VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Liudas Pranevičius

LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PROJEKTAVIMO NORMŲ TEMPIAMOJO SUSTANDĖJIMO MODELIŲ LYGINAMOJI ANALIZĖ

COMPARATIVE ANALYSIS OF TENSION – STIFFENING MODELS FOR FLEXURAL MEMBERS FROM REINFORCED CONCREDE DESIGN CODES

Baigiamasis magistro darbas

Statybos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Specialiųjų statinių specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2015

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Tiltų ir specialiųjų statinių katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas	**Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų projektavimo normų tempiamojo sustandėjimo modelių lyginamoji analizė**
Autorius	**Liudas Pranevičius**
Vadovas	**dr. Viktor Gribniak**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Rengiant šį darbą susipažinta su pasaulyje taikomomis gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normomis. Taip pat susipažinta su tempiamojo sustandėjimo tyrimo metodika, sukurta VGTU tiltų ir specialiųjų statinių katedroje. Naudojant reprezentatyvią lenkiamųjų gelžbetoninių elementų parametrų imtį, pagal Europos EN 1992-1-1, Rusijos SP 52-101, JAV ACI 318-11 bei Kinijos GB 500-10 projektavimo normas apskaičiuotos trumpalaikės momentų ir kreivių diagramos. Naudojant VGTU sukurtą fizikinių modelių kūrimo metodiką, paremtą vidutinių plyšių modeliu ir plokščiųjų pjūvių hipoteze, iš apskaičiuotų momentų ir kreivių diagramų, gautos tempiamosios zonos betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos. Nustatyti pagrindiniai veiksniai, lemiantys tempiamojo sustandėjimo rezultatų pokyčius. Įvertinus galimybes tempiamojo sustandėjimo skaitinės realizacijos atitinkančios normų modelius, nustatyta, kad įmanoma pasiūlyti universalią tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų analitinę išraišką, atitinkančią Europos normas. Kaip pavyzdys, pasiūlyta nesudėtinga empirinė išraiška aproksimuojanti EN 1992-1-1 tempiamojo betono įtempių ir deformacijų krentančiąją diagramos dalį.

Prasminiai žodžiai: tempiamasis sustandėjimas, įtempių ir deformacijų priklausomybės, gelžbetoniniai elementai, įtempiai, deformacijos, kreiviai, vidutinio pleišėjimo koncepcija, projektavimo normos.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Bridges and Special Structures

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title	**Comparative analysis of tension-stiffening models for flexural members from reinforced concrete design codes**
Author	**Liudas Pranevičius**
Academic supervisor	**dr. Viktor Gribniak**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

Preparing this thesis, analysis of code provisions for design of reinforced concrete structures was performed. Tension stiffening research methodology, developed at VGTU Department of bridges and special structures was investigated. Moment-curvature diagrams were calculated using European EN 1992-1-1, Russian SP 52-101, USA ACI 318-11 and Chinese GB 500-10 design codes with the help of representative set of parameters. Using the constitutive modeling methodology, average stress-average strain tension stiffening diagrams were derived for the tensile concrete. A parametric analysis of the derived stress-strain diagrams was carried out identifying main factors, which contribute to the tension stiffening modeling results. A possibility to create a numerical model of tension stiffening was evaluated. It appeared that a versatile model can be developed for the European code. An example of such model was provided.

Keywords: tension stiffening, stress-strain relationship, reinforced concrete elements, stresses, deformations, curvatures, average cracking, design codes.

TURINYS

ĮVADAS 8

1. GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ DEFORMACIJŲ APSKAIČIAVIMO METODŲ IR MODELIŲ APŽVALGA 11

1.1. Medžiagų modeliai 11

1.1.1. Gniuždomasis betonas 11

1.1.2. Tempiamasis betonas 13

1.1.3. Armatūra 16

1.1.4. Armatūros ir tempiamojo betono sąveika 16

1.1.5. Supleišėjusio tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės 17

1.2. Gelžbetoninių elementų deformacijų apskaičiavimo metodai 21

1.2.1. Tempiamųjų elementų deformacijų apskaičiavimas bei įtempių ir deformacijų diagramų nustatymas pagal Europos normų EN 1992 – 1 – 1 metodiką 21

1.2.2. Lenkiamųjų elementų momentų – kreivių apskaičiavimas pagal Europos normų 1992 – 1 – 1 metodiką 22

1.2.3. Lenkiamųjų elementų momentų – kreivių apskaičiavimas pagal Rusijos normų SP 52 – 101 metodiką 24

1.2.4. Lenkiamųjų elementų momentų – kreivių apskaičiavimas pagal JAV normų ACI 318-11 metodiką. Branson efektyvusis intercijos momentas 25

1.2.5. Lenkiamųjų elementų momentų – kreivių apskaičiavimas pagal Kinijos projektavimo normas 25

1.3. Pirmojo skyriaus išvados ir uždaviniai 28

2. ATVIRKŠTINIO UŽDAVINIO SPRENDIMAS NAUDOJANT MOMENTŲ IR KREIVIŲ PRIKLAUSOMYBES, APSKAIČIUOTAS PAGAL NORMŲ REKOMENDACIJAS 29

2.1. Modeliavimo principai 29

2.2. Atvirkštinio uždavinio sprendimo metoto aprašymas 29

2.3. Geometrinės ir pusiausvyros lygtys. 30

2.4. Betono vidutinių įtempių ir deformacijų diagramų nustatymo metodas, taikant lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramas. 31

2.5. Skaitinis eksperimentas 34

2.5.1. Momentų ir kreivių diagramos pagal EN 1992 – 1 – 1 projektavimo normas 34

2.5.2. Momentų ir kreivių diagramos pagal Rusijos SP 52 – 101 projektavimo normas 35

2.5.3. Momentų ir kreivių diagramos pagal JAV ACI 318-11 projektavimo normas 37

2.5.4. Momentų ir kreivių diagramos pagal Kinijos projektavimo normas 38

2.6. Antrojo skyriaus išvados ir rezultatai 39

3. ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ DIAGRAMŲ PALYGINAMOJI ANALIZĖ 40
3.1. Supleišėjusio lenkiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos 40
3.2. Įtempių ir deformacijų diagramos pagal Europos EN 1992 – 1 – 1 projektavimo normas....41
3.3. Įtempių ir deformacijų diagramos pagal Rusijos SP 52 – 101 projektavimo normas.....42
3.4. Įtempių ir deformacijų diagramos pagal JAV ACI 318-11 projektavimo normas 44
3.5. Įtempių ir deformacijų diagramos pagal Kinijos GB50010-2002 projektavimo normas.....47
3.6. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos modeliavimas 49
3.7. Trečiojo skyriaus rezultatai ir išvados.....50
DARBO REZULTATAI IR BENDROSIOS IŠVADOS 52
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....55

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Gniuždomojo betono įtempių – deformacijų diagrama (Girdžius 2011) 12
1.2 pav. Tempimo bandymai tiesioginio tempimo (a); lenkimo (b); dvipusio spaudimo (c); skėlimo (d) (Gribniak 2009).....14
1.3 pav. Tempimo bandymas (a); betono elgsena kontroliuojamos apkrovos (b) ir kontroliuojamų deformacijų (c) tempimo bandyme; plyšių lokalizavimosi įtaka bandymo rezultatams (d) (Gribniak 2009) 15
1.4 pav. (a) bandinio ilgio įtaka įtempių ir deformacijų diagramai; (b) betono trapumo įtaka apkrovos ir deformacijų diagramai (Gribniak 2009) 16
1.5 pav. Armatūros įtempių ir deformacijų diagrama (*Girdžius 2011)* 16
1.6 pav. Tempiamojo betono vidutinių įtempių ir deformacijų diagrama (G. Kaklauskas *et al.* 2006*)* 18
2.1 pav. Skirtingais atstumais nuo armatūros nutolusių tempiamojo betono sluoksnių vidutinės įtempių ir deformacijų diagramos (Girdžius 2011) 30
2.2 pav. Lenkiamojo gelžbetoninio elemento skerspjūvio deformacijos ir įražos: 31
(a) dvipusiai armuoto elemento skerspjūvis; 31
(b) deformacijų diagrama; (c) vidaus jėgos ir išorės momentas (Girdžius 2011) 31
2.3 pav.Momentų ir deformacijų diagramos kraštiniams gniuždomojo ir tempiamojo betono sluoksniams bei apskaičiuotosios įtempių ir deformacijų kreivės gniuždomajam ir tempiamajam betonui (Girdžius 2011) 32
2.5 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0% 35
2.6 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0% 35
2.7 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0% 36
2.8 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0% 36
2.9 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0% 37
2.10 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0% 37
2.11 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0% 38
2.12 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0% 38
3.1 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0% 41
3.3 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0% 43
3.4 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant efektyviajam skerspjūvio aukščiui: a) p=1,0%; b) p=2,0% 44
3.5 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armavimo koeficientui: a) C20 betono klasė; b) C40 betono klasė 45
3.6 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0% 45
3.7 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0% 46
3.8 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armavimo koeficientui: a) C20 betono klasė; b) C40 betono klasė 47
3.9 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0% 48
3.10 pav. Pasiūlytos empirinės išraiškos ir Europos normų EN 1992 – 1 – 1 tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų palyginimas 49

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Betono tamprumo moduliai, GPa 27
2.1 lentelė. Skerspjūvio parametrai naudojami skaitiniame eksperimente 34
2.2 lentelė. Judančio vidurkio priartėjimo metodikos taikymas 34
3.1 lentelė. Tempiamojo sustandėjimo priklausomybė nuo skerspjjūvio parametrų 40
3.2 lentelė. Diagramų plotai pagal EN 1992-1-1 kintant armatūros tamprumo moduliui 41
3.3 lentelė. Diagramų plotai pagal SP 52-101 kintant armatūros tamprumo moduliui 42
3.4 lentelė. Diagramų plotai pagal SP 52-101 kintant betono klasei 43
3.5 lentelė. Diagramų plotai pagal ACI 318-11-08 kintant efektyviajam skerspjūvio aukščiui ...44
3.6 lentelė. Diagramų plotai pagal ACI 318-11 kintant armavimo koeficientui 45
3.7 lentelė. Diagramų plotai pagal ACI 318-11 kintant armatūros tamprumo moduliui 46
3.8 lentelė. Diagramų plotai pagal ACI 318-11 kintant betono klasei 47
3.9 lentelė. Diagramų plotai pagal GB50010-2002 kintant armavimo koeficientui 48
3.10 lentelė. Diagramų plotai pagal GB50010-2002 kintant armatūros tamprumo moduliu 49

ĮVADAS

Darbo aktualumas

Statybinių konstrukcijų stiprumo (saugos ribinio būvio) nustatymas paprastai nesukelia sunkumų, nes skaičiavimai remiasi fundamentiniais deformuojamo kūno mechanikos principais. Deformacijų ir plyšio pločio (tinkamumo ribinio būvio) prognozavimo sudėtingumas priklauso nuo konstrukciją sudarančių medžiagų deformacinių savybių. Šiuo požiūriu betonas užima išskirtinę vietą tarp kitų dažniausiai taikomų medžiagų (plieno, aliuminio ar medžio). Kadangi betonas tuti mažą tempiamąjį stiprį, jis pleišėja. Pirmiausia betone atsiranda mikro įtrūkimai, kurie didėjant apkrovai plečiasi, kol, atsiranda didieji plyšiai, pasireiškiantys didžiojoje elemento tempiamosios zonos dalyje. Atsiradus šiems plyšiams, gelžbetoninių elementų deformacijos gali padidėti keletą kartų. Plyšiuose ir gretimuose pjūviuose įvyksta armatūros praslydimas betone, o rumbelių vietose betone atsiranda lokalūs plyšiai. Praslydus armatūrai, kontakto zonoje atsiranda šlyties įtempiai, kurie yra perduodami betonui. Tokiu būdu, ruožuose tarp plyšių betonas perima tempimo įtempius, o tai lemia gelžbetoninio elemento standumo padidėjimą. Šis reiškinys vadinamas gelžbetoninio elemento tempimo sustandėjimu (angl. tension-stiffening effect).

Nepaisant to, kad betoninės konstrukcijos tiriamos jau daugiau nei septynis dešimtmečius, pasaulyje nėra vieningų ir tarpusavyje suderintų deformacijų ir plyšio pločio skaičiavimo teorijų, o inžinerinėje praktikoje vyrauja empiriniai metodai. Nagrinėjamos mokslinės problemos sudėtingumą rodo JAV, Rusijos, Kinijos ir Europos projektavimo normų metodų skirtumas. Šiuo metu statybinių konstrukcijų analizei dažniausiai taikomas baigtinių elementų metodas, tačiau projektuotojas dažniausiai negali atlikti skaičiavimų pagal normas nes nėra reglamentuotų skaitinių modelių parametrų.

Naujausi tyrimai rodo, kad didžiausią įtaką gelžetoninių elementų modeliavimo rezultatams turi betono pleišėjimo bei armatūros ir betono sąveikos idealizavimas kuris dažniausiai apibrėžiamas tempiamojo sustandėjimo modeliais. Esamose projektavimo normose tempiamasis sustandėjimas yra vertinamas netiesiogiai, taikant empirines priklausomybes su daugeliu koeficientų. Šis mokslinis darbas skirtas lenkiamųjų gelžbetoninių elementų projektavimo normų tempiamojo sustandėjimo modelių palyginamąją analizei.

Tiltų ir specialiųjų statinių katedroje sukurta metodika bus pritaikyta gaunant tempiamojo sustandėjimo modelius pagal momentų ir kreivių diagramas apskaičiuotas taikant normų metodus. Gauti rezultatai bus gauti pirmą kartą ir leis įvertinti tempiamojo sustandėjimo skaitinės realizacijos atitinakančios normų modelių galimybes.

Tyrimų objektai ir metodai

Tyrimų objektai: gelžbetoninių sijų tempiamosios zonos įtempių ir deformacijų būvis (tempiamasis sustandėjimas). Tyrimų metodai: literatūros analizė, skaitinis modeliavimas, palyginamoji analizė, statistikos metodai, mokslinių teiginių formulavimo (sintezės) metodai.

Pagrindinis tikslas

Atlikti gelžbetoninių elementų projektavimo normų tempiamojo sustandėjimo modelių palyginamąją analizę.

Uždaviniai

- Susipažinti su pasaulyje taikomomis projektavimo normomis skiriant pagrindinį dėmesį tempiamojo sustandėjimo modeliavimui.
- Susipažinti su tempiamojo sustandėjimo tyrimo metodika sukurta VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedroje kai supleišėjusio tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagrama gaunama pagal gelžbetotinių sijų apkrovos ir kreivių priklausomybę.
- Sugeneruoti gelžbetoninių sijų duomenų imtį ir užtikrinti jos reprezentatyvumą.
- Pagal pasirinktų projektavimo normų reikalavimus taikant sugeneruotą duomenų imtį apskaičiuoti apkrovos ir kreivių diagramas.
- Taikant VGTU Tiltų ir specialųjų statinių katedroje sukurtą metodiką, pagal momentų ir kreivių diagramas apskaičiuoti tempiamojo betono įtempių ir deformacijų reikšmes ir nustatyti normų priimto tempiamojo sustandėjimo modeliavimo ypatumus.
- Nustatyti pagrindinius veiksnius lemiančius tempiamojo sustandėjimo modeliavimo rezultatų pokyčius.
- Įvertinti galimybes tempiamojo sustandėjimo skaitinės realizacijos atitinakančios normų modelius.
- Pateikti rekomendacijas gelžbetoninių sijų skaitiniam modeliavimui.

Darbo naujumas ir laukiamų rezultatų perspektyvumas

Darbe įvertintas lenkiamųjų gelžbetoninių elementų projektavimo praktikoje naudojamų skerspjūvio parametrų (efektyviojo skerspjūvio aukštis, armavimo koeficientas, armatūros tamprumo modulis ir betono klasė) reikšmių variacijos efektas tempiamojo sustandėjimo modeliavimo rezultatams. Darbo rezultatai turi neabejotiną praktinę vertę, nes parodyta kad Europos projektavimo normų įlinkių skaičiavimo modeliui įmanoma sukurti atitinkamą universalų tempiamojo betono įtempių ir deformacijų modelį. Kaip pavyzdį, pasiūlyta

nesudėtinga empirinė išraiška aproksimuojanti EN 1992-1-1 tempiamojo betono įtempių ir deformacijų krentančiąją diagramos dalį. Kitoms nagrinėjamoms normoms sukurti universalų modelį praktiškai sudėtinga, nes kreivių skaičiavimo rezultatai reikšmingai priklauso nuo daugumos nagrinėjamų parametrų.

Darbo struktūra ir apimtis

Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, 3 skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 58 p. teksto be priedų, 26 pav., 13 lent., 20 bibliografinių šaltinių.

1. GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ DEFORMACIJŲ APSKAIČIAVIMO METODŲ IR MODELIŲ APŽVALGA

1.1. Medžiagų modeliai

Šiame skyriuje apžvelgiami įvairūs fiziniai medžiagų modeliai, armatūros ir tempiamojo betono sąveika, supleišėjusio tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės, gelžbetoninių elementų deformacijų apskaičiavimo metodai bei pleišėjimo modeliai.

1.1.1. *Gniuždomasis betonas*

Ankstyvuosiuose gelžbetonio analizės modeliuose buvo naudojama idealizuota tamprios – plastinės medžiagos diagrama (1.1 pav. 1 kreivė). Buvo manoma, kad didžiausią įtaką plastinėms betono deformacijoms daro netamprios armatūros deformacijos ir tempiamojo betono pleišėjimas. Naujesniuose modeliuose buvo naudojamos įtempių ir deformacijų kreivės, gautos panaudojus eksperimentinius bandinių gniuždymo rezultatus. Vidutinio stiprio betonams pirmosios plastinės deformacijos pasireiškia įtempiams pasiekus $\sigma_c \approx 0{,}3\, f_c^{'}$ ($f_c^{'}$ −gniuždomasis betono stipris), o esant maksimaliems įtempiams ($\sigma_c - f_c^{'}$) plastinės deformacijos tampa apytikriai yra lygios tampriosioms. Pasiūlyta labai daug gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybių, žemiau pateikiamos kelios, dažniausiai naudojamos priklausomybės:

$$\sigma_c = f_c^{'}\left[2 \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2\right]; \tag{1.1}$$

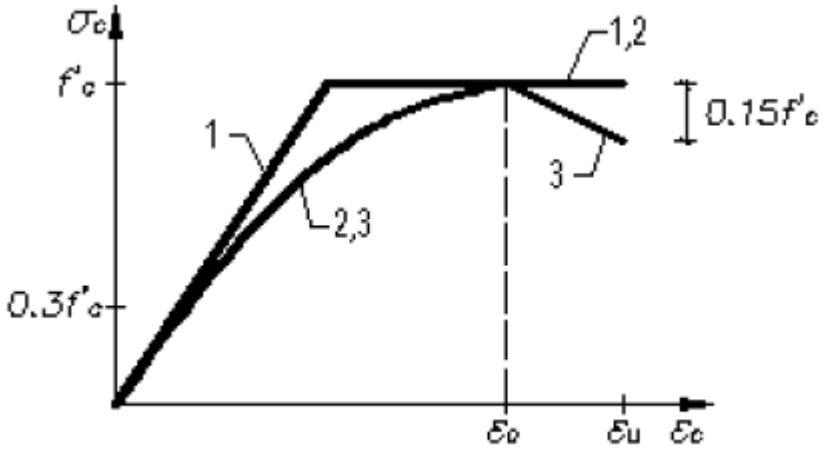
$$\sigma_c = f_c^{'}\frac{1{,}1 \cdot E_c \cdot \varepsilon_c/\varepsilon_0 - (\varepsilon_c - \varepsilon_0)^2}{1 + (1{,},1 \cdot E_c \cdot \varepsilon_0/f_c^{'} - 2)\varepsilon_c/\varepsilon_0}; \tag{1.2}$$

čia

$\sigma_c,\ \varepsilon_c$ − gniuždomojo betono įtempiai bei deformacija;

$f_c^{'},\ \varepsilon_0$ −standartinio gniuždomojo bandinio maksimalūs stipriai bei juos atitinkamti deformacija.

Šios lygtys apibūdina tampriąsias deformacijas (kylančią įtempių ir deformacijų kreivės dalį), elementui supleišėjus, krentančioji dalis dažnai naudojama tiesės formos (1.1 pav. 3 kreivė). Nors lenkiamųjų elementų tyrimuose nustatytos gana plačios ribinės gniuždomojo betono deformacijos ($0{,}0025 \leq \varepsilon_u \leq 0{,}006$) dažniausiai naudojamos reikšmes yra $0{,}003$ ir $0{,}004$.



1.1 pav. Gniuždomojo betono įtempių – deformacijų diagrama (Girdžius 2011)

D. J. Careira ir K. Chu (Carreira & Chu 1985) pasiūlė tokią įtempių ir deformacijų priklausomybę, kurioje įtraukta ir krentančioji diagramos dalis:

$$\sigma_c = \frac{\beta_c \cdot f_c^{'}(\varepsilon_c/\varepsilon_0)}{\beta_c - 1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^{\beta_c k_2}}; \tag{1.3}$$

čia β_c ir k_2 – empiriniai koeficientai.

E. Thorenfeldtas (Thorenfeldt *et al.* 1987) pasiūlė (1.3) priklausomybę taikyti stipriesiems betonams, naudojant:

$$\beta_c = 1/(1 - f_c/\varepsilon_0 \cdot E_c). \tag{1.4}$$

M. A. Mansuras (Mansur *et al.* 1997) pasiūlė tokią k_2 koeficiento išraišką:

$$k_2 = (42{,}5/f_c^{'})^{1{,}3}. \tag{1.5}$$

Pateikta daug įvairių priklausomybių ε_0 deformacijai nustatyti, iš kurių pažymėtinos šios:

$$\varepsilon_0 = (1{,}6 + 0{,}00371 \cdot f_c^{'}) \times 10^{-2}; \quad (1.6)$$

$$\varepsilon_0 = 0{,}71 \times 10^{-5} f_c^{'} + 0{,}00168\,; \quad (1.7)$$

$$\varepsilon_0 = 1{,}65 \times 10^{-5} f_c^{'} + 0{,}00165\,; \quad (1.8)$$

čia $f_c^{'}$ išreikštas MPa.

Apibendrinęs įvairių autorių eksperimentinius tyrimus, B. Nikolas (Nicolo *et al.* 1994) pasiūlė tokią empirinę priklausomybę:

$$\varepsilon_0 = 0{,}00076 + [(0{,}626 \cdot f_c^{'} - 4{,}33) \times 10^{-7}]^{0{,}5}. \quad (1.9)$$

1.1.2. ***Tempiamasis betonas***

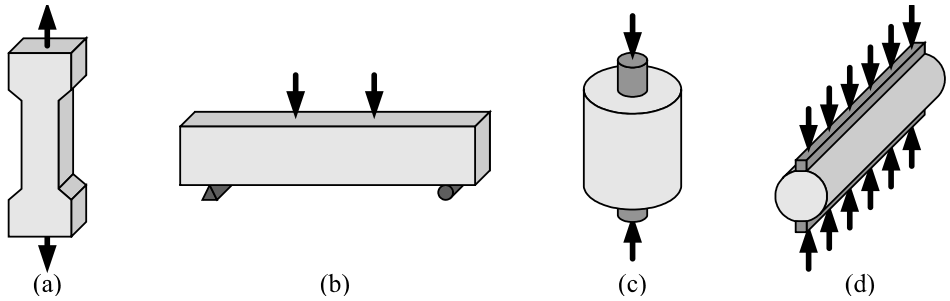
Žinoma, jog betono tempiamasis stipris yra apie 10 kartų mažesnis nei jo gniuždomasis stipris. Palyginę betoną su plienine armatūra, pamatysime jog betono gniuždomasis stipris yra vidutiniškai 10 – 20 kartų mažesnis nei armatūros stipris. Gali susidaryti įspūdis, jog tempiamojo betono įtaka, dėl mažo jo stiprio, gežbetoninių konstrukcijų darbui yra nedidelė. Tai nėra visiška tiesa, skaičiuojant lenkiamųjų elementų stiprumą, tempiamojo betono įtempių galima nevertinti. Tačiau, kai skaičiuojami supleišėjusių elementų įlinkiai, tempiamojo betono įtaka turi būti įvertinta, jos neįvertinus, gali būti daroma didelė paklaida.

Tempiamojo betono darbą tyrė *Evans* ir *Marathe* (1968), *Hughes ir Chapman* (1966), *Notkus* (1982), *Kudzys* ir *Notkus* (1978), *Kupliauskas* ir *Notkus* (1987). Įprastai tempiamasis betonas dirba tampriai, kol įtempiai neviršija apie 60 % tempiamojo stiprio (f_{ct}). Šie įtempiai gali būti laikomi tamprumo riba, nes ją peržengus prasideda mikropleišėjimas, kuris tampa ypač pastebimas, kai įtempiai pasiekia apie 75 % tempiamojo stiprio. Kai pasiekiami maksimalūs įtempiai (σ_{cr}) ir juos atitinkančios deformacijos (ε_{cr}), plastinės ir tampriosios deformacijos tampa apytikriai lygios. Viršijus pleišėjimo deformacijas (ε_{cr}), bandiniai dar ilgai atlaiko įtempius. Nearmuotų betoninių bandinių įtempių ir deformacijų diagramos krentančios dalies tyrimai parodė, kad maksimalios deformacijos gali viršyti ε_{cr} net ~30kartų (Field & Bischoff 2004).

Jeigu lygintume betoninių bandinių tempimo ir gniuždymo tyrimus, pamatytume jog atlikti tempimo bandymus yra sudėtingiau. Taip yra dėl to, jog sunku užtikrint tempimo jėgos centriškumą. Nors tokius bandymus galima atlikti ir tiesiogiai, bet dėl ankščiau minėtos priežasties jie yra atliekami retai, o betono tempiamasis stipris nustatomas iš netiesioginių bandymų pasitelkiant skirtingus metodus (1.2 pav.): lenkimo bandymą, dvipusio spaudimo bandymą bei skėlimo bandymą. Neretai betono tempiamasis stipris apskaičiuojamas naudojant empirines priklausomybes, paremtas vienaašiu betono gniuždomuoju stipriu.

$$f_{ct} = \begin{cases} f_{ct} = 0{,}30\sqrt[3]{(f_{cm}-8)^2}, f_{cm} \le 58\ MPa; \\ 2{,}12\ln\left(1+\frac{f_{cm}}{10}\right), f_{cm} > 58\ MPa; \end{cases} \quad (1.10)$$

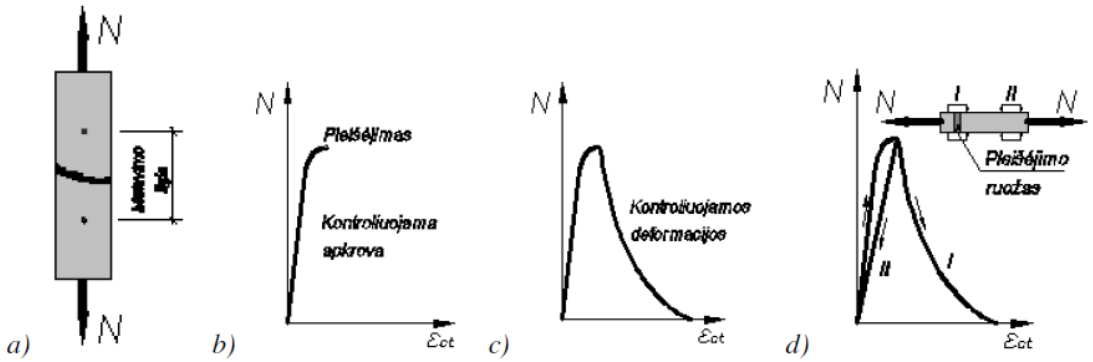
čia f_{cm} – vidutinis cilindrinis betono gniuždomojo betono stipris.



1.2 pav. Tempimo bandymai tiesioginio tempimo (a); lenkimo (b); dvipusio spaudimo (c); skėlimo (d) (Gribniak 2009)

Pimuosiuose nearmuotų betoninių elementų tempimo bandymuose (kontroliuojamos apkrovos), jėga būdavo didinama iki tol, kol bandinys supleišėja (žiūr. 1.3, b pav.). H. F. Gonermanas ir E. C. Šumannas (Gonnerman & Shuman 1928) atliko išsamius bandymus, kurių metu naudojo specialius griebtus. Buvo nustatyta, kad tempiamasis elementas, taip pat kaip ir gniuždymo bandymų metu, po pleišėjimo atlaiko tam tikrą apkrovą, kaip pavaizduota 1.3, c paveiksle. Šių bandymų metu buvo matuojami ne įtempiai, o deformacijos tam tikrame matavimo ruože, kurio ilgis l_{mean}. Tokiu būdu buvo gautos įtempių ir deformacijų priklausomybės. Priimdami vienodą įtempių pasiskirstymą matavimo ruože l_{mean}, išmatuotas deformacijas galime sulyginti su vidutinėmis elementų deformacijomis ε_m. Priimtas vienodas įtempių pasiskirstymas visiškai galioja iki pleišėjimo. Elementui supleišėjus ši taisyklė nebegalioja, nes išmatuotas deformacijas sudaro dvi dalys: tamprios deformacijos ir plyšio atsivėrimo deformacijos. Dėl šios priežasties, tempiamojo betono irimas yra lokalus reiškinys.

1.3, d paveiksle matome tempimo bandymą, kurio metu kontroliuojamos deformacijos. Tiesiška priklausomybė galioja beveik iki pat pleišėjimo, todėl įtempiai ir vidutinės deformacijos, gali būti apskaičiuoti tiesiogiai iš išmatuotų apkrovos ir deformacijų priklausomybių. Pasiekus pleišėjimo apkrovą, deformacijos pradeda lokalizuotis tam tikrame pleišėjimo ruože. Šis ruožas atsiranda silpniausioje bandinio vietoje. Jei pleišėjimo ruožas atsiranda deformacijų matavimo zonoje, gauname I kreivę pavaizduotą 1.3, d paveiksle. Kai deformacijos mūsų matuojamame pleišėjimo ruože žymiai padidėja, o kitose elemento vietose yra pastebimas deformacijų sumažėjimas, apkrova yra sumažinama. (II kreivė 1.3, d paveiksle).

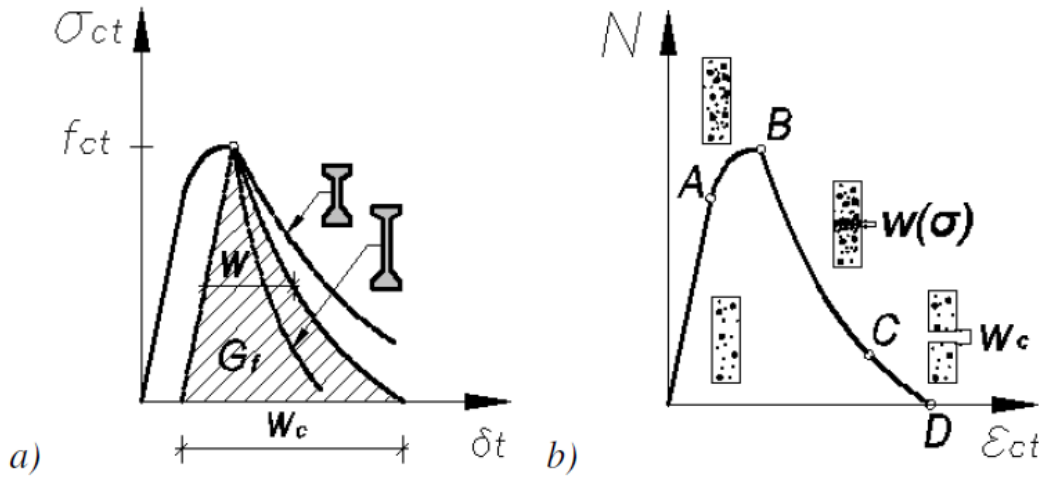


1.3 pav. Tempimo bandymas (a); betono elgsena kontroliuojamos apkrovos (b) ir kontroliuojamų deformacijų (c) tempimo bandyme; plyšių lokalizavimosi įtaka bandymo rezultatams (d) (Gribniak 2009)

Atliekant tempimo bandymus, pastebėta jog bandinio ilgis daro įtaką krentančiajai vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos daliai. Kuo bandinys ilgesnis, tuo krentančioji diagramos dalis yra statesnė. (1.4, a pav.). Bandiniams, kurių ilgis viršija tam tikrą kritinį ilgį, nustatyti krentančios diagramos dalies negalima (Hordijk 1991). Kontinualios mechanikos modeliai, kuriuose taikomos įtempių ir deformacijų priklausomybės, negali paaiškinti staigesnio ilgesnių bandinių suirimo. 1.4, b paveikslas schematiškai vaizduoja tempiamojo betono elgseną pleišėjimo ruože. B. Karihalu (Karihaloo 1995) teigia, kad netiesišką pleišėjimo ruožą (AB) ir krentančios diagramos dalies ruožą (BC) nulemia atsivėrę mikro plyšiai. Likusiai diagramos daliai (CD) įtaką daro vidutinės trinties sukelti efektai ir betono užpildo dalelių sukibimas. Bandiniui pasiekus kritinį plyšio plotį w_c, jis suyra (žiūr. 1.4, b pav.). Nagrinėdami šį modelį, tempiamojo betoninio elemento elgseną galime išskirti į dvi dalis:

1) tempiamojo betono būvis už pleišėjimo zonos ribų gali būti aprašytas taikant įtempių ir vidutinių deformacijų priklausomybę;
2) įtempių ir pleišėjimo deformacijų priklausomybę nusako betono elgsena pleišėjimo zonoje.

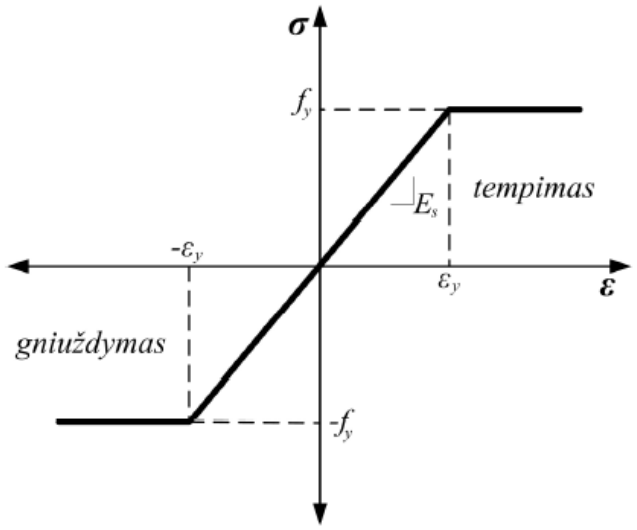
Pastaroji kreivė apima plotą (užtušuotą 1.4, a paveiksle), kuris atitinka irimo energiją G_f.



1.4 pav. (a) bandinio ilgio įtaka įtempių ir deformacijų diagramai; (b) betono trapumo įtaka apkrovos ir deformacijų diagramai (Gribniak 2009)

1.1.3. ***Armatūra***

Armatūros modeliavimui gali būti naudojma idealizuota priklausomybė (1.5 pav.) ar kokia kita laužtinė linija, kuri atitinka faktinę įtempių ir deformacijų diagramą.



1.5 pav. Armatūros įtempių ir deformacijų diagrama (*Girdžius 2011)*

1.1.4. ***Armatūros ir tempiamojo betono sąveika***

Bendros deformacijos yra užtikrintos betono ir armatūros sukibimo. Dėl itin skirtingų armatūros ir tempiamojo betono mechaninių savybių bei deformacijų, bendras jų darbas yra komplikuotas.

Armatūros ir betono sukibimas laikomas idealiu tol kol elementas nesupleišėja. Elementui supleišėjus, bei didėjant plyšių kiekiui ir jų pločiui, atsiranda sukibimo defektų, kurie sudaro sąlygas armatūros praslydimui betone. Sukibimo stiprumas priklauso nuo betono

stiprio, armatūros paviršiaus, įtempių būvio, apkrovos tipo bei kitų faktorių (Gribniak *et al.* 2004).

Betono pleišėjimo ir sukibimo efektai modeliuojami dvejopai:

1) Armatūros ir betono sukibimo ir praslydimo priklausomybe;
2) Betono įtempių ir deformacijų diagrama, kuria įvertinamas betono pleišėjimas, darbas tarp plyšių bei armatūros praslydimas. Ši diagrama taikoma vidutinių plyšių modelyje, kuris taikomas šiame darbe.

1.1.5. ***Supleišėjusio tempiamojo betono įtempių ir deformaciijų priklausomybės***

Elementui supleišėjus, jo elgsena tampa žymiai sudėtingesnė. Kadangi tarp plyšių esantis betonas turi gerą sukibimą su armatūra, jis atlaiko dalį statmenos plyšių krypčiai tempimo įražos. Šis reiškinys vadinamas *tempiamojo betono elgsena tarp plyšių* arba *tempiamojo betono sustandėjimu*, bei daro įtaką bandinių deformacijų analizės rezultatams (Bischoff 2001).

Gelžbetoninių konstrukcijų darbo analizei pasiūlyta nemažai supleišėjusio tempiamojo betono fizikinių modelių. Šiame darbe nagrinėjamos vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos, gautos naudojant lenkiamųjų elementų bandymų duomenis. Žemiau pateikiamos kelios tempiamojo betono vidutinių įtempių ir deformacijų priklausomybės gelžbetoninių kontrukcijų deformatyvumo modeliavimui.

T. C. T. Hsu bendroje gelžbetonio teorijoje (Hsu 1993) pasiūlė tokią priklausomybę:

$$\sigma_t = \sigma_{cr}\left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t}\right)^{0,4}; \tag{1.11}$$

$$\sigma_{cr} = 0{,}311\sqrt{f_c^{'}}. \tag{1.12}$$

D. J. Careira ir K. Chu (Carreira & Chu 1985) pasiūlė priklausomybę analogišką gniuždomojo betono $\sigma - \varepsilon$ diagramai (1.3 formulė):

$$\sigma_t = \frac{\beta_t \cdot f_t^{'}(\varepsilon_t/\varepsilon_t^{'})}{\beta_t - 1 + (\varepsilon_t/\varepsilon_t^{'})^{\beta_t}}; \tag{1.13}$$

čia $\beta_t -$ empirinis koeficientas.

F. J. Vecchio ir M. P. Colinsas (Vecchio & Colins 1982), remdamiesi gelžbetoninių plokščių, paveiktų grynąja šlytimi bandymais, *modifikuoto gniuždomojo lauko teorijoje* pasiūlė tokią priklausomybę:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{cr}}{1 + \sqrt{200\varepsilon_t}}; \tag{1.14}$$

$$\sigma_{cr} = 0{,}33\sqrt{f_c^{'}}; \tag{1.15}$$

čia σ_t ir ε_t −atitinkamai betono įtempiai ir deformacija.

Ši priklausomybė gauta naudojant stipriai armuotų gelžbetoninių elementų tyrimų rezultatus. Joje β reikšmė yra lygi 20.



1.6 pav. Tempiamojo betono vidutinių įtempių ir deformacijų diagrama (G. Kaklauskas *et al.* 2006*)*

Laboratoriniai gelžbetoninių elementų tyrimai parodė, kad tempiamojo betono vidutinių įtempių ir deformacijų diagrama priklauso nuo įvairių faktorių: tempiamojo betono stiprio, armavimo koeficiento, armatūros strypo paviršiaus tipo ir skersmens (Yamamoto & Vecchio 2001).

Vidutinių įtempių ir deformacijų modelyje, elemento stipris priklauso nuo tempiamojo elemento tikrojo ilgio L_r. Šiame ilgyje atsiradę plyšiai pasiskirsto tolygiai, o jo skaičiuojamasis ilgis randamas naudojant tokią formulę:

$$L_r = d/2; \tag{1.16}$$

čia d – naudingasis sijos aukštis.

Tempiamojo betono stipris f_{c1b} randamas taip:

$$f_{c1b} = \begin{cases} E_c\varepsilon_1 \le e_1 \le \varepsilon_{cr} \\ \dfrac{f_c^{'}}{1+\sqrt{k_s(\varepsilon_1-\varepsilon_{cr})}}, \varepsilon_{cr} \le \varepsilon_1 < \varepsilon_{te} \\ \dfrac{(\varepsilon_{te}-\varepsilon_{cr})}{(\varepsilon_{te}-\varepsilon_{ch})} f_{ch}, \varepsilon_{ch} \le \varepsilon_1 < \varepsilon_{te} \\ 0, \varepsilon_{te} \le \varepsilon_1 \end{cases}; \tag{1.17}$$

čia

$$\varepsilon_{ch} = \frac{2 \cdot G_f}{L_r \cdot f_t^{'}}; \tag{1.18}$$

$$\varepsilon_{te} = 5 \cdot \varepsilon_{ch}; \tag{1.19}$$

$$f_{ch} = \frac{f_t^{'}}{1 + \sqrt{k_s(\varepsilon_{ch} - \varepsilon_{cr})}}. \tag{1.20}$$

Tempiamosios zonos koeficientas k_s yra nustatomas taip:

$$\int_0^{\infty} f_{c1b} \cdot d \cdot \varepsilon = \frac{G_f}{L_f}. \tag{1.21}$$

Tempiamasis betono stipris $f_t^{'}$ yra randamas taip:

$$f_t^{'} = 0{,}65\ (f_c')^{0{,}33}. \tag{1.22}$$

Santykinė pleišėjimo deformacija ε_{cr} yra randama taip:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f_t^{'}}{E_c}; \tag{1.23}$$

čia

E_c – betono tamprumo modulis;

$f_c^{'}$ –gniuždomasis betono stipris.

Vidutinių įtempių ir deformacijų modelyje, sustandėjimo efektas ir papildomas tempimo laikas tempiamojoje supleišėjusioje zonoje yra įvertinamas šia išraiška:

$$f_{c1t} = \alpha \cdot \rho_t \left(f_u - f_y\right) \cos^2 \theta_n\ ; \tag{1.24}$$

čia

$\alpha = 0{,}80$, ρ_t –armavimo koeficientas.

Bendri lenkiamojo elemento tempiamojo betono įtempiai apskaičiuojami taikant tokias išraiškas:

$$f_{c1} = f_{c1b} + f_{c1t}; \tag{1.25}$$

$$f_{c1} = \frac{f_t^{'}}{1 + \sqrt{c_t \cdot \varepsilon_1}}. \tag{1.26}$$

čia $c_t = 500$ - tempiamojo stiprio koeficientas, priklausantis nuo armatūros strypų skermens ir bandinio dydžio.

Pagal P. H. Bišofo metodą (Bischoff 2001) ašine jėga veikiamo gelžbetoninio elemento vidutinė santykinė deformacija, lygi supleišėjusio elemento vidutinei deformacijai ($\varepsilon_{sm} = \varepsilon m$. Vidutinę santykinę deformaciją galima išreiktši tokia formule:

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_s - \Delta\varepsilon_s = \varepsilon_s - \beta\Delta\varepsilon_{s,max}\ . \tag{1.27}$$

čia β – empirinis koeficientas, kuriuo įvertinamos armatūros deformacijos visame elemento ilgyje, bei kuris kinta nuo 1 iki 0. Pirmoji reikšmė naudojama elementui pradėjus pleišėti, antroji kai įtempių betone nebelieka.

Armatūros deformacijų šuolis $(\Delta\varepsilon_{s,max})$, matuojamas nuo elemento pleišėjimo pradžios bei įvertinamas šia priklausomybe: $\varepsilon_{sr} - \varepsilon_{cr} = f_{cr}/\rho E_s$;

čia

ε_{cr} – pleišėjimo deformacija;

ε_{sr} – armatūros strypų deformacija, elementui pradėjus pleišėti;

E_s – armatūros tamprumo modulis;

ρ – armavimo koeficientas $(\rho = A_s/A_c)$;

A_c – gelžbetoninio elemento skerspjūvio plotas;

A_s – armatūros skerspjūvio plotas.

Vidutinė santykinė elemento deformacija apskaičiuojama taikant šią priklausomybę:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{1}{E}\left(f_s - \beta\frac{f_{cr}}{\rho}\right); \tag{1.28}$$

čia

f_s – armatūros įtempiai prie plyšio $(f_s = N/A_s)$;

β – empirinis koeficientas $(\beta = 0{,}5)$.

Taip pat yra ir kita vidutinės santykinės elemento deformacijos priklausomybės išraiška:

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_s - \frac{\beta}{n\cdot\rho}\varepsilon_{sr} = \frac{f_s}{E_s}\left(1 - \frac{\beta}{1+n\cdot\rho}\frac{f_{sr}}{f_s}\right); \tag{1.29}$$

čia

n – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis $(n = E_s/E_c)$;

f_{sr} – armatūros įtempiai element pleišėjimo pradžioje$(f_{sr} = N_r/A_s)$.

Pasiūlyta nemažai β koeficiento radimo būdų *Koch* ir *Leonhard, Rao* ir *Rostasy* šio koeficiento apskaičiavimui pasiūlė tokią išraišką: $\beta = f_{sr}/f_s$. Šiame modelyje nevertinami tokie veiksniai kaip apkrovimo tipas, įtempių nuostoliai bei naujų plyšių atsivėrimas. Pritaikę šią β koeficiento išraišką formulėje (1.29) gauname tokią priklausomybę:

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_s\left(1 - \frac{1}{1+n\cdot\rho}\frac{f_{sr}^2}{f_s^2}\right) = \varepsilon_s\left(1 - \frac{f_{sr}^2}{f_s^2}\right) + \frac{f_{sr}}{f_s}\varepsilon_{cr}. \tag{1.30}$$

Armatūros deformacijų įvertinimo palengvinimui, kai kurie modeliai nevertina pleišėjimo deformacijos ε_{cr}. Tokiu atveju, vidutinė santykinė elemento deformacijų priklausomybės išraiška sutrumpėja ir mes gauname $\varepsilon_{sm} = \varepsilon_s(1 - f_{sr}^2/f_s^2)$. Nors šioje išraiškoje pleišėjimo deformacijos ir nėra vertinamos, ji gana gerai parodo betone esančios armatūros vidutinį pailgėjimą, bei yra naudojama plyšio pločio apskaičiavimui.

1.2. Gelžbetoninių elementų deformacijų apskaičiavimo metodai

1.2.1. *Tempiamųjų elementų deformacijų apskaičiavimas bei įtempių ir deformacijų diagramų nustatymas pagal Europos normų EN 1992 – 1 – 1 metodiką*

Pagal Europos normų EN 1992 – 1 – 1 deformacijų skaičiavimo metodiką, gelžbetoninis elementas, apkrautas ašine jėga P dirba tampriai tol, kol pasiekia pleišėjimo apkrovą P_{cr}:

$$P_{cr} = f_{ct}(A_c + nA_s); \tag{1.31}$$

čia

f_{ct} – tempiamasis betono stipris;

A_s – armatūros skerspjūvio plotas;

A_c – gelžbetoninio elemento skerspjūvio plotas;

n – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis ($n = E_s/E_c$);

E_s – armatūros tamprumo modulis;

E_c – betono tamprumo modulis.

Šioje būsenoje, gelžbetoninio elemento vidutines deformacijas galima apskaičiuoti naudojant šią išraišką:

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{cm} = \frac{P}{E_c(A_c + nA_s)}. \tag{1.32}$$

Kai apkrova pasiekia pleišėjimo ribą P_{cr}, plyšio atsivėrimo vietoje betonas nebelaiko tempimo, tad visą tempimo jėgą perima armatūra, kas lemia staigų įtempių padidėjimą. Toks įtempių pokytis armatūroje ženkliai prisideda prie vidutinių deformacijų padidėjimo, kurį galima apskaičiuoti naudojant šią formulę:

$$\varepsilon_m = (1 - \xi)\varepsilon_{s1} + \xi\varepsilon_{s2}; \tag{1.33}$$

čia

ε_{s1} – elemento vidutinės deformacijos tamprioje būsenoje;

ε_{s2} – visiškai supleišėjusio tempiamojo elemento deformacijos;

ξ – pasiskirstymo koeficientas.

$$\varepsilon_{s2} = \frac{P}{E_s A_s}; \tag{1.34}$$

$$\xi = 1 - \left(\frac{P_{cr}}{P}\right)^2, čia\ P > P_{cr}. \quad (1.35)$$

Supleišėjusio elemento vidutinių įtempių ir deformacijų priklausomybė gali būti nustatyta iš elemento apkrovos ir deformacijos diagramos. Vis dėlto bet kuri apkrovimo stadija atitiks šią pusiausvyros lygtį:

$$P = N_{sm} + N_{cm}; \quad (1.36)$$

čia

N_{sm} – vidutinė įraža armatūroje;

N_{cm} – vidutinė įraža betone.

Apskaičiavę elemento vidutines deformacijas, įražą armatūroje bet kokiai apkrovai,galime rasti naudodami šią išraišką:

$$N_{sm} = A_s E_s \varepsilon_{sm}; \quad (1.37)$$

čia

A_s – tempiamosios armatūros skerspjūvio plotas;

E_s – armatūros tamprumo modulis;

ε_{sm} – vidutinė armatūros deformacija.

Žinodami pusiausvyros lygtį, bei vidutines elemento deformacijas, galime rasti vidutinę įražą betone:

$$N_{cm} = P - A_s E_s \varepsilon_{sm}. \quad (1.38)$$

Apskaičiavę vidutinę įražą betone N_{cm}, taip pat galime rasti tempiamojo betono įtempius:

$$\sigma_{tm} = \frac{P - A_s E_s \varepsilon_{sm}}{A_C}. \quad (1.39)$$

1.2.2. ***Lenkiamųjų elementų momentų – kreivių apskaičiavimas pagal Europos normų 1992 – 1 – 1 metodiką***

Lenkiamojo gelžbetoninio elemento pleišėjimo momentas pagal Europos normų EN 1992–1–1 deformacijų skaičiavimo metodiką randamas taip

$$M_{cr} = W_1 f_{ctm}; \quad (1.40)$$

čia

W_1 – skerspjūvio atsparumo momentas;

f_{ctm} – betono tempiamasis stipris.

Skaičiuodami deformacijas lenkiamuosiuose gelžbetoniniuose elementuose, naudojame tas pačias formules, kaip ir tempiamiesiems elementams. Supleišėjusio lenkiamojo elemento kreivis randamas naudojant tokią išraišką:

$$\kappa_m = (1-\xi)\kappa_1 + \xi\kappa_2; \qquad (1{,}41)$$

čia

$\kappa_1 -$ nesupleišėjusio lenkiamojo gelžbetonino elemento kreivis;

$\kappa_2 -$ supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento kreivis;

$\xi -$ pasiskirstymo koeficientas.

Pasiskirstymo koeficientą randamas taip:

$$\xi = 1 - \beta_1\beta_2\left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^2; \qquad (1.42)$$

čia

$\beta_1 -$ koeficientas vertinantis armatūros paviršiaus tipą (1,0 – rumbuotiems, 0,5 – lygiems strypams);

$\beta_2 -$ koeficientas vertinantis apkrovos trukmę ir pobūdį (1,0 – trumpalaikei apkrovai, 0,5 – ilgalaikei arba ciklinei apkrovai).

Nesupleišėjusio lenkiamojo gelžbetonino elemento kreivis κ_1 apskaičiuojamas naudojant šią formulę:

$$\kappa_1 = \frac{M}{E_C I_1}; \qquad (1.43)$$

čia

$I_1 -$ nesupleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento redukuotas inercijos momentas;

$E_c -$ betono tamprumo modulis.

Supleišėjusio lenkiamojo gelžbetonino elemento kreivis κ_2 apskaičiuojamas naudojant šią formulę:

$$\kappa_2 = \frac{M}{E_C I_2}; \qquad (1.44)$$

čia

$I_2 -$ supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento redukuotas inercijos momentas;

$E_c -$ betono tamprumo modulis.

1.2.3. *Lenkiamųjų elementų momentų – kreivių apskaičiavimas pagal Rusijos normų SP 52 – 101 metodiką*

Lenkiamojo gelžbetoninio elemento kreiviai randami taikant šią lygtį:

$$\kappa = \frac{M}{D}; \tag{1.45}$$

čia

$M -$ išorinių apkrovų sukeltas lenkimo momentas;

$D -$ lenkiamojo gelžbetoninio element standumas.

$$D = E_{c1} I_{red}; \tag{1.46}$$

čia

$E_{c1} = 0{,}85 E_c -$ betono tamprumo modulis;

$I_{red} -$ redukuotas skerspjūvio intercijos momentas.

$$I_{red} = I_c + \alpha_{s1} I_{s1} + \alpha_{s2} I_{s2}; \tag{1.47}$$

čia

$I_c -$ skerspjūvio intercijos momentas;

α_{s1}ir $\alpha_{s2} -$ gniuždomosios ir tempiamosios zonos armatūros ir betono tamprumo modulių santykių koeficientai;

I_{s1} ir $I_{s2} -$ gniuždomosios ir tempiamosios armatūros inercijos momentai;

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{c,red}}; \tag{1.48}$$

$$\alpha_{s2} = \frac{E_{s,red}}{E_{c,red}}; \tag{1.49}$$

Koeficientas ψ_s įvertina betono darbą tarp plyšių. Jis taip pat parodo armatūros ir betono sukibimą tarp plyšių, kuris daro įtaką armatūros įtempių skirtumui plyšyje ir už jo ribų, bei yra apskaičiuojamas šia formule:

$$\psi_s = 1 - 0{,}8 \frac{M_{cr}}{M}. \tag{1.50}$$

Tarp plyšių esančios tempiamosios armatūros tamprumo modulis E_{s1} apskaičiuojamas taikant šią išraišką:

$$E_{s1,cr} = \frac{E_{s1}}{\psi_s}. \tag{1.51}$$

1.2.4. *Lenkiamųjų elementų momentų – kreivių apskaičiavimas pagal JAV normų ACI 318-11 metodiką. Branson efektyvusis intercijos momentas*

D. E. Bransonas (Branson 1977) pasiūlė tokią supleišėjusio skerspjūvio inercijos momento empirinę priklausomybę:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^m I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^m\right] I_{cr}; \tag{1.52}$$

čia

$M_{cr} = f_r I_g / y_t -$ pleišėjimo momentas;

$I_g -$ inercijos momentas tamprioje būsenoje, nustatomas visam skerspjūviui;

$f_r = 0{,}623\lambda\sqrt{f_c'}[MPa] -$ tempiamasis betono stipris, nustatytas iš lenkimo bandymų;

$y_t -$ atstumas nuo skerspjūvio svorio centro iki labiausiai tempiamojo krašto;

$\lambda -$ koeficientas normalaus sunkumo betonams lygus 1,0;

$f_c' -$ gniuždomasis betono stipris.

Laipsnio rodiklis m yra gautas eksperimentiniu būdu. Laboratorijoje buvo išbandytos 58 sijos ir taikant *Newmark* metodą buvo gautas rodiklis m. Nors *Branson* iš pradžių tikėjosi kvadratinės koeficiento reikšmės, eksperimentai parodė, jog vertinant elemento darbą, koeficientas m turi būti padidintas iki 3,0. Jeigu norima vertinti skerspjūvio darbą, tada koeficiento m reikšmė turi būti padidinta iki 4,0.ACI 318 normose yra priimta taikyti $m = 3{,}0$ rodiklio reikšmę. Taip pat, taikant šią metodiką naudojama klasikinė išraiška supleišėjusių gelžbetoninių elementų kreiviui apskaičiuoti: $\kappa = M/EI_e$, šiuo atveju $EI_e -$ elemento lenkiamasis standumas.

1.2.5. *Lenkiamųjų elementų momentų – kreivių apskaičiavimas pagal Kinijos projektavimo normas*

Lenkiamojo gelžbetoninio elemento trumpalaikis standis pagal Kinijos projektavimo normas randamas taikant tokią formulę:

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1{,}15\psi + 0{,}2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3{,}5\gamma_f'}}; \tag{1.53}$$

čia

$E_s -$ armatūros tamprumo modulis;

$A_s -$ tempiamosios armatūros skerspjūvio plotas;

$h_0 -$ efektyvusis skerspjūvio aukštis;

$\alpha_E = E_s/E_c -$ armatūros ir betono tamprumo modulių santykis;

$\rho = A_s/(bh_0)$ – armavimo koeficientas;

ψ – koeficientas įvertinantis netiesinį armatūros deformacijų pasiskirstymą tarp plyšių.

$\gamma_f^{'} = (b_f - b)h_f/bh_0$ – skerspjūvio tempiamosios briaunos ir sienelės plotų santykis;

b_f, h_f – atitinkamai briaunos plotis ir aukštis;

b – skerspjūvio plotis.

Koeficientą įvertinantį netiesinį armatūros deformacijų pasiskirstymą tarp plyšių apskaičiuojame šia formule:

$$\psi = 1{,}1 - 0{,}65\frac{f_{tk}}{\rho_{te}\sigma_{sk}}; \tag{1.54}$$

čia

f_{tk} – betono charakteristinis tempiamasis stipris;

ρ_{te} – santykis tarp visos armatūros ir armatūros esančios tempiamojo betono ruože;

σ_{sk} – gelžbetoninio elemento armatūros įtempiai.

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{0{,}87h_0A_s}; \tag{1.55}$$

čia

M_k – išorinės jėgos sukeltas lenkimo momentas;

h_0 – efektyvusis skerspjūvio aukštis;

A_s – armatūros plotas;

Gelžbetoninio elemento pleišėjimo momentas apskaičiuojamas:

$$M_{cr} = \gamma f_{tk} W_0; \tag{1.56}$$

čia

γ – plastinės įtakos koeficientas;

f_{tk} – betono charakteristinis tempiamasis stipris;

W_0 – redukuoto skerspjūvio inercijos momentas.

Pagal šiuo metu galiojančias Kinijos projektavimo normas, betono tamprumo modulis nėra skaičiuojamas. Skaičiavimuose taikomas dydis paimtas iš lentelės:

1.1 lentelė. Betono tamprumo moduliai, GPa

Betono klasė	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
E_c	2,20	2,55	2,80	3,00	3,15	3,25	3,35	3,45	3,55	3,60	3,65	3,70	3,75	3,80

Trumpalaikis gelžbetoninio elementų kreivis apskaičiuojamas:

$$\kappa = \frac{M}{B_s}; \tag{1.57}$$

čia

$M -$ išorinės apkrovos sukeltas lenkimo momentas;

$B_s -$ gelžbetoninio elemento trumpalaikis standis.

1.3. Pirmojo skyriaus išvados ir uždaviniai

Nepaisant to, kad betoninės konstrukcijos tiriamos jau daugiau nei septynis dešimtmečius, pasaulyje nėra vieningų ir tarpusavyje suderintų deformacijų ir plyšio pločio skaičiavimo teorijų. Tai puikiai atspindi JAV, Rusijos, Kinijos ir Europos gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normų metodų skirtumai. Literatūros analizė rodo, kad didžiausią įtaką gelžetoninių elementų skaitinio modeliavimo rezultatams turi betono pleišėjimo bei armatūros ir betono sąveikos (taip vadinamojo tempiamojo sustandėjimo efekto) idealizavimas. Esamose projektavimo normose tempiamasis sustandėjimas yra vertinamas netiesiogiai, taikant empirines priklausomybes su daugeliu koeficientų. Šis mokslinis darbas skirtas lenkiamųjų (plačiausiai praktiškai naudojamų elementų, kur egiztuoja tempiamasis sustandėjimas) gelžbetoninių elementų projektavimo normų tempiamojo sustandėjimo modelių palyginamajai analizei. Atsižvelgiant į tai, pagrindiniai šio darbo užvadiniai yra šie:

- Sudaryti tyrimų planą parenkant reprezentatyvią gelžbetoninių skerspjūvių fizikinių parametrų imtį;
- Pagal parinktą duomenų imtį, apskaičiuoti momentų ir kreivių diagramas pagal Europos, JAV, Rusijos ir Kinijos projektavimo normas;
- Naudojant apskaičiuotas momentų ir kreivių diagramas, taikant Tiltų ir specialųjų statinių katedroje sukurtą metodiką, apskaičiuoti tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas;
- Nustatyti pagrindinius veiksnius lemiančius tempiamojo sustandėjimo modeliavimo rezultatų pokyčius;
- Įvertinti kokią įtaką tempiamajam sustandėjimui daro įvairūs skerspjūvio parametrai;
- Atlikti įtempių ir deformacijų diagramų, apskaičiuotų taikant įvairias projektavimo normas, palyginamają analizę.

Įvykdžius šiuos uždavinius, turėtų paaiškėti, nuo ko priklauso tempiamasis sustandėjimas įtempių ir deformacijų diagramose, apskaičiuotose taikant Europos, JAV, Rusijos ir Kinijos projektavimo normas, bei kokią tai turi įtaką skaičiavimo rezultatams.

2. ATVIRKŠTINIO UŽDAVINIO SPRENDIMAS NAUDOJANT MOMENTŲ IR KREIVIŲ PRIKLAUSOMYBES, APSKAIČIUOTAS PAGAL NORMŲ REKOMENDACIJAS

2.1. Modeliavimo principai

Šiame skyriuje aptariamas supleišėjusio tempiamojo betono įtempių ir vidutinių deformacijų ($\sigma - \varepsilon$) kreivės išvedimas lenkiamiesiems gelžbetoniniams elementams (atvirkštinio uždavinio sprendimas), veikiamiems trumapalaikės apkrovos. Atvirkštinio uždavino sprendimas atliekamas dviem etapais:

- Atliekamas skaitinis eksperimentas. Taikant normų rekomendacijas, tam tikrų charakteristikų sijoms apskaičiuojamos momentų ir kreivių diagramos;
- Taikant atvirkštinio uždavinio sprendimo metodiką iš apskaičiuotų momentų ir kreivių diagramų gaunamos įtempių ir deformacijų diagramos;

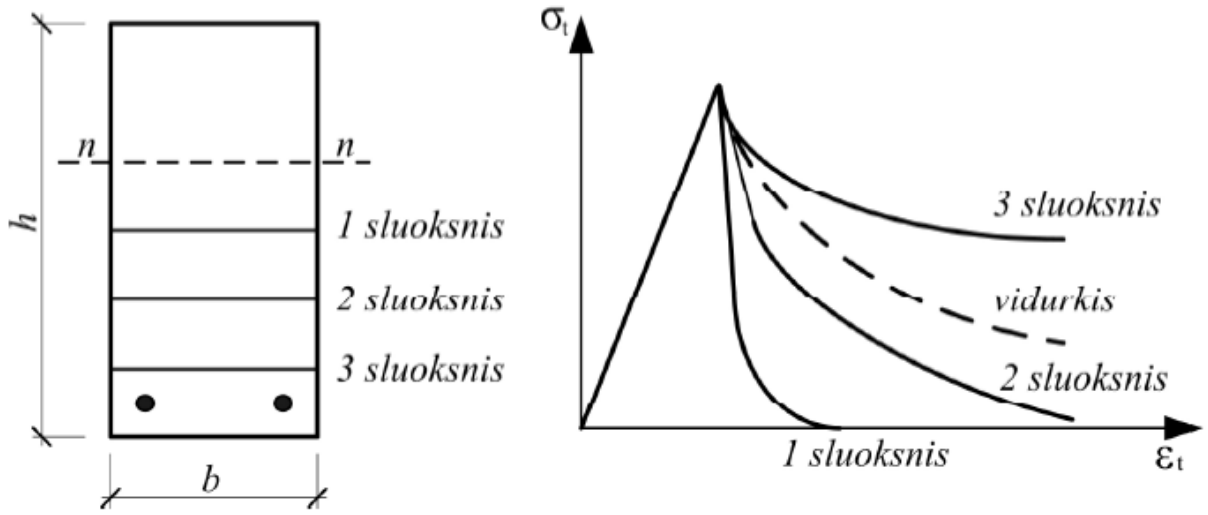
Šis išvedimas atliktas naudojant skaitinio eksperimento momento ir kreivių diagramas, gautas pagal Europos normų EN 1992–1–1, Rusijos normų SP 52–101, JAV normų ACI 318, bei Kinijos normų skaičiavimo metodikas. Toliau darbe aptariami visi atvirkštinio uždavinio sprendimo žingsniai.

2.2. Atvirkštinio uždavinio sprendimo metoto aprašymas

Šiame poskyryje pateikiamas G. Kaklausko pasiūlytas metodas supleišėjusio tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramoms nustatyti iš lenkiamųjų gelžbetoninio elementų ir kreivių diagramų.

Atvirkštinio uždavimo sprendimo metu, taikomos šios prielaidos, įvertinančios lenkiamųjų gelžbetoninių elementų darbą:

a) plokščiųjų pjūvių hipotezė, t.y. deformacijos skerspjūve kinta tiesiškai;
b) modelis pagrįstas vidutinių plyšių modeliu, t.y. skaičiavimuose taikomi vidutiniai įtempiai bei vidutinės deformacijos;
c) armatūros ir betono sukibimas laikomas idealiu. Armatūros praslydimas betone atsirandantis prie didesnių apkrovų, įvertinamas tempiamojo betono fizikine priklausomybe;
d) visiems tempiamojo betono sluoksniams galioja ta pati įtempių ir deformacijų diagrama.
e) Pastaroji prielaida yra mažiau tiksli tempiamajam betonui, nes esant duotajai deformacijai, supleišėjusio betono vidutiniai įtempiai yra didesni sluoksniuose prie armatūros, nei sluoksniuose labiau nutolusiuose nuo armatūros (3.7 pav.).



2.1 pav. Skirtingais atstumais nuo armatūros nutolusių tempiamojo betono sluoksnių vidutinės įtempių ir deformacijų diagramos (Girdžius 2011)

2.3. Geometrinės ir pusiausvyros lygtys.

Nagrinėjamas dvipusiai armuotas gelžbetoninis elementas be išankstinio įtempio (3.7 pav.). Kreivis gali būti nustatytas, turint dviejų skirtingų sluoksnių deformacijas:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_c}{h} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{d}; \tag{3.1}$$

čia

ε_t, $\varepsilon_c -$ kraštinių betono sluoksnių (atitinkamai tempiamojo ir gniuždomojo) vidutinės deformacijos;

$\varepsilon_s -$ tempiamosios armatūros vidutinė deformacija;

$h -$ skerspjūvio aukštis;

$d -$ naudingasis aukštis.

Neutraliosios ašies padėtis gali būti nustatyta iš sąlygos:

$$y_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t - \varepsilon_c} h = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s - \varepsilon_c} d. \tag{3.2}$$

Bet kurio sluoksnio deformacija:

$$\varepsilon_{z,i} = \kappa y_i; \tag{3.3}$$

čia

$y_i -$ i – tojo sluoksnio atstumas nuo neutraliosios ašies.

Laikomasi tokios ženklų taisyklės, kad deformacija tempiant bei y_i reikšmės sluoksniams esantiems žemiau neutraliosios ašies, būtų teigiamos.

Pusiausvyros lygtis:

$$F_{cc} + F_{sc} + F_{ct} + F_{st} = 0; \tag{3.4}$$

$$M_{CC} + M_{sc} + M_{ct} + M_{st} - M_0 = 0; \tag{3.5}$$

čia

F_{CC} – gniuždanti betono vidinė jėga;

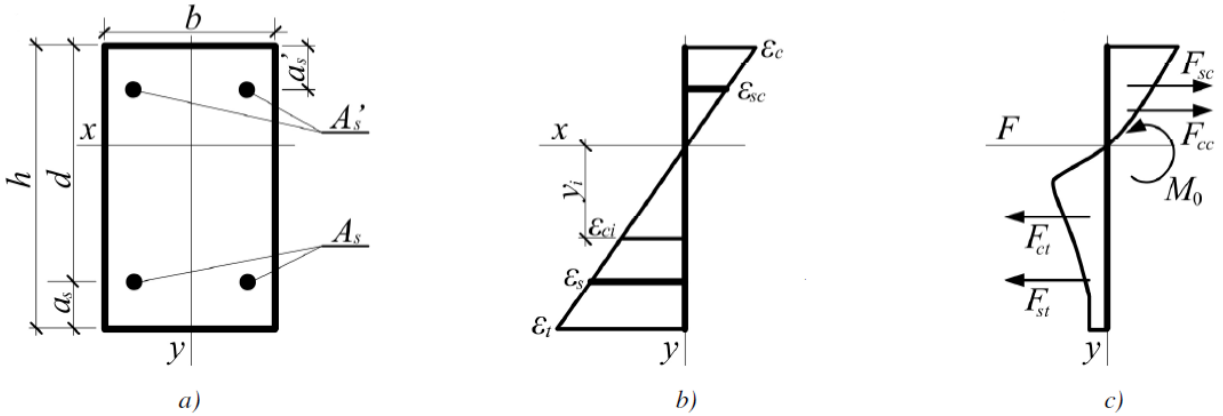
F_{sc} – gniuždanti armatūros vidinė jėga;

F_{ct} – tempianti betono vidinė jėga;

F_{st} – tempianti armatūros vidinė jėga;

M – vidaus jėgų momentas (indeksai analogiški vidaus jėgoms),;

M_0 – išorės lenkimo momentas.



2.2 pav. Lenkiamojo gelžbetoninio elemento skerspjūvio deformacijos ir įražos:
(a) dvipusiai armuoto elemento skerspjūvis;
(b) deformacijų diagrama; (c) vidaus jėgos ir išorės momentas (Girdžius 2011)

2.4. Betono vidutinių įtempių ir deformacijų diagramų nustatymo metodas, taikant lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramas.

Reikalingi tokie lenkiamųjų gelžbetoninių elementų duomenys:

a) Momento ir vidutinių deformacijų diagrama kraštiniam gniuždomojo betono sluoksniui;
b) Momento ir vidutinių deformacijų diagrama kraštiniam tempiamojo betono sluoksniui;
c) Armatūros įtempių ir deformacijų diagrama.

Turint a) ir b) diagramas, iš (3.1 – 3.3) formulių gali būti nustatyta neutralios ašies padėtis ir bet kurio sluoksnio deformacija. Duotai apkrovos pakopai gali būti išspręstos dvi pusiausvyros lygtys: (3.4) ir (3.5), apskaičiuojant dviejų nežinomųjų reikšmes. Vidutinių jėgų apskaičiavimui naudojamas sluoksniuotasis skerspjūvis. Žinant armatūros deformaciją, jos įtempiai bei atstojamoji nesunkiai nustatomi. Išorės momentas M_0 ir visų tempiamojo bei gniuždomojo betono sluoksnių deformacijos taip pat yra žinomi. Nežinomasis tėra tempiamojo bei gniuždomojo betono įtempiai, tačiau tiek tempiamojoje tiek gniuždomojoje skerspjūvio dalyje

yra daug sluoksnių, todėl turimų pusiausvyros lygčių (3.4) ir (3.5) nepakanka tų sluoksnių įtempiams apskaičiuoti.

Nežinomųjų skaičius gali būti sumažintas iki dviejų. Nežinomaisiais laikomi kraštinių sluoksnių gniuždomojo ir tempiamojo betono įtempiai. Skaičiavime apkrova didinama pakopomis. Pirmajai apkrovos pakopai apskaičiuojami vidutiniai tempiamojo ir gniuždomojo betono įtempiai atitinkantys kraštinių sluoksnių deformacijas. Gautos tempiamojo betono $\sigma - \varepsilon$ diagramos takomos visiems kitiems gniuždomojo ir tempiamojo betono sluoksniams, kurių deformacijos yra mažesnės už kraštinių sluoksnių deformacijas.Antrajai apkrovos pakopai nustatomos naujos kraštinių sluoksnių įtempių prieaugių reikšmės, o gautosios įtempių ir deformacijų diagramos taikomos mažiau deformuotiems sluoksniams. Tokiu būdu didėjančia tvarka nustatomos gniuždomojo ir tempiamojo betono vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos.

Pasiūlytojo metodo esmė parodyta 3.9 pav.a ir b. Jeigu taškus sujungtume tiesiomis atkarpomis, gautune netolydžias momentų ir deformacijų diagramas. Remiantis tokiomis diagramomis, apskaičiuotos medžiagos įtempių ir deformacijų kreivės būtų trūkios.

Kraštinio gniuždomojo betono sluoksnio deformacijos (3.9a pav.):

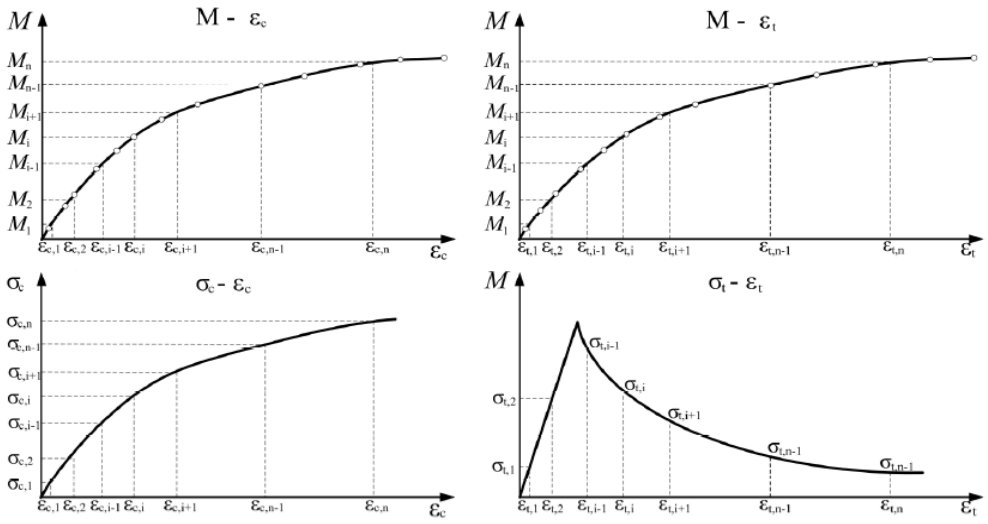
$$\varepsilon_{c,i} = \varepsilon_{c,1}, \varepsilon_{c,2} \dots \varepsilon_{c,n-1}, \varepsilon_{c,n} \tag{3.6}$$

Kraštinio tempiamojo betono sluoksnio deformacijos (3.9b pav.):

$$\varepsilon_{t,i} = \varepsilon_{t,1}, \varepsilon_{t,2} \dots \varepsilon_{t,n-1}, \varepsilon_{t,n} \tag{3.7}$$

Šios deformacijos atitinka momentus:

$$M_i = M_1, M_2 \dots M_{n-1}, M_n. \tag{3.8}$$



2.3 pav. Momentų ir deformacijų diagramos kraštiniams gniuždomojo ir tempiamojo betono sluoksniams bei apskaičiuotosios įtempių ir deformacijų kreivės gniuždomajam ir tempiamajam betonui (Girdžius 2011)

Bendrasis atvejis i – ajai apkrovos pakopai aprodytas 3.10, d pav. Įtempių $\sigma_{c,i}$ ir $\sigma_{t,i}$ nustatymui pusiausvyros lygtyse (3.4) ir (3.5) nariai F_{cc}, F_{ct}, M_{cc} ir M_{ct} suskaidomi į du komponentus:

$$F_{cc,i-1} + \Delta F_{cc,i} + F_{sc} + F_{ct,i-1} + \Delta F_{ct,i} + F_{st} = 0; \tag{3.9}$$

$$M_{cc,i-1} + \Delta M_{cc,i} + M_{sc} + M_{ct,i-1} + \Delta M_{ct,i} + M_{st} + M_0 = 0. \tag{3.10}$$

čia

$F_{cc,i-1}$, $F_{ct,i-1}$, $M_{cc,i-1}$ ir $M_{ct,i-1}$ – įtempių veikiančių betone, atstojamosios ir jų momentai, nustatyti atitinkamai betono zonai, neįvertinus kraštinio sluoksnio $(j = 1, 2 \ldots i-1)$;

$\Delta F_{cc,i}$, $\Delta F_{ct,i}$, $\Delta M_{cc,i}$, $\Delta M_{ct,i}$ –tas pats, įvertinus tik kraštinius sluoksnius $(j = 1)$.

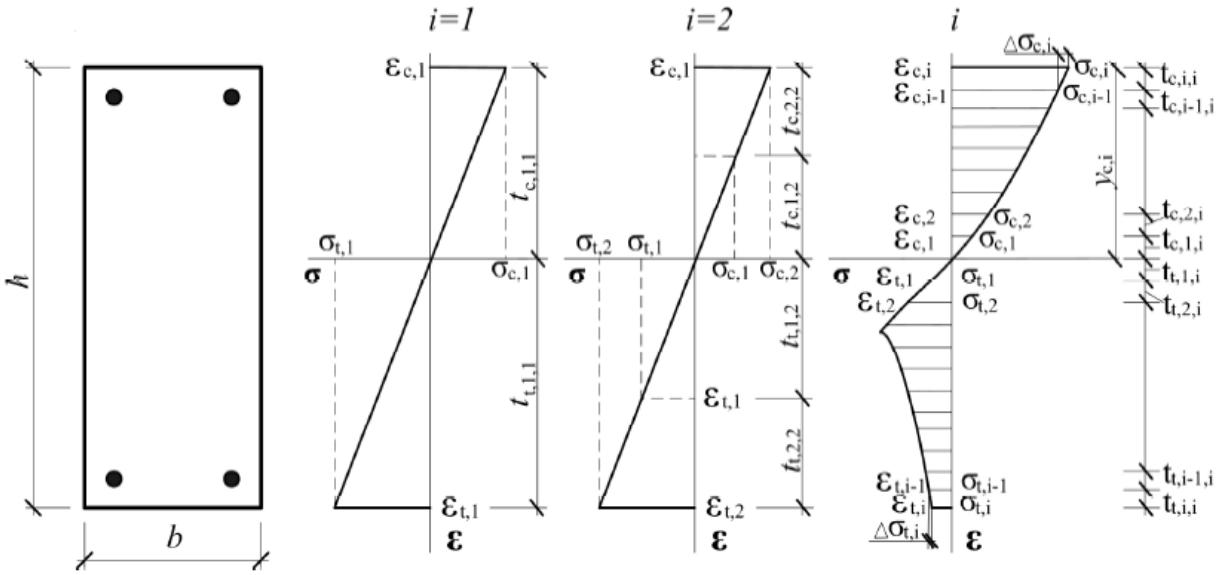
I – ajai apkrovos pakopai $F_{cc,i-1}$, $F_{ct,i-1}$, $M_{cc,i-1}$ ir $M_{ct,i-1}$ gali būti nesunkiai nustatyti, nes tiek gniuždomojo tiek tempiamojo betono įtempiai atitinkamiems sluoksniams $(j = 1, 2 \ldots i-1)$ buvo apskaičiuoti ankstesnėse pakopose. Likusieji keturi betono atstojamųjų ir jų momentų komponentai gali būti išreikšti per įtempių prieaugius $\Delta\sigma_{c,i}$ ir $\Delta\sigma_{t,i}$ kraštiniuose sluoksniuose (3.10, d pav.):

$$\Delta F_{cc,i} = bt_{c,i,i}\left[\sigma_{c,i-1} + \frac{1}{2}\Delta\sigma_{c,i}\right]; \tag{3.11}$$

$$\Delta M_{cc,i} = bt_{c,i,i}\left[\sigma_{c,i-1}\left(y_{c,i-1}\frac{1}{2}t_{c,i,i}\right) + \frac{1}{2}\Delta\sigma_{c,i}\left(y_{c,i} - \frac{1}{3}t_{c,i,i}\right)\right]; \tag{3.12}$$

$$\Delta F_{ct,i} = bt_{t,i,i}\left[\sigma_{t,i-1} + \frac{1}{2}\Delta\sigma_{t,i}\right]; \tag{3.13}$$

$$\Delta M_{ct,i} = bt_{t,i,i}\left[\sigma_{t,i-1}\left(y_{t,i-1}\frac{1}{2}t_{t,i,i}\right) + \frac{1}{2}\Delta\sigma_{t,i}\left(y_{t,i} - \frac{1}{3}t_{t,i,i}\right)\right]. \tag{3.14}$$



2.4 pav. Betono sluoksnių skaičius įvairioms apkrovos pakopoms bei atitinkamai įtempiai ir deformacijos (Girdžius 2011)

Įtempių prieaugiai $\Delta\sigma_{c,i}$ ir $\Delta\sigma_{t,i}$ nustatomi tiesiogiai ši pusiausvyros lygčių (3.9) ir (3.10). Tuomet betono įtempiai apskaičiuojami iš šių priklausomybių

$$\sigma_{c,i} = \sigma_{c,i-1} + \Delta\sigma_{c,i}; \tag{3.15}$$

$$\sigma_{t,i} = \sigma_{t,i-1} + \Delta\sigma_{t,i}. \tag{3.16}$$

2.5. Skaitinis eksperimentas

Tyrimų planas sudarytas atsižvelgiant į atvirkštinio uždavinio iteracinio sprendimo ypatumus ir kaupiamąjį atitinkamų skaičiavimo paklaidų pobūdį bei parinktų parametrų atitikimą projektavime naudojamoms reikšmėms. Tai leido sugeneruoti reprezentatyvią lenkiamųjų gelžbetoninių elementų fizikinių parametrų imtį.

2.1 lentelė. Skerspjūvio parametrai naudojami skaitiniame eksperimente

Parametrai	Armavimo koeficientas	Efektyvusis skerspjūvio aukštis	Armatūros tamprumo modulis	Betono klasė
Naudojamos reikšmės	Nuo 0,6 iki 2,0%	Nuo 0,75 iki 0,975	Nuo 60 GPa iki 210 GPa	Nuo C20 iki C60

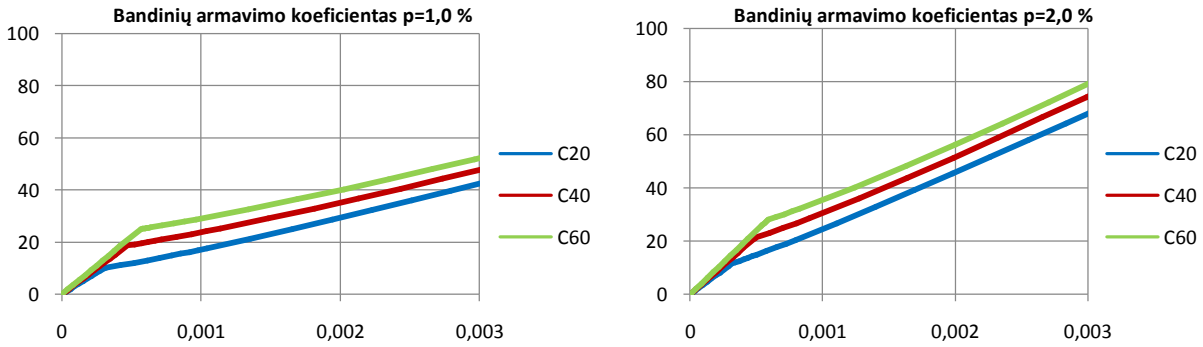
Įvertinus atvirkštinio uždavinio iteracinio sprendimo ypatumus ir skaičiavimo paklaidų kaupiamąjį pobūdį bei atlikus bandomuosius skaičiavimus, diagramos buvo išlyginamos naudojant judančio vidurkio priartėjimo metodiką.

2.2 lentelė. Judančio vidurkio priartėjimo metodikos taikymas

EN 1992-1-1	ACI 318-11	SP 52-101	GB50010-2002

2.5.1. ***Momentų ir kreivių diagramos pagal EN 1992 – 1 – 1 projektavimo normas***

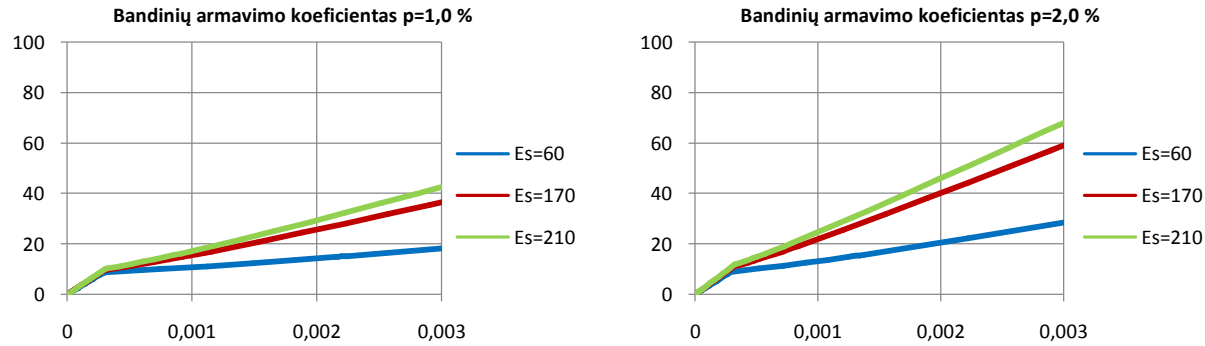
Šiame skyriuje atliekamas skaitinis eksperimentas, taikant Europos projektavimo normų EN 1992 – 1 – 1 deformacijų skaičiavimo rekomendacijas lenkiamiesiems gelžbetoniniams elementams. Pirmiausia apskaičiuojamos momentų ir kreivių diagramos, tada atliekama šių diagramų parametrinė analizė. Skaitiniame eksperimente naudojami šie parametrai: armavimo koeficientas (p=1,0, 2,0%) ir betono klasė (C20/25, C40/50, C60/75).



a) b)

2.5 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0%

2.5 paveiksle parodytos skirtingai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramos, kintant betono klasei (C20/25, C40/50, C60/75). Galime pastebėti, jog naudojamo betono klasė daro įtaką elemento pleišėjimo momentui M_{cr}. Kuo stipresnis naudojamas betonas, tuo didesnė elemento laikomoji galia. Skaitiniame eksperimente naudojami šie parametrai: armavimo koeficientas (p=1,0, 2,0%) ir armatūros tamprumo modulis (Es=60, 170, 210 GPa).



a) b)

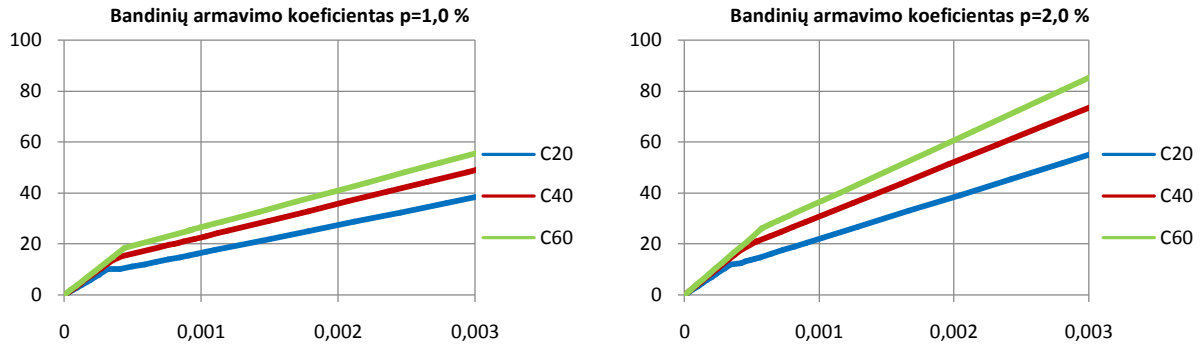
2.6 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0%

2.6 paveiksle parodytos skirtingai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui (Es=60, 170, 210 GPa). Galime pastebėti, jog naudojamos armatūros tamprumo modulis didžiausią įtaką daro elementui jau supleišėjus, esant didesniam armatūros tamrumo moduliui, didėja laikomoji galia. Šis efektas stipriau armuotiems elementams juntamas labiau.

2.5.2. *Momentų ir kreivių diagramos pagal Rusijos SP 52 – 101 projektavimo normas*

Šiame skyriuje atliekamas skaitinis eksperimentas, taikant Rusijos projektavimo normų SP 52 – 101 deformacijų skaičiavimo rekomendacijas lenkiamiesiems gelžbetoniniams elementams. Pirmiausia apskaičiuojamos momentų ir kreivių diagramos, tada atliekama šių diagram

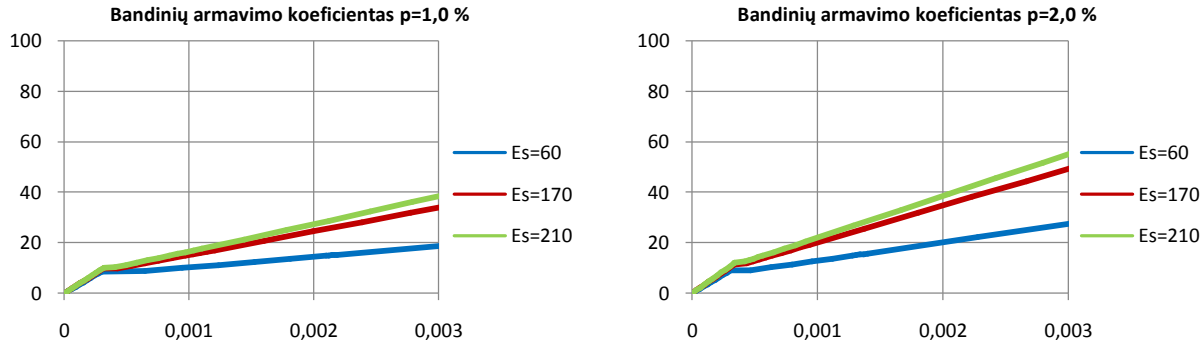
parametrinė analizė. Skaitiniame eksperimente naudojami šie parametrai: armavimo koeficientas (p=1,0, 2,0%) ir betono klasė (C20/25, C40/50, C60/75).



a) b)

2.7 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0%

2.7 paveiksle parodytos skirtingai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramos, kintant betono klasei (C20/25, C40/50, C60/75). Galime pastebėti, jog naudojamo betono klasė daro įtaką elemento pleišėjimo momentui M_{cr}. Kuo stipresnis naudojamas betonas, tuo didesnė elemento laikomoji galia. Skaitiniame eksperimente naudojami šie parametrai: armavimo koeficientas (p=1,0, 2,0%) ir armatūros tamprumo modulis (Es=60, 170, 210 GPa).



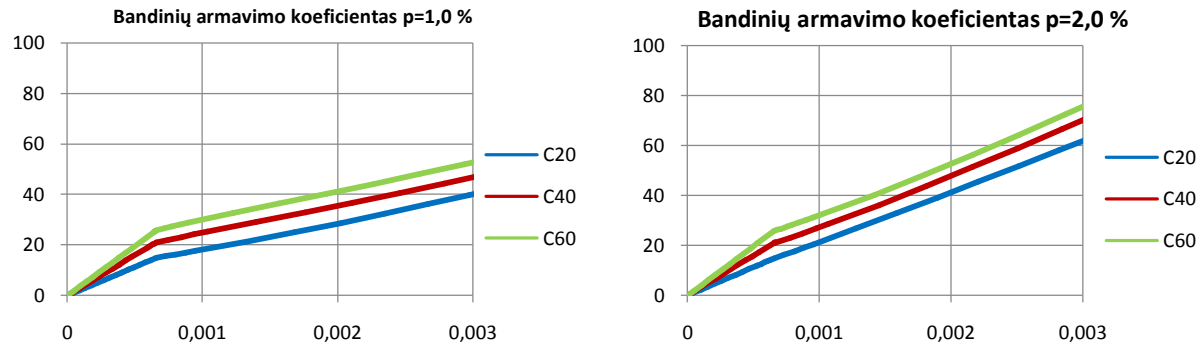
a) b)

2.8 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0%

2.8 paveiksle parodytos skirtingai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui (Es=60, 170, 210 GPa). Galime pastebėti, jog naudojamos armatūros tamprumo modulis didžiausią įtaką daro elementui jau supleišėjus, esant didesniam armatūros tamrumo moduliui, didėja laikomoji galia. Šis efektas stipriau armuotiems elementams juntamas labiau.

2.5.3. ***Momentų ir kreivių diagramos pagal JAV ACI 318-11 projektavimo normas***

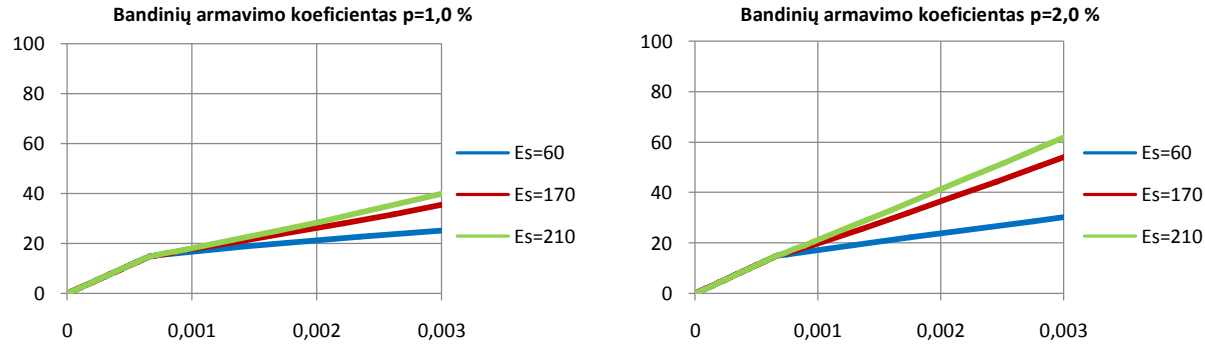
Šiame skyriuje atliekamas skaitinis eksperimentas, taikant JAV ACI 318-11 projektavimo normų deformacijų skaičiavimo rekomendacijas lenkiamiesiems gelžbetoniniams elementams. Pirmiausia apskaičiuojamos momentų ir kreivių diagramos, tada atliekama šių diagram parametrinė analizė. Skaitiniame eksperimente naudojami šie parametrai: armavimo koeficientas (p=1,0, 2,0%) ir betono klasė (C20/25, C40/50, C60/75).



a) b)

2.9 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0%

2.9 paveiksle parodytos skirtingai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramos, kintant betono klasei (C20/25, C40/50, C60/75). Galime pastebėti, jog naudojamo betono klasė daro įtaką elemento pleišėjimo momentui M_{cr}. Kuo stipresnis naudojamas betonas, tuo didesnė elemento laikomoji galia. Skaitiniame eksperimente naudojami šie parametrai: armavimo koeficientas (p=1,0, 2,0%) ir armatūros tamprumo modulis (Es=60, 170, 210 GPa).



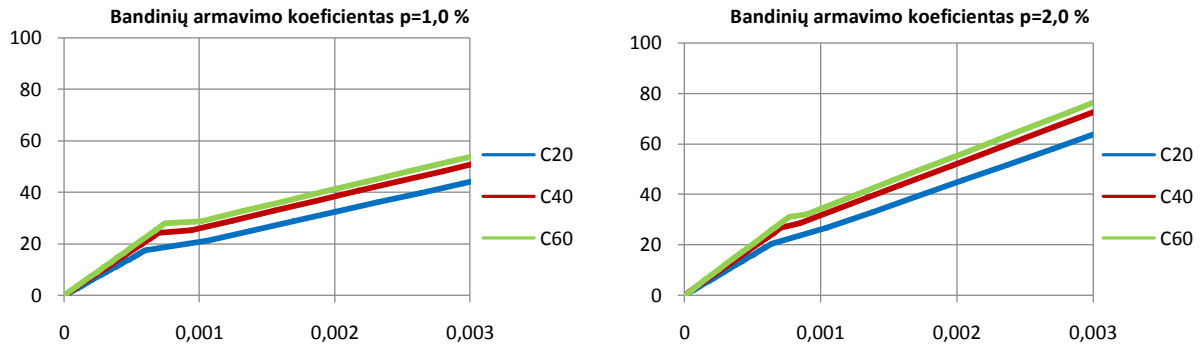
a) b)

2.10 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0%

2.10 paveiksle parodytos skirtingai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui (Es=60, 170, 210 GPa). Galime pastebėti, jog naudojamos armatūros tamprumo modulis didžiausią įtaką daro elementui jau supleišėjus, esant didesniam armatūros tamrumo moduliui, didėja laikomoji galia.

2.5.4. ***Momentų ir kreivių diagramos pagal Kinijos projektavimo normas***

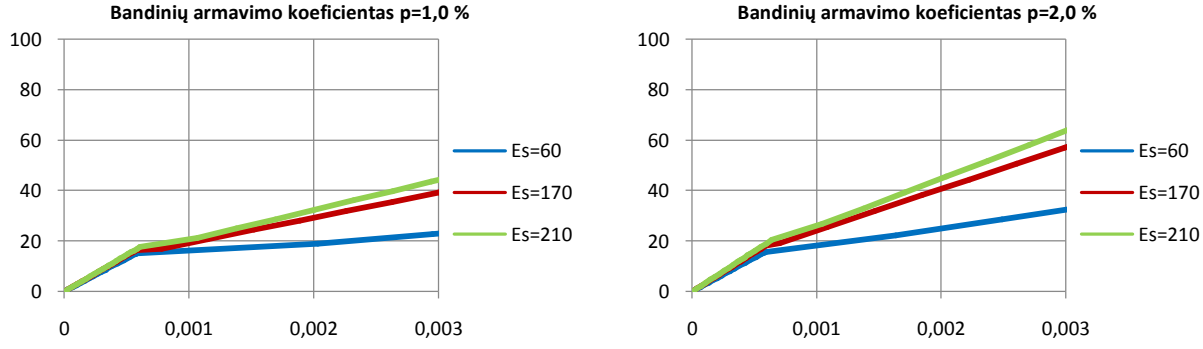
Šiame skyriuje atliekamas skaitinis eksperimentas, taikant Kinijos projektavimo normų deformacijų skaičiavimo rekomendacijas lenkiamiesiems gelžbetoniniams elementams. Pirmiausia apskaičiuojamos momentų ir kreivių diagramos, tada atliekama šių diagram parametrinė analizė. Skaitiniame eksperimente naudojami šie parametrai: armavimo koeficientas (p=1,0, 2,0) ir betono klasė (C20/25, C40/50, C60/75).



a) b)

2.11 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0%

2.11 paveiksle parodytos skirtingai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramos, kintant betono klasei (C20/25, C40/50, C60/75). Galime pastebėti, jog naudojamo betono klasė daro įtaką elemento pleišėjimo momentui M_{cr}. Kuo stipresnis naudojamas betonas, tuo didesnė elemento laikomoji galia. Skaitiniame eksperimente naudojami šie parametrai: armavimo koeficientas (p=1,0, 2,0%) ir armatūros tamprumo modulis (Es=60, 170, 210 GPa).



a) b)

2.12 pav. Momentų ir kreivių diagramos kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0%

2.12 paveiksle parodytos skirtingai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui (Es=60, 170, 210 GPa). Galime pastebėti, jog naudojamos armatūros tamprumo modulis didžiausią įtaką daro elementui jau

supleišėjus, esant didesniam armatūros tamrumo moduliui, didėja laikomoji galia. Šis efektas stipriau armuotiems elementams juntamas labiau.

2.6. Antrojo skyriaus išvados ir rezultatai

- Susipažinta su VGTU Tiltų ir specialųjų statinių katedroje sukurta metodika, skirta atvirkštinio gelžbetonio deformacijų nustatymo uždavinio sprendimui, kai pagal gelžbetoninio elemento momentų ir kreivių priklausomybes apskaičiuojamos tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos.
- Sudarytas tyrimų planas, parenkant lenkiamųjų gelžbetoninių elementų fizikinius parametrus, atitinkančius jų naudojimą praktikoje. Sudarant tyrimų planą buvo atsižvelgta į atvirkštinio uždavinio iteracinio sprendimo ypatumus bei skaičiavimo paklaidų kaupiamojo pobūdžio, buvo pritaikyta judančio vidurkio metodika.
- Parinktiems skerspjūviams sugeneruotos momentų ir kreivių diagramos pagal Europos, JAV, Rusijos ir Kinijos projektavimo normų reikalavimus. Pastebėta, jog:
    - Betono stipris daro didesnę įtaką nei armatūros tamprumo modulis momentų ir kreivių diagramoms apskaičiuotoms taikant visas paminėtas projektavimo normas. Ypač tai pastebima daugiau armuotuose elementuose;
    - Betono stipris akivaizdžiai daro dižiausią įtaką momentų ir kreivių diagramoms apskaičiuotoms pagal Rusijos projektavimo normas;
    - Mažas armatūros tamprumo modulis, būdingas nemetalinei stiklo pluošto armatūrai, daro ženklią įtaką momentų ir kreivių diagramoms, apskaičiuotoms taikant visas paminėtas projektavimo normas;
    - Įprasta plieninė armatūra neturi ženklios įtakos momentų ir kreivių diagramoms, apskaičiuotoms taikant visas paminėtas projektavimo normas;
    - Kiti paremetrai (armavimo koeficientas, efektyvusis skerspjūvio aukštis) neturi didelės įtakos momentų kreivių diagramoms.

3. ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ DIAGRAMŲ PALYGINAMOJI ANALIZĖ

3.1. Supleišėjusio lenkiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos

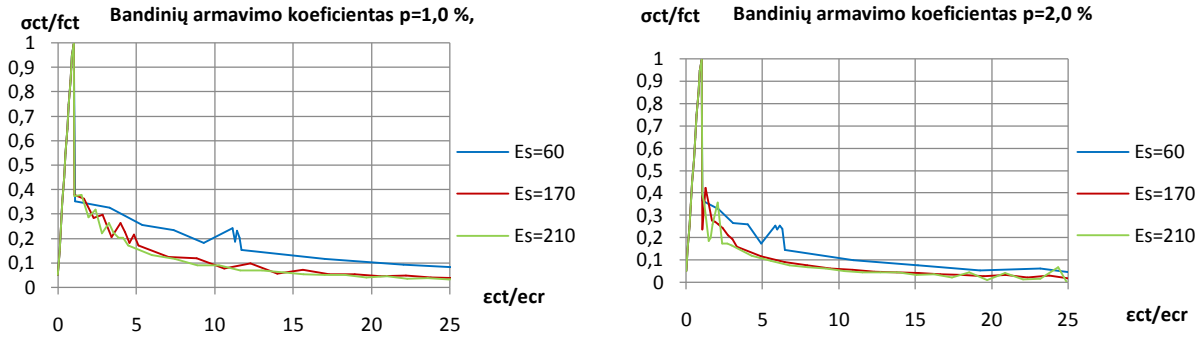
Šiame poskyryje pateiktos įtempių ir deformacijų diagramos gautos taikant atvirkštinio uždavinio sprendimo metodiką. Visi šiame darbe nagrinėjami lenkiamieji gelžbetoniai elementai yra apkrauti trumpalaike apkrova, bei stebima kokią įtaką įtempiams ir deformacijoms turi supleišėjęs tempiamasis betonas. Žemiau pateiktoje lentelėje, matyti kokie nagrinėjamų elementų parametrai daro įtaką gelžbetoninių elementų tempiamajo sustandėjimo efektui. Toliau pateikiamos normalizuotos įtempių ir deformacijų diagramos, nagrinejama kokią įtaką diagramoms turi kievienas iš parametrų. Skaičiuojant diagramų užimamus plotus, buvo pasirinkta kreivės atkarpa nuo 0 iki tol, kol εct/ecr pasiekia 5,0. Šioje dalyje skirtumai matomi labiausiai, ji naudojama visoms įtempių ir deformacijų diagramoms. Neigiamos kreivių dalys nėra vertinamos. Jeigu kreivė kerta ašį, nepasiekus nustatytos santykinės deformacijų ribos, kuri naudojama skaičiavimuose, vertinama tik teigiama diagramos dalis.

3.1 lentelė. Tempiamojo sustandėjimo priklausomybė nuo skerspjjūvio parametrų

	Armavimo koeficientas	Efekyvusis skerspjūvio aukštis	Armatūros tamprumo modulis	Betono klasė
EN 1992 – 1 – 1				
ACI 318-11				
SP 52 – 101				
GB50010-2002				

3.2. Įtempių ir deformacijų diagramos pagal Europos EN 1992 – 1 – 1 projektavimo normas

Kaip matome iš 3.1 lentelės, taikant Europos EN 1992 – 1 – 1 projektavimo normas, vienintelis parametras darantis įtaką lenkiamųjų gelžbetoninių elementų tempiamajam sustandėjimui yra naudojamos armatūros tamprumo modulis. Žemiau pateikiamos diagramos dviems armavimo atvejams (p=1,0, 2,0%)



a) b)

3.1 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0%

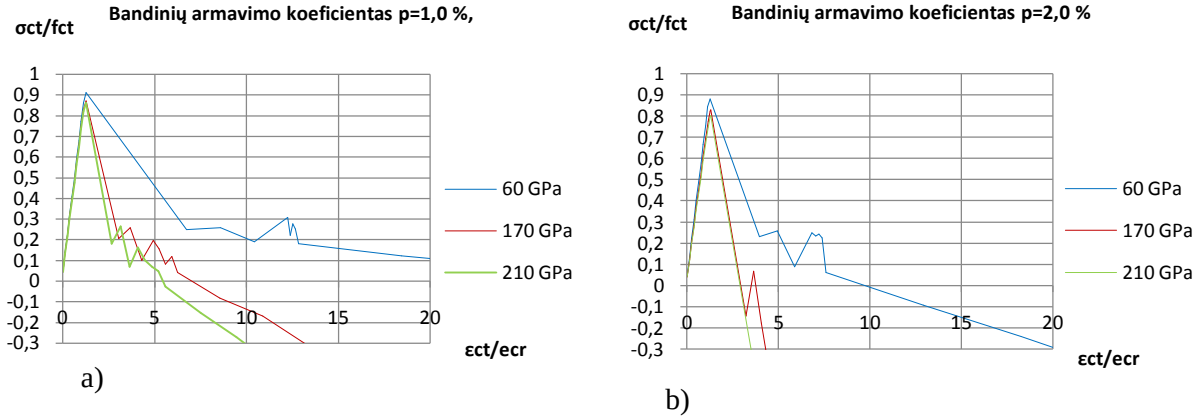
3.1 paveiksle palygintos skirtingų armavimo koeficiento (p=1,0, 2,0%) įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui ($E_s = 60, 170, 210$ GPa). Pateiktuose paveiksluose matoma, jog žemo tamprumo modulio armatūra daro įtaką supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento įtempių ir deformacijų diagramai. Armatūros tamprumo moduliui sumažėjus 3,5 karto, diagramos užimamas plotas padidėjo 12%. Toks žemas armatūros tamprumo modulis būdingas nemetalinei stiklo pluošto armatūrai. Nagrinėjant įprastą plieninę armatūrą, tamprumo modulio įtakos elementų tempiamajam sustandėjimui nepastebėta, tad galime daryti išvadą, jog šis perteklinis tempiamasis sustandėjimas pasireiškia tik armatūrai, su labai žemu tamprumo moduliu. Armavimo koeficientas šiuo atveju neturi reikšmės.

3.2 lentelė. Diagramų plotai pagal EN 1992-1-1 kintant armatūros tamprumo moduliui

	p=1,0%		p=2,0%	
	Plotas	Santykinis plotas	Plotas	Santykinis plotas
Es=60 GPa	1,97	1,12	1,97	1,12
Es=170 GPa	1,71	0,97	1,71	0,97
Es=210 GPa	1,75	1,00	1,75	1,00

3.3. Įtempių ir deformacijų diagramos pagal Rusijos SP 52 – 101 projektavimo normas

Kaip matome 3.1 lentelėje, taikant Rusijos SP 52 – 101 projektavimo normas, įtaką gelžbetoninių elementų tempiamajam sustandėjimui daro du parametrai: armatūros tamprumo modulis, naudojamo betono klasė. Žemiau pateikiamos diagramos, bei detalesnė skerspjūvio parametrų įtakos analizė.

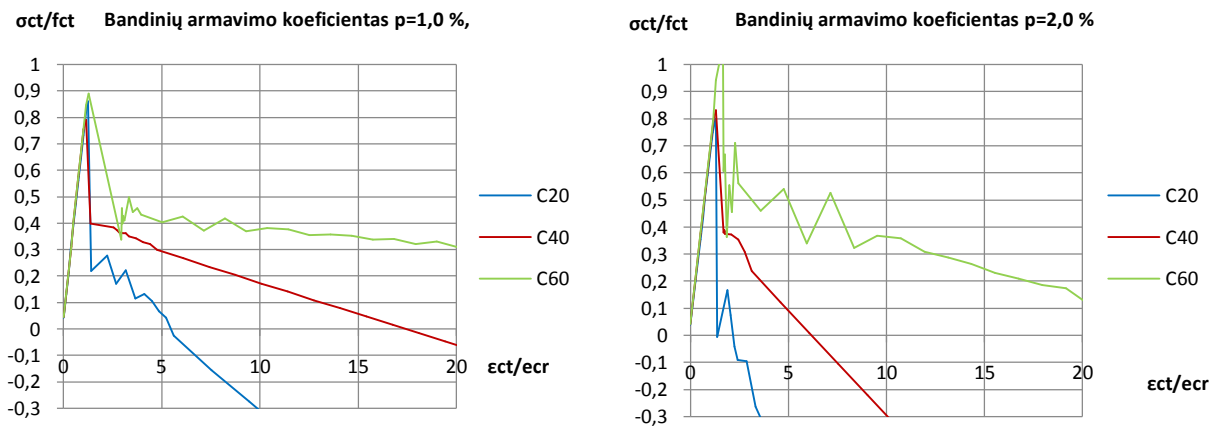


3.2 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0%

3.2 paveiksle palygintos skirtingų armavimo koeficiento (p=1,0, 2,0%) įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui ($E_s = 60, 170, 210$ GPa). Pateiktuose paveiksluose matoma, jog žemo tamprumo modulio armatūra daro įtaką supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento įtempių ir deformacijų diagramai. Armatūros tamprumo moduliui sumažėjus 3,5 karto, diagramos užimamas plotas padidėjo 2,28 karto. Nagrinėjant įprastą plieninę armatūrą, tamprumo modulio įtaka tempiamajam sustandėjimui yra nedidelė, tad galime daryti išvadą, jog šis perteklinis tempiamasis sustandėjimas pasireiškia tik armatūrai, su labai žemu tamprumo moduliu.

3.3 lentelė. Diagramų plotai pagal SP 52-101 kintant armatūros tamprumo moduliui

	p=1,0%		p=2,0%	
	Plotas	Santykinis plotas	Plotas	Santykinis plotas
Es=60 GPa	3,81	2,28	2,51	2,08
Es=170 GPa	1,98	1,18	1,27	1,05
Es=210 GPa	1,67	1,00	1,21	1,00



3.3 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0%

3.3 paveiksle palygintos skirtingų armavimo koeficiento (p=1,0, 2,0%) įtempių ir deformacijų diagramos, betono klasei (C20/25, C40/50, C60/75). Pateiktuose paveiksluose matoma, jog naudojamo betono klasė daro reikšmingą įtaką supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento įtempių ir deformacijų diagramai. Padidinus betono stiprį 2 kartus, diagramos užimamas plotas padidėjo 1,71 karto, o naudojant C60 klasės betoną 1,94 karto. Ši įtaka didesnė daugiau armuotiems elementams. Padidinus betono stiprį 2 kartus, diagramos užimamas plotas padidėjo 2,80 karto, o naudojant C60 klasės betoną netgi 5,19 karto.

3.4 lentelė. Diagramų plotai pagal SP 52-101 kintant betono klasei

	p=1,0%		p=2,0%	
	Plotas	Santykinis plotas	Plotas	Santykinis plotas
C20	1,31	1,00	0,60	1,00
C40	2,24	1,71	1,68	2,80
C60	2,54	1,94	3,11	5,19

Galima pastebėti (3.3 pav.), jog įtempių ir deformacijų diagramos apskaičiuotos pagal SP 52-101 kerta horizontalią ašį ir įgauna neigiamas reikšmes. Verta paminėti, jog kreiviai skaičiuojami vertinant papildomus koeficientus:

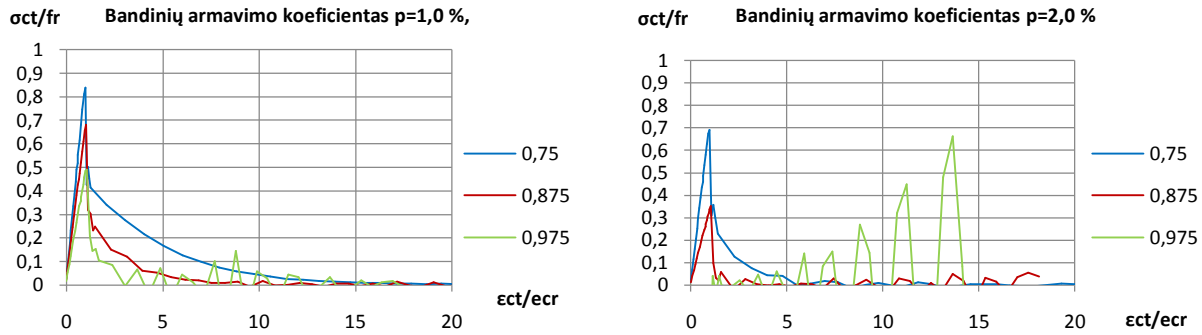
1. Skaičiuojant redukuoto skerspjūvio parametrus naudojamas betono tamprumo modulis E_{c1}, apskaičiuojamas naudojant koeficientas lygų 0,85 (šis koeficientas vertina gniuždomoju betono netampriąsias deformacijas);
2. Vertinant tempiamojo sustandėjimo efektą, tempiamosios armatūros deformacijų modulis $E_{s,red} = E_s/\psi_s$, apskaičiuojamas naudojant koeficientą $\psi_s = 1 - 0{,}8\,M_{cr}/M$.

Abu šie koeficientai turi įtakos skaičiuojant lenkiamojo gelžbetoninio elemento standumą $D = E_{c1}I_{red}$. Kuo didesnis lenkimo momentas M, tuo koeficiento ψ_s reikšmė artimesnė vienetui,

o $E_{s,red}$ reikšmė, artimesnė E_s ir tuo mažesnis redukuoto skerspjūvio inercijos momento I_{red} padidėjimas dėl betono tempiamojo sustandėjimo. Kadangi betono deformacijos modulį mažinantis koeficientas liekas pastovus, apskaičiuotas elemento kreivis didėjant apkrovai gali viršyti tampriąsias deformacijas, tai tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramoje atspindi neigiamos reikšmės.

3.4. Įtempių ir deformacijų diagramos pagal JAV ACI 318-11 projektavimo normas

Kaip matome 3.1 lentelėje, taikant JAV ACI 318-11 projektavimo normas, įtaką gelžbetoninių elementų tempiamajam sustandėjimui daro keturi parametrai: armavimo koeficientas, efektyvusis skerspjūvio aukštis, armatūros tamprumo modulis, naudojamo betono klasė. Žemiau pateikiamos diagramos, bei detalesnė skerspjūvio parametrų įtakos analizė.

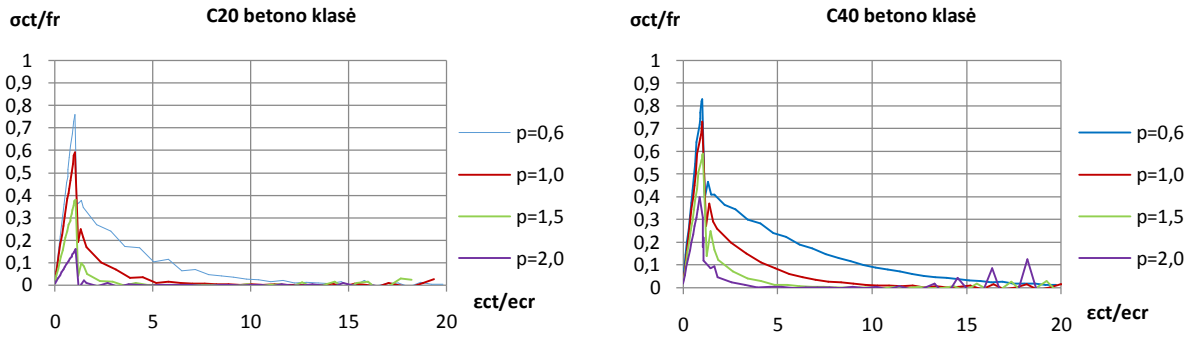


3.4 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant efektyviajam skerspjūvio aukščiui: a) p=1,0%; b) p=2,0%

3.4 paveiksle palygintos skirtingų armavimo koeficiento (p=1,0, 2,0%) įtempių ir deformacijų diagramos, kintant efektyviajam skerspjūvio aukščiui (0,75, 0,875, 0,975). Pateiktuose paveiksluose matoma, jog efektyvusis skerspjūvio aukštis daro reikšmingą įtaką supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento tempiamajam sustandėjimui. Efektyviajam skerspjūvio aukščiui sumažėjus nuo 0,975 iki 0,875 diagramos užimamas plotas padidėjo 1,76, o taikant efektyvujį skerspjūvio aukštį lygų 0,75, diagramos užimamas plotas padidėja 2,99 karto. Daugiau armuotiems elementams šis parametras daro mažesnę įtaką. Lyginant 0,875 ir 0,75 efektyviuosius aukščius, plotai yra atitinkamai 3,65 ir 1,96 karto mažesni.

3.5 lentelė. Diagramų plotai pagal ACI 318-11-08 kintant efektyviajam skerspjūvio aukščiui

	p=1,0%		p=2,0%	
	Plotas	Santykinis plotas	Plotas	Santykinis plotas
d/h=0,75	1,61	2,99	0,84	84,30
d/h=0,875	0,95	1,76	0,26	26,04
d/h=0,975	0,54	1,00	0,01	1,00



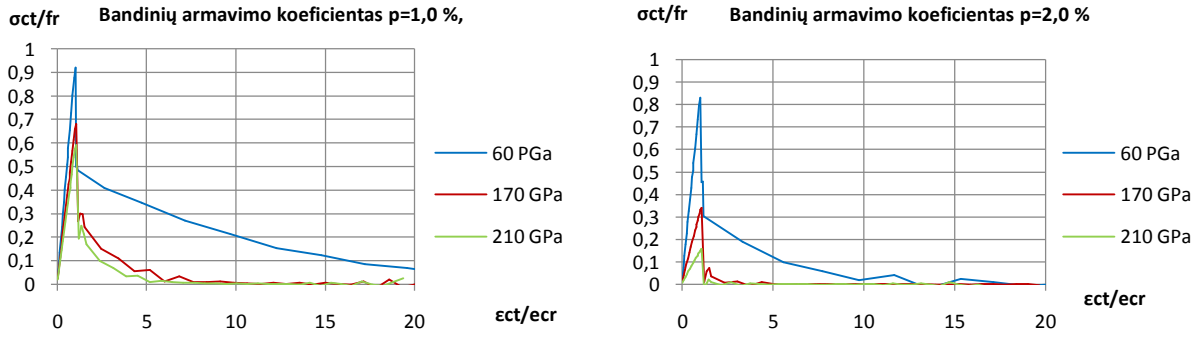
a) b)

3.5 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armavimo koeficientui: a) C20 betono klasė; b) C40 betono klasė

3.5 paveiksle palygintos dviejų betono klasių (C20/25, C40/50) įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armavimo koeficientui (p=0,6, 1,0, 1,5, 2,0%). Pateiktuose paveiksluose matoma, jog armavimo koeficientas daro reikšmingą įtaką supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento tempiamajam sustandėjimui. Armavimo koeficientui sumažėjus 3,33 karto, diagramos užimamas plotas padidėjo 13,12 karto. Ši įtaka yra mažesnė elementams pagamintiems iš didesnės klasės betono, šiuo atveju armavimo koeficientui sumažėjus 3,33 karto, diagramos užimamas plotas padidėjo 5,11 karto.

3.6 lentelė. Diagramų plotai pagal ACI 318-11 kintant armavimo koeficientui

	C20/25		C40/50	
	Plotas	Santykinis plotas	Plotas	Santykinis plotas
p=0,6	1,35	13,12	1,80	5,11
p=1,0	0,71	6,91	1,16	3,30
p=1,5	0,32	3,09	0,67	1,91
p=2,0	0,10	1,00	0,35	1,00



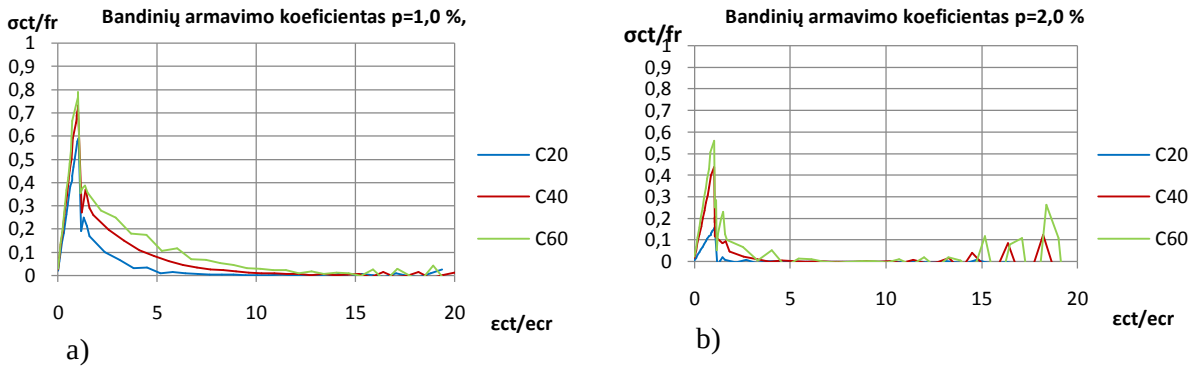
a) b)

3.6 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0%

3.6 paveiksle palygintos skirtingų armavimo koeficiento (p=1,0, 2,0%) įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui ($E_s = 60, 170, 210$ GPa). Pateiktuose paveiksluose matoma, jog žemo tamprumo modulio armatūra daro įtaką supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento tempiamajam sustandėjimui. Armatūros tamprumo moduliui sumažėjus 3,5 karto, diagramos užimamas plotas padidėjo 2,97 karto. Daugiau armuotiems elementams ši įtaka yra kur kas didesnė. Armatūros tamprumo modulį sumažinus 3,5 karto, diagramos užimamas plotas padidėjo 13,14 kartų. Nagrinėjant įprastą plieninę armatūrą, tamprumo modulio įtaka tempiamajam sustandėjimui nėra didelė, tad galime daryti išvadą, jog šis perteklinis tempiamasis sustandėjimas pasireiškia tik armatūrai, su labai žemu tamprumo moduliu.

3.7 lentelė. Diagramų plotai pagal ACI 318-11 kintant armatūros tamprumo moduliui

	p=1,0%		p=2,0%	
	Plotas	Santykinis plotas	Plotas	Santykinis plotas
Es=60 GPa	2,11	2,97	1,31	13,34
Es=170 GPa	0,95	1,34	0,26	2,65
Es=210 GPa	0,71	1,00	0,10	1,00



3.7 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant betono klasei: a) p=1,0%; b) p=2,0%

3.7 paveiksle palygintos skirtingų armavimo koeficiento (p=1,0, 2,0%) įtempių ir deformacijų diagramos, betono klasei (C20/25, C40/50, C60/75). Pateiktuose paveiksluose matoma, jog naudojamo betono klasė daro įtaką supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento tempiamajam sustandėjimui. Padidinus betono stiprį 2 kartus, diagramos užimamas plotas padidėjo 1,64 karto, o naudojant C60 klasės betoną 2,02 karto. Ši įtaka didesnė daugiau armuotiems elementams. Padidinus betono stiprį 2 kartus, diagramos užimamas plotas padidėjo 3,58 karto, o naudojant C60 klasės betoną netgi 5,57 karto.

3.8 lentelė. Diagramų plotai pagal ACI 318-11 kintant betono klasei

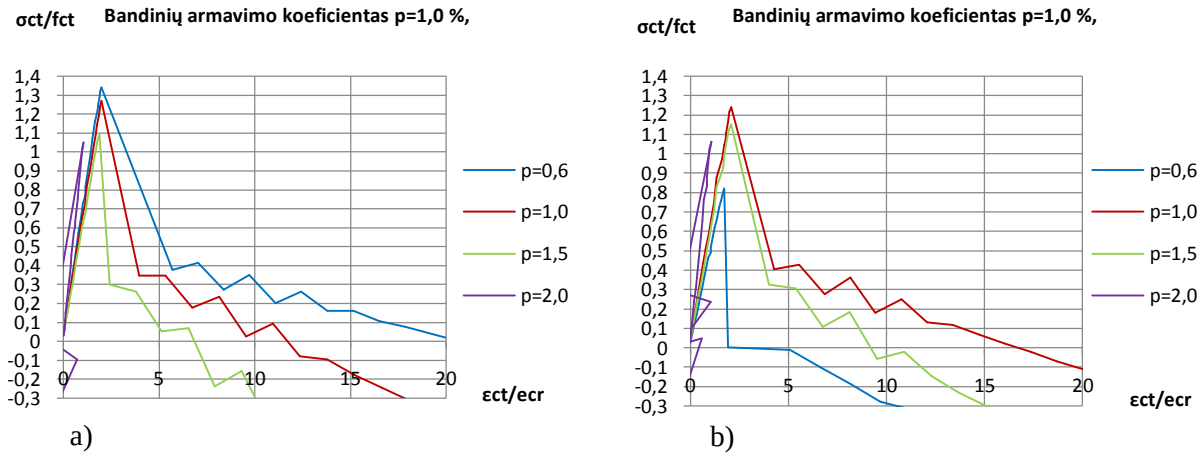
	p=1,0%		p=2,0%	
	Plotas	Santykinis plotas	Plotas	Santykinis plotas
C20	0,71	1,00	0,10	1,00
C40	1,16	1,64	0,37	3,58
C60	1,43	2,02	0,57	5,57

Galima pastebėti (3.4-3.7 pav.), jog pagal ACI 318-11 metodiką apskaičiuotose normalizuotose įtempių ir deformacijų diagramose maksimalūs tempiamojo betono įtempiai nepasiekia 1,0. Taip gali būti dėl dviejų priežasčių:

1. Pleišėjimo momentas skaičiuojamas naudojant betoninio skerspjūvio inercijos momentą I_g (nevertinant armatūros): $M_{cr} = f_r I_g / y_t$;
2. Įtempių ir deformacijų diagramoms normalizuoti naudojamas tempiamasis stipris, nustatomas pagal lenkimo bandymus (*rupture modulus*), kuris yra akivaidžiai didesnis nei maksimalūs tempiamojo betono įtempiai (tiesiogninio tempiamojo betono stiprio ekvivalentas), nustatomas šiame darbe.

3.5. Įtempių ir deformacijų diagramos pagal Kinijos GB50010-2002 projektavimo normas

Kaip matome 3.1 lentelėje, taikant Kinijos projektavimo normas, įtaką gelžbetoninių elementų tempiamajam sustandėjimui daro du parametrai: armavimo koeficientas, armatūros tamprumo modulis. Žemiau pateikiamos diagramos, bei detalesnė skerspjūvio parametrų įtakos analizė.



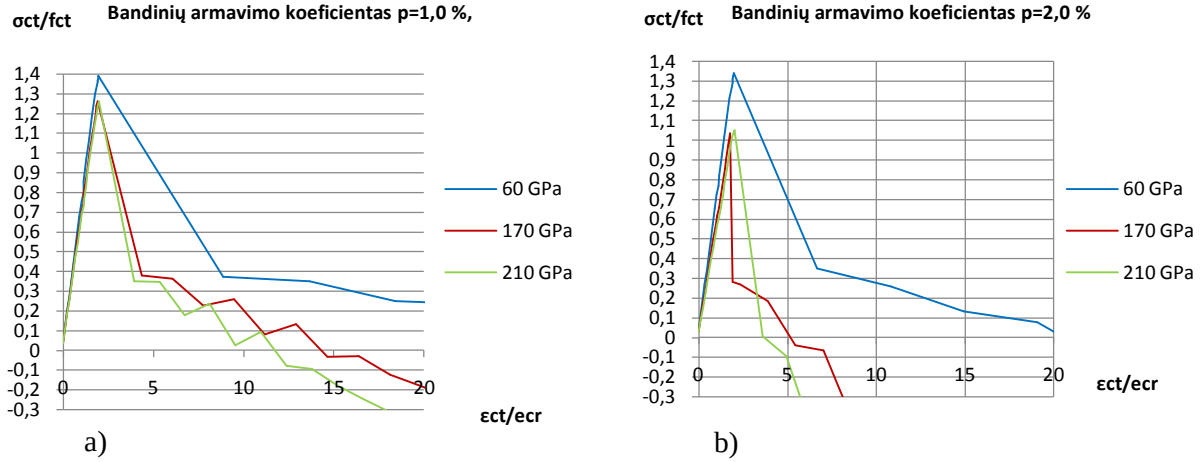
3.8 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armavimo koeficientui: a) C20 betono klasė; b) C40 betono klasė

3.8 paveiksle palygintos dviejų betono klasių (C20/25, C40/50) įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armavimo koeficientui (p=0,6, 1,0, 1,5, 2,0%). Pateiktuose paveiksluose

matoma, jog armavimo koeficientas daro įtaką supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento įtempių ir deformacijų diagramai. Armavimo koeficientui sumažėjus 3,33 karto, diagramos užimamas plotas padidėjo 2,18 karto. Ši įtaka yra mažesnė elementams pagamintiems iš didesnės klasės betono, šiuo atveju armavimo koeficientui sumažėjus 3,33 karto, diagramos užimamas plotas sumažėjo 2,08 karto.

3.9 lentelė. Diagramų plotai pagal GB50010-2002 kintant armavimo koeficientui

	C20/25		C40/50	
	Plotas	Santykinis plotas	Plotas	Santykinis plotas
p=0,6	4,27	2,18	0,97	0,48
p=1,0	3,27	1,67	3,48	1,71
p=1,5	2,05	1,05	3,02	1,48
p=2,0	1,96	1,00	2,04	1,00



3.9 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui: a) p=1,0%; b) p=2,0%

3.9 paveiksle palygintos skirtingų armavimo koeficiento (p=1,0, 2,0%) įtempių ir deformacijų diagramos, kintant armatūros tamprumo moduliui ($E_s = 60, 170, 210$ GPa). Pateiktuose paveiksluose matoma, jog žemo tamprumo modulio armatūra daro reikšmingą įtaką supleišėjusio lenkiamojo gelžbetoninio elemento įtempių ir deformacijų diagramai. Armatūros tamprumo moduliui sumažėjus 3,5 karto, diagramos užimamas plotas padidėjo 1,53 karto. Daugiau armuotiems elementams ši įtaka yra didesnė. Armatūros tamprumo modulį sumažinus 3,5 karto, diagramos užimamas plotas padidėjo 2,29 karto. Nagrinėjant įprastą plieninę armatūrą, tamprumo modulio įtaka tempiamajam sustandėjimui nėra dideli, tad galime daryti išvadą, jog šis perteklinis tempiamasis sustandėjimas pasireiškia tik armatūrai, su labai žemu tamprumo moduliu.

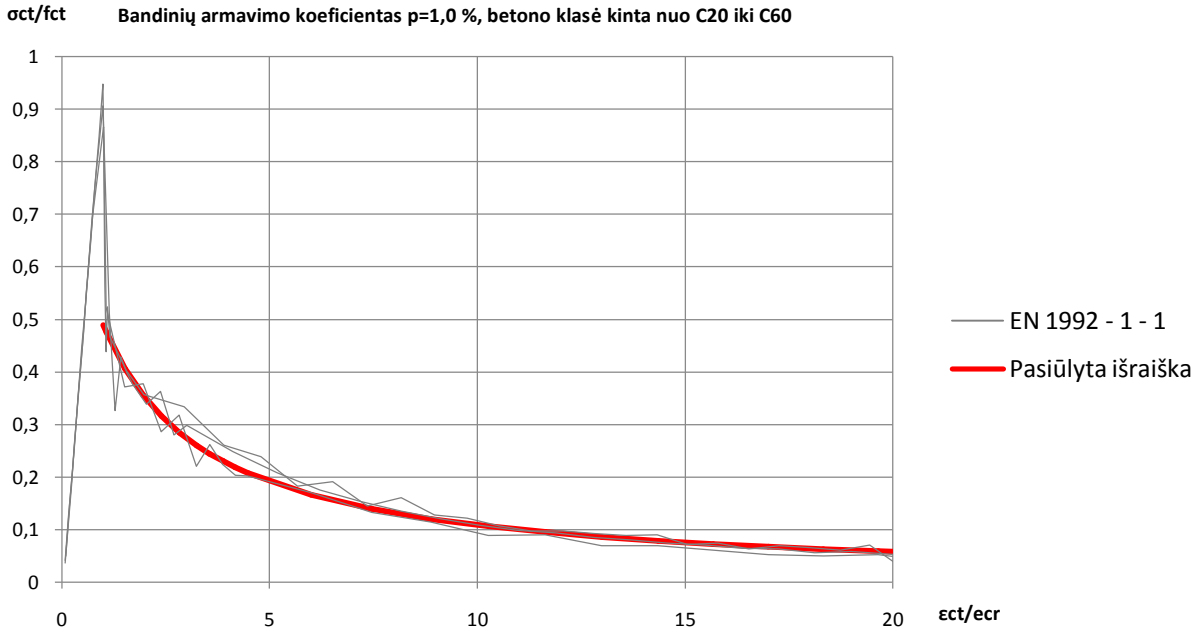
3.10 lentelė. Diagramų plotai pagal GB50010-2002 kintant armatūros tamprumo moduliu

	p=1,0%		p=2,0%	
	Plotas	Santykinis plotas	Plotas	Santykinis plotas
Es=60 GPa	4,99	1,53	4,49	2,29
Es=170 GPa	3,51	1,08	1,61	0,82
Es=210 GPa	3,26	1,00	1,96	1,00

Galima pastebėti (3.8-3.9 pav.), jog įtempių ir deformacijų diagramos apskaičiuotos pagal GB50010-2002 kerta horizontalią ašį ir įgauna neigiamas reikšmes. Verta paminėti, jog kreiviai skaičiuojami vertinant papildomą koeficientą $\psi = 1{,}1 - 0{,}65(f_{tk}/\rho_{te}\sigma_{sk})$. Todėl didėjant įtempiams armatūroje σ_{sk}, didėja šis koeficientas ir, atitinkamai, mažėja skerspjūvio lenkiamasis standis B_S (1.53).

3.6. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos modeliavimas

Įvertinus normų modelius atitinakančios tempiamojo sustandėjimo skaitinės realizacijos galimybes, nustatyta, kad įmanoma pasiūlyti universalią tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų analitinę išraišką. Kaip pavyzdys, pasiūlyta nesudėtinga empirinė išraiška aproksimuojanti EN 1992-1-1 tempiamojo betono įtempių ir deformacijų krentančiąją diagramos dalį.



3.10 pav. Pasiūlytos empirinės išraiškos ir Europos normų EN 1992 – 1 – 1 tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų palyginimas

Krentančioji diagramos dalis (3.10 pav.) apibrėžiama šia fomule:

$$\sigma_{ct} = \frac{f_{ct}}{1{,}25 + 0{,}8\frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{cr}}}; (3.1)$$

čia

f_{ct} – betono tempiamasis stipris;
ε_{ct} – lenkiamojo elemento deformacijos;
ε_{cr} – lenkiamojo elemento pleišėjimo deformacijos.

Ši empirinė išraiška galioja intervale $1 \leq \varepsilon_{ct}/\varepsilon_{cr} \leq \infty$. Deformacijų santykiui artėjant link begalybės, tempiamojo betono tempimo įtempiai artėja prie nulio. Kai deformacijų santykis pasiekia 1,0, betono įtempiai tampa apytiksliai lygūs $0{,}5f_{ct}$.

3.7. Trečiojo skyriaus rezultatai ir išvados

1. Naudojant Europos (EN 1992-1-1), JAV (ACI 318-11), Rusijos (SP 52-101) ir Kinijos (GB50010-2002) gelžbetoninių elementų projektavimo normas apskaičiuotas momentų ir kreivių diagramas, taikant VGTU Tiltų ir specialųjų statinių katedroje sukurtą metodiką, buvo apskaičiuotos ir normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos.
2. Visose projektavimo normose, išskyrus EN 1992-1-1, buvo pastebėta didelė apskaičiuotų tempimo įtempių reikšmių sklaida. Siekiant sumažinti šią sklaidą buvo pritaikyta judančio vidurkio įtempių ir deformacijų diagramų priartėjimo metodika.
3. Šiame darbe tyrinėjama efektyviojo skerspjūvio aukščio, armavimo koeficiento, armatūros tamprumo modulio ir betono klasės įtaka tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų formai:
    - EN 1992-1-1: įtempių ir deformacijų diagramoms įtaką gali turėti tik mažas tamprumo modulis, būdingas nemetalinei armatūrai. Plieninės armatūros charakteringas tamprumo modulis normalizuotų įtempių ir deformacijų diagram formai įtakos neturi, todėl įmanoma pasiūlyti universalią tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų analitinę išraišką.
    - ACI 318-11: įtempių ir deformacijų diagramoms įtaką daro visi nagrinėjami parametrai, o ypač armavimo koeficientas. Šiam koeficientui sumažėjus 3 kartus, įtempių ir deformacijų diagramos apibrėžtas plotas padidėjo apie 13 kartų. Normalizuoti tempimo įtempiai nepasiekia tempiamojo stiprio, nustatomo pagal lenkimo bandymus (*rupture modulus*). Didėjant armavimo koeficientui (iki 2 %) ir mažėjant betono klasei (iki C20) maksimalūs tempimo įtempiai gali sudaryti vos 10 % nuo stiprio, taikomo skaičiavimuose;

- SP 52-101: įtempių ir deformacijų diagramoms, įtaką daro mažas armatūros tamprumo modulis bei betono klasė. Betono stiprio įtaka didesnė didėjant armatūros kiekiui. Keičiant betono klasę nuo C20 iki C40, įtempių ir deformacijų diagramos apibrėžtas plotas padidėjo apie 3 kartus, o naudojant C60 klasės – netgi daugiau nei 5 kartus. Dėl naudojamų empirinių koeficientų apskaičiuotos kreivio reikšmės esant didelioms apkrovoms gali viršyti elastines reikšmes, atitinkamai, esant didelėms deformacijoms apskaičiuotos tempimo įtempių reikšmės yra neigiamos;
- GB50010-2002: įtempių ir deformacijų diagramoms įtaką daro mažas armatūros tamprumo modulis ir armavimo koeficientas. Armavimo koeficientui sumažėjus 3 kartus, įtempių ir deformacijų diagramos apibrėžtas plotas padidėjo 2 kartus, ši įtaka mežėja didėjant betono klasei. Analogiškai kaip ir Rusijos projektavimo normose, empiriškai apskaičiuotas kreivis gali viršyti elastines reikšmes, todėl, atitinkami tempimo įtempiai irgi įgauna neigiamas reikšmes.

4. Pasiūlyta empirinė išraiška aproksimuojanti EN 1992-1-1 tempiamojo betono įtempių ir deformacijų krentančiąją diagramos dalį galioja intervale $1 \leq \varepsilon_{ct}/\varepsilon_{cr} \leq \infty$.

DARBO REZULTATAI IR BENDROSIOS IŠVADOS

- Literatūros apžvalgoje pastebėta, jog didžiausią įtaką gelžetoninių elementų deformacijų skaitinio modeliavimo rezultatams turi betono pleišėjimo bei armatūros ir betono sąveikos – tempiamojo sustandėjimo idealizavimas. Esamose projektavimo normose tempiamasis sustandėjimas yra vertinamas netiesiogiai, taikant empirines priklausomybes su daugeliu koeficientų.
- Tyrimų planas, sudarytas atsižvelgiant į atvirkštinio uždavinio iteracinio sprendimo ypatumus ir kaupiamąjį atitinkamų skaičiavimo paklaidų pobūdį bei parinktų parametrų atitikimą projektavime naudojamoms reikšmėms, leido sugeneruoti reprezentatyvią lenkiamųjų gelžbetoninių elementų fizikinių parametrus imtį.
- Naudojant Europos (EN 1992-1-1), JAV (ACI 318-11), Rusijos (SP 52-101) ir Kinijos (GB50010-2002) gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normas apskaičiuotos momentų ir kreivių diagramas. Taikant VGTU sukurtą fizikinių modelių kūrimo metodą, paremtą vidutinio pleišėjimo koncepcija bei plokščiųjų pjūvių hipoteze, iš apskaičiuotų momentų ir kreivių diagramų gautos lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, veikiamų trumpalaike apkrova, vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos.
- Nustatyta, jog įtempių ir deformacijų diagramos sudarytos iš dviejų dalių: tampriosios, kylančios į viršų ir krentančios, atitinkančios supleišėjusio elemento elgseną. Taip pat pastebėta, jog skirtingi skerspjūvių parametrai daug didesnę įtaką daro krentančiai diagramos daliai.
- Visose projektavimo normose, išskyrus EN 1992-1-1, buvo pastebėtas didelė apskaičiuotų tempimo įtempių reikšmių sklaida. Siekiant sumažinti šią sklaidą buvo pritaikyta judančio vidurkio įtempių ir deformacijų diagramų priartėjimo metodika.
- Tyrinėta efektyviojo skerspjūvio aukščio, armavimo koeficiento, armatūros tamprumo modulio ir betono klasės įtaka normalizuotų tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų formai. Įtempių ir deformacijų diagramos buvo normalizuojamos nagrinėjant tempimo įtempių ir betono tempiamojo stiprio (atitinkančio normų reikalavimus), bei deformacijų ir betono pleišėjimo deformacijų santykius. Pagal gautus rezultatus pastebėta jog:
    - EN 1992-1-1: įtempių ir deformacijų diagramoms įtaką gali turėti tik mažas tamprumo modulis, būdingas nemetalinei armatūrai. Plieninės armatūros charakteringas tamprumo modulis normalizuotų įtempių ir deformacijų diagram formai įtakos neturi;

- ACI 318-11: įtempių ir deformacijų diagramoms įtaką daro visi nagrinėjami parametrai, o ypač armavimo koeficientas. Šiam koeficientui sumažėjus 3 kartus, įtempių ir deformacijų diagramos apibrėžtas plotas padidėjo apie 13 kartų. Taip pat pastebėta, kad normalizuoti tempimo įtempiai nepasiekia tempiamojo stiprio, nustatomo pagal lenkimo bandymus (*rupture modulus*). Didėjant armavimo koeficientui (iki 2 %) ir mažėjant betono klasei (iki C20) maksimalūs tempimo įtempiai gali sudaryti vos 10 % nuo stiprio, taikomo skaičiavimuose;
- SP 52-101: įtempių ir deformacijų diagramoms, įtaką daro mažas armatūros tamprumo modulis bei betono klasė. Betono stiprio įtaka didėja didėjant armatūros kiekiui. Keičiant betono klasę nuo C20 iki C40, įtempių ir deformacijų diagramos apibrėžtas plotas padidėjo apie 3 kartus, o naudojant C60 klasės – netgi daugiau nei 5 kartus. Be to, pastebėta jog, esant didelėms deformacijoms, gautos neigiamos betono tempimo įtempių reikšmės;
- GB50010-2002: įtempių ir deformacijų diagramoms įtaką daro mažas armatūros tamprumo modulis ir armavimo koeficientas. Armavimo koeficientui sumažėjus 3 kartus, įtempių ir deformacijų diagramos apibrėžtas plotas padidėjo 2 kartus, ši įtaka mažėja didėjant betono klasei. Analogiškai kaip ir SP 52-101, buvo gauti neigiami tempimo įtempiai.

- Įvertinus galimybes tempiamojo sustandėjimo skaitinės realizacijos atitinakančios normų modelius, nustatyta, kad įmanoma pasiūlyti universalią tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų analitinę išraišką, atitinkančią Europos normas. Kaip pavyzdys, pasiūlyta nesudėtinga empirinė išraiška aproksimuojanti EN 1992-1-1 tempiamojo betono įtempių ir deformacijų krentančiąją diagramos dalį.

Padėka

Autorius išreiškia nuoširdžią padėką savo vadovui *dr. Viktor Gribniak, Vilniaus Gedimino technikos universiteto Tiltų ir specialiųjų statinių katedros* tyrėjui, už kantrybę, rekomendacijas ir patarimus rengiant šį baigiamąjį magistro darbą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

BRANSON, D.E., 1977. Deformation of concrete structures. New York: McGraw Hill Book Company.

LST, 2007. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. *1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės, LST EN 1992-1-1:2005*. 2007. S.l.: LST (Lietuvos standartizacijos departamentas).

KARIHALOO, B. L. 1995. Fracture Mechan*ics and Structural Concrete*. Essex: Longman Scientific & Technical.

HOGNESTAD E. *A* Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members // Bulletin 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill., 1951.

BAČINSKAS, D. Integral model for long–term deformational analysis of flexural reinforced concrete members, Summary of Ph.D. Thesis, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania.

IRAVANI, S. AND MCGREGOR, J.G. Sustained load strength and short–term strain behavior of high–strength concrete, ACI Mater. J. 95. 1998.

KAKLAUSKAS, G. Integral Flexural Constitutive Model for Deformational Analysis of Concrete Structures, Technika, Vilnius, 2001.

CARREIRA D. J. AND CHU K. –H. Stress–Strain Relationship for Plain Concrete in Compression// *ACI Journal, Proceedings,* V. 82, No. 6, Nov.–Dec. 1985, p. 797–804 [26].

SHAH S. P. AND AHMAD S. H. Structural Properties of High Strength Concrete and its Implication for Precast Prestressed Concrete // *Portland Cement Inst. J. 30, No. 6* 1985.

FIELDS K., BISCHOFF P. H. Tension Stiffening and Cracking of High–Strenght Reinforced Concrete Tension Members, ACI Structural Journal, Vol. 101, No. 4, July–August 2004.

GONNERMAN, H. F.; SHUMAN E. C. 1928. Compresion, flexure and tension tests of plane concrete, in Proc. of American Society of Testing Materials 28 (2)

HSU T. C. T. Unified Theory of Reinforced Concrete, CRC Press, Inc., 1993.

VECCHIO F. J. AND COLLINS M. P. Response of Reinforced Concrete to In–Plane Shear and Normal Stresses. *Publication* No. 82–03, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 1982.

YAMAMOTO T., VECCHIO F. J. Analysis of Reinforced Coccreate Shells for Transverse Shear and Torsion // *ACI Structural Journal, March–April 2001.*

HORDIJK, D. A. 1991. *Local Approach to Fatigue of Concrete*. PhD dissertation. Delft University of technology, Delft, The Netherlands.

GRIBNIAK, V., 2009. *Shrinkage Influence on Tension-Stiffening of Concrete Structures*. S.l.: Vilnius Gediminas Technical University.

ACI COMMITTEE 318, 2011. *Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318M-11*. 2011. S.l.: ACI (American Concrete Institute). ISBN 9780870317453.

BISCHOFF P. H. Effects of Shrinkage on Tension Stiffening and Cracking in Reinforced Concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 3, June 2001, p. 363–374 [4]. *Branson D. E*. Deformation of Concreate Structures. New York: McGrew Hill Book Company, 1977

KAKLAUSKAS G. Integral Constituve Model for Deformational Analysis of Reinforced Concreate Members // Hadilitation Thesis, Vilnius Gediminas Technical University, 2000.

KAKLAUSKAS, G. AND GHABOUSSI, J. Stress–strain relations for cracked tensile concrete from RC beam tests, J. Struct. Engin., ASCE 127. 2001.