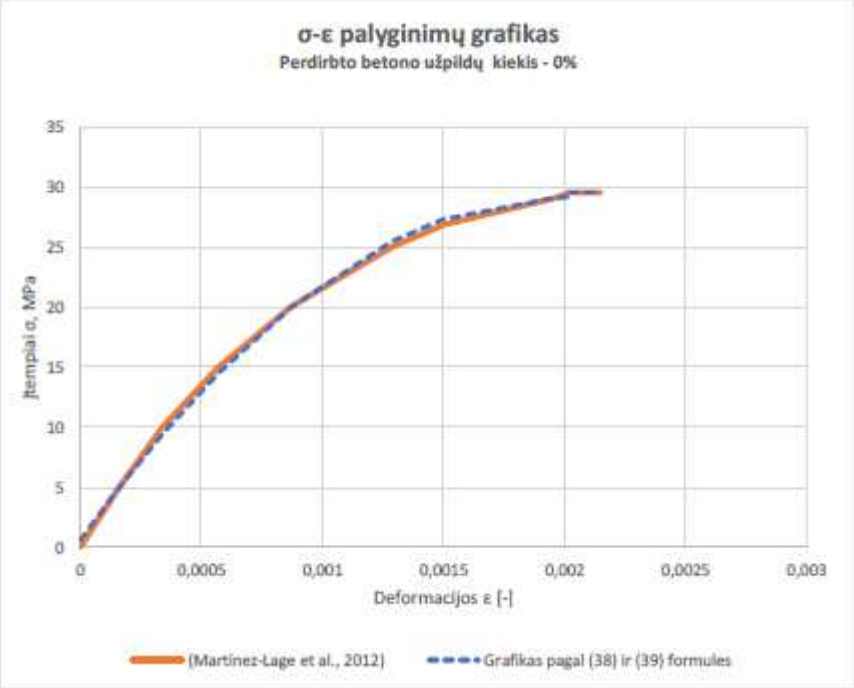
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-7069260.682 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{2} + 28396.1933 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) + 0.60235539\right]\text{MPa} \quad (38)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := 29.5\text{MPa} \quad (39)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0$ $\varepsilon_{c1} := 0.00202$ $\varepsilon_{cu} := 0.00215$



A.3. 1 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.3. 1 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0,00042	0,00045	0,00002
60%	0,00073	0,00075	0,00001
80%	0,00117	0,00115	0,00002

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 5.782 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.044 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001327$

$k_c = 0.383$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-7069260.682 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 28396.1933 \cdot y_{c.c}\right) + 0.60235539\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 25.838 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 29.5MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-7069260.682 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 28396.1933 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) + 0.60235539\right] \rightarrow \begin{pmatrix} 0.00044324699730545071797 \\ 0.0035736077456952403407 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.00044324699730545071797$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 26.622 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(\gamma_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.876$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.07\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 12.01 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -188.347 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 188.347 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 2.912$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 2.912 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.658 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 48.523 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 30.336 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Ilinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 7.513 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.04 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.17277693152795491205 \\ 0.12445549616068950514 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.173 \\ 0.124 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.124 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.813 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_Y := M_R = 188.347 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_Y - M_{cr.fl}}{20} = 6.991 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_Y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cul} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul}$$

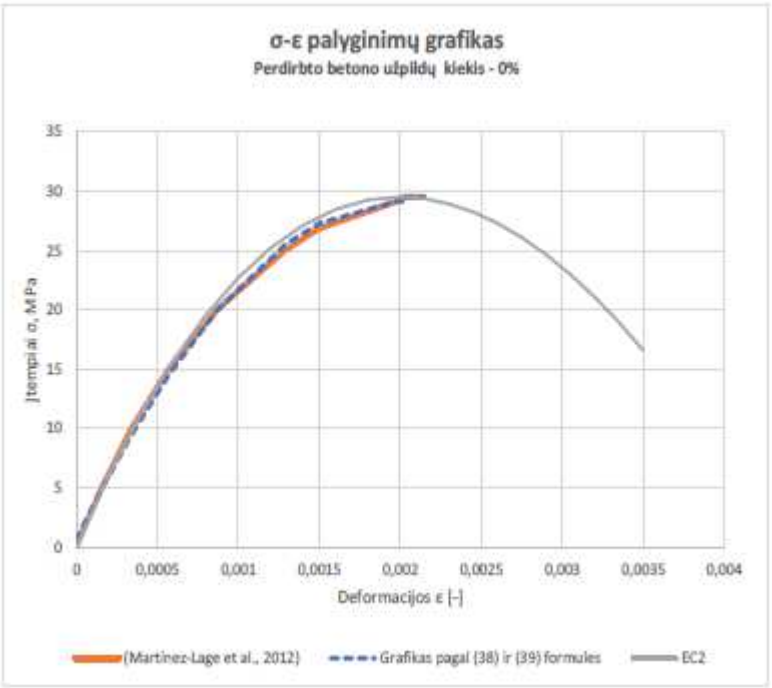
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 30.435 \cdot GPa$$

Itempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.165$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.3. 2 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{c.c} = 1.508 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{c.c} = 0.078 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}} \qquad y_c = 0.00194004$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 29.478 \cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.999$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.061\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 188.097 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 12.26 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -188.097 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 188.097\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 188.347 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 188.097 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Įlinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos įlinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 6.571 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.283 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.15989860055091993357 \\ 0.11763108259856125014 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.16 \\ 0.118 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.118 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.019 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{REC2} = 188.097 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 6.991 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Įlinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.00215$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0}.c}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{cc1}(\varepsilon_{cc1})) \cdot \varepsilon_{cc1}\, d\varepsilon_{cc1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{cc2}(\varepsilon_{cc2})) \cdot \varepsilon_{cc2}\, d\varepsilon_{cc2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0}.c}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{cc1}(\varepsilon_{cc1})))\, d\varepsilon_{cc1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{cc2}(\varepsilon_{cc2}))\, d\varepsilon_{cc2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 5.783 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.044 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001327$

$k_c = 0.383$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-7069260.682 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 28396.1933 \cdot y_{c.c}\right) + 0.60235539\right] MPa \qquad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 25.839 \cdot MPa$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 29.5 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_t := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 3.367 \cdot MPa$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 25.528 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.876$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.07\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = -0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 12.008 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -188.349 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 188.349 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 188.347 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 188.097 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 188.349 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 35.078 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 188.349 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.664 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.835 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.299 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.1266574957331381842 \\ -0.17705014205077236428 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.1266574957331381842 \cdot m$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s - A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 8.077 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

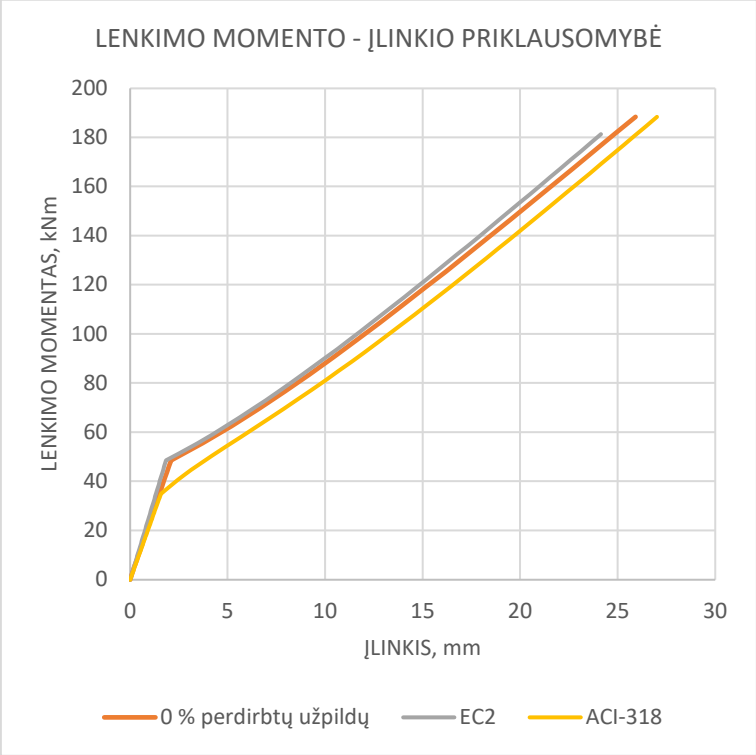
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.3. 3 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Martínez-Lage et al., 2012). Betono natūralių užpildų pakeitimo perdirbtais kiekis - 50%

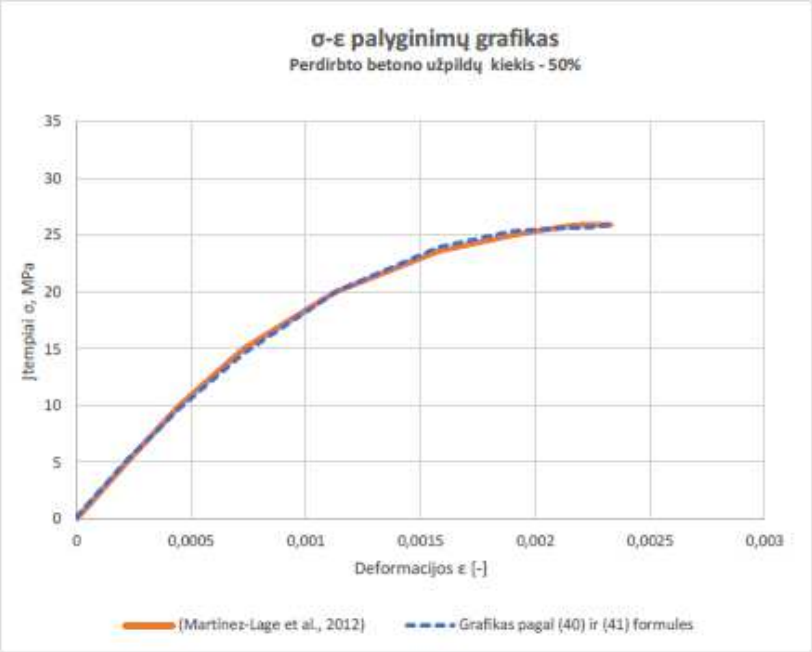
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-5592167.281 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 23884.28552 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) + 0.160601463\right]\text{MPa} \quad (40)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := 25.9\text{MPa} \quad (41)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0$ $\varepsilon_{c1} := 0.0022$ $\varepsilon_{cu} := 0.00233$



A.3. 4 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.3. 2 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00047	0.00048	0.00001
60%	0.00077	0.00080	0.00003
80%	0.00122	0.00121	0.00001

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 6.004 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.042 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001441$

$k_c = 0.382$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-5592167.281 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 23884.28552 \cdot y_{c.c}\right) + 0.160601463\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 22.964 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 25.9MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-5592167.281 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 23884.28552 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) + 0.160601463\right] \rightarrow \begin{pmatrix} 0.003789761851880099413 3 \\ 0.000481263015555358278019 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.000481263015555358278019$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 21.527 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(\gamma_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.887$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.078\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 13.477 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -186.88 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 186.88 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 2.71$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 2.71 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.334 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 45.147 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 28.226 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 9.291 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 7.47 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.13590754921465938268 \\ -0.19566592211119692259 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.136 \\ -0.196 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.136 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 9.228 \times 10^{-4} m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 186.88 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 7.087 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \qquad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3} \qquad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \qquad \varepsilon_{cul} := 0.0035 \qquad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cul} - \varepsilon_{c1}}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1} \qquad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cul}$$

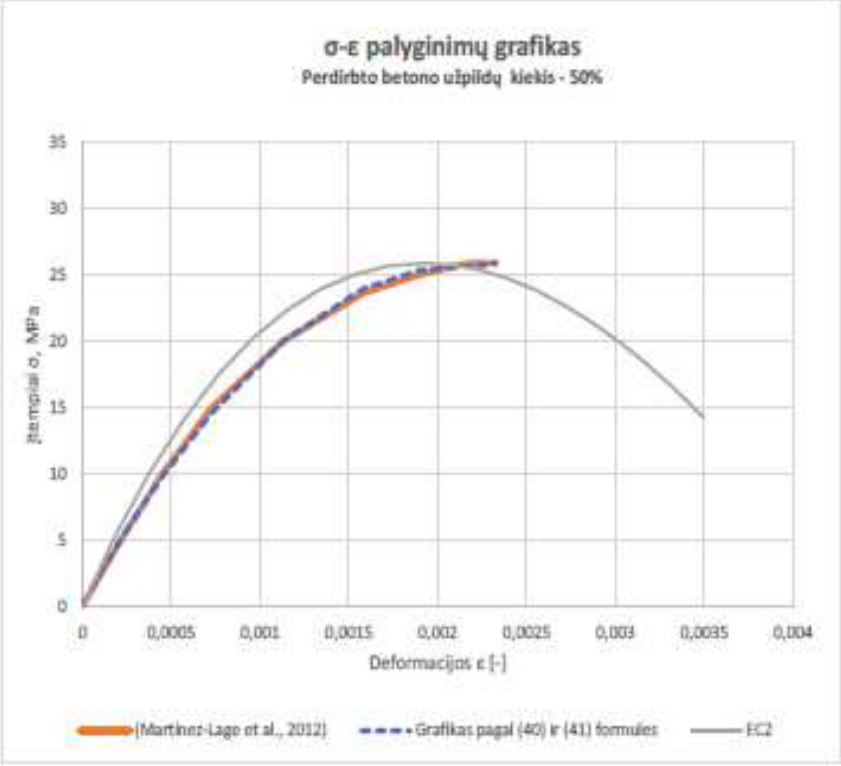
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 29.269 \cdot GPa$$

Itempiu-deformaciu kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.278$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.3. 5 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{c.c} = 1.317 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{c.c} = 0.069 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}} \qquad y_c = 0.00191613$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 25.9 \cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 1$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.07\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 186.189 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 14.168 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -186.189 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 186.189\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 186.88 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 186.189 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 6.833 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{sl} = 5.494 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{sl}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16354099286390328504 \\ 0.11959053322265315421 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.164 \\ 0.12 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.12 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{II.EC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{sl}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.243 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{y.EC2} := M_{R.EC2} = 186.189 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II.EC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 7.087 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.EC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II.EC2} .. M_{y.EC2}$

$\rho_{II.EC2}(M_{II.EC2}) := \frac{M_{II.EC2}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{II.EC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{II.EC2}(M_{II.EC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II.EC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Iškis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.00233$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 6.021 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.042 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001442$

$k_c = 0.381$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-5592167.281 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 23884.28552 \cdot y_{c.c}\right) + 0.160601463\right]\text{MPa} \quad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 22.973 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 25.9 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_t := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 3.155 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 23.919 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.887$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.078\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 13.452 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -186.905 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 186.905 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 186.88 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 186.189 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 186.905 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 32.868 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 186.905 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.702 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 8.361 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 6.723 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.13013058554504960286 \\ -0.18391151350088407496 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.13013058554504960286 \cdot m$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s - A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 8.501 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Ilinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

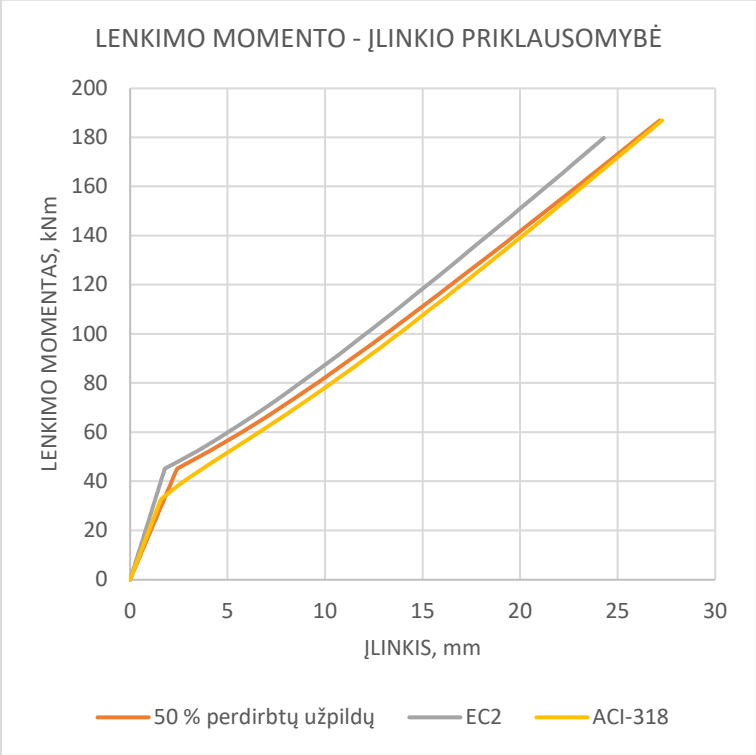
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Ilinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$



A.3. 6 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

(Martinez-Lage et al., 2012). Betono natūralių užpildų pakeitimo perdirbtais kiekis - 100%

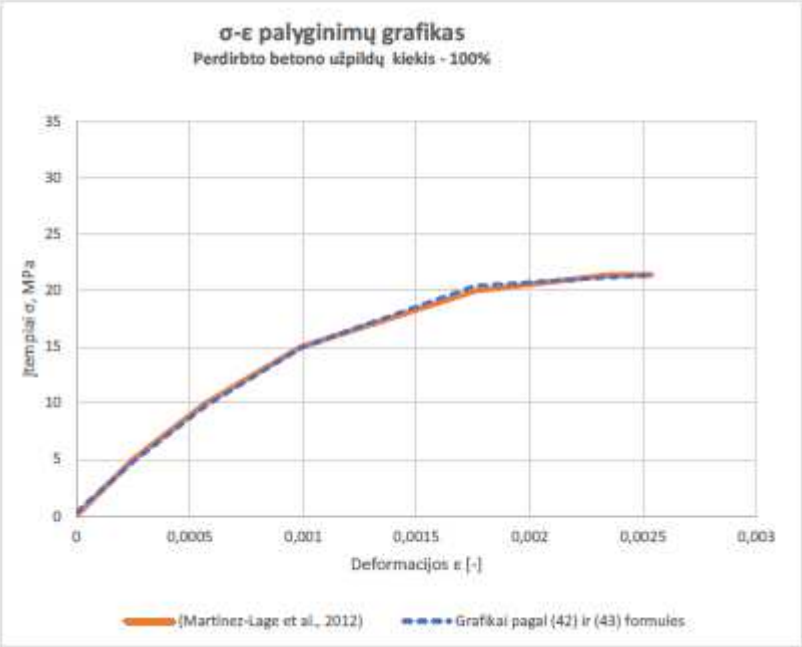
Įtempių formulės:

$$\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1}) := \left[\left(-4328434.762 \cdot \varepsilon_{c.c1}^{\ 2} + 19058.90371 \cdot \varepsilon_{c.c1}\right) + 0.300327508\right]\text{MPa} \quad (42)$$

$$\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}) := 21.4\text{MPa} \quad (43)$$

Deformacijų reikšmės:

$\varepsilon_{c0.c} := 0$ $\varepsilon_{c1} := 0.00235$ $\varepsilon_{cu} := 0.00254$



A.3. 7 pav. σ – ε grafikų palyginimas

A.3. 3 lentelė. Deformacijų palyginimas

Deformacijų palyginimas			
Įtempių lygis	Kylančio grafiko reikšmės		Absoliučioji paklaida
	Originalus grafikas	Tendencijos linija	
40%	0.00048	0.00049	0.00001
60%	0.00081	0.00081	0.00000
80%	0.00132	0.00127	0.00004

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 6.022 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.039 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001557$

$k_c = 0.387$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Įtempių esančių įtempių deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-4328434.762 \cdot y_{c.c}^{\,2} + 19058.90371 \cdot y_{c.c}\right) + 0.300327508\right] MPa$$

$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 19.482 \cdot MPa$

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.25m$ $\quad h := 0.5m$

$L := 6m$

Sija armuojama 4xϕ16 apačioje

$d_1 := 0.055m$

$f_{yk} := 500MPa$

$f_{ym} := 1.12 \cdot f_{yk} = 560 \cdot MPa$

$A_{s1} := 8.04 \times 10^{-4} m^2$

$E_s := 200GPa$

$n_{rebar} := 4$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 21.4MPa$

- Tamprumo modulis:

Iš kylančios tendencijos linijos išsireiškiu deformaciją ties $0{,}4f_{cm}$:

$$\left(0.4 \cdot \frac{f_{cm}}{1MPa}\right) = \left[\left(-4328434.762 \cdot \varepsilon_{c1.1}{}^2 + 19058.90371 \cdot \varepsilon_{c1.1}\right) + 0.300327508\right] \rightarrow \begin{pmatrix} 0.003915879048142366938 2 \\ 0.000487307035963848822 72 \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_c := 0.000487307035963848822 72$

$$E_{cm} := \frac{(0.4 \cdot f_{cm})}{\varepsilon_c} = 17.566 \cdot GPa$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(\gamma_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.91$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.092\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_R := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_c = 16.107 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -184.25 \cdot kN \cdot m$

$M_R = 184.25 \cdot kN \cdot m$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 2.426$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 2.426 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 3.88 \cdot MPa$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 2.6042 \times 10^5 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.25\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.042 \times 10^7 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 40.417 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 25.268 \cdot kN \cdot m$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$$

Kreivis:

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := k \cdot \rho_I(M_I) \cdot L^2$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 11.386 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 9.154 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II2})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II2}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.14758273710549165309 \\ -0.2208154206409934227 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.148 \\ -0.221 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.148 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 1.078 \times 10^{-3}\, m^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_R = 184.25 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 7.192 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := k \cdot \alpha(M_{II}) \cdot L^2$$

- **PALYGINIMAS SU EC2 NETIESINE PRIKLAUSOMYBE:**

Deformacijos:

$\varepsilon_{c0.c} := 0.000$ $\quad \varepsilon_{c1} := 0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31} \cdot 10^{-3}$ $\quad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10}$ $\quad \varepsilon_{cu1} := 0.0035$ $\quad d\varepsilon_{cu} := \frac{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}}{10}$

$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1}$ $\quad \varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$

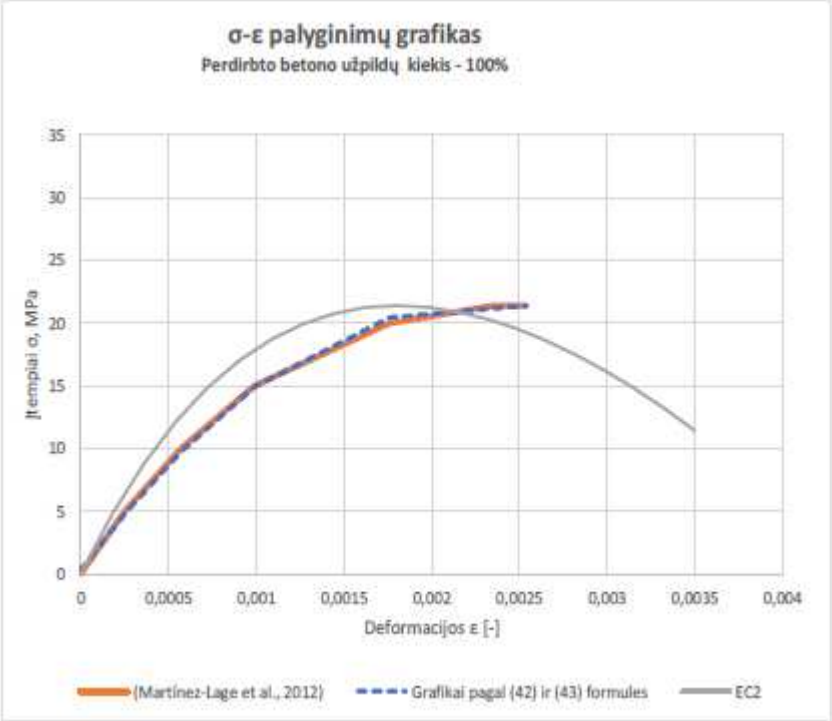
Tamprumo modulis:

$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 27.641 \cdot GPa$$

Itempiu-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.454$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



A.3. 8 pav. σ – ε grafiko palyginimas su EC2

Statinis momentas:

$$S_{z.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_c \, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] \cdot \varepsilon_{cu} \, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{z.c} = 1.079 \times 10^{-4} \cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{z.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cul}} f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{z.c} = 0.057 \cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{z.c}}{A_{z.c}} \qquad y_c = 0.0018831$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cul} - y_c}{\varepsilon_{cul}}$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$

$\sigma_{c.yc}(y_c) = 21.376 \cdot MPa$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.999$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$d := h - d_1$

$$\xi_{lim} := \frac{0.0035}{0.0035 + \frac{f_{ym}}{E_s}}$$

$x_\xi := d \cdot \xi_{lim}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$d = 0.445\,m$

$\xi_{lim} = 0.556$

$x_\xi = 0.247\,m$

$x = 0.084\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 5.821 \times 10^{-14} \cdot kN$

$F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

$M_{R.EC2} = 182.833 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$

$M_c = 17.524 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -182.833 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 182.833\,m \cdot kN$

Eksperimento ir EC2 laikomosios galios palyginimas

$M_R = 184.25 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 182.833 \cdot kN \cdot m$

- ILINKIO SKAIČIAVIMAS

Nesupleišėjusios sijos ilinkis:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{IEC2} := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_{IEC2} := M_0, M_0 + dM_{IEC2} .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$\rho_{IEC2}(M_{IEC2}) := \frac{M_{IEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$

Ilinkis:

$w_{IEC2}(M_{IEC2}) := k \cdot \rho_{IEC2}(M_{IEC2}) \cdot L^2$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cmEC2}} = 7.236 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 5.818 \times 10^3 \cdot mm^2$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.16905058772275779016 \\ 0.12251028342080545052 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.169 \\ 0.123 \end{pmatrix}$

$x_{II} := 0.123 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$I_{IIEC2} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s - A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 7.583 \times 10^{-4} m^4$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$M_{yEC2} := M_{RIEC2} = 182.833 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{IIEC2} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 7.192 \cdot kN \cdot m$

$M_{IIEC2} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{IIEC2} .. M_{yEC2}$

$\rho_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_{IIEC2}}$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Pasiskirstymo koeficientas:

$\zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{IIEC2}}\right)^2$

Vidutinis kreivis

$$\rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \frac{M_{IIEC2}}{E_{cmEC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_{IEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IEC2}(M_{IIEC2}) \qquad \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := \rho_{IIEC2}(M_{IIEC2})$$

$$\alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) := \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2}) \cdot \alpha_{IIEC2}(M_{IIEC2}) + (1 - \zeta_{IIEC2}(M_{IIEC2})) \cdot \alpha_{IEC2}(M_{IIEC2})$$

Ilinkis:

$$w_{IIEC2}(M_{IIEC2}) := k \cdot \alpha_{EC2}(M_{IIEC2}) \cdot L^2$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.00254$$

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} (\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})) \cdot \varepsilon_{c.c1}\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2})) \cdot \varepsilon_{c.c2}\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_{\varepsilon_{c0.c}}^{\varepsilon_{c1}} ((\sigma_{c.c1}(\varepsilon_{c.c1})))\, d\varepsilon_{c.c1} + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu}} (\sigma_{c.c2}(\varepsilon_{c.c2}))\, d\varepsilon_{c.c2}$$

Svorio centras:

$$y_{c.c} := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}}$$

$$k_c := \frac{\varepsilon_{cu} - y_{c.c}}{\varepsilon_{cu}}$$

Gautos reikšmės:

$S_{c.c} = 6.053 \times 10^{-5} \cdot MPa$

$A_{c.c} = 0.039 \cdot MPa$

$y_{c.c} = 0.001559$

$k_c = 0.386$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

- Itempiu esančiu įtempiu deformacijų grafiko svorio centre apskaičiavimas

$$\sigma_{c.c1}(y_{c.c}) := \left[\left(-4328434.762 \cdot y_{c.c}^{\ 2} + 19058.90371 \cdot y_{c.c}\right) + 0.300327508\right]\text{MPa} \quad \sigma_{c.c1}(y_{c.c}) = 19.492 \cdot \text{MPa}$$

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 21.4 \cdot \text{MPa}$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 2.868 \cdot \text{MPa}$$

Tamprumo modulis:

$$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} = 21.742 \cdot \text{GPa}$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.c1}(y_{c.c})}{f_{cm}}$$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.911$

$d := h - d_1$

$d = 0.445\,\text{m}$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$$

$x = 0.092\,\text{m}$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 450.24 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 450.24 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 16.07 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 200.357 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -184.287 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 184.287 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_R = 184.25 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 182.833 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 184.287 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 2.604 \times 10^5 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 29.876 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 184.287 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 7.721 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 9.199 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 7.396 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.13535330582232277425 \\ -0.19451918016076737527 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.13535330582232277425 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s - A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 9.158 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$$k := \frac{4}{4S}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

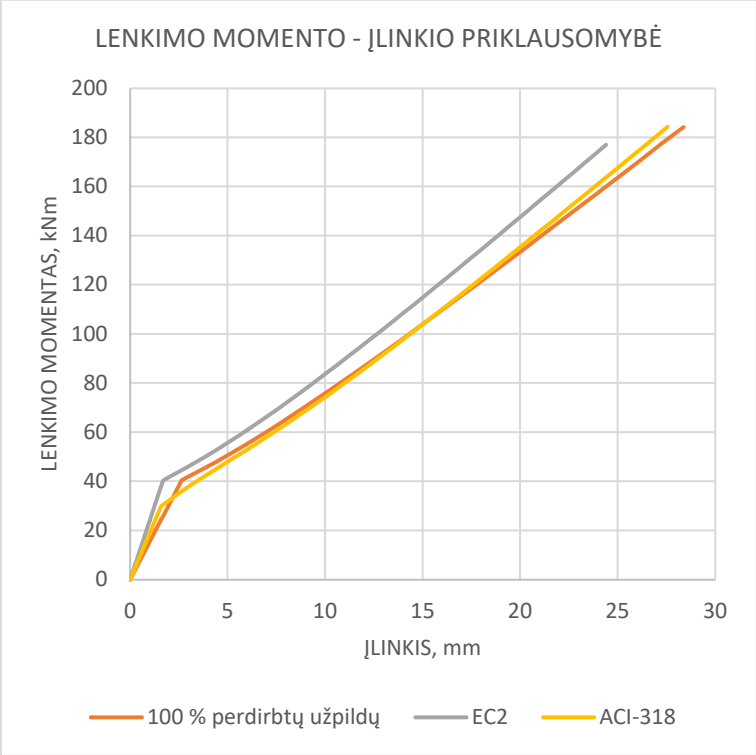
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

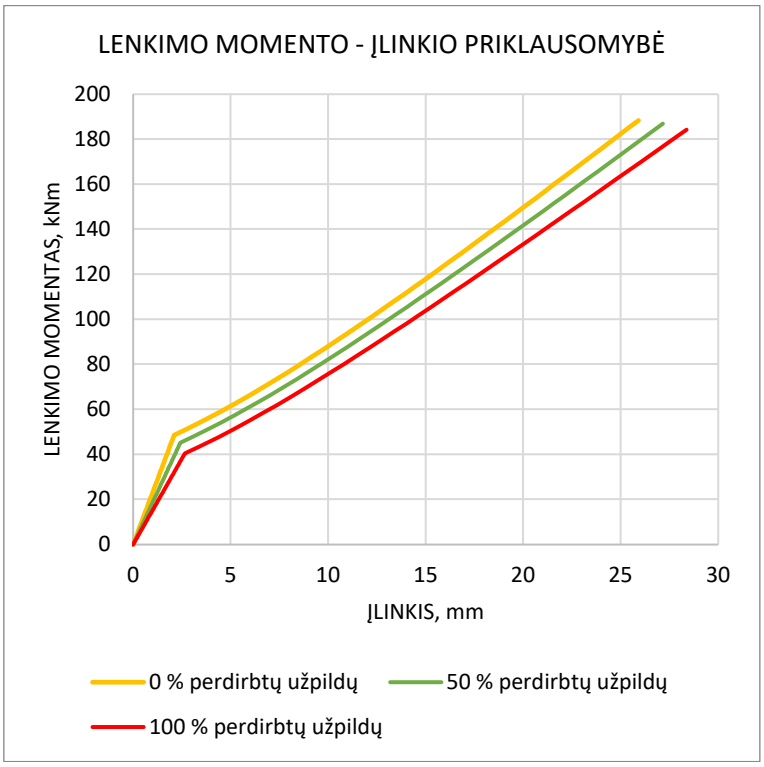
$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L^2$$

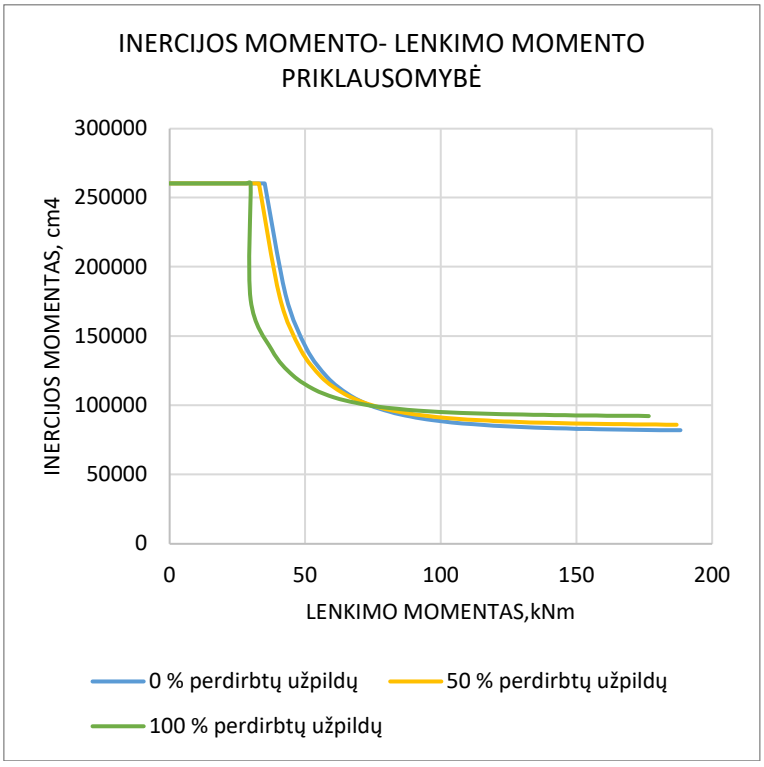


A.3. 9 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė pagal tyrimą, EC2 ir ACI

Bendri rezultatai:



A.3. 10 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio



A.3. 11 pav. Inercijos momento – lenkimo momento priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio

B Priedas. Skaičiavimai pagal 2 metodą

B.1 priedas. Skaičiavimai pagal 2 metodą. (Hamad et al., 2018)

(Hamad et al., 2018). Normaliojo betono bandinys (NFN). Perdirbto betono užpildų kiekis 0%

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.2m$ $h := 0.3m$

Tarpatramis

$L_s := 1.8m$

Atstumas nuo atramos iki apkrovos pridėties:

$a := 0.6m$

Sijos armavimas

$\phi_{rebar} := 20mm$ $n_{rebar} := 2$ $cc := 30mm$

$\phi_{stirrup} := 8mm$

Efektyvusis sijos aukštis:

$$d := h - cc - \phi_{stirrup} - \frac{\phi_{rebar}}{2} = 0.252\,m$$

$$f_{ym} := 632MPa$$

$$A_{s1} := \left[\pi \cdot \left(\frac{\phi_{rebar}}{2}\right)^2\right] \cdot n_{rebar} = 628.319 \cdot mm^2$$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 33.4MPa$

$E_s := 200GPa$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.112$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.112 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.978 \cdot MPa$$

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \quad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \quad \varepsilon_{c1} := \frac{\left[0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31}\right]}{1000} = 2.077 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cu1} := 0.0035 \quad d\varepsilon_{cu} := \frac{(\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1})}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1}$$

$$\varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

Tamprumo modulis:

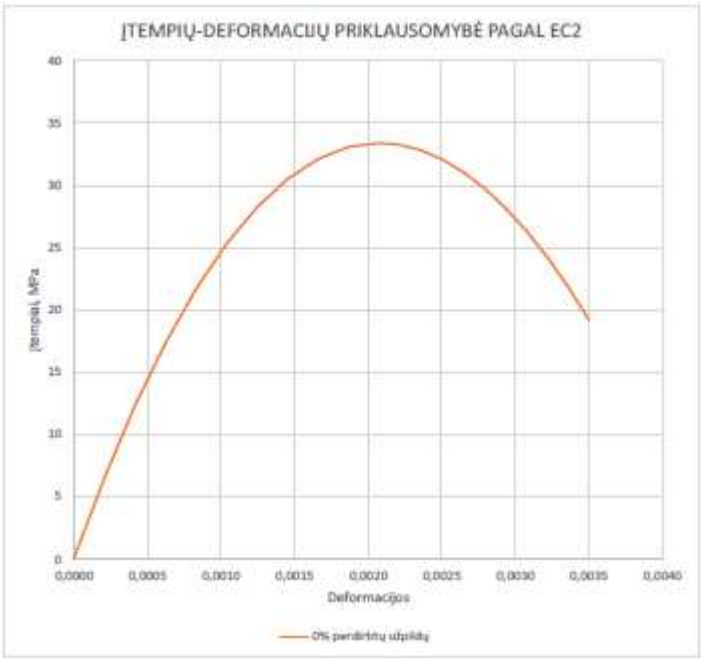
$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 31.59 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.063$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$

$$\sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



B.1.1 pav. Įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal EC2

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 0.00017\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{\varepsilon.c} = 0.087\cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.0019639$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 33.306\cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.997 \qquad k_c := \frac{\varepsilon_{cu1} - y_c}{\varepsilon_{cu1}} = 0.439$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

Gautos reikšmės:

$$x := \frac{f_{ym}\cdot A_{s1}}{\alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b}$$

$x = 0.06\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b\cdot x \qquad F_c = 397.097\cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym}\cdot A_{s1} \qquad F_{sy} = 397.097\cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0\cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$ $M_{R.EC2} = 89.679 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 10.389 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 100.069 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -89.679 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 89.679 \cdot kN \cdot m$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 4.5 \times 10^4 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.15\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 3 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 14.934 \cdot kN \cdot m$

$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 9.336 \cdot kN \cdot m$

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := \frac{3 \cdot L_s^2 - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \rho_I(M_I)$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 6.331 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 3.978 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot\left(x_{II.1}\right)^2\cdot\frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s\cdot\frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.082189127223000339618 \\ -0.12196898656421848211 \end{pmatrix}$$

$x_{II} := 0.082189127223000339618 \cdot m$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b\cdot x_{II}^3}{12} + b\cdot x_{II}\cdot\left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s\cdot A_{s1}\right)\cdot\left(d - x_{II}\right)^2 = 1.517\times 10^4\cdot cm^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_{R.EC2} = 89.679\cdot kN\cdot m \quad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 3.737\cdot kN\cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm.EC2}\cdot I_{II}}$$

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta\cdot\left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm.EC2}\cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II})\cdot\alpha_{II}(M_{II}) + \left(1 - \zeta_{II}(M_{II})\right)\cdot\alpha_I(M_{II})$$

Ilinkis

$$w_{II}(M_{II}) := \frac{3\cdot L_s^2 - 4\cdot a^2}{24}\cdot\alpha(M_{II})$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$\varepsilon_{cu} := 0.003$

Statinis momentas:

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\,d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\,d\varepsilon_{cu}$$

$S_{c.c} = 0.00017\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]d\varepsilon_{cu}$$

$A_{c.c} = 0.087\cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}} \qquad y_c = 0.0019639$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 33.306\cdot MPa$$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 33.4 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 3.583 \cdot MPa$

Tamprumo modulis:

$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 27.163 \cdot GPa$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_c}$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.997$

$d = 0.252\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b} \qquad x = 0.06\,m$$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \qquad F_c = 397.097 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \qquad F_{sy} = 397.097 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x \qquad M_c = 10.389 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d \qquad M_{sy} = 100.069 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -89.679 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 89.679 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_{R.EC2} = 89.679 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 89.679 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 4.5 \times 10^4 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 10.749 \cdot kN \cdot m$$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$$

$M_{I.ACI} := M_0 \,|\, M_0 + dM_{I.ACI} \,|\, M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$$M_y := M_{R.ACI} = 89.679 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 3.946 \cdot kN \cdot m$$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI} \,|\, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} \,|\, M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.363 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.626 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.13355589431766026794 \\ 0.087292363737852939857 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.087292363737852939857 \cdot m$$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 1.699 \times 10^{-4} \, m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \, I_g}$$

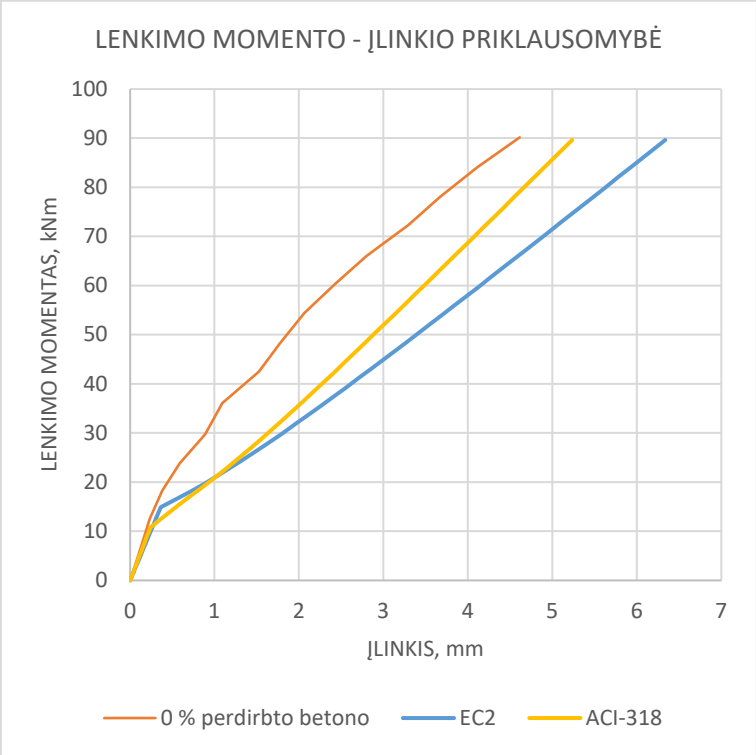
$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L_s^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \, I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L_s^2$$

ACI318, Eurokodo ir eksperimento momento-įlinkio priklausomybės palyginimas



B.1.2 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė

(Hamad et al., 2018). Perdirbto betono bandinys (NF40). Perdirbto betono užpildų kiekis 40%

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.2m$ $h := 0.3m$

Tarpatramis

$L_s := 1.8m$

Atstumas nuo atramos iki apkrovos pridėties:

$a := 0.6m$

Sijos armavimas

$\phi_{rebar} := 20mm$ $n_{rebar} := 2$ $cc := 30mm$

$\phi_{stirrup} := 8mm$

Efektyvusis sijos aukštis:

$$d := h - cc - \phi_{stirrup} - \frac{\phi_{rebar}}{2} = 0.252\,m$$

$$f_{ym} := 632MPa$$

$$A_{s1} := \left[\pi \cdot \left(\frac{\phi_{rebar}}{2}\right)^2\right] \cdot n_{rebar} = 628.319 \cdot mm^2$$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 30.7MPa$

$E_s := 200GPa$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 2.976$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 2.976 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.76 \cdot MPa$$

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \quad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \quad \varepsilon_{c1} := \frac{\left[0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31}\right]}{1000} = 2.024 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cu1} := 0.0035 \quad d\varepsilon_{cu} := \frac{(\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1})}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1}$$

$$\varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

Tamprumo modulis:

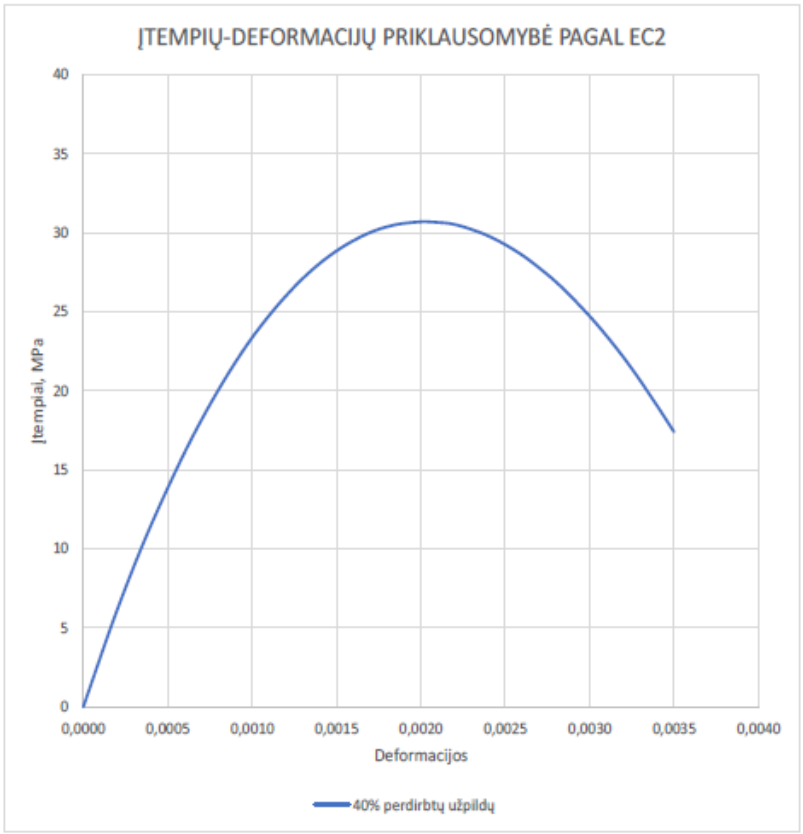
$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 30.801 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.132$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$

$$\sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



B.1.3 pav. Įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal EC2

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 0.00016\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{\varepsilon.c} = 0.081\cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00194759$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 30.662\cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.999 \qquad k_c := \frac{\varepsilon_{cu1} - y_c}{\varepsilon_{cu1}} = 0.444$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

Gautos reikšmės:

$$x := \frac{f_{ym}\cdot A_{s1}}{\alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b}$$

$x = 0.065\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b\cdot x \qquad F_c = 397.097\cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym}\cdot A_{s1}$

$F_c - F_{sy} = 0\cdot kN \qquad F_{sy} = 397.097\cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$ $M_{R.EC2} = 88.663 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 11.405 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 100.069 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -88.663 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 88.663 \cdot kN \cdot m$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 4.5 \times 10^4 \cdot cm^4$

Skerspjūvio svorio centras

$y_t := \frac{h}{2} = 0.15\,m$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$W := \frac{I_I}{y_t} = 3 \times 10^6 \cdot mm^3$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 14.281 \cdot kN \cdot m$

$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 8.927 \cdot kN \cdot m$

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$

Įlinkis

$w_I(M_I) := \frac{3 \cdot L_s^2 - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \rho_I(M_I)$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 6.493 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.08 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot\left(x_{II.1}\right)^2\cdot\frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s\cdot\frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.08302886419326232704 1 \\ -0.12382750270811517616 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.08302886419326232704 1 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b\cdot x_{II}^{\ 3}}{12} + b\cdot x_{II}\cdot\left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s\cdot A_{s1}\right)\cdot\left(d - x_{II}\right)^2 = 1.546\times 10^4\cdot cm^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_{R.EC2} = 88.663\cdot kN\cdot m \quad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 3.719\cdot kN\cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}\left(M_{II}\right) := \frac{M_{II}}{E_{cm.EC2}\cdot I_{II}}$$

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}\left(M_{II}\right) := 1 - \beta\cdot\left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Vidutinis kreivis

$$\rho_I\left(M_{II}\right) := \frac{M_{II}}{E_{cm.EC2}\cdot I_I}$$

$$\alpha_I\left(M_{II}\right) := \rho_I\left(M_{II}\right) \qquad \alpha_{II}\left(M_{II}\right) := \rho_{II}\left(M_{II}\right)$$

$$\alpha\left(M_{II}\right) := \zeta_{II}\left(M_{II}\right)\cdot\alpha_{II}\left(M_{II}\right) + \left(1 - \zeta_{II}\left(M_{II}\right)\right)\cdot\alpha_I\left(M_{II}\right)$$

Ilinkis

$$w_{II}\left(M_{II}\right) := \frac{3\cdot L_s^{\ 2} - 4\cdot a^2}{24}\cdot\alpha\left(M_{II}\right)$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 4.5 \times 10^{4} \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.15\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 3 \times 10^{6} \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 14.281 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 8.927 \cdot kN \cdot m$$

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.ctm}}{20} \qquad M_I := M_0 .. M_0 + dM_I .. M_{cr.ctm}$$

Kreivis:

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := \frac{3 \cdot L_s^{\,2} - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \rho_I(M_I)$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 6.493 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.08 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot\left(x_{II.1}\right)^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.083028864193262327041 \\ -0.12382750270811517616 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.083028864193262327041 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s \cdot A_{s1}\right)\cdot\left(d - x_{II}\right)^2 = 1.546 \times 10^4 \cdot cm^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_{R.EC2} = 88.663 \cdot kN \cdot m \quad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.ctm}}{20} = 3.987 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.ctm}, M_{cr.ctm} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm.EC2} \cdot I_{II}}$$

Pasiskirstymo koeficientas:

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.ctm}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + \left(1 - \zeta_{II}(M_{II})\right) \cdot \alpha_I(M_{II})$$

Ilinkis

$$w_{II}(M_{II}) := \frac{3 \cdot L_s^2 - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \alpha(M_{II})$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$\varepsilon_{cu} := 0.003$

Statinis momentas:

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\,d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\,d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 0.00016\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]d\varepsilon_{cu}$$

$A_{\varepsilon.c} = 0.081\cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00194759$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 30.662\cdot MPa$$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 30.7 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 3.435 \cdot MPa$

Tamprumo modulis:

$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 26.042 \cdot GPa$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_c}$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.999$

$d = 0.252\,m$

$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$

$x = 0.065\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $F_c = 397.097 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $F_{sy} = 397.097 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 11.405 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 100.069 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -88.663 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 88.663 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_{R.EC2} = 88.663 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 88.663 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 4.5 \times 10^4 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 10.306 \cdot kN \cdot m$$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $$dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$$

$M_{I.ACI} := M_0 .. M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 88.663 \cdot kN \cdot m$ $$dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 3.918 \cdot kN \cdot m$$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI} .. M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.68 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.826 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot(x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.13700981836014408463 \\ 0.08875476298336461 6393 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.08875476298336461 6393 \cdot m$$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II}\cdot\left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s \cdot A_{s1}\right)\cdot\left(d - x_{II}\right)^2 = 1.752 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right]\cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$$k := \frac{4}{48}$$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI}\cdot I_g}$$

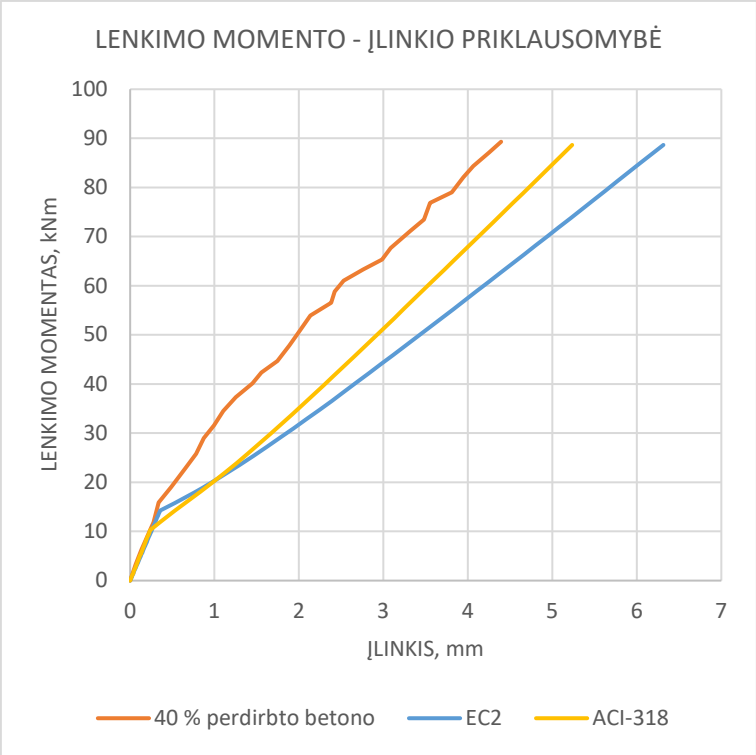
$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k\cdot\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI})\cdot L_s^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI}\, I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k\cdot\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI})\cdot L_s^2$$

ACI318, Eurokodo ir eksperimento momento-įlinkio priklausomybės palyginimas



B.1.4 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė

(Hamad et al., 2018). Perdirbto betono bandinys (NF100). Perdirbto betono užpildų kiekis 100%

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.2m$ $h := 0.3m$

Tarpatramis

$L_s := 1.8m$

Atstumas nuo atramos iki apkrovos pridėties:

$a := 0.6m$

Sijos armavimas

$\phi_{rebar} := 20mm$ $n_{rebar} := 2$ $cc := 30mm$

$\phi_{stirrup} := 8mm$ $\phi_{rebar.2} := 12mm$

Efektyvusis sijos aukštis: $n_{rebar2} := 2$

$$d := h - cc - \phi_{stirrup} - \frac{\phi_{rebar}}{2} = 0.252m$$

$$f_{ym} := 632MPa$$

$$A_{s1} := \left[\pi \cdot \left(\frac{\phi_{rebar}}{2}\right)^2\right] \cdot n_{rebar} = 628.319 \cdot mm^2$$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 29.5MPa$

$E_s := 200GPa$

$$d_2 := cc + \phi_{stirrup} + \frac{\phi_{rebar.2}}{2}$$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 2.912$$

$$A_{s2} := \left[\pi \cdot \left(\frac{\phi_{rebar.2}}{2}\right)^2\right] \cdot n_{rebar2} = 226.195 \cdot mm^2$$

$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 2.912 \cdot MPa$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 4.659 \cdot MPa$$

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \quad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \quad \varepsilon_{c1} := \frac{\left[0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31}\right]}{1000} = 1.999 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cu1} := 0.0035 \quad d\varepsilon_{cu} := \frac{(\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1})}{10}$$

$$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1}$$

$$\varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$$

Tamprumo modulis:

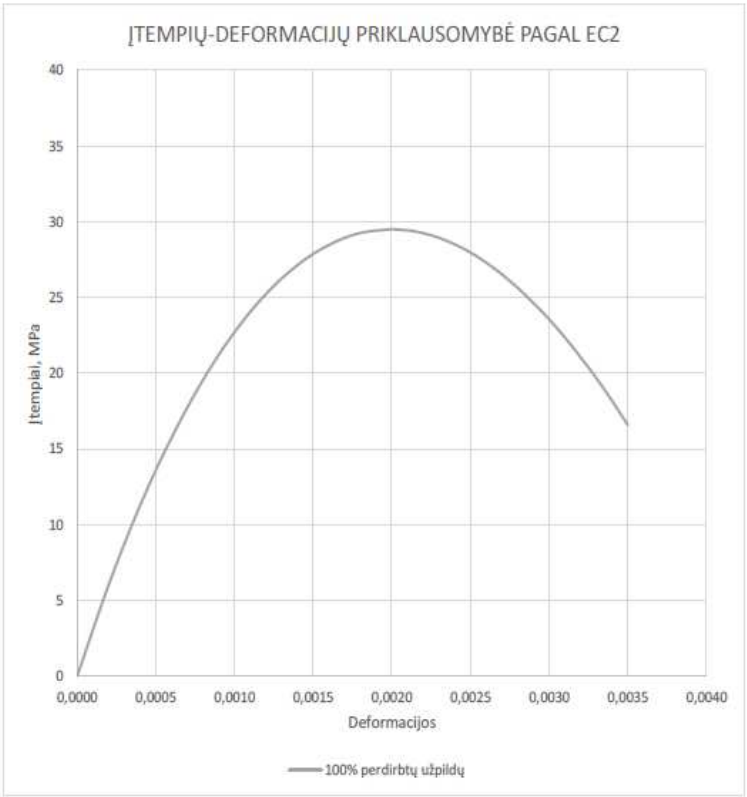
$$E_{cm.EC2} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 30.435 \cdot GPa$$

Itempiu-deformaciju kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm.EC2} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 2.165$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$

$$\sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]$$



B.1.5 pav. Įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal EC2

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 0.00015\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{\varepsilon.c} = 0.078\cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00194004$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 29.478\cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.999 \qquad k_c := \frac{\varepsilon_{cu1} - y_c}{\varepsilon_{cu1}} = 0.446$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

Gautos reikšmės:

$$x := \frac{f_{ym}\cdot A_{s1}}{\alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b}$$

$x = 0.067\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b\cdot x \qquad F_c = 397.097\cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym}\cdot A_{s1} \qquad F_{sy} = 397.097\cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0\cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$ $M_{R.EC2} = 88.148 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 11.921 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 100.069 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -88.148 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 88.148 \cdot kN \cdot m$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 4.5 \times 10^4 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.15\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 3 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 13.976 \cdot kN \cdot m$

$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 8.737 \cdot kN \cdot m$

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := \frac{3 \cdot L_s^2 - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \rho_I(M_I)$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 6.571 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.129 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot\left(x_{II.1}\right)^2\cdot\frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s\cdot\frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.083428181169272314056 \\ -0.12471777192941062706 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.083428181169272314056 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b\cdot x_{II}^3}{12} + b\cdot x_{II}\cdot\left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s\cdot A_{s1}\right)\cdot\left(d - x_{II}\right)^2 = 1.56 \times 10^4 \cdot cm^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_{R.EC2} = 88.148\cdot kN\cdot m \quad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 3.709\cdot kN\cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm.EC2}\cdot I_{II}}$$

Pasiskirstymo koeficientas:

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta\cdot\left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm.EC2}\cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

Ilinkis

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II})\cdot\alpha_{II}(M_{II}) + \left(1 - \zeta_{II}(M_{II})\right)\cdot\alpha_I(M_{II}) \qquad w_{II}(M_{II}) := \frac{3\cdot L_s^2 - 4\cdot a^2}{24}\cdot\alpha(M_{II})$$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 4.5 \times 10^{4} \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.15\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 3 \times 10^{6} \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 13.976 \cdot kN \cdot m$$

$$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 8.737 \cdot kN \cdot m$$

$$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.ctm}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.ctm}$$

Kreivis:

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm.EC2} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := \frac{3 \cdot L_s^{\,2} - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \rho_I(M_I)$$

Supleišėjusios sijos įlinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.EC2}} = 6.571 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.129 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot\left(x_{II.1}\right)^2\cdot\frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s\cdot\frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.083428181169272314056 \\ -0.12471777192941062706 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.083428181169272314056 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b\cdot x_{II}^3}{12} + b\cdot x_{II}\cdot\left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s\cdot A_{s1}\right)\cdot\left(d - x_{II}\right)^2 = 1.56 \times 10^4 \cdot cm^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_{R.EC2} = 88.148\cdot kN\cdot m \quad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.ctm}}{20} = 3.971\cdot kN\cdot m \quad M_{II} := M_{cr.ctm}, M_{cr.ctm} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}\left(M_{II}\right) := \frac{M_{II}}{E_{cm.EC2}\cdot I_{II}}$$

Pasiskirstymo koeficientas:

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

$$\zeta_{II}\left(M_{II}\right) := 1 - \beta\cdot\left(\frac{M_{cr.ctm}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I\left(M_{II}\right) := \frac{M_{II}}{E_{cm.EC2}\cdot I_I}$$

$$\alpha_I\left(M_{II}\right) := \rho_I\left(M_{II}\right) \qquad \alpha_{II}\left(M_{II}\right) := \rho_{II}\left(M_{II}\right)$$

$$\alpha\left(M_{II}\right) := \zeta_{II}\left(M_{II}\right)\cdot\alpha_{II}\left(M_{II}\right) + \left(1 - \zeta_{II}\left(M_{II}\right)\right)\cdot\alpha_I\left(M_{II}\right)$$

Įlinkis

$$w_{II}\left(M_{II}\right) := \frac{3\cdot L_s^2 - 4\cdot a^2}{24}\cdot\alpha\left(M_{II}\right)$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$\varepsilon_{cu} := 0.003$

Statinis momentas:

Statinis momentas:

$$S_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\,d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\,d\varepsilon_{cu}$$

$S_{c.c} = 0.00015\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{c.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]d\varepsilon_{cu}$$

$A_{c.c} = 0.078\cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{c.c}}{A_{c.c}} \qquad y_c = 0.00194004$$

Įtempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 29.478\cdot MPa$$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 29.5 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 3.367 \cdot MPa$

Tamprumo modulis:

$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 25.528 \cdot GPa$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_c}$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.999$

$d = 0.252\,m$

$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b}$

$x = 0.067\,m$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\quad F_c = 397.097 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\quad F_{sy} = 397.097 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentų pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\quad M_c = 11.921 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\quad M_{sy} = 100.069 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -88.148 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 88.148 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_{R.EC2} = 88.148 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 88.148 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 4.5 \times 10^4 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 10.102 \cdot kN \cdot m$$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m$ $\qquad dM_{I.ACI} := \dfrac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0 .. M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 88.148 \cdot kN \cdot m$ $\qquad dM_{II.ACI} := \dfrac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 3.902 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI} .. M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 7.835 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 4.923 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot \left(x_{II.1}\right)^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} -0.1386789345492626134 \\ 0.08945220337189060615 5 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.08945220337189060615 5 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s \cdot A_{s1}\right) \cdot \left(d - x_{II}\right)^2 = 1.778 \times 10^{-4} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e\left(M_{II.ACI}\right) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

$$\rho_{I.ACI}\left(M_{I.ACI}\right) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

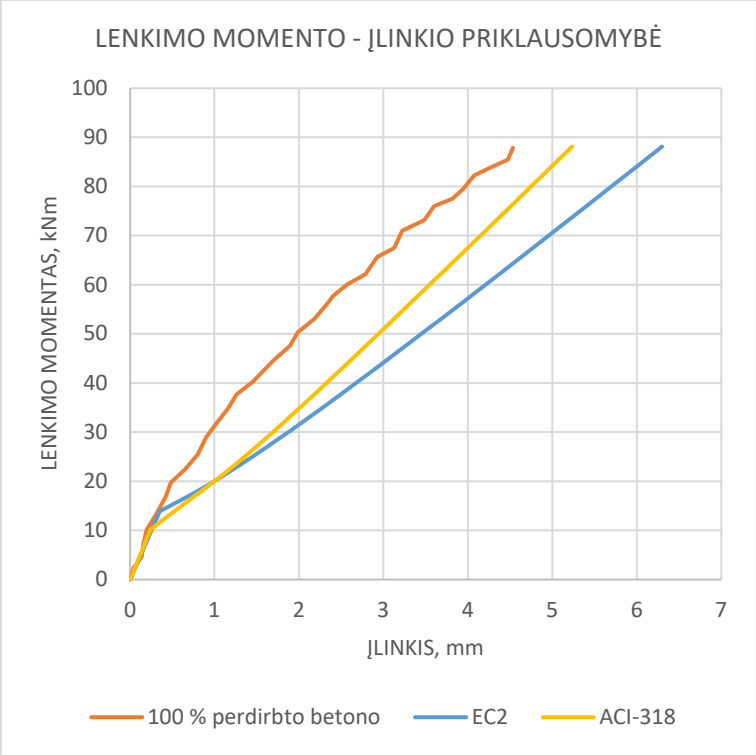
$$w_{I.ACI}\left(M_{I.ACI}\right) := k \cdot \rho_{I.ACI}\left(M_{I.ACI}\right) \cdot L_s^2$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}\left(M_{II.ACI}\right) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e\left(M_{II.ACI}\right)}$$

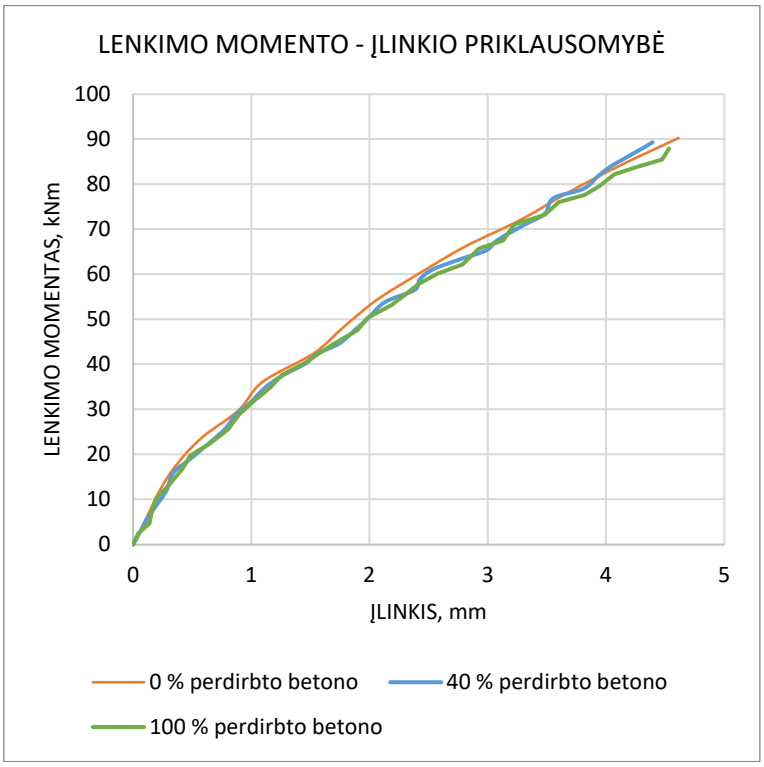
$$w_{II.ACI}\left(M_{II.ACI}\right) := k \cdot \rho_{II.ACI}\left(M_{II.ACI}\right) \cdot L_s^2$$

ACI318, Eurokodo ir eksperimento momento-įlinkio priklausomybės palyginimas



B.1.6 pav. Lenkimo momento įlinkio priklausomybė

Bendri rezultatai:



B.1.7 pav. Lenkimo momento ir įlinkio priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio

B.2 priedas. Skaičiavimai pagal 2 metodą. (Knaack & Kurama, 2015)

(Knaack & Kurama, 2015). Perdirbto betono užpildų kiekis 0%

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.15m$ $h := 0.23m$

Tarpatramis

$L_s := 1.68m$

Atstumas nuo atramos iki apkrovos pridėties:

$a := 0.765m$

Sijos armavimas

$\phi_{rebar} := 16mm$ $n_{rebar} := 2$

$\phi_{stirrup} := 10mm$ $E_s := 197GPa$

Efektyvusis sijos aukštis:

$d := 0.2m$

$f_{ym} := 572MPa$

$$A_{s1} := \left[\pi \cdot \left(\frac{\phi_{rebar}}{2}\right)^2\right] \cdot n_{rebar} = 402.124 \cdot mm^2$$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 37.4MPa$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.299$$

$$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.299 \cdot MPa$$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.277 \cdot MPa$$

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \quad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \quad \varepsilon_{c1} := \frac{\left[0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31}\right]}{1000} = 2.151 \times 10^{-3}$$

$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c} \cdot \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} \cdot \varepsilon_{c1}$

$\varepsilon_{cu1} := 0.0035$ $d\varepsilon_{cu} := \frac{(\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1})}{10}$

$\varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1} \cdot \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} \cdot \varepsilon_{cu1}$

Tamprumo modulis:

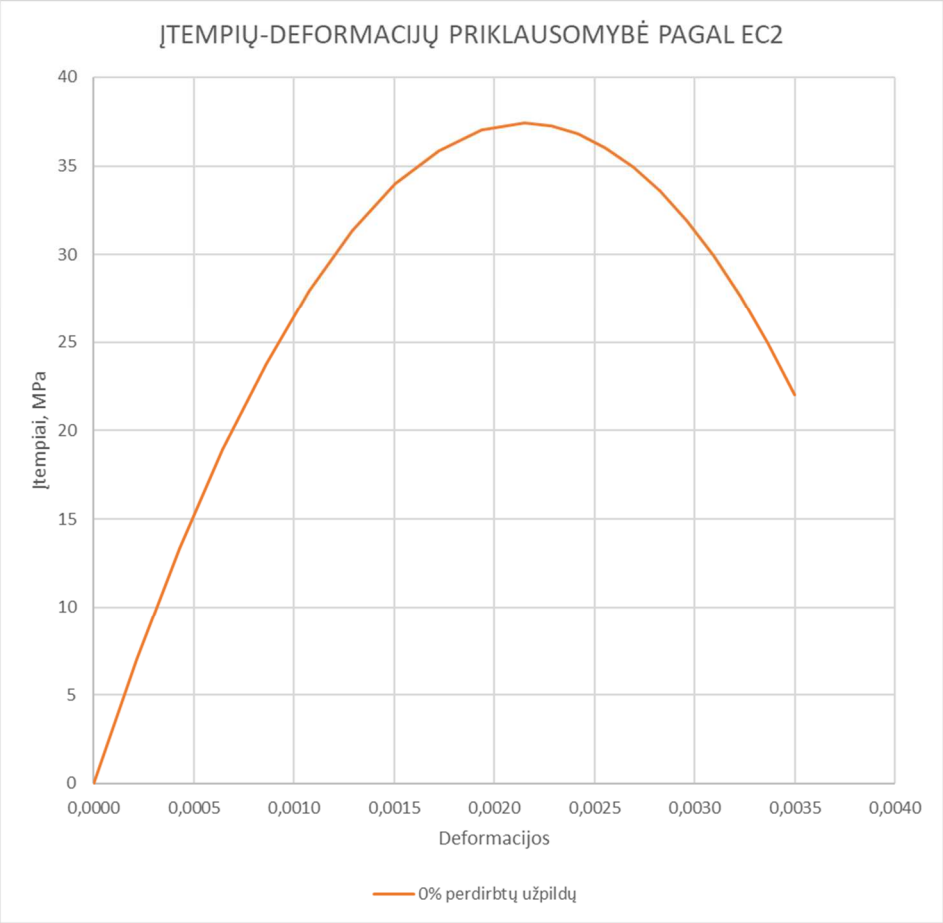
$$E_{cm} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 32.68 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.974$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$

$$\sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$



B.2.1 pav. Įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal EC2

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 0.00019\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_{cu}$$

$A_{\varepsilon.c} = 0.097\cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00198651$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 37.175\cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.994 \qquad k_c := \frac{\varepsilon_{cu1} - y_c}{\varepsilon_{cu1}} = 0.432$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$$x := \frac{f_{ym}\cdot A_{s1}}{\alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b}$$

Gautos reikšmės:

$x = 0.041\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b\cdot x$

$F_c = 230.015\cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym}\cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 230.015\cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0\cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$ $M_{R.EC2} = 41.9 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 4.103 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 46.003 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -41.9 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 41.9 \cdot kN \cdot m$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai

Inercijos momentas:

$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 1.5209 \times 10^4 \cdot cm^4$

Skerspjūvio svorio centras

$y_t := \frac{h}{2} = 0.115\,m$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.322 \times 10^6 \cdot mm^3$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 6.979 \cdot kN \cdot m$

$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 4.363 \cdot kN \cdot m$

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$

Įlinkis

$w_I(M_I) := \frac{3 \cdot L_s^2 - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \rho_I(M_I)$

Supleišėjusios sijos įlinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.028 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 2.424 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot\left(x_{II.1}\right)^2\cdot\frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s\cdot\frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.065847550649653370488 \\ -0.098168242128310019478 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.065847550649653370488 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b\cdot x_{II}^3}{12} + b\cdot x_{II}\cdot\left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s\cdot A_{s1}\right)\cdot\left(d - x_{II}\right)^2 = 5.79 \times 10^3 \cdot cm^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_{R.EC2} = 41.9\cdot kN\cdot m \qquad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 1.746\cdot kN\cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm}\cdot I_{II}}$$

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta\cdot\left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm}\cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II})\cdot\alpha_{II}(M_{II}) + \left(1 - \zeta_{II}(M_{II})\right)\cdot\alpha_I(M_{II})$$

Įlinkis

$$w_{II}(M_{II}) := \frac{3\cdot L_s^2 - 4\cdot a^2}{24}\cdot\alpha(M_{II})$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$\varepsilon_{cu} := 0.003$

Statinis momentas:

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 0.00019\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_{cu} \qquad A_{\varepsilon.c} = 0.097\cdot MPa$$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00198651$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 37.175\cdot MPa$$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 37.4 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 3.792 \cdot MPa$

Tamprumo modulis:

$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 28.743 \cdot GPa$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_c}$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.994$

$d = 0.2\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b} \qquad x = 0.041\,m$$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \qquad F_c = 230.015 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \qquad F_{sy} = 230.015 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x \qquad M_c = 4.103 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d \qquad M_{sy} = 46.003 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -41.9 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 41.9 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_{R.EC2} = 41.90019 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 41.900189 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 1.521 \times 10^{-4} \cdot m^4$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.ACI} := \frac{f_t \cdot I_g}{y_t} = 5.014 \cdot kN \cdot m$$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$$M_0 := 0 kN \cdot m \qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$$

$M_{I.ACI} := M_0 , M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$$M_y := M_{R.ACI} = 41.9 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 1.844 \cdot kN \cdot m$$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI} , M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.854 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 2.756 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot\left(x_{II.1}\right)^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.069302539319264912775 \\ -0.10605032256679515405 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.069302539319264912775 \cdot m$$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralia ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s \cdot A_{s1}\right)\cdot\left(d - x_{II}\right)^2 = 6.372 \times 10^{-5}\, m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e\left(M_{II.ACI}\right) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right]\cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

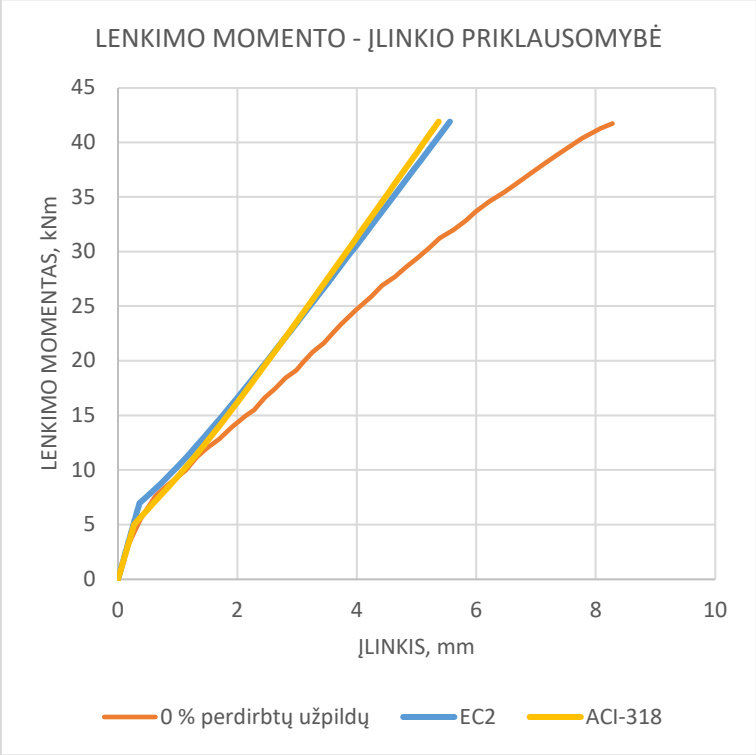
$$\rho_{I.ACI}\left(M_{I.ACI}\right) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} I_g}$$

$$w_{I.ACI}\left(M_{I.ACI}\right) := k \cdot \rho_{I.ACI}\left(M_{I.ACI}\right) \cdot L_s^{\,2}$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}\left(M_{II.ACI}\right) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} I_e\left(M_{II.ACI}\right)}$$

$$w_{II.ACI}\left(M_{II.ACI}\right) := k \cdot \rho_{II.ACI}\left(M_{II.ACI}\right) \cdot L_s^{\,2}$$



B.2.2 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė

(Knaack & Kurama, 2015). Perdirbto betono užpildu kiekis 50%

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.15m$ $h := 0.23m$

Tarpatramis

$L_s := 1.68m$

Atstumas nuo atramos iki apkrovos pridėties:

$a := 0.765m$

Sijos armavimas

$\Phi_{rebar} := 16mm$ $n_{rebar} := 2$

$\Phi_{stirrup} := 10mm$ $E_s := 197GPa$

Efektyvusis sijos aukštis:

$d := 0.2m$

$f_{ym} := 572MPa$

$$A_{s1} := \left[\pi \cdot \left(\frac{\Phi_{rebar}}{2}\right)^2\right] \cdot n_{rebar} = 402.124 \cdot mm^2$$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 36.7MPa$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12 \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10 \cdot MPa}\right)\right] = 3.267$$

$f_{ctm} := f_{ctm.x} \cdot 1MPa = 3.267 \cdot MPa$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000 \cdot m}\right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.227 \cdot MPa$$

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c0.c} := 0.000 \quad d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10} \quad \varepsilon_{c1} := \frac{\left[0.7 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31}\right]}{1000} = 2.139 \times 10^{-3}$$

$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c}.. \varepsilon_{c1}$

$\varepsilon_{cu1} := 0.0035 \quad d\varepsilon_{cu} := \frac{(\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1})}{10}$

$\varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu}.. \varepsilon_{cu1}$

Tamprumo modulis:

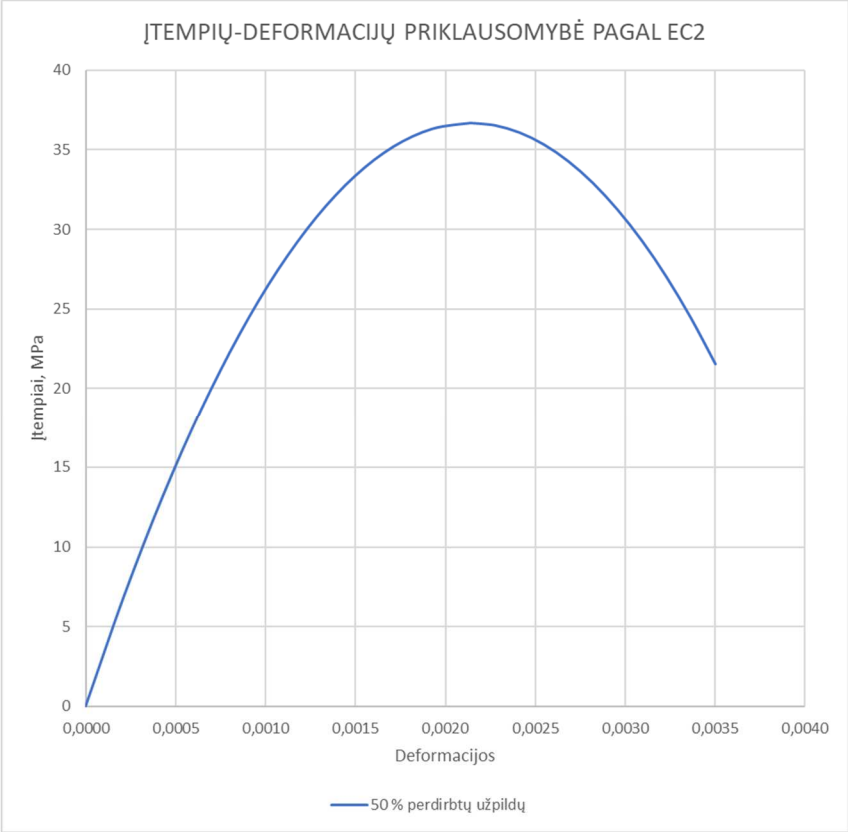
$$E_{cm} := 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3} \cdot GPa = 32.495 \cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.988$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$

$$\sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$



B.2.3 pav. Įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal EC2

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 0.00019\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_{cu} \qquad A_{\varepsilon.c} = 0.095\cdot MPa$$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00198267$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 36.503\cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.995 \qquad k_c := \frac{\varepsilon_{cu1} - y_c}{\varepsilon_{cu1}} = 0.434$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

Gautos reikšmės:

$$x := \frac{f_{ym}\cdot A_{s1}}{\alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b}$$

$x = 0.042\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b\cdot x$

$F_c = 230.015\cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym}\cdot A_{s1}$

$F_{sy} = 230.015\cdot kN$

$F_c - F_{sy} = -2.91\times 10^{-14}\cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$ $M_{R.EC2} = 41.814 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 4.189 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 46.003 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -41.814 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 41.814 \cdot kN \cdot m$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 1.5209 \times 10^4 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.115\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.322 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 6.913 \cdot kN \cdot m$

$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 4.321 \cdot kN \cdot m$

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := \frac{3 \cdot L_s^2 - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \rho_I(M_I)$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.062 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 2.438 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot(x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.065997514415957676193 \\ -0.098501925734155166116 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.065997514415957676193 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b \cdot x_{II}^3}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 5.815 \times 10^3 \cdot cm^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_{R.EC2} = 41.814 \cdot kN \cdot m \quad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 1.745 \cdot kN \cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_{II}}$$

Pasiskirstymo koeficientas:

$$\zeta_{II}(M_{II}) := 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

Vidutinis kreivis

$$\rho_I(M_{II}) := \frac{M_{II}}{E_{cm} \cdot I_I}$$

$$\alpha_I(M_{II}) := \rho_I(M_{II}) \qquad \alpha_{II}(M_{II}) := \rho_{II}(M_{II})$$

$$\alpha(M_{II}) := \zeta_{II}(M_{II}) \cdot \alpha_{II}(M_{II}) + (1 - \zeta_{II}(M_{II})) \cdot \alpha_I(M_{II})$$

[linkis

$$w_{II}(M_{II}) := \frac{3 \cdot L_s^2 - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \alpha(M_{II})$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$\varepsilon_{cu} := 0.003$

Statinis momentas:

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\,d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\,d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 0.00019\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]d\varepsilon_{cu}$$

$A_{\varepsilon.c} = 0.095\cdot MPa$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00198267$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}-\left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1+(k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 36.503\cdot MPa$$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 36.7 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 3.756 \cdot MPa$

Tamprumo modulis:

$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 28.473 \cdot GPa$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_c}$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.995$

$d = 0.2\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b} \qquad x = 0.042\,m$$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x$ $\qquad F_c = 230.015 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1}$ $\qquad F_{sy} = 230.015 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = -0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $\qquad M_c = 4.189 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $\qquad M_{sy} = 46.003 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -41.814 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 41.814 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_{R.EC2} = 41.813997 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 41.813997 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 1.521 \times 10^4 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 4.967 \cdot kN \cdot m$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0, M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 41.814 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 1.842 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI}, M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.919 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 2.782 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot\left(x_{II.1}\right)^2\cdot\frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s\cdot\frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.069561615967428000149 \\ -0.1066581995527599389 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.069561615967428000149 \cdot m$$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b\cdot x_{II}^{\ 3}}{12} + b\cdot x_{II}\cdot\left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s\cdot A_{s1}\right)\cdot\left(d - x_{II}\right)^2 = 6.417\times 10^{-5}\, m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e\left(M_{II.ACI}\right) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right]\cdot I_{cr}$$

Įlinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

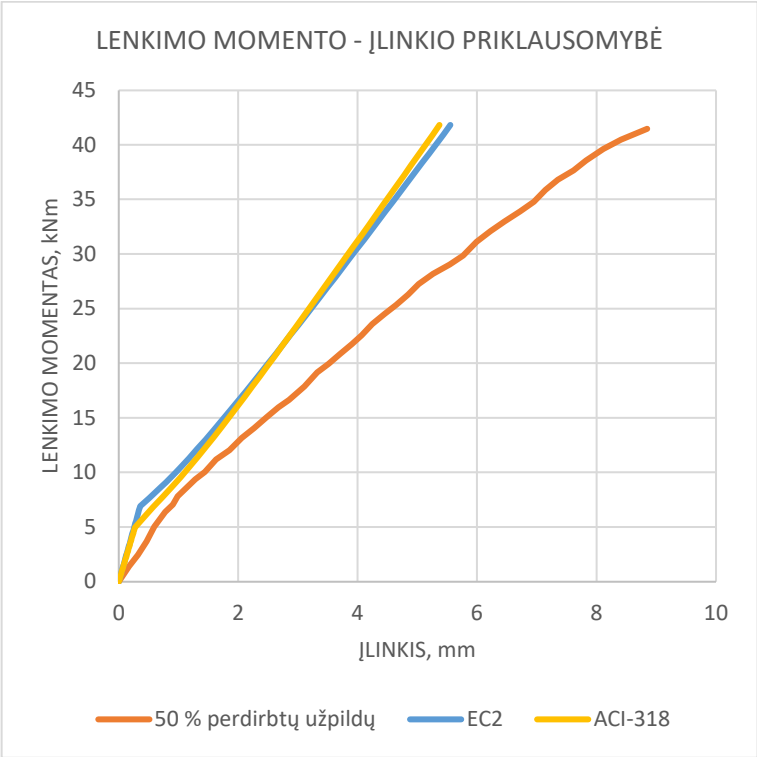
$$\rho_{I.ACI}\left(M_{I.ACI}\right) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI}\cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}\left(M_{I.ACI}\right) := k\cdot\rho_{I.ACI}\left(M_{I.ACI}\right)\cdot L_s^{\ 2}$$

Įlinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

$$\rho_{II.ACI}\left(M_{II.ACI}\right) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI}\, I_e\left(M_{II.ACI}\right)}$$

$$w_{II.ACI}\left(M_{II.ACI}\right) := k\cdot\rho_{II.ACI}\left(M_{II.ACI}\right)\cdot L_s^{\ 2}$$



B.2.4 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė

(Knaack & Kurama, 2015). Perdirbto betono užpildų kiekis 100%

- Sijos geometrijos ir armavimo parametrai:

$b := 0.15m$ $h := 0.23m$

Tarpatramis

$L_s := 1.68m$

Atstumas nuo atramos iki apkrovos pridėties:

$a := 0.765m$

Sijos armavimas

$\Phi_{rebar} := 16mm$ $n_{rebar} := 2$

$\Phi_{stirrup} := 10mm$ $E_s := 197GPa$

Efektyvusis sijos aukštis:

$d := 0.2m$

$f_{ym} := 572MPa$

$$A_{s1} := \left[\pi\cdot\left(\frac{\Phi_{rebar}}{2}\right)^2\right]\cdot n_{rebar} = 402.124\cdot mm^2$$

- Betono vidutinis gniuždomasis stipris:

$f_{cm} := 37.5MPa$

- Pleišėjimo momentas

$$f_{ctm.x} := 2.12\cdot\ln\left[1+\left(\frac{f_{cm}}{10\cdot MPa}\right)\right] = 3.303$$

$f_{ctm} := f_{ctm.x}\cdot 1MPa = 3.303\cdot MPa$

$$f_{ctm.fl} := \max\left[\left(1.6-\frac{h}{1000\cdot m}\right)\cdot f_{ctm}, f_{ctm}\right] = 5.284\cdot MPa$$

Deformacijos:

$$\varepsilon_{c1} := \frac{\left[0.7\cdot\left(\frac{f_{cm}}{MPa}\right)^{0.31}\right]}{1000} = 2.153\times 10^{-3}$$

$\varepsilon_{c0.c} := 0.000$

$d\varepsilon_{c.c} := \frac{\varepsilon_{c1}}{10}$

$\varepsilon_c := \varepsilon_{c0.c}, \varepsilon_{c0.c} + d\varepsilon_{c.c} .. \varepsilon_{c1}$

$\varepsilon_{cu1} := 0.0035$ $d\varepsilon_{cu} := \frac{(\varepsilon_{cu1}-\varepsilon_{c1})}{10}$

$\varepsilon_{cu} := \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{c1} + d\varepsilon_{cu} .. \varepsilon_{cu1}$

Tamprumo modulis:

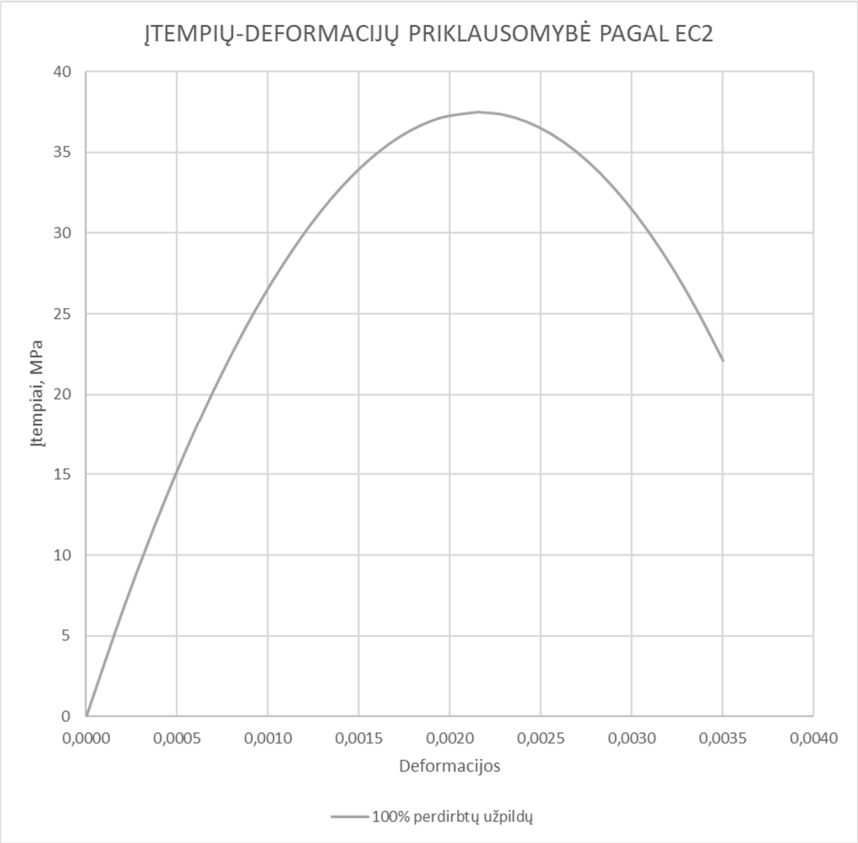
$$E_{cm} := 22\cdot\left(\frac{f_{cm}}{10MPa}\right)^{0.3}\cdot GPa = 32.706\cdot GPa$$

Įtempių-deformacijų kreivės:

$$k := 1.05 \cdot E_{cm} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} = 1.972$$

$$\sigma_{c.EC2}(\varepsilon_c) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$

$$\sigma_{cu.EC2}(\varepsilon_{cu}) := f_{cm} \cdot \left[\frac{k \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}} \right]$$



B.2.5 pav. Įtempių ir deformacijų priklausomybė pagal EC2

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\, d\varepsilon_{cu}$$

$S_{\varepsilon.c} = 0.00019\cdot MPa$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_{cu} \qquad A_{\varepsilon.c} = 0.097\cdot MPa$$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00198705$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 37.271\cdot MPa$$

$$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_{cm}} = 0.994 \qquad k_c := \frac{\varepsilon_{cu1} - y_c}{\varepsilon_{cu1}} = 0.432$$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

Gautos reikšmės:

$$x := \frac{f_{ym}\cdot A_{s1}}{\alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b}$$

$x = 0.041\,m$

Jėgų pusiausvyra:

$F_c := \alpha_c\cdot f_{cm}\cdot b\cdot x$ $\qquad F_c = 230.015\cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym}\cdot A_{s1}$ $\qquad F_{sy} = 230.015\cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0\cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.EC2} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$ $M_{R.EC2} = 41.912 \cdot kN \cdot m$

- Momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x$ $M_c = 4.091 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d$ $M_{sy} = 46.003 \cdot kN \cdot m$

Pasitikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -41.912 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.EC2} = 41.912 \cdot kN \cdot m$

- **ĮLINKIO SKAIČIAVIMAS**

Nesupleišėjusios sijos įlinkis:

Nesupleišėjusio skerspjūvio parametrai:

Inercijos momentas:

$$I_I := \frac{b \cdot h^3}{12} = 1.5209 \times 10^4 \cdot cm^4$$

Skerspjūvio svorio centras

$$y_t := \frac{h}{2} = 0.115\,m$$

Nesupleišėjusio skerspjūvio atsparumo momentas

$$W := \frac{I_I}{y_t} = 1.322 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Pleišėjimo momentas

$M_{cr.fl} := f_{ctm.fl} \cdot W = 6.989 \cdot kN \cdot m$

$M_{cr.ctm} := f_{ctm} \cdot W = 4.369 \cdot kN \cdot m$

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_I := \frac{M_{cr.fl}}{20} \qquad M_I := M_0, M_0 + dM_I .. M_{cr.fl}$

Kreivis:

$$\rho_I(M_I) := \frac{M_I}{E_{cm} \cdot I_I}$$

Įlinkis

$$w_I(M_I) := \frac{3 \cdot L_s^2 - 4 \cdot a^2}{24} \cdot \rho_I(M_I)$$

Supleišėjusios sijos ilinkis

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.023 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 2.422 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2}\cdot\left(x_{II.1}\right)^2\cdot\frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right)\cdot\alpha_s\cdot\frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.06582637611134339872 \\ -0.09812118686750106843 9 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.06582637611134339872 \cdot m$$

Supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{II} := \frac{b\cdot x_{II}^3}{12} + b\cdot x_{II}\cdot\left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + \left(\alpha_s\cdot A_{s1}\right)\cdot\left(d - x_{II}\right)^2 = 5.787 \times 10^3 \cdot cm^4$$

Supleišėjusio skerspjūvio kreivis:

$$M_y := M_{R.EC2} = 41.912\cdot kN\cdot m \quad dM_{II} := \frac{M_y - M_{cr.fl}}{20} = 1.746\cdot kN\cdot m \qquad M_{II} := M_{cr.fl}, M_{cr.fl} + dM_{II} .. M_y$$

$$\rho_{II}\left(M_{II}\right) := \frac{M_{II}}{E_{cm}\cdot I_{II}}$$

Pasiskirstymo koeficientas:

Koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę:

$\beta := 1$ trumpalaikė apkrova

$$\zeta_{II}\left(M_{II}\right) := 1 - \beta\cdot\left(\frac{M_{cr.fl}}{M_{II}}\right)^2$$

Vidutinis kreivis

$$\rho_I\left(M_{II}\right) := \frac{M_{II}}{E_{cm}\cdot I_I}$$

$$\alpha_I\left(M_{II}\right) := \rho_I\left(M_{II}\right) \qquad \alpha_{II}\left(M_{II}\right) := \rho_{II}\left(M_{II}\right)$$

$$\alpha\left(M_{II}\right) := \zeta_{II}\left(M_{II}\right)\cdot\alpha_{II}\left(M_{II}\right) + \left(1 - \zeta_{II}\left(M_{II}\right)\right)\cdot\alpha_I\left(M_{II}\right)$$

Ilinkis

$$w_{II}\left(M_{II}\right) := \frac{3\cdot L_s^2 - 4\cdot a^2}{24}\cdot\alpha\left(M_{II}\right)$$

PALYGINIMAS SU ACI-318M-11

Ribinė gniuždomoji betono deformacija:

$$\varepsilon_{cu} := 0.003$$

Statinis momentas:

Statinis momentas:

$$S_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_c\, d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right]\cdot\varepsilon_{cu}\, d\varepsilon_{cu}$$

$$S_{\varepsilon.c} = 0.00019\cdot MPa$$

Figūros plotas:

$$A_{\varepsilon.c} := \int_0^{\varepsilon_{c1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_c + \int_{\varepsilon_{c1}}^{\varepsilon_{cu1}} f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c1}}}\right] d\varepsilon_{cu} \qquad A_{\varepsilon.c} = 0.097\cdot MPa$$

Figūros svorio centras:

$$y_c := \frac{S_{\varepsilon.c}}{A_{\varepsilon.c}} \qquad y_c = 0.00198705$$

Itempiai figūros svorio centre:

$$\sigma_{c.yc}(y_c) := f_{cm}\cdot\left[\frac{k\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + (k-2)\cdot\frac{y_c}{\varepsilon_{c1}}}\right] \qquad \sigma_{c.yc}(y_c) = 37.271\cdot MPa$$

Laikomosios galios apskaičiavimas:

Pleišėjimo modulis (tempiamasis betono stipris)

$f_c := f_{cm} = 37.5 \cdot MPa$

$\lambda := 1$ normaliojo svorio betonas

$f_r := 0.62 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 3.797 \cdot MPa$

Tamprumo modulis:

$E_{cm.ACI} := 4700 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{MPa}} \cdot MPa = 28.782 \cdot GPa$

- Neutraliosios ašies padėties apskaičiavimas

$\alpha_c := \frac{\sigma_{c.yc}(y_c)}{f_c}$

Gautos reikšmės:

$\alpha_c = 0.994$

$d = 0.2\,m$

$$x := \frac{f_{ym} \cdot A_{s1}}{\alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b} \qquad x = 0.041\,m$$

- Jėgų pusiausvyra

$F_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \qquad F_c = 230.015 \cdot kN$

$F_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \qquad F_{sy} = 230.015 \cdot kN$

$F_c - F_{sy} = 0 \cdot kN$

- Laikomoji galia:

$M_{R.ACI} := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot (d - k_c \cdot x)$

- Lenkimo momentu pusiausvyra

$M_c := \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b \cdot x \cdot k_c \cdot x \qquad M_c = 4.091 \cdot kN \cdot m$

$M_{sy} := f_{ym} \cdot A_{s1} \cdot d \qquad M_{sy} = 46.003 \cdot kN \cdot m$

Patikrinimas:

$M_c - M_{sy} = -41.912 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 41.912 \cdot kN \cdot m$

Palyginimas:

$M_{R.EC2} = 41.9122203 \cdot kN \cdot m$

$M_{R.ACI} = 41.9122203 \cdot kN \cdot m$

Inercijos momentas:

$I_g := I_I = 1.521 \times 10^4 \cdot cm^4$

Pleišėjimo momentas

$$M_{cr.ACI} := \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} = 5.021 \cdot kN \cdot m$$

Iki pleišėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_0 := 0kN \cdot m \qquad dM_{I.ACI} := \frac{M_{cr.ACI}}{20}$

$M_{I.ACI} := M_0 .. M_0 + dM_{I.ACI} .. M_{cr.ACI}$

Nuo pleišėjimo iki armatūros tekėjimo veikiantis lenkimo momentas:

$M_y := M_{R.ACI} = 41.912 \cdot kN \cdot m \qquad dM_{II.ACI} := \frac{M_y - M_{cr.ACI}}{20} = 1.845 \cdot kN \cdot m$

$M_{II.ACI} := M_{cr.ACI} .. M_{cr.ACI} + dM_{II.ACI} .. M_y$

Skerspjūvio redukavimas (armatūros pakeitimas betonu)

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm.ACI}} = 6.845 \qquad A_{eq} := \alpha_s \cdot A_{s1} = 2.752 \times 10^{3} \cdot mm^2$$

Suplešėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies padėtis (iš jėgų pusiausvyros Fc=Fs)

$$\frac{1}{2} \cdot (x_{II.1})^2 \cdot \frac{b}{1m} - \left(\frac{d}{1m} - x_{II.1}\right) \cdot \alpha_s \cdot \frac{A_{s1}}{1m^2} \rightarrow \begin{pmatrix} 0.06926597764889439 3607 \\ -0.1059647311437727 1693 \end{pmatrix}$$

$$x_{II} := 0.06926597764889439 3607 \cdot m$$

Suplešėjusio skerspjūvio inercijos momentas apie neutralią ašį

$$I_{cr} := \frac{b \cdot x_{II}^{3}}{12} + b \cdot x_{II} \cdot \left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + (\alpha_s \cdot A_{s1}) \cdot (d - x_{II})^2 = 6.366 \times 10^{-5} m^4$$

Efektyvusis inercijos momentas:

$$I_e(M_{II.ACI}) := \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3 \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr.ACI}}{M_{II.ACI}}\right)^3\right] \cdot I_{cr}$$

Ilinkis iki pleišėjimo :

$k := \frac{4}{48}$ koncentruota apkrova apkrautai sijai

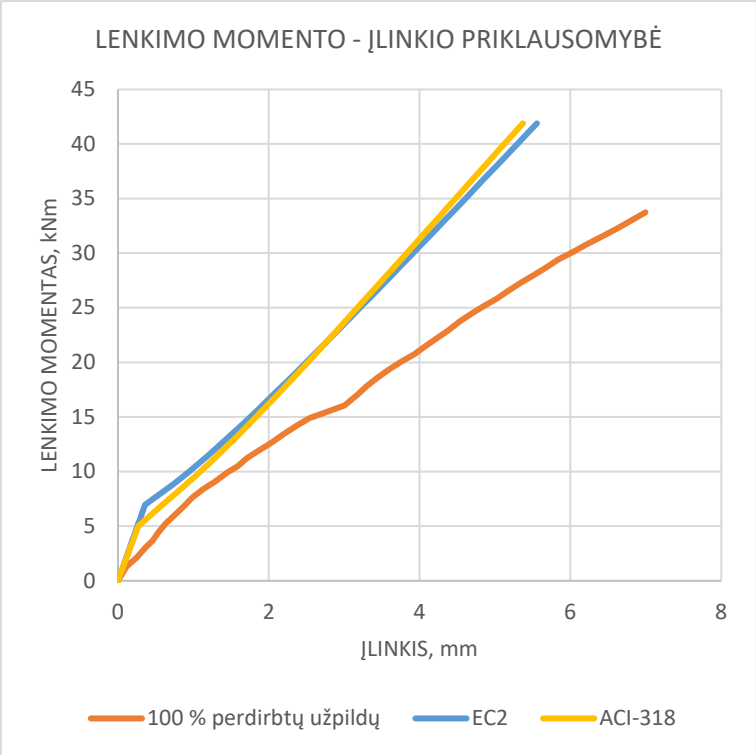
$$\rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := \frac{M_{I.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_g}$$

$$w_{I.ACI}(M_{I.ACI}) := k \cdot \rho_{I.ACI}(M_{I.ACI}) \cdot L_s^2$$

Ilinkis nuo pleišėjimo pradžios iki armatūros tekėjimo:

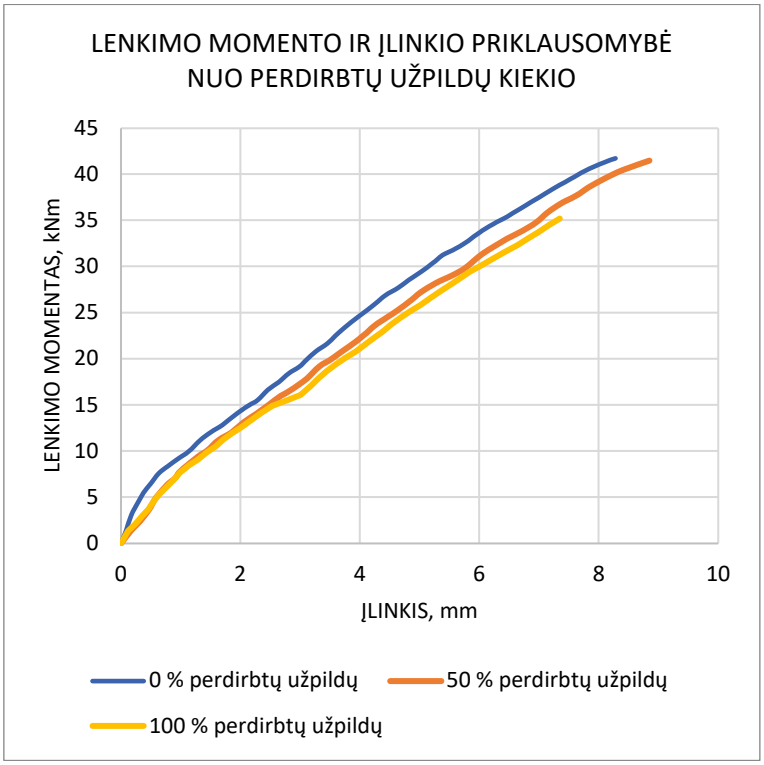
$$\rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := \frac{M_{II.ACI}}{E_{cm.ACI} \cdot I_e(M_{II.ACI})}$$

$$w_{II.ACI}(M_{II.ACI}) := k \cdot \rho_{II.ACI}(M_{II.ACI}) \cdot L_s^2$$



B.2.6 pav. Lenkimo momento – įlinkio priklausomybė

Bendri rezultatai:



B.2.7 pav. Lenkimo momento ir įlinkio priklausomybė nuo perdirbtų užpildų kiekio