



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Saulius Šiaulys

SUKAMŲ ĮTEMPTOJO GELŽBETONIO SIJŲ STIPRUMAS
PRESTRESSED CONCRETE BEAMS STRENGTH UNDER TORSION

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 62402T107

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2010

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Juozas Valivonis

(Vardas, pavardė)

(Data)

Saulius Šiaulys

SUKAMŲ ĮTEMPTOJO GELŽBETONIO SIJŲ STIPRUMAS
PRESTRESSED CONCRETE BEAMS STRENGTH UNDER TORSION

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 62402T107

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Vadovas prof. dr. Juozas Valivonis
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas) (Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2010

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Technologijos mokslų sritis

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Statinių konstrukcijos studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Juozas Valivonis

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui Sauliui Šiauliui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: **Sukamų įtemptojo gelžbetonio sijų stiprumas**

patvirtinta 2009 m. Gruodžio 4 d. dekanu potvarkiu Nr. 451st

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2010m. Birželio 10 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti sukamųjų gelžbetoninių elementų skaičiavimo metodų bei kitų autorių rezultatų analizę.

Ištirti išankstinio apgniuždymo įtaką sukamų elementų laikomajai galiai. Nustatyti armavimo procento ir elemento matmenų įtaką sukamo elemento elgsenai ir laikomajai galiai. Atlikti sukamų elementų įtempių būvio kompiuterinę analizę.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

Lina Rutkienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

prof.dr. Juozas Valivonis
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

Saulius Šiaulys

(Vardas, pavardė)

2008 m. Spalio 2 d.

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedra

ISBN ISSN
Egz. Sk.
Data 2010-06-

Statinių konstrukcijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

SUKAMŲ ĮTEMPTOJO GELŽBETONIO SIJŲ STIPRUMAS

Atliko: **Saulius Šiaulys**

Vadovas: **prof. dr. Juozas Valivonis**

Kalba

☒ lietuvių

☐ anglų

ANOTACIJA

Pagrindinis magistro darbo tikslas – susipažinti su sukamais gelžbetoniniais elementais, jų apskaičiavimu ir nustatyti, kokią įtaką turi išankstinis apspaudimas ir armatūros kiekis sukamo elemento laikomajai galiai ir elgsenai.

Baigiamąjį magistro darbą sudaro: įvadas, trys dalys, išvados ir literatūros sąrašas. Pirmoje dalyje pateikiamos bendros žinios apie sukamus gelžbetoninius elementus ir atliekama skaičiavimo metodų analizė. Antroje dalyje nustatoma, kokią įtaką turi armatūros kiekis sukamų elementų elgsenai bei laikomajai galiai, taip pat atliekamas palyginimas tarp ACI 318-02 bei EC2 projektavimo normų bei rezultatų, gautų skaičiuojant pagal erdvinės santvaros teoriją. Trečioje dalyje nagrinėjama išankstinio apspaudimo įtaka elemento laikomajai galiai bei armatūros kiekio įtaka iš anksto apspaustų elementų stiprumui. Ketvirtoje darbo dalyje pateikiama kompiuterinė sukamų gelžbetonių elementų analizė, įvertinant medžiagos netiesiškumą. Analizė atliekama pasinaudojant baigtinių elementų programa ANSYS 11.0.

Darbo apimtis- 88psl. Darbe yra pateikta 19 lentelių, 57 paveikslai ir 32 bibliografiniai šaltiniai

Reikšminiai žodžiai:

sukimas, sukimo - sąsūkio kreivė, netiesinė analizė, sija, išankstinis apspaudimas, gelžbetonis, medžiagos netiesiškumas, Ansys 11.0

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures

ISBN ISSN
Egz. Sk.
Data 2010-06-

Thesis for Master's Degree in the Study Programme of the Construction of Structures

PRESTRESSED CONCRETE BEAMS STRENGTH UNDER TORSION

Author: **Saulius Šiaulys**

Academic supervisor: **prof. dr. Juozas Valivonis**

Language

Lithuanian

X English

ANNOTATION

The main aim of the master's thesis is to comprehend the reinforced concrete elements under torsion and their calculation methods. Determine the prestress and reinforcement volume ration influence for the reinforced concrete beams strength and behavior under torsion.

The composing parts of the master's thesis are introduction, four parts, conclusions and reference list. The general information about elements subjected to torsion, and calculation methods are described in the first part of the thesis. In the second part of the thesis the influence of reinforcement ratio to behavior and strength of reinforced concrete beams subjected to torsion is discussed. Also it is compared the calculations made using EC2 and ACI 318-05 with variable angle space truss theory. The influence of prestress level to strength of reinforced concrete strength is described in third part. There are finite element model with ANSYS 11.0 program created in the forth part of this thesis.

The thesis contains 88 pages. There are 19 tables, 57 pictures and 32 references in this thesis.

Keywords:

reinforced concrete, torsion, strength, prestressed concrete, material nonlinearities

TURINYS

TURINYS	6
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
ĮVADAS	13
1. SUKAMOS GELŽBETONINĖS KONSTRUKCIJOS IR JŲ APSKAIČIAVIMAS	14
1.1. Bendrosios žinios apie sukamus gelžbetoninius elementus	14
1.2. Sukami betoniniai elementai	16
1.2.1. Sukamų betoninių elementų elgsena	16
1.2.2. Sukamų betoninių elementų laikomoji galia	17
1.3. Sukami gelžbetoniniai elementai	19
1.3.1. Sukamų gelžbetoninių elementų elgsena	19
1.3.2. Sukamųjų gelžbetoninių elementų laikomosios galios skaičiavimas	29
1.4. Sukamųjų išanksto įtemptųjų gelžbetoninių elementų laikomoji galia	33
1.5. Sukamųjų gelžbetoninių elementų stiprumo skaičiavimas taikant normų reikalavimus	35
1.5.1. Skaičiavimas pagal ACI 318-05 standartą	35
1.5.2. Skaičiavimas pagal Europos standartą EC2	35
1.6. Sukamų gelžbetoninių elementų eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai	36
1.7. Išvados	38
2. SUKAMŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ANALIZĖ	39
2.1. Armatūros kiekio įtaka sukamų gelžbetoninių elementų elgsenai	39
2.2. Armatūros kiekio įtaka sukamų gelžbetoninių elementų stiprumui, skaičiuojant pagal erdvinės santvaros metodą, ACI 318-05 ir EC2 normas	61
2.3. Išvados	66
3. IŠ ANKSTO ĮTEMPTŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ANALIZĖ	68
3.1. Išankstinio apspaudimo įtaka sukamų gelžbetoninių elementų laikomajai galiai	68
3.2. Armatūros kiekio įtaka iš anksto įtemptųjų gelžbetoninių elementų laikomajai galiai	70
3.3. Išvados	73
4. KOMPIUTERINĖ SUKAMO GELŽBETONINIO ELEMENTO ANALIZĖ	74
4.1. Sukamo elemento baigtinių elementų modelio sudarymas	74
4.1.1. Bendrosios žinios	74
4.1.2. Elementų tipai, naudojami kompiuteriniame modelyje	75
4.1.3. Tikrosios konstantos (Real Constants) komanda baigtiniams elementams	75
4.1.4. Medžiagų mechaninės savybės	76
4.1.5. Modelio sudarymas	77

4.1.6. <i>Apkrovos ir įtvirtinimas</i>	79
4.2. Kompiuterinė analizė	79
4.2.1. <i>Apspaudimo įtaka sukamo elemento elgsenai, plyšio atsiradimo momentu</i>	79
4.3. Išvados.....	83
IŠVADOS	85
LITERATŪROS SĄRAŠAS	87

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1. 1 pav. Sukimo veikiami gelžbetoniniai elementai.....	14
1. 2 pav. Sukamos gelžbetoninės sijos: a) pirminis sukimas; b) antrinis sukimas	15
1. 3 pav. Sukimo momento sumažinimo galimybė: a) sukimo momento sumažinti negalima; b) sukimo momentą sumažinti galima.....	15
1. 4 pav. Betoninio elemento sukimo momento – sąsūkio kreivė	16
1. 5 pav. Tipinė sukamo gelžbetoninio elemento elgsenos kreivė	20
1. 6 pav. Sukamo elemento perėjimas iš nesupleišėjusios stadijos į supleišėjusią.....	24
1. 7 pav. Sukamo elemento idealizavimas taikant besikeičiančio kampo erdvinės santvaros modelį (<i>Variable Angle Truss-Model</i>)	25
1. 8 pav. Sukamo elemento sienutės gniuždomo betono $\sigma - \varepsilon$ kreivė, įvertinus betono susilpnėjimą (<i>Softening Effect</i>).....	25
1. 9 pav. Deformacijų ir įtempių pasiskirstymas sukamo elemento efektyviojoje sienutėje	27
1. 10 pav. Skaičiavimo algoritmas sukamo elemento elgsenos kreivei sudaryti, pagal kintamo kampo santvaros teoriją (<i>Variable Angle Truss-Model</i>)	28
1. 11 pav. Sukamo elemento idealizavimas pagal <i>erdvinės santvaros teoriją</i> :.....	29
1. 12 pav. Jėgos veikiančios erdvinėje santvaroje	30
1. 13 pav. Jėgų pasiskirstymas sukamo elemento skerspjuvyje	32
1. 14 pav. Įtemptojo ir neįtemptojo gelžbetonio sijų sukamoji galia, priklausomai nuo skersinės armatūros kiekio.....	33
2. 1 pav. Sijų, naudojamų skaitiniam eksperimentui skerspjuviai.....	39
2. 2 pav. Plieno įtempių ir deformacijų kreivė, vaizduojanti idealiai tampriai plastinės medžiagos modelį.....	40
2. 3 pav. $\rho_{tot} = 0,57 \%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 0,57) sukimo momento-sąsūkio ($T - \theta$) diagrama.....	42
2. 4 pav. (B1 0,57) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento	42
2. 5 pav. $\rho_{tot} = 1.11 \%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 1.11) sukimo momento-sąsūkio ($T - \theta$) diagrama.....	43
2. 6 pav. (B1 1.11) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento	44
2. 7 pav. $\rho_{tot} = 1.67 \%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 1.67) sukimo momento-sąsūkio ($T - \theta$) diagrama.....	45

2. 8 pav. (B1 1,67) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento.....	45
2. 9 pav. $\rho_{tot} = 2,00$ % armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 2,00) sukimo momento-sąsukio ($T - \theta$) diagrama.....	46
2. 10 pav. (B1 2,00) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento.....	47
2. 11 pav. $\rho_{tot} = 2,49$ % armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 2,49) sukimo momento-sąsukio ($T - \theta$) diagrama.....	48
2. 12 pav. (B1 2,49) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento.....	49
2. 13 pav. $\rho_{tot} = 3,00$ % armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 3,00) sukimo momento-sąsukio ($T - \theta$) diagrama.....	50
2. 14 pav. (B1 3,00) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento.....	50
2. 15 pav. $\rho_{tot} = 3,51$ % armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 3,51) sukimo momento-sąsukio ($T - \theta$) diagrama.....	51
2. 16 pav. (B1 3,51) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento.....	52
2. 17 pav. $\rho_{tot} = 3,92$ % armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 3,92) sukimo momento-sąsukio ($T - \theta$) diagrama.....	53
2. 18 pav. (B1 3,92) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento.....	53
2. 19 pav. Sukamos gelžbetoninės sijos (0,25x0,40 m) sukimo momento - sąsukio ($T - \theta$) diagramos kitimas, keičiantis armatūros kiekiui.....	54
2. 20 pav. Įtempiai skersinėje armatūroje, priklausomai nuo sukimo momento dydžio, ...	54
2. 21 pav. Armatūros kiekio įtaka elemento standumui po plyšių atsivėrimo	55
2. 22 pav. Sukamos gelžbetoninės sijos (0,30x0,48 m) sukimo momento – sąsukio ($T - \theta$) diagramos kitimas, keičiantis armatūros kiekiui.....	57
2. 23 pav. Įtempiai skersinėje armatūroje, priklausomai nuo sukimo momento dydžio, 0.30x0.48 m skerspjūvio sijoje.....	57
2. 24 pav. Sukamos gelžbetoninės sijos (0,40x0,64 m) sukimo momento- sąsukio ($T - \theta$) diagramos kitimas, keičiantis armatūros kiekiui.....	59
2. 25 pav. Įtempiai skersinėje armatūroje, priklausomai nuo sukimo momento dydžio, 0.40x0.64 m skerspjūvio sijoje.....	60

2. 26 pav. 0,25x0,40 m skerspjūvio sijos laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui	62
2. 27 pav. 0,30x0,48 m skerspjūvio sijos laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui	63
2. 28 pav. 0,40x0,64 m skerspjūvio sijos laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui	64
2. 29 pav. 0,25x0,40 m; 0,30x0,48 m; 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui	66
3. 1 pav. 0,25x0,40 m skerspjūvio sijų laikomosios galios kitimas, didėjant išankstiniam įtempimui, kai sijos armuotos $\rho_{tot} = 1,11\%$; $\rho_{tot} = 1,67\%$; $\rho_{tot} = 2,00\%$ ir $\rho_{tot} = 2,48\%$ armavimo procentu	69
3. 2 pav. 0,25x0,48 m skerspjūvio sijų laikomosios galios kitimas, didėjant išankstiniam įtempimui, kai sijos armuotos $\rho_{tot} = 1,10\%$; $\rho_{tot} = 1,50\%$; $\rho_{tot} = 2,12\%$ ir $\rho_{tot} = 2,64\%$ armavimo procentu	69
3. 3 pav. 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų laikomosios galios kitimas, didėjant išankstiniam įtempimui, kai sijos armuotos $\rho_{tot} = 1\%$; $\rho_{tot} = 1,50\%$; $\rho_{tot} = 2,01\%$ ir $\rho_{tot} = 2,64\%$ armavimo procentu	70
3. 4 pav. 0,25x0,40 m skerspjūvio sijų, su išankstiniu įtempimu ($\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.1$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.2$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.3$), laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui	71
3. 5 pav. 0,30x0,48 m skerspjūvio sijų, su išankstiniu įtempimu ($\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.1$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.2$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.3$), laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui	71
3. 6 pav. 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų, su išankstiniu įtempimu ($\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.1$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.2$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.3$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.4$), laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui	72
4. 1 pav. Sija, naudojama kompiuteriniame modelyje	74
4. 2 pav. Solid65 tipo baigtinis elementas	75
4. 3 Pav. Betono įtempių- deformacijų kreivė, veikiant vienašiai gniuždymui	77
4. 4 pav. Tūriniai elementai vaizduojantys gelžbetoninę siją ir metalines dalis	78
4. 5 pav. Sija ir metalinė dalis sudalinta į baigtinius elementus	78
4. 6 pav. Sijų su $\sigma_0 = 0 \text{ MPa}$, $\sigma_0 = 3 \text{ MPa}$, $\sigma_0 = 6 \text{ MPa}$ išankstiniu įtempimu	80
4. 7 pav. Plyšių atsivėrimas sukamoje sijoje be išankstinio apspaudimo	80
4. 8 pav. Atsivėrę plyšiai: a) sija su 3 MPa išankstiniu apspaudimu; b) sija su 6 MPa išankstiniu apspaudimu	81

4. 9 pav. Sukamo elemento poslinkiai išilgai sijos ašiai: a) neįtemta sija; b) Sija su 3 MPa išankstiniu įtempimu; c) sija su 6 MPa įtempimu;	81
4. 10 pav. Tangentiniai įtempiai yz plokštumoje: a) neįtemta sija; b) sija su 3 MPa išankstiniu įtempimu; c) sija su 6 MPa įtempimu.	82
4. 11 pav. Normaliniai svarbiausieji tempimo įtempiai σ_1 : a) neįtemta sija; b) sija su 3 MPa išankstiniu įtempimu; c) sija su 6 MPa įtempimu.	83

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1. lentelė Sukamo stačiakampio elemento geometriniai parametrai pagal <i>St. Venantq</i>	22
2. lentelė 0,25 x 0,40 m sijų skerspjūvio matmenys, fizinės ir mechaninės charakteristikos.....	40
3. lentelė skaičiavimo rezultatai 0,25x0,40 m skerspjūvio sijos, armuotos skirtingu kiekiu armatūros, tiesinei analizei aprašyti	41
4. lentelė Elemento (B1 0.57) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (<i>Variable Angle Truss-Model</i>).....	41
5. lentelė Elemento (B1 1.11) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (<i>Variable Angle Truss-Model</i>).....	43
6. lentelė Elemento (B1 1.67) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (<i>Variable Angle Truss-Model</i>).....	44
7. lentelė Elemento (B1 2,00) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (<i>Variable Angle Truss-Model</i>).....	46
8. lentelė Elemento (B1 2,48) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (<i>Variable Angle Truss-Model</i>).....	48
9. lentelė Elemento (B1 3,00) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (<i>Variable Angle Truss-Model</i>).....	49
10. lentelė Elemento (B1 3,50) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (<i>Variable Angle Truss-Model</i>).....	51
11. lentelė Elemento (B1 3,92) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (<i>Variable Angle Truss-Model</i>).....	52
12. lentelė 0,30x 0,48 m sijų skerspjūvio matmenys, fizinės ir mechaninės charakteristikos.....	56
13. lentelė skaičiavimo rezultatai 0,25x0,40 m skerspjūvio sijos, armuotos skirtingu kiekiu armatūros, tiesinei analizei aprašyti	56
14. lentelė 0,40x 0,64 m sijų skerspjūvio matmenys, fizinės ir mechaninės charakteristikos.....	58
15. lentelė skaičiavimo rezultatai, 0,40x0,64 m skerspjūvio sijos, armuotos skirtingu kiekiu armatūros, tiesinei analizei aprašyti	58
16. lentelė 0,25x0,40 m sijos stiprumo skaičiavimo rezultatai, kai didėja armatūros kiekis, skaičiuojant pagal erdvinės santvaros teoriją ir pagal ACI 318-02 ir EC2	61
17. lentelė 0,30x0,48 m sijos stiprumo skaičiavimo rezultatai, kai didėja armatūros kiekis, skaičiuojant pagal erdvinės santvaros teoriją ir pagal ACI 318-02 ir EC2	63
18. lentelė 0,4x0,64 m sijos stiprumo skaičiavimo rezultatai, kai didėja armatūros kiekis, skaičiuojant pagal erdvinės santvaros teoriją ir pagal ACI 318-02 ir EC2	64

IVADAS

Gelžbetonis – viena populiariausių šiuolaikinės statybos medžiagų, naudojama konstrukcijoms gaminti. Tokių konstrukcijų standumas ir laikomoji galia priklauso nuo daugelio faktorių: aplinkos poveikio, išorinių apkrovų ir eksploatavimo sąlygų.

Gera suprojektuotos gelžbetoninės konstrukcijos yra ekonomiškos ir gali būti eksploatuojamos daugybę metų, tačiau neįvertinus visų galimų įrašų, tokių kaip sukimas, poveikio, eksploatacijos laikotarpiu gali atsirasti nepageidaujama plyšių ir deformacijų. Tuomet toks neapdairumas ir abejingumas gali kainuoti daug lėšų bei darbo sąnaudų, stiprinant ir atstatant konstrukcijas. Norint suvaldyti sukimo poveikį gelžbetoninėms konstrukcijoms, reikia žinoti, kokią įtaką turi atskiri veiksniai sukamo elemento elgsenai ir laikomajai galiai.

Baigiamojo magistro darbo tikslas yra išnagrinėti atskirų veiksnių įtaką sukamų gelžbetoninių elementų stiprumui ir elgsenai.

Darbe keliama uždaviniai:

1. Apžvelgti gelžbetonines konstrukcijas, kuriose gali atsirasti sukimas.
2. Išnagrinėti sukamų gelžbetoninių elementų skaičiavimo metodikas.
3. Nustatyti, kokią įtaką turi armatūros kiekis sukamų gelžbetoninių elementų elgsenai ir sukamajai galiai.
4. Palyginti EC2 ir ACI 318-02 projektavimo normas.
5. Nustatyti, kokią įtaką turi išankstinis apspaudimas sukamų gelžbetoninių elementų stiprumui.
6. Atlikti sukamų gelžbetoninių elementų kompiuterinę analizę, pasinaudojant baigtinių elementų programa, bei nustatyti išankstinio įtempimo poveikį plyšių atsiradimui ir įtempimų bei deformacijų būviui.

Atliekant darbą buvo pasirinktos trijų skerspjūvių sijos, jos buvo suarmuotos skirtingu kiekiu armatūros bei apspaudžiamos vis kitokia apspaudimo jėga ir nagrinėjamas šių kintančių dydžių poveikis elementams.

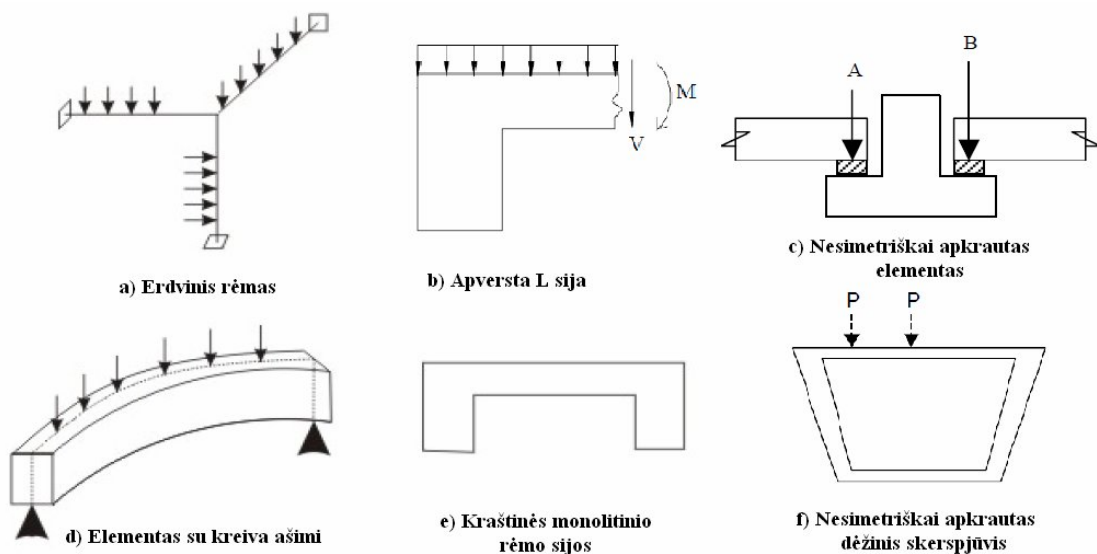
Išmokus gerai suvaldyti sukimo momento poveikį gelžbetoninėms konstrukcijoms, atsiveria daugiau galimybių projektuojant netipinės formos ir išvaizdos pastatus ir elementus, tokius kaip sijos su kreiva ašimi, įstrižos struktūros, konstrukcijos su didelėmis gembėmis ir t.t.

1. SUKAMOS GELŽBETONINĖS KONSTRUKCIJOS IR JŲ APSKAIČIAVIMAS

1.1. Bendrosios žinios apie sukamus gelžbetoninius elementus

Sukimas yra deformavimo tipas, apibūdinamas skerspjūvių pasisukimu strypo ašies atžvilgiu.

Jeigu jėga veikia simetrijos plokštumoje arba yra simetriška jai, tai elemente yra sukiamas lenkimo momentas ir skersinė jėga, tačiau, jeigu jėga sudaro petį su simetrijos plokštuma arba veikia nesimetriškai jai, tada sukeliama papildoma įraša – sukimo momentas. Statybinės konstrukcijos, kuriose dažniausiai atsiranda sukimo momentas yra erdviniai rėmai; L skerspjūvio, kraštinės surenkamos arba monolitinės, apversto T skerspjūvio sijos; elementai su išsikreivinusia ašimi bei netolygiai apkrauti dėžinio skerspjūvio elementai (žr. 1.1 pav.).



1. 1 pav. Sukimo veikiami gelžbetoniniai elementai

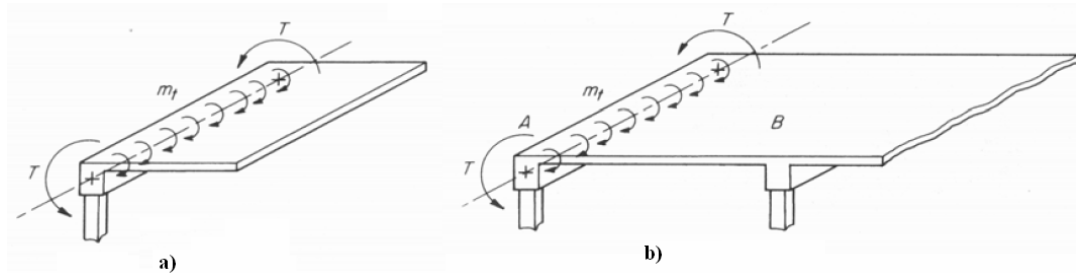
Sukimo momentas gali būti skirstomas, pagal tai kaip jis pasireiškia konstrukcijoje:

- pirminis sukimas, kai elementas sukimo momento veikiamas tiesiogiai (1.1 pav., c,d,f);
- antrinis sukimas, kai elementas sukamas netiesiogiai – per kitą elementą (1.1 pav., a,b,e).

Pirminis sukimas, kartais vadinamas pusiausvyros sukimu, atsiranda tada, kai išorinė apkrova jį sukelia tiesiogiai. Šiuo atveju įraša nuo sukimo momento apskaičiuojama pagal statikos dėsnius, sudarant pusiausvyros sąlygas, jėgos atstojamąją padauginę iš peties, kurį sudaro atstumas nuo jėgos iki elemento ašies. Pavyzdžiui, gembinė plokštė, standžiai įtvirtinta į siją, joje sukelia pirminį sukimo momentą (1.2 pav., a). Esant pirminiam poveikiui, jeigu sija neperimtų sukimo, konstrukcija tiesiog sugriūtų.

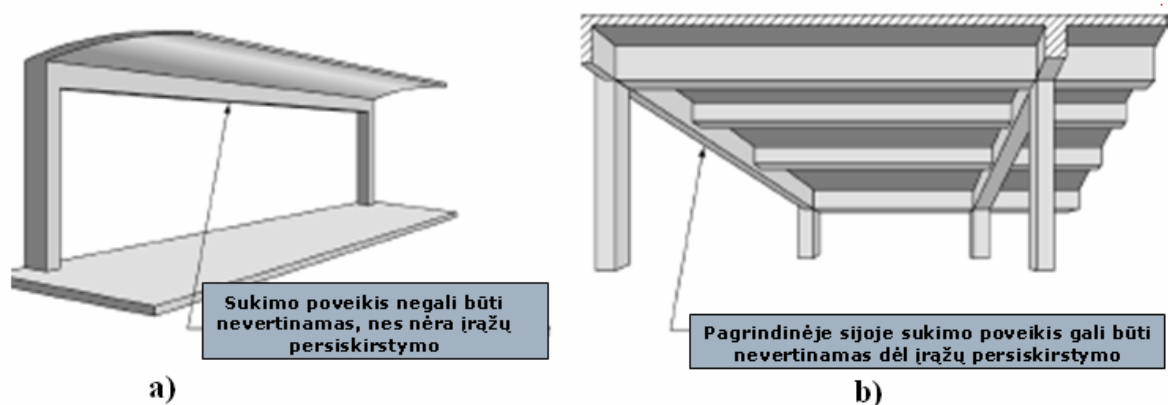
Antrinis sukimas, kitaip vadinamas suderintu sukimu, paprastai atsiranda statiškai neišsprendžiamose konstrukcijose, todėl ieškoma įraša negali būti randama vien tik pagal pusiausvyros sąlygas. Jeigu nekreiptume dėmesio į konstrukcijų nepertraukiamumą, mazguose gali

atsirasti plyšių, tačiau tai nesukels griuvimo, nes statiskai nesprenžiamose konstrukcijose galimas įrašų persiskirstymas. Antrinio sukamojo momento atsiradimo pavyzdys pateiktas (1.2 pav., b). Šis sukimo momentas atsiranda kraštinėje monolitinės perdangos sijoje. Jeigu sija yra pakankamai standi ir pakankamai armuota atlaikyti veikiantį sukimo momentą, o kolonos suprojektuotos taip, kad atlaikytų lenkimo momentą, kurį sukelia sukimas sijoje, tai plokštė dirbs kaip standžiai įtvirtina kraštinėje atramoje. Tačiau jeigu sija bus nepakankamai standi arba netinkamai armuota, tada tarp sijos ir perdangos atsiras plyšiai, kurie sumažins atramos standumą. Tai sukels lenkimų momentų persiskirstymą plokštėje. Šiuo atžvilgiu perdanga turi būti tinkamai armuota, kad atlaikytų atsiradusias papildomas įrašas.



1. 2 pav. Sukamos gelžbetoninės sijos: a) pirminis sukimas; b) antrinis sukimas

ACI (*American Concrete Institute*) išleistose normose yra nurodoma, kada galima sumažinti sukimo momentą dėl įrašų persiskirstymo. Šiose normose sakoma, kad konstrukcijose, veikiamose pirminio sukimo, įrašų persiskirstymo nėra, vadinasi, sukimo momentas negali būti sumažintas, nes nuo sukamų elementų stiprumo, tiesiogiai priklauso konstrukcijos stiprumas (1.3 pav., a). Statiškai nesprenžiamose konstrukcijose, tokiose kaip sijinė monolitinė perdanga (1.3 pav., b), galimas įrašų persiskirstymas, kraštinės pagrindinės sijos sukimas perduodamas šalutinėms sijoms, kaip lenkimo momentas, todėl galima sukimo momentą sumažinti, priklausomai nuo elementų santykinio standumo.

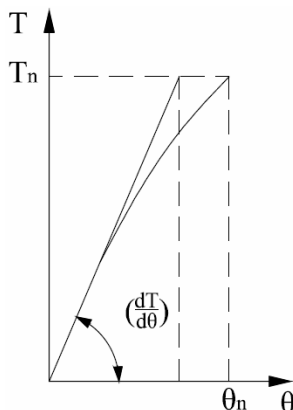


1. 3 pav. Sukimo momento sumažinimo galimybė: a) sukimo momento sumažinti negalima; b) sukimo momentą sumažinti galima

1.2. Sukami betoniniai elementai

1.2.1. Sukamų betoninių elementų elgsena

Sukamo elemento sąsūkis nustatomas, išmatuojant kampą tarp dviejų susisukusio elemento pjūvių ir tą kampą padalinant iš atstumo tarp šių pjūvių. Ištyrus sukamo vienalyčio betoninio elemento elgsenos kreivę (2.1 pav.), matyti, jog elementas elgiasi tamptariai, veikiant mažam sukamajam momentui, tačiau, veikiant didesnėms apkrovoms, kreivė pradeda kisti pagal netiesinę priklausomybę. Sukamam betoniniam elementui pasiekus ribinį būvį, įvyksta trapus suirimas.



1. 4 pav. Betoninio elemento sukimo momento – sąsūkio kreivė

Sukamo betoninio elemento standumas aprašomas kaip tangentas kampo, kurį sudaro nuožulni kreivės dalis su ordinačių ašimi $\tan \alpha = \frac{dT}{d\theta}$, jis gali būti siejamas su elemento, veikiamo vienašio gniuždymo arba tempimo įtempių – deformacijų priklausomybės diagrama.

Mokslininkas *Berre de Saint- Venantas* (1855) pasiūlė formulę, sukamo stačiakampio skerspjūvio betoninio elemento, sukamajam standumui apskaičiuoti.

$$\frac{dT}{d\theta} = \beta x^3 y \frac{E_c}{2(1+\nu)}, \quad (1)$$

čia $\frac{E_c}{2(1+\nu)} = G_c$ betono šlyties modulis, x ir y - skerspjūvio atitinkamai mažesnioji ir didesnioji kraštinės, β - St. Venant koeficientas, įvertinantis stačiakampio skerspjūvio formą.

Esant nulinei apkrovai sukamasis standumas yra užrašomas $\left(\frac{dT}{d\theta} \right)_0$. Tuomet E_c užrašomas kaip pradinis tamprumo modulis E_0 ir iš (1) formulės išreiškus gaunama:

$$E_0 = \frac{2(1+\nu)}{\beta x^3 y} \left(\frac{dT}{d\theta} \right)_0. \quad (2)$$

Remiantis eksperimentiniais tyrimais suradus pradinį standumą $\left(\frac{dT}{d\theta}\right)_0$ ir apskaičiavus pirminį tamprumo modulį pagal (2) formulę, nustatyta, jog apskaičiuotasis deformacijų modulis mažai skiriasi nuo gniuždomo betono tamprumo modulio (*Berre de Saint- Venant* 1855). Taigi galima teigti, kad St. Venano teorija gerai aprašo sukamų stačiakampio skerspjūvio elementų elgseną, veikiant palyginti mažoms apkrovoms, t.y. kol elementas deformuojasi tampriai.

Veikiant didesnėms apkrovoms sukimo momento – sąsūkio kreivė išsikreivina, elementas pradeda deformuotis netiesiškai. Nors sukamasis elementas elgiasi netiesiškai, jo elgsena gali būti aproksimuojama kaip tiesė, kuri nusakoma kaip antrinis standumas. Kai normaliniai gniuždymo įtempiai σ_c pasiekia maždaug 50 % gniuždomojo stiprio reikšmės f_c , sukamo betoninio elemento tamprumo modulis pagal ACI normas gali būti apskaičiuojamas pagal formulę:

$$E_c = 33(w^{1.5}) \cdot \sqrt{f_c}, \quad (3)$$

čia w - sukamo elemento vienetinis svoris.

1.2.2. Sukamų betoninių elementų laikomoji galia

Tamprumo teorija

Mokslininkui *St. Venantui* pradėjus tirti sukamus betoninius elementus bei nustatčius priklausomybes elemento sukamajam standumui bei elgsenai aprašyti, jo teorijos prielaidos buvo taikomos ir sukamų betoninių elementų stiprumui apskaičiuoti. Taikant šią teoriją, daroma prielaida, kad betoninis elementas suirs tada, kai normaliniai tempimo įtempiai $\sigma_{\max}$ elemente pasieks betono tempiamąjį stiprį f_t (*Berre de Saint - Venant* 1855 m.). Sukamo betoninio elemento laikomoji galia, taikant šią teoriją, apskaičiuojama pagal formulę:

$$T_e = \alpha x^2 y f_t, \quad (4)$$

čia α - St. Venanto tamprumo koeficientas, priklausantis nuo skerspjūvio formos; x ir y - atitinkamai didesnioji ir mažesnioji skerspjūvio kraštinės; f_t - betono tempiamasis stipris, nustatytas iš tempimo tyrimų.

Tamprumo teorija buvo plačiai naudota, norint apskaičiuoti sukamo betoninio elemento laikomąją galią. Šią teoriją tikslino mokslininkai (*Youngas* 1992, *Andersenas* 1937 m., *Cowmanas* 1951 m., *Humphreysas* 1957m., *Zia* 1961m.). Tačiau tyrimai parodė, kad ši teorija netiksliai nusako betoninio elemento laikomąją galią. Nustatyta, kad betoninių elementų laikomoji galia, nustatyta eksperimentų metu, yra maždaug 50 % didesnė, negu apskaičiuota pagal teoriją.

Plastiškumo teorija

Kadangi sukamoji galia, apskaičiuota pagal tamprumo teoriją, nepakankamai gerai apibūdina tikrąją sijos stiprumą. Papildomą stiprumą sukamiems elementams suteikia betono plastiškumo savybės (Nylander 1935). Kitaip sakant, betone gali pasireikšti plastinės deformacijos, nuo kurių pasireiškimo padidėja sukamo elemento laikomoji galia, kuri apskaičiuojama pagal formulę:

$$T_p = \alpha_p x^2 y \cdot f_{ct}, \quad (5)$$

čia $\alpha_p = (0,5 - \frac{x}{6y})$ - koeficientas, įvertinantis plastinį betono darbą, jis yra apie 50 %

didesnis už St. Venanto tamprumo koeficientą α . Atsižvelgiant į tai galima teigti, jog sukamosios galios padidėjimas, apskaičiavus pagal plastiškumo teoriją, padidėja dėl to, kad yra įvertinamas betono plastinis darbas.

Nors elemento sukamoji galia, apskaičiuota pagal plastiškumo teoriją, yra artima gautai eksperimentiniu būdu, tačiau šios teorijos prielaidos kelia abejonių. Pirma, tai teoriškai netikslu, nes sijos suirimą sukelia svarbiausieji normaliniai tempimo įtempiai, o nagrinėjant tempiamo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės kreivę, žymių plastinių deformacijų nėra, t.y. elementas suyra iš karto, įtempiams pasiekus ribinę reikšmę. Antra, sukamo betoninio elemento suirimasis yra trapus, o tai nebūdinga plastiškumą turintiems elementams. Trečia, nėra įvertinamas sijos formos ir dydžio efektas.

Įstrižojo lenkimo teorija

Eksperimentinių tyrimų metu bandant sukamus elementus ir nustatinėjant jų elgseną bei suirimo charakterį pastebėta, jog sija suyra atsiradus 45° plyšiams, jie atsiranda didesniosios stačiakampio skerspjuvio kraštinės plokštumoje, nes ten sukeliami didžiausi įtempiai (Thomas Hsu 1968). Taigi sukant betoninį elementą, vienoje plokštumoje yra sukeliami svarbiausieji tempimo įtempiai, vadinasi priešingoje plokštumoje turi atsirasti svarbiausieji gniuždymo įtempiai. Toks suirimo charakteris primena lenkiamo elemento suirimą, kai vienoje kraštinėje atsiranda tempimas, o priešingoje - gniuždymas. Kadangi sukamo elemento suirimasis panašus į lenkiamo, tik plyšiai atsiranda ne statmenai sijos ašiai, o pasvirę 45° kampų, tai ši teorija pavadinta *įstrižojo lenkimo teorija*.

Pritaikius lenkiamo elemento suirimo mechanizmą sukamajam elementui, galima išvesti priklausomybę sukamojo elemento laikomajai galiai apskaičiuoti pagal įstrižojo lenkimo teoriją.

$$T_{np} = 6(x^2 + 10)y\sqrt{f'_c}, \quad (6)$$

čia x, y - skerspjūvio didesnioji ir mažesnioji kraštinės, turi būti priimtos *inčais*; f'_c - gniuždomasis betono stipris, priimama *psi*.

Kadangi formulė išvesta empiriniu būdu, tai negalima SI vienetų taikyti tiesiogiai. Formulę pertvarkius, kad būtų galima naudoti SI vienetų sistemą, gauname:

$$T_{np} = \frac{1}{4.60} \left(x^2 + \frac{1}{155} \right) y^3 \sqrt{f_{cm}}. \quad (7)$$

Lyginant formules betoninių elementų sukamajam stiprumui apskaičiuoti tamprumo, plastiškumo ir įstrižojo lenkimo teorijomis, galima pastebėti, jog į visas stiprumui apskaičiuoti formules įeina parametras $x^2 y$. Skirtumas tarp teorijų pastebimas tik bedimenciuose koeficientuose, priimtuose taikant visokiausiais prielaidas ir medžiagų stipriuose, naudojamuose atskirose teorijose, vienoje yra naudojamas tempiamasis betono stipris, kitose- gniuždomasis.

1.3. Sukami gelžbetoniniai elementai

1.3.1. Sukamų gelžbetoninių elementų elgsena

Gelžbetoniniai elementai be skersinės armatūros

Sukamojo gelžbetoninio elemento, armuoto vien tik išilgine armatūra, elgsena yra labai artima betoninio sukamojo elemento elgsenai, veikiant sukimui. Jeigu elementas armuotas vien tik išilgine armatūra, jos įtaka yra labai maža, todėl tokio elemento standumą galima apskaičiuoti pagal sukamų betoninių elementų teoriją.

Jeigu išilginės armatūros bus mažai, tuomet elementas gali suirti iš karto tik atsiradus plyšiams, taip kaip betoninis elementas. Tačiau jeigu išilginės armatūros bus pakankamai, elemento sukamasis stipris gali išaugti iki 15 %, lyginant su sukimo momentu, nuo kurio atsiranda plyšiai. Mokslininkai spėjo, kad išilginė armatūra neturi didelės įtakos elemento stiprumui todėl, kad ji yra išdėstoma stačiakampio elemento kampuose, kur, pagal *St. Venanto* teoriją, šlyties įtempiai yra artimi nuliui. Išilginę armatūrą išdėsčius skerspjūvio kraštinių viduryje ir atlikus bandymus, nustatyta, kad elemento stiprumui išilginės armatūros padėtis jokios įtakos nedaro.

Elementai su skersine ir išilgine armatūra

Nagrinėjant gelžbetoninio elemento su skersine ir išilgine armatūra elgsenos kreivę, veikiant sukimo momentui, galima išskirti tris pagrindines deformavimosi stadijas (1.5 pav.).

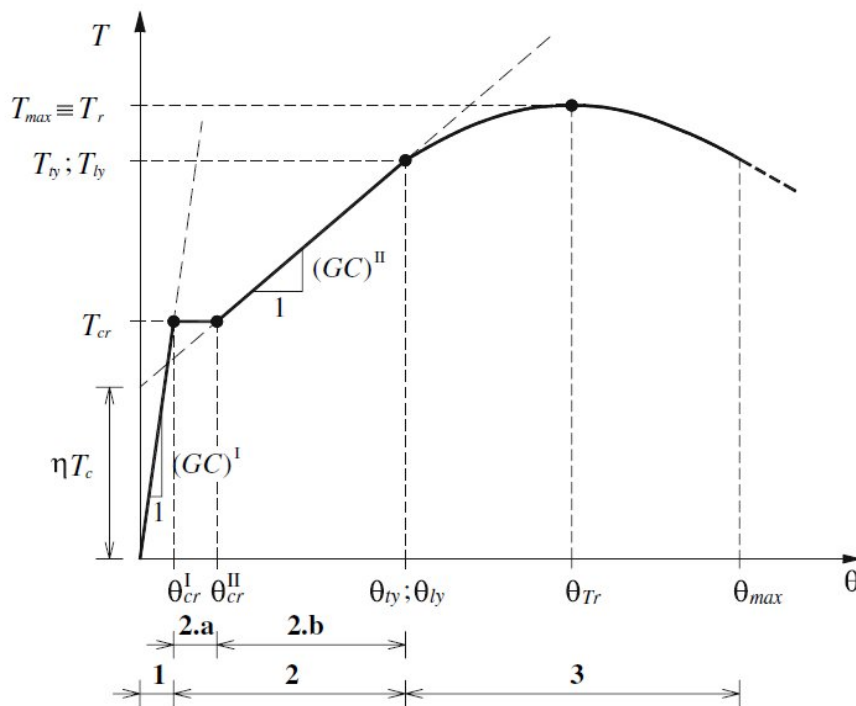
Pirma stadija - kai elementas dirba iki plyšių atsiradimo. Šioje stadijoje įvertinamas tik betono darbas. Elementas dirba pagal tiesinę priklausomybę, pradinio taško koordinatė laikoma $(0;0)$, pabaigos taško $(\theta_{cr}^I; T_{cr})$. Šios tiesės posvyrio kampas nusako tamprųjį *St. Venanto* standumą.

Teoriniai modeliai, aprašantys šios zonos elgseną, paremti *tampriosios teorijos (Theory of Elasticity)*, *įstrižojo lenkimo teorijos (Skew-Bending Theory)* ir kt. teorijų prielaidomis.

Atsivėrus plyšiams, sijoje pasireiškia staigus susisukimo padidėjimas, po kurio pasikeičia elemento tiesinė elgsena. Čia betono šlyties įtempiai perduodami armatūrai. Tai reiškia, kad ji įsitraukia į bendrą darbą. Ši stadija pažymėta 2a (1.5 pav.), ji prasideda $(\theta_{cr}^I; T_{cr})$ taške, o baigiasi kai sąsūkis pasiekia reikšmę θ_{cr}^{II} . Pasvirusi tiesė 2b zonoje vaizduoja supleišėjusios sijos standumą. Šios zonos elgsena aprašoma remiantis erdvinės santvaros, kai plyšiai su sijos ašimi sudaro 45° kampą, teorija.

Trečia stadija nusako netiesinę elemento elgseną. Vieta (taškas), nuo kurios elementas nustoja elgtis pagal tiesinę priklausomybę, priklauso nuo dviejų kriterijų: pirma, elementas pradeda deformuotis pagal netiesinę priklausomybę, tada kai įtempiai skersinėje arba išilginėje armatūroje pasiekia takumo ribą. Taigi reikia surasti vietą, kurioje pradeda tekėti armatūra, sukamo elemento elgsenos kreivėje. Antra priežastis, dėl kurios sukamojo elemento elgsenoje pasireiškia netiesiškumas – tai netiesinės betono deformacijos.

Netiesinė sukamojo elemento elgsena aprašoma *kintamo kampo santvaros modeliu (Variable Angle Truss Model)*, kuris įvertina idealiai tampriai plastinį armatūros darbą bei betono susilpnėjimą dėl šlyties poveikio (*Softening Effect*).



1. 5 pav. Tipinė sukamo gelžbetoninio elemento elgsenos kreivė: T_{cr} – plyšimo sukimo momentas;

θ_{cr}^I – sąsūkis sukeltas T_{cr} sukimo momento, jis nusako zonos 1 pabaigą, kai konstrukcija dirba

tamprioje stadijoje be plyšių; θ_{cr}^{II} – sąsūkis sukeltas T_{cr} zonos 2.a pabaigoje, 2.b pradžioje,

nusakantis tamprų konstrukcijos darbą su plyšiais; T_{ly} – sukimo momentas, nuo kurio pradeda tekėti išilginė armatūra; θ_{ly} – sąsūkis sukeltas T_{ly} ; T_{ty} – sukimo momentas, nuo kurio pradeda tekėti skersinė armatūra; θ_{ty} – sąsūkis sukeltas T_{ty} ; T_r – maksimalus sukimo momentas, kurį atlaiko sukamas elementas; θ_{Tr} – sąsūkis sukeltas T_r ; θ_{max} – maksimalus sąsūkis iki sijos visiško suirimo

Tamprus elemento darbas iki plyšių atsiradimo

Tamprų elemento darbą iki atsirandant plyšiams nusako (1.5 pav.) 1 zona. Taigi reikia nustatyti plyšių susidarymo sukamąjį momentą T_{cr} . Eksperimentiniai tyrimai parodė, jog gelžbetoninio elemento sukamąją galią iki plyšių atsiradimo nusako betono darbas (Andersen 1935, Vecchio and Collins 1981, Thomas T. Hsu 1979), todėl plyšio atsiradimo sukimo momentą galima apskaičiuoti pagal betoninio elemento laikomosios galios apskaičiavimo formules:

$$T_e = \alpha x^2 y f_t \text{ (tamprumo teorija);}$$

$$T_p = \alpha_p x^2 y \cdot f_t \text{ (plastiškumo teorija);}$$

$$T_{np} = 6(x^2 + 10)y \sqrt[3]{f_c'} \text{ (įstrižojo lenkimo teorija).}$$

Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad kol gelžbetoninis elementas dirba be plyšių, armatūra turi nežymų poveikį elemento sukamajam standumui (Thomas T. Hsu 1968). Atsižvelgiant į tai plyšio atsiradimo sukamąjį momentą galima patikslinti priklausomai nuo armavimo procento dydžio:

$$T_{cr,ef} = (1 + 4\rho_{tot})T_{cr}, \quad (8)$$

čia T_{cr} – plyšimo sukimas, apskaičiuotas pagal vieną iš betoninio elemento stiprumui nustatyti skirtų teorijų; ρ_{tot} – tai skersinės ir išilginės armatūrų armavimo procentų suma

$$\rho_l = \frac{A_l}{A_c}; \rho_t = \frac{A_t u}{A_c s}; \rho_{tot} = \rho_t + \rho_l.$$

Pagal sukamojo elemento tamprumo teoriją, pateiktą mokslininko St. Venanto, sukimo momentas yra tiesiogiai proporcingas sukamajam standumui ir elemento sąsūkiui. Vadinas, norint sužinoti sąsūkį, kurį sukelia plyšimo momentas T_{cr} , reikia žinoti elemento pradinį standumą $(GC)^I$.

$$\theta_{cr}^I = \frac{T_{cr,ef}}{K(GC)^I}, \quad (9)$$

čia K - skaičiavimuose priimtas pataisos koeficientas, kuriuo įvertinamas sukamo elemento standumo netekimas dėl sijos netobulumų $K \approx 0.7-1.0$. Skaitiniam eksperimentui priimama, jog $K=1$, skaičiuojant išbandytų sijų teorinį standumą $K=0.7$;

G - sukamojo elemento šlyties modulis:

$$G = \frac{E_c}{[2(1+\nu)]}, \quad (10)$$

čia ν - betono Puasono koeficientas;

C - koeficientas, nusakantis stačiakampio sukamo elemento skerspjūvio geometrijos įtaką sukamajam standumui, apskaičiuojamas pagal St. Venanto teoriją:

$$C = \beta x^3 y, \quad (11)$$

čia β - St. Venanto koeficientas apskaičiuojamas pagal empirines formules ir priklauso nuo skerspjūvio kraštinių $\frac{y}{x}$ santykio.

1. lentelė Sukamo stačiakampio elemento geometriniai parametrai pagal *St. Venantą*

$\frac{y}{x}$	k	β	α	α_2
1	0,675	0,141	0,208	0,208
1,2	0,759	0,166	0,219	0,169
1,4	0,822	0,187	0,227	0,185
1,6	0,869	0,204	0,234	0,174
1,8	0,904	0,217	0,240	0,164
2,0	0,930	0,229	0,246	0,155
2,5	0,968	0,249	0,258	0,135
3,0	0,985	0,264	0,267	0,118
4,0	0,997	0,281	0,282	0,0945
5,0	0,999	0,291	0,291	0,0782
10,0	1,00	0,312	0,312	0,0397
100	1,00	0,331	0,331	0,00217
∞	1,00	0,333	0,333	0

Nuo sukamųjų jėgų poveikio gelžbetoniniame elemente atsiranda tangentiniai įtempiai. Didžiausi įtempiai atsiranda stačiakampio gelžbetoninio elemento ilgesniojoje kraštinėje, jie gali būti apskaičiuojami pagal formulę:

Vientiso elemento:

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_T} = \frac{T}{\alpha x^2 y}, \quad (12)$$

čia α – St. Venant koeficientas, priklausančias nuo skerspjūvio kraštinių santykio, pateiktas 1 lentelėje.

Tuščiaavidurio elemento:

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_T} = \frac{T}{2Ah}. \quad (13)$$

Tiesinis elemento darbas atsiradus plyšiams

Nagrinėdamas tuščiaavidurius sukamus gelžbetoninius elementus mokslininkas *Thomas Hsu (1973)* pasiūlė išraišką gelžbetoninių sukamųjų sijų standumui surasti po to, kai elemente atsiranda

plyšių. Šios teorijos įrodymai buvo patvirtinti eksperimentiniais tyrimais, kurie parodė, kad sukamo elemento skerspjūvio vidinė dalis neturi įtakos sukamajam standumui po plyšių atsivėrimo (Thomas Hsu 1973, Rauch 1929).

Norint matematiškai aprašyti elemento elgseną po plyšių atsivėrimo, tuščiavidurio elemento sienutė ir joje esanti armatūra idealizuojama pagal mokslininko *Raucha (1929)* pateiktą erdvinės santvaros modelį. Pasinaudojus šiuo modeliu *Hsu (1973)* pateikė išraišką sukamojo gelžbetoninio elemento po plyšių atsivėrimo standumui apskaičiuoti.

$$(GC)^{II} = \frac{E_s x_l^2 y_l^2 xy}{(x_l + y_l)^2 \left[\frac{2nxy}{(x_l + y_l)h} + \frac{1}{\rho_l} + \frac{1}{\rho_l} \right]}, \quad (14)$$

čia x_l – skersinės armatūros apkabos mažesnioji kraštinė; y_l – skersinės armatūros apkabos didesnioji kraštinė; ρ_l – išilginės armatūros armavimo procentas; ρ_l – skersinės armatūros armavimo procentas; $n = \frac{E_s}{E_c}$ armatūros ir betono tamprumo modulių santykis;

h – tuščiavidurio gelžbetoninio elemento sienutės storis.

Tuščiavidurio ir vientiso skerspjūvio efektyvusis sienutės storis h_e apskaičiuojamas pagal *Hsu* pasiūlytą formulę $h_e = 1.4(\rho_l + \rho_l)x$.

Hsu (1973) nustatė, kad tiesė, apibūdinanti sukamo gelžbetoninio elemento elgseną po plyšių atsiradimo, kerta ordinačių ašį taške ηT_c (1.6 pav.). Koeficientas η priklauso nuo skerspjūvio sienutės storio ir mažesniosios kraštinės santykio. Sukimo momentas T_c kurį atlaiko betonas apskaičiuojamas pagal formules:

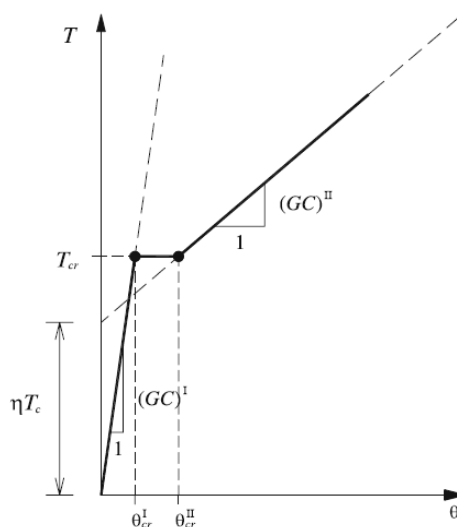
$$T_c = \frac{x^2 y}{3} 2.4 \sqrt{f_c}; \quad (15)$$

$$\eta = 0.57 + 2.86 \frac{h}{x}, \quad (16)$$

čia h - sienutės storis;

x, y - atitinkamai mažesniosios ir didesniosios skerspjūvio kraštinės matmuo.

Kai skerspjūvis vientisas $\frac{h}{x} = 0.5$, tada $\eta = 2$.



1. 6 pav. Sukamo elemento perėjimas iš nesupleišėjusios stadijos į supleišėjusią

Nagrinėjant (10) formulę, matome, kad elemento standumas $(GC)''$ po plyšių atsivėrimo priklauso nuo skersinės ir išilginės armatūros kiekio ir efektyviosios tuščiaavidurio elemento sienutės storio. Laikoma, kad skerspjuvio vidinė dalis į darbą neįsitraukia. Vadinasi, dalį standumo suteikia armatūra, dalį betonas.

Netiesinė supleišėjusio elemento analizė

Sukamasis elementas trečią deformavimosi stadiją pasiekia tada, kai skersinėje arba išilginėje armatūroje pasireiškia takumo įtempiai arba gniuždomas betonas pradeda deformuotis netiesiškai.

Sukamo elemento darbas netiesinėje deformavimosi stadijoje aprašomas **besikeičiančio kampo erdvinės santvaros modeliu** (*Variable Angle Truss-Model*), kurį atrado *Collins (1973)*, skaičiavimuose įvertinant betono susilpnėjimą (*Softening Effect*) šlyties veikiamame elemente.

Pagrindinės prielaidos, priimtos, taikant besikeičiančio kampo erdvinės santvaros modelį (*Variable Angle Truss-Model*):

1. Santvaros modelį sudaro: kampu α pasvirę betoniniai gniuždomi spyriai, išilginė ir skersinė armatūra.
2. Betonas perima tik gniuždymo įtempius. Šlytis tarp atskirtų betoninių spyrių ir skerspjuvio šerdies neįvertinama.
3. Išilginė ir skersinė armatūra perima tik tempiamąsias ašines jėgas.
4. Sukamo elemento šerdis į darbą neįsitraukia ir papildomo standumo nesuteikia, jos darbas atmetamas.

$$\sigma_d = f_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \right) - \lambda \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], \text{ kai } \varepsilon_d \leq \varepsilon_p \text{ (žr. 1.8. pav.);} \quad (17)$$

$$\sigma_d = f_p (1 - \eta^2), \text{ kai } \varepsilon_d \geq \varepsilon_p \text{ (žr. 1.8. pav.);} \quad (18)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\gamma_m}{\varepsilon_d} - \nu}; \quad (19)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_p}{2\varepsilon_0 - \varepsilon_p}, \quad (20)$$

čia λ – koeficientas, įvertinantis betono susilpnėjimą šlyties veikiamame elemente; f_c – betono gniuždomasis stipris bandant standartinius cilindrus; ν – betono Puasono koeficientas, kuris priimamas 0,2; γ_m – betoninės plokštelės išsikreivinimas ($\gamma_m = \varepsilon_l + \varepsilon_t + 2\varepsilon_d$); ε_l – išilginės armatūros deformacija; ε_t – skersinės armatūros deformacija; ε_d – betono deformacija sukamo elemento sienelėje.

Betono susilpnėjimas dėl šlyties veikimo (*Softening Effect*) yra įvertinamas koeficientu λ . Jis sumažina betono gniuždomąjį stiprį f_c iki $\frac{1}{\lambda} f_c$. Šlyties veikiamame elemente atsiranda įstriži plyšiai, kurie sumažina betono gniuždomąjį stiprį. Betono susilpnėjimo įvertinimas, taikant koeficientą λ , geriau įvertina sukamojo elemento darbą, negu taikant standartinę betono įtempimų-deformacijų kreivę (Mo, Thomas T. Hsu 1985). Todėl kintamo kampo erdvinės santvaros teorijoje pasirinktas toks betono darbo modelis.

Sukamo elemento kreivės sudarymui pagal **besikeičiančio kampo erdvinės santvaros modelį** (*Variable Angle Truss-Model*) reikia nustatyti pagrindinius tris parametrus, kurie aprašo sukamo elemento darbą: sukimo momentą T , vamzdinio elemento efektyvųjį sienutės storį t_d ir kampą α , kurį sudaro plyšiai su sijos išilgine ašimi.

$$T = 2A_0 t_d \sigma_d \sin \alpha \cos \alpha; \quad (21)$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{A_l f_l}{p_0 \sigma_d t_d}; \quad (22)$$

$$t_d = \frac{A_l f_l}{p_0 \sigma_d} + \frac{A_t f_t}{s \sigma_d}, \quad (23)$$

čia A_0 – plotas, apribotas šlyties įtempimų centrine ašimi, kuri sutampa su vamzdinio elemento efektyviosios sienutės t_d centru; σ_d – įtempiai pasvirusiame betoniniame gniuždomame elemente, kurį apriboja plyšiai (žr. 1.7 pav.); A_l – išilginės armatūros suminis plotas; f_l – įtempiai išilginėje armatūroje; A_t – skersinės armatūros vieno strypo skerspjūvio plotas; f_t – įtempiai skersinėje armatūroje; s – skersinės armatūros žingsnis.

Sukamojo elemento elgsenai aprašyti reikia žinoti skersinės bei išilginės armatūros deformacijas ε_t ir ε_l , taip pat elemento sąsūkį. Šie dydžiai apskaičiuojami pagal žemiau pateiktas formules:

$$\varepsilon_t = \left(\frac{A_0^2 \sigma_d}{p_0 T \cdot \operatorname{tg} \alpha} - \frac{1}{2} \right) \varepsilon_{ds}; \quad (24)$$

$$\varepsilon_l = \left(\frac{A_0^2 \sigma_d}{p_0 T \cdot \cot \alpha} - \frac{1}{2} \right) \varepsilon_{ds}; \quad (25)$$

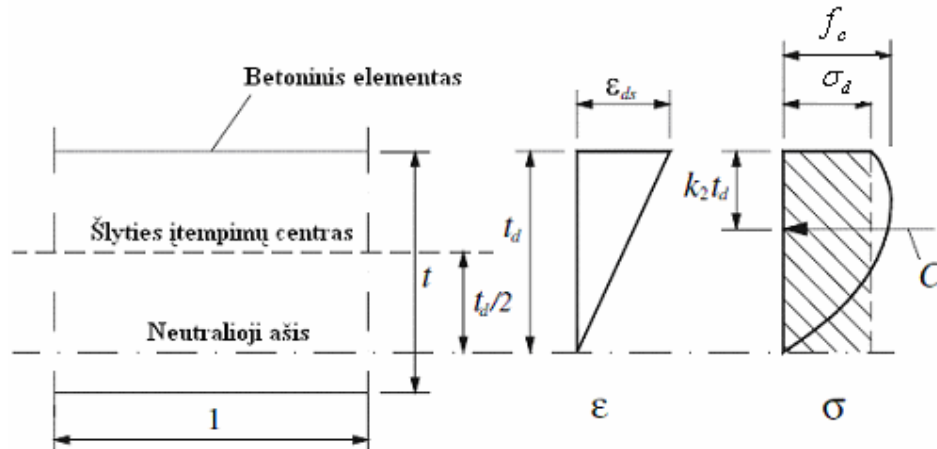
čia A_0 - sukamo elemento skerspjūvio plotas; σ_d - įtempiai sukamo elemento gniuždomame betone; p_0 - skerspjūvio perimetras; T - sukimo momentas, veikiantis elementą; ε_{ds} - deformacijos betone; α - kampas, kurį sudaro plyšys su sijos išilgine ašimi.

Žinant kokį kampą sudaro plyšys su sijos išilgine ašimi ir efektyvųjų sienutės storį, galima sužinoti kiek susisuks sija, kai gniuždomame betone pasireikš ε_{ds} deformacija.

$$\theta = \frac{\varepsilon_{ds}}{2t_d \sin \alpha \cos \alpha} \cdot f_c \cdot k_1 \quad (26)$$

Sukamo elemento efektyviosios sienutės betono įtempiai nusakomi kaip vidutiniai iš kintamos diagramos (žr. 1.9 pav.).

$$\sigma_d = k_1 \left(\frac{1}{\lambda} \right) f_c. \quad (27)$$



1. 9 pav. Deformacijų ir įtempių pasiskirstymas sukamo elemento efektyviojoje sienutėje

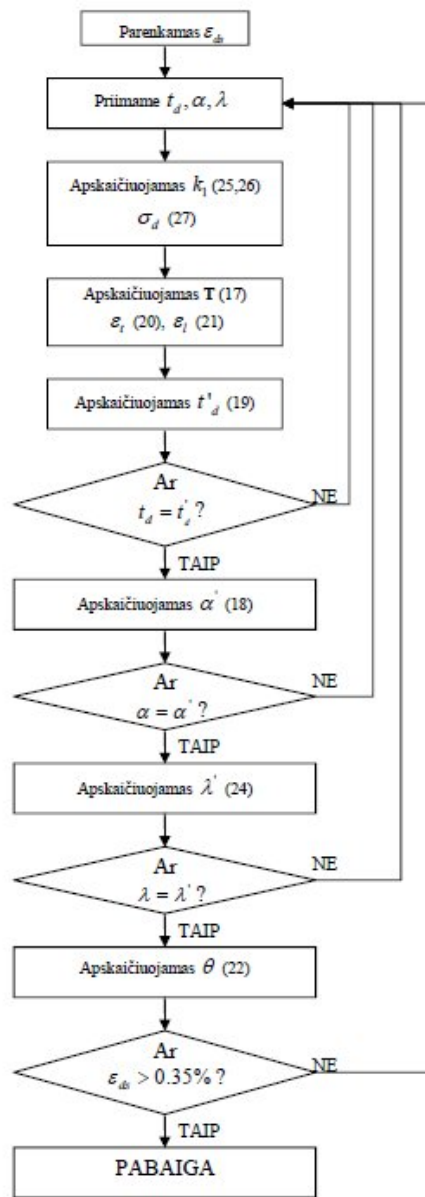
$$\lambda = \sqrt{\frac{\varepsilon_l + \varepsilon_t + \varepsilon_{ds}}{\varepsilon_{ds} / 2}} - 0.3 \quad (28)$$

Koeficientas k_1 parodo santykį tarp vidutinių ir maksimalių įtempių sukamo elemento betone ir apskaičiuojamas pagal sąlygas:

$$k_1 = \lambda \frac{\varepsilon_{ds}}{\varepsilon_0} - \frac{\lambda^2}{3} \left(\frac{\varepsilon_{ds}}{\varepsilon_0} \right)^2, \text{ kai } \varepsilon_{ds} \leq \frac{\varepsilon_0}{\lambda}; \quad (29)$$

$$k_1 = \left(1 - \frac{1}{(2\lambda - 1)^2} \right) \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{ds}} \right) + \frac{1}{(2\lambda - 1)^2} \frac{\varepsilon_{ds}}{\varepsilon_p} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_{ds}}{\varepsilon_p} \right), \text{ kai } \varepsilon_{ds} > \frac{\varepsilon_0}{\lambda}. \quad (30)$$

Elemento sukamojo momento – sąsūkio ($T - \theta$) kreivė išbrėžiama pagal aukščiau pateiktas priklausomybes, kadangi šios priklausomybės tarpusavyje susiję netiesiškai, tai galutinis rezultatas sužinomas priartėjimo būdu, panaudojant kelias iteracijas. Iteracijų apskaičiavimo algoritmas pateikiamas 1.10 pav.



1. 10 pav. Skaičiavimo algoritmas sukamo elemento elgsenos kreivei sudaryti, pagal kintamo kampo santvaros teoriją (*Variable Angle Truss-Model*)

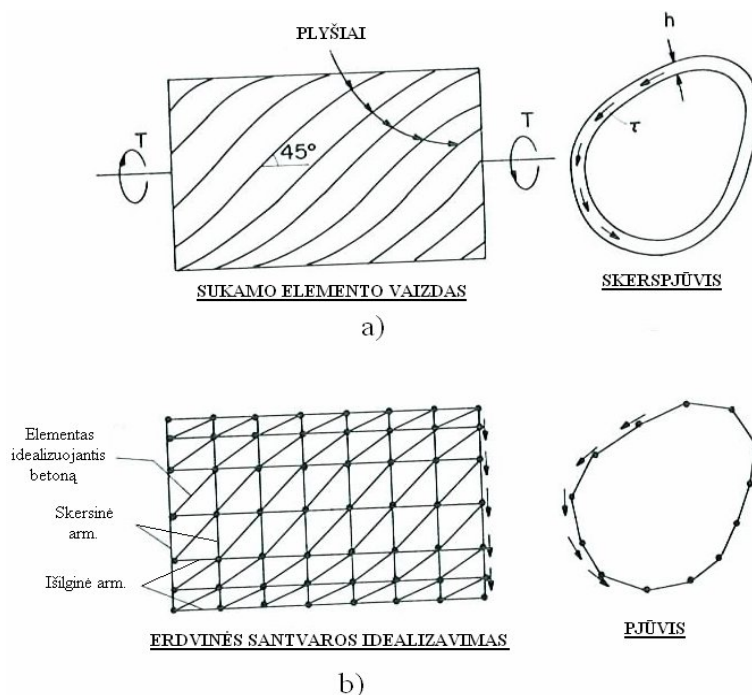
1.3.2. Sukamųjų gelžbetoninių elementų laikomosios galios skaičiavimas

Per paskutinius metus buvo išvesta daug teorijų, sukamo gelžbetoninio elemento su išilgine ir skersine armatūra laikomajai galiai apskaičiuoti. Šios teorijos gali būti skirstomos į du tipus: santvaros tipo ir įstrižojo lenkimo tipo teorijos.

Mokslininkai *Rauchas (1929)* ir *Cowmanas (1935)* norėdami nustatyti gelžbetoninio elemento sukamąją galią, jį idealizavo kaip erdvinę santvarą. Šių mokslininkų prielaidos ir išvestos formulės, naudojamos daugelių šalių projektavimo normose. Mokslininkas *Hsu (1979)* išvedė formulę sukamojo gelžbetoninio elemento stiprumui skaičiuoti, naudodamasis įstrižojo lenkimo teorija.

Rauscho erdvinės santvaros teorija

Pirmasis gelžbetoninių konstrukcijų apskaičiavimą panaudojant erdvinės santvaros modelį pateikė mokslininkas *Rauschas (1929)*. Jis pasiūlė skaičiavimams priimti supaprastintą tuščiavidurį skerspjuvį. Sprendimas buvo pagrįstas teorinėmis sukamo elemento žiniomis, nes buvo žinoma, kad vidinėje skerspjuvio dalyje veikia žymiai mažesni tangentiniai įtempiai, atsirandantys dėl sukimo poveikio, negu skerspjuvio perimetre. Vėlesni eksperimentiniai tyrimai parodė, kad pilnavidurio ir tuščiavidurio skerspjuvio elementų stiprumas sukimui yra beveik vienodi (*Hao-Jan Chiu, I-Kuang Fang et.al. 2006, Lui's F. A. Bernardo, M. R. Lopes et.al. 2008*). Po supleišėjimo betonas atskiriamas į atskirus žiedinius elementus. Šie žiediniai betoniniai elementai tariamai sąveikauja su išilgine ir skersine armatūra ir taip suformuoja erdvinę santvarą.

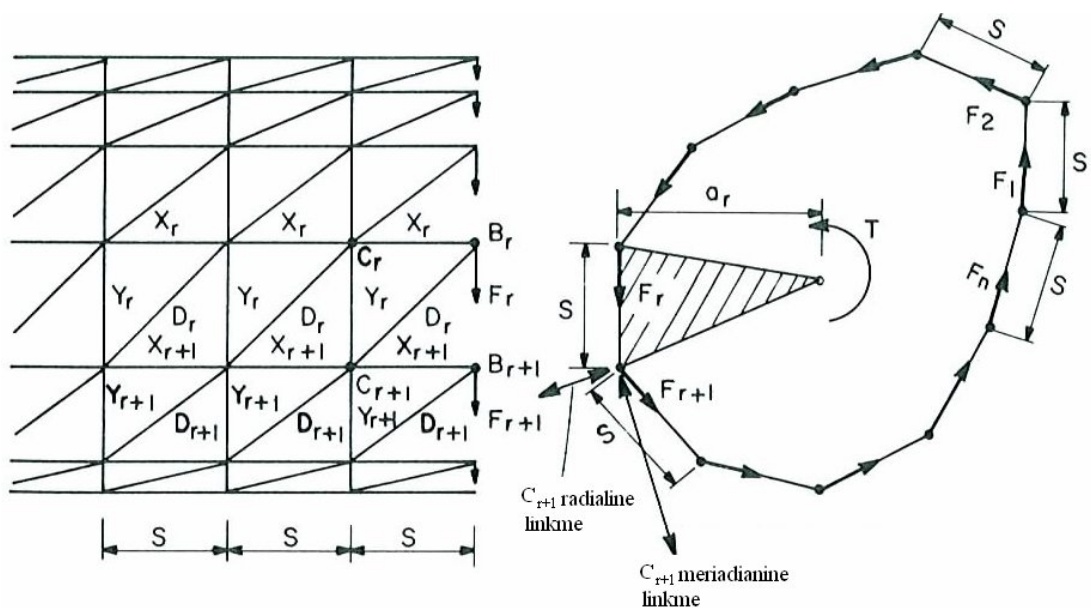


1. 11 pav. Sukamo elemento idealizavimas pagal *erdvinės santvaros teoriją*:

a) supleišėjęs sukamas elementas; b) idealizuota erdvinė santvara

Kiekvienas žiedinis betoninis elementas yra suprantamas kaip 45° kampu pasviręs tiesus strypas, sujungtas mazguose su elementais, kurie yra skersinės ir išilginės armatūros strypai (Rausch 1929).

Sukimo momento poveikis elementui priimamas kaip pastovus šlyties srautas, veikiantis įsivaizduojamo tuščiavidurio skerspjuvio sienelėse ir sukeliantis betoniniuose elementuose gniuždymo įtempius. Per mazgus iš betoninių elementų, jėgos persiskirsto į skersinę armatūrą. Mechanizmas, kurį sudaro elementai iš idealizuojamo betono ir skersinės armatūros, veikiant sukimo momentui, turi savybę ilgėti sijos ašies atžvilgiu. Taigi išilginė armatūra perima jėgas, kurios sukelia tokio mechanizmo pailgėjimą.



1. 12 pav. Jėgos veikiančios erdvinėje santvaroje

Prielaidos priimamos taikant erdvinės santvaros teoriją:

1. Erdvinė santvara sudaryta iš elementų, kurie idealizuoja 45° laipsnių kampu pasvirusias betonines dalis, skersinę ir išilginę armatūrą, mazguose sujungtais šarnyriniais ryšiais;
2. Pasvirę betoniniai elementai perima tik gniuždymą, šlytis tarp jų neįvertinama;
3. Išilginėje ir skersinėje armatūroje veikia tik ašinės tempimo jėgos;
4. Laikoma, kad skerspjuvio vidinės dalies darbas yra neįvertinamas.

Pagal priimtas prielaidas sudaroma skerspjuvyje veikiančių jėgų pusiausvyra. Vidinių jėgų sukeliamas sukimo momentas turi būti lygus išorinių jėgų sukeliamam sukimo momentui (Rausch 1929).

$$T = \sum_{r=1}^r F_r a_r = F \sum_{r=1}^r a_r, \quad (31)$$

čia F - vidinės jėgos, veikiančios idealizuotos santvaros strypuose; a_r – jėgos petys iki sukimosi ašies, iš geometrijos priimama jog $a_r = \frac{2A_r}{s}$.

Atlikus formulės (31) pertvarkymus gauname išraišką, sukamojo gelžbetoninio, armuoto skersine ir išilgine armatūra, elemento, skaičiuojant pagal erdvinės santvaros teoriją, sukamajai galiai apskaičiuoti

$$T_n = \frac{2x_1 y_1 A_t f_{sy}}{s}, \quad (32)$$

čia x_1, y_1 – stačiakampio skerspjūvio atitinkamai mažesnioji ir didesnioji kraštinės; A_t – skersinės armatūros skerspjūvio plotas; f_{sy} – skersinės armatūros stipris; s - atstumas tarp skersinės armatūros strypų.

Skaičiuojant pagal erdvinės santvaros teoriją, turi būti išlaikyta sąlyga, jog skersinės ir išilginės armatūros tūris gelžbetoniniame elemente turi būti toks pat, kitaip sakant, jų armavimo procentas turi būti vienodas. Taigi apskaičiavus skersinės armatūros kiekį pagal (32) sąlyga, turi būti išlaikoma:

$$A_t = A_l \frac{2(x_1 + y_1)}{s}. \quad (33)$$

Sąlyga, kad skersinės ir išilginės armatūros tūrių santykis turi būti vienodas, išplaukia iš reikalavimo, kad plyšiai su sijos išilgine ašimi turi sudaryti 45° kampą.

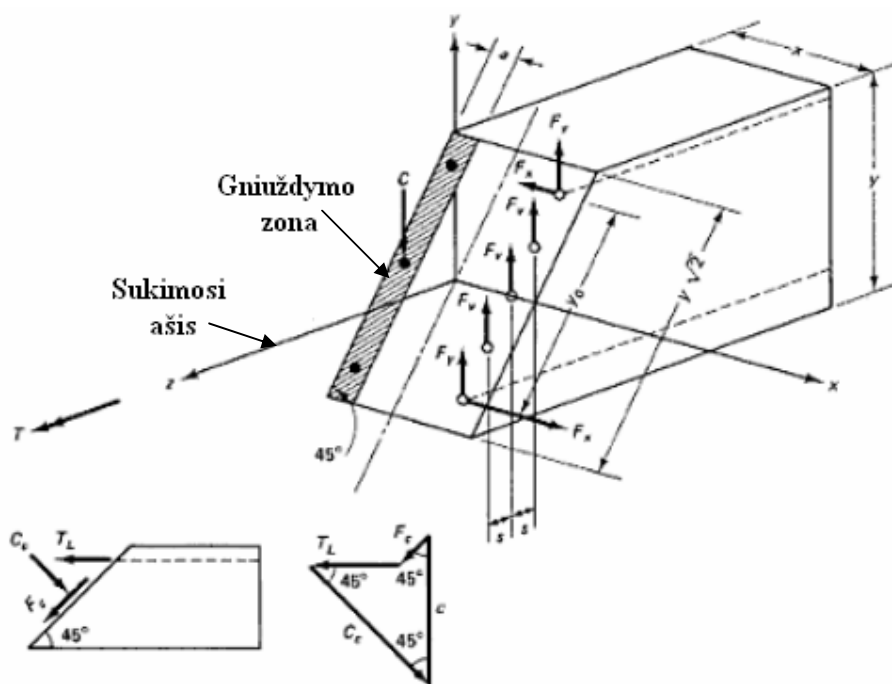
Kaip matome iš (32) formulės, sukamo elemento laikomoji galia tiesiai proporcingai priklauso nuo skerspjūvio matmenų, skersinės armatūros skerspjūvio ploto, plieno stiprio ir atvirkščiai proporcingai nuo skersinės armatūros žingsnio. Kuo didesnis žingsnis, tuo mažesnė įtaką skersinė armatūra turi sukamajai galiai. Betono stiprumas iki atsirandant plyšiams nėra įvertinamas, tai reiškia kad betono darbas įvertinamas tik stadijoje po plyšių atsiradimo.

Įstrižojo lenkimo teorija

Pirmas sukamo elemento skaičiavimą pagal įstrižojo lenkimo teoriją pasiūlė mokslininkas *Lessig (1965)*, vėliau jo pasiūlytą teoriją nagrinėjo ir papildė *Collins, Hsu, Zia, Gesunt et.al.*, galutinai ši teorija buvo papildyta ir įrodyta eksperimentiniais tyrimais mokslininko *Hsu (1979)*.

Įstrižojo lenkimo teorijoje priimama, kad trijose iš sukamo stačiakampio skerspjūvio kraštinių pasireiškia tempimo, o ketvirtojoje gniuždymo įtempiai. Priimama, jog gniuždomos zonos plotis išlieka toks pat per visą skerspjūvio kraštinę (Thomas Hsu 1979).

Tempimo įtempių veikiamose kraštinėse išsivysto plyšiai, kurie betoniniame elemente sukeltų suirimą, tačiau armuotame elemente šiuos tempimo įtempius perima skersinė armatūra. Išilginė armatūra tarnauja kaip sprauskeliai, kurie neleidžia atplyšusiom plokštumom pasislinkti vienai kitos atžvilgiu.



1. 13 pav. Jėgų pasiskirstymas sukamo elemento skerspjūvyje pagal įstrižojo lenkimo teoriją

Skaičiuojant pagal įstrižojo lenkimo teoriją priimamos tokios prielaidos:

1. Įvykus suirimui skersinė ir išilginė armatūra pradeda tekėti vienu metu;
2. Tempama betono dalis skaičiavimuose neįvertinama;
3. Gniuždomų armatūros strypų darbas skaičiavimuose neįvertinamas;
4. Atliekant skaičiavimus daroma prielaida, kad betono gniuždymo zona yra stačiakampės formos.

Skaičiuojant sukamo gelžbetoninio elemento laikomąją galią, pagal įstrižojo lenkimo teoriją, atsižvelgiama į jėgas veikiančias skerspjūvyje. Laikoma, kad sukamoji galia priklauso nuo skersinės armatūros, išilginės armatūros ir gniuždomo betono stiprio.

Pagal Hsu (1979) išvestą formulę, sukamoji galia, veikiant grynajam sukimui, gali būti apskaičiuojama pagal formulę:

$$T_{US} = T_c + \alpha_t \frac{x_1 y_1 A_t f_{sy}}{s} \quad (34)$$

Išskleidus formulę gauname:

$$T_{US} = \frac{x^2 y}{3} (2.4 \sqrt{f_c}) + \sqrt{m} \frac{f_{by}}{f_{sy}} \left(1 + 0.2 \frac{y_1}{x_1} \right) \frac{x_1 y_1 A_t f_{sy}}{s}, \quad (35)$$

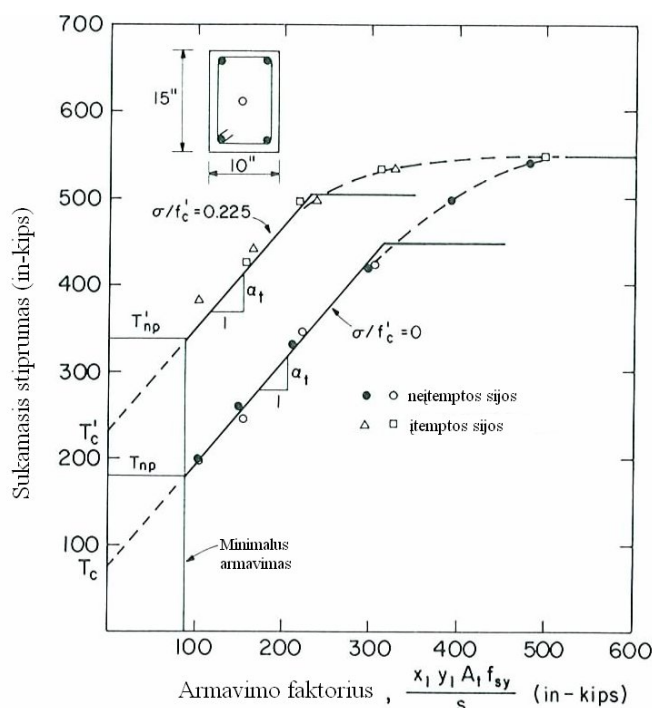
čia m – santykis tarp išilginės ir skersinės armatūros tūrio:

$$m = \frac{A_t s}{A_l \cdot 2(x_1 + y_1)}; \quad (36)$$

x ir y – skerspjūvio kraštinių išoriniai matmenys; A_t – skersinės armatūros plotas; A_l – išilginės armatūros plotas; f_{by} – skersinės armatūros takumo ribos stiprumas; f_{ty} – išilginės armatūros takumo ribos stiprumas; f_c – betono gniuždomasis stiprumas; s – skersinės armatūros žingsnis.

1.4. Sukamųjų išanksto įtemptųjų gelžbetoninių elementų laikomoji galia

Gera žinoma, kad išankstinis įtempimas padidina gelžbetoninio elemento atsparumą plyšio atsiradimui. Taip yra todėl, kad išankstinis įtempimas sukelia gniuždymo įtempimus elemente, kurie atsveria atsiradusius tempimo įtempimus. Plyšiai atsiranda tada, kai tempimo įtempiai panaikina apgniuždymo įtempius, atsiradusius nuo išankstinio apspaudimo, ir pasiekia betono tempiamąjį stiprį.



1. 14 pav. Įtemptojo ir neįtemptojo gelžbetonio sijų sukamoji galia, priklausomai nuo skersinės armatūros kiekio

Formulė, sukamųjų, iš anksto įtemptųjų, gelžbetoninių sijų laikomajai galiai apskaičiuoti, buvo išvesta remiantis eksperimentų tyrimais. Šiuos bandymus atliko mokslininkas *Hsu (1967)*. Jis atliko eilę bandymų su iš anksto įtemptomis ir neįtemptomis sijomis. Eksperimento metu buvo išbandytos tokio pat skerspjūvio, pagamintos iš tokio paties betono, sijos, tačiau vienos buvo apspaudžiamos išankstiniu įtempimu, o kitos ne. Atlikus bandymus buvo nubrėžtos kreivės, kurios rodo, kaip priklauso sijų sukamoji galia nuo armavimo procento. Iš nubrėžtų kreivių pastebėta, kad jos yra lygiagrečios, lyginant iš anksto įtemptas ir neįtemptas sijas, tačiau ordinačių ašį kerta skirtingose vietose (1.14 pav.). Tai reiškia, kad sukamų iš anksto įtemptų gelžbetoninių sijų sukamoji galia gali būti išreikšta, kaip suma momentų, kuriuos atlaiko betonas ir skersinė armatūra. Išankstinis apspaudimas padidina betono poveikį sukamo elemento stiprumui, tuo tarpu skersinės armatūros poveikis išlieka toks pats, lyginant su neįtemptomis sijomis (Thomas Hsu 1967).

$$T_n = T_c \gamma_1 + \alpha_t \frac{x_1 y_1 A_t f_{sy}}{s}, \quad (37)$$

čia T_c - sukamasis momentas, kurį atlaiko betonas; γ_1 - koeficientas, apsprendžiantis išankstinio apspaudimo įtaką betonui; α_t - koeficientas, apsprendžiantis skerspjūvio formos įtaką

$$\alpha_t = 0.66 + 0.33 \frac{y}{x}.$$

Išnagrinėjus (37) formulę matome, kad jos sandara lygiai tokia pati kaip ir skaičiuojant sukamojo gelžbetoninio elemento, be išankstinio apspaudimo, stiprumą. Koeficientas γ_1 įvertina išankstinio apspaudimo arba ašinės jėgos sukeltų įtempių įtaką, sukamo elemento laikomajai galiai. Kaip matome skersinės armatūros įtaka išlieka tokia pati kaip ir neįtemptame elemente.

Koeficientas γ_1 apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\gamma_1 = 2.5 \cdot \sqrt{1 + 10 \frac{\sigma}{f_c}} - 1.5, \quad (38)$$

čia σ - įtempimai betone, kuriuos sukelia išankstinis apspaudimas; f_c - gniuždomasis betono stipris.

Kadangi įtempiai betone gali būti gaunami ne vien nuo armatūros išankstinio įtempimo, bet ir nuo išorinės jėgos, vadinasi pagal tą pačią formulę galima apskaičiuoti sukamą ir kartu gniuždomą elementą.

1.5. Sukamųjų gelžbetoninių elementų stiprumo skaičiavimas taikant normų reikalavimus

1.5.1. Skaičiavimas pagal ACI 318-05 standartą

Sukamų gelžbetoninių sijų laikomoji galia pagal (ACI 318-05, 2005) standartą apskaičiuojama:

$$T_{US} = \frac{2A_0 A_{sw} f_{ys}}{s} \cot \theta_t, \quad (39)$$

čia A_0 – skerspjūvio plotas, apribotas įtempių srauto centro linijos, gali būti priimamas $0.85A_{oh}$; A_{oh} – plotas, apribotas skersinės armatūros centro linijomis.

Kampas, kurį sudaro plyšiai su sijos išilgine ašimi, neįtemptiems arba mažai įtemptiems elementams, turi būti priimamas 45° (ACI 318-05, 2005). Formulė, sukamojo elemento laikomajai galiai apskaičiuoti, yra paremta prielaidomis, kad visą išorinę apkrovą perima armatūra, o betono darbas nevertinamas. Skersinė ir išilginė armatūra pradeda tekėti vienu metu, vadinasi elementas turi būti suarmuotas vienodu skersinės ir išilginės armatūros procentu, priklausomai nuo armatūros plieno takumo stiprio. Betonai už skersinės armatūros ribų dirba neefektyviai ir jo poveikis yra atmetamas (ACI 318-05, 2005).

Standartas taip pat pabrėžia, kad išilginės armatūros kiekis turi būti didesnis negu apskaičiuotas pagal formulę:

$$A_s = \left(\frac{f_{ys}}{f_y} \right) \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) u_t \cot^2 \theta_t. \quad (40)$$

Kadangi standartas pabrėžia jog kampas, kurį sudaro plyšys su sijos išilgine ašimi turi būti priimamas 45° , tuomet gauname jog skersinės ir išilginės armatūros keikis turi būti toks pat, priklausomai nuo jų stiprio santykio.

1.5.2. Skaičiavimas pagal Europos standartą EC2

Skaičiuojant pagal EC2 (2002), laikoma, kad elementas netenka laikomosios galios, veikiant sukimui, kai pradeda tekėti skersinė arba išilginė armatūra arba kai suyra sukamo elemento betonai. Apskaičiavus, pasirenkama mažiausia laikomosios galios reikšmė.

Sukamasis momentas, kurį atlaiko skersinė armatūra:

$$T_{u,sw} = \frac{2A_k A_{sw} f_{ys}}{s} \cot \theta_t, \quad (41)$$

čia A_k – plotas, apribotas efektyvios sienutės storio centro linijos. Efektyvus sienutės storis apskaičiuojamas $t_{ef} = \frac{A}{u}$, čia A – visas skerspjūvio plotas, u – viso skerspjūvio perimetras.

Sukamasis momentas, kurį atlaiko išilginė armatūra:

$$T_{u,s} = \frac{2A_k A_s f_y}{u_k} \tan \theta_t, \quad (42)$$

čia u_k - ploto A_k perimetras.

Sukimas, kurį atlaiko gniuždomas betonas:

$$T_{u,c} = 2\nu f_{ck} A_k t_{ef} \sin \theta_t \cos \theta_t, \quad (43)$$

čia f_{ck} - betono gniuždomasis stipris;

$$\nu = 0.6(1 - f_{ck} / 250). \quad (44)$$

Mažiausias iš šių trijų apskaičiuotų stiprumų ir yra sukamo gelžbetoninio elemento laikomoji galia.

Kampas, kurį sudaro plyšys su sijos išilgine ašimi, turi neišeiti iš ribų pagal sąlygą $1 \leq \cot \theta_t \leq 2.5$, bet gali būti priimamas 45° (EC2 2002).

Atlikus ACI 318-05 ir EC2 normų analizę, matome, jog skaičiuojant pagal ACI normas sukamo gelžbetoninio elemento laikomoji galia apskaičiuojama įvertinant tik skersinės armatūros įtaką, tuo tarpu skaičiuojant pagal EC2 įvertinama ir išilginės armatūros bei betono įtaką laikomajai galiai.

EC2 normose kampas tarp išilginės ašies ir plyšio gali kisti $21,8^\circ < \theta_t < 45^\circ$, tuo tarpu ACI normose šis kampas turi būti priimamas 45° . Taip pat EC2 nėra griežto reikalavimo dėl išilginės ir skersinės armatūros tūrių santykio, tuo tarpu ACI būtina išlaikyti sąlygą, kad skersinės ir išilginės armatūros kiekis turi būti vienodas, atsižvelgiant į stiprumų santykį. Šiuo atžvilgiu ACI 318-05 normos yra žymiai konservatyvesnės lyginant su EC2.

1.6. Sukamų gelžbetoninių elementų eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai

Norėdami nustatyti, smarkiai apkrautos, skersine jėga ir sukimo momentu, sijos elgseną, mokslininkai *Reid ir Bridge (1990)* atliko teorinius ir eksperimentinius tyrimus. Jų metu nustatyta, jog sukimas smarkiai sumažina sijos laikomąją galią, kai veikia kelių įrašų derinys. Sukimas veikdamas kartu su skersine jėga ir momentu, sukelia sijos trapų suirimą.

Betono gniuždomojo stiprio įtaką sukamo gelžbetoninio elemento elgsenai ir standumui tyrė mokslininkai *Rasmussen ir Baker (1994)*, jie nustatė jog betono stipris turi didelės įtakos plyšių ploiui, sukamajam standumui ir sukamajam stiprumui.

Fang ir Shiau (2004) eksperimentiniais bandymais tyrė sijų, iš normalaus ir didelio stiprumo betono, elgseną. Jų tyrimai parodė, kad sijų iš didelio stiprumo betono sukamasis stiprumas ir standumas po plyšių atsivėrimo yra didesnis negu normalaus betono sijose, esant tokiam pačiam armavimo intensyvumui.

Mokslininkai *Ali ir White* pastebėjo, kad skaičiuojant mažiausią reikiamą armatūros kiekį sukamame elemente, pagal ACI 318-95, rezultatas gali gautis neigiamas, tai gali suklaidinti projektuotojus, todėl jie pasiūlė, kad reikiamas mažiausias sukamo elemento armatūros kiekis, turi priklausyti nuo sukamojo plyšio momento. Tai patvirtino *Koutchoukai ir Belarbi(1995)*, jie nustatė didelio stiprumo betono poveikį elemento sukamajam plyšimo stiprumui T_{cr} ir pasiūlė mažiausią reikiamą armavimo kiekį susieti su sukamuoju stiprumu, kuris turi būti lygus plyšio atsiradimo momentui.

Įtaką sukamo elemento elgsenai nuo skersinės ir išilginės armatūros santykio, betono stiprumo, skerspjuvio matmenų tyrė mokslininkai *Hao-Jan Chiu ir I-Kuang Fang (2006)*. Jie nustatė jog didėjant išilginės armatūros kiekiui plyšio plotis mažėja, esant tam pačiam apkrovimui. Sukamasis plyšio atsiradimo momentas, sijose iš didelio stiprumo betono, yra didesnis lyginant su sijomis iš normalaus stiprumo betono. Lyginant pilnavidurių sijų su tokių pat matmenų ir armavimu tuščiavidurėmis sijomis, pastebėta, kad tuščiavidurių sijų sukamasis plyšio atsiradimo momentas yra mažesnis. Taip pat nustatyta, jog didėjant santykiui tarp skerspjuvio išorinių matmenų, sukamasis plyšio atsiradimo stiprumas mažėja, o plyšio plotis didėja, tai galima paaiškinti tuom, kad didėjant skerspjuvio aukščiui, didėja įtempimai skerspjuvio didesniojoje kraštinėje, kas ir sąlygoja plyšių atsiradimą prie mažesnio sukamojo momento.

Mokslininkai *Lui's F. A. Bernardo ir Se'rgio M. R. Lopes (2008)* eksperimentiniais bandymais nustatinėjo sukamų gelžbetoninių sijų, pagamintų iš normalaus betono, elgsenos ($T - \Theta$) kreives. Bandymų metu buvo išbandyta 21 sija. Jos buvo bandomos palaipsniui didinant sukimo momentą, ir nustatant kiek elementas susisuka nuo pridėtos apkrovos. Skaitinių tyrimų metu, buvo sudarytos išbandytų sijų teorinės apkrovos deformacijų kreivės, pasinaudojant tampromo, erdvinės 45° plyšių santvaros, įstrižojo lenkimo, kintamojo kampo santvaros, teorijų prielaidomis. Taip pat išvedimais, kuriuos pateikė mokslininkai- *Rauch, Bredt, Hsu et. al. (1979)*. Tyrimais nustatyta, kad elemento elgsena, apskaičiuota pagal teorines prielaidas, nedaug skiriasi nuo eksperimentais gautos kreivės, kol elementas dirba pagal tiesinį modelį, tiek pilnavidurėms tiek tuščiavidurėms sijoms. Vadinasi kol elementas dirba tampriai, jo standumui skerspjuvio šerdis didelės įtakos nedaro. Kai sukamas elementas pasiekia tokią apkrovą, nuo kurios jis pradeda elgtis netiesiškai, skaičiuojant pagal kintamo kampo erdvinės santvaros teorijos modelį, gaunami geri rezultatai, nustatant didžiausią sukimo momentą, kurį gali atlaikyti skerspjuvis, bei suirimo tipą - trapus ar plastinis. Lyginant tuščiavidures ir pilnavidures sijas galima daryti išvadą, jog skerspjuvio šerdis turi mažai įtakos elemento stiprumui, tačiau žymiai sumažina standumą.

1.7. Išvados

Pirmajame skyriuje išnagrinėti pagrindiniai šiuo metu naudojami metodai sukamiems gelžbetoniniams elementams apskaičiuoti: tamprumo teorija (*St. Venant*), įstrižojo lenkimo teorija (*skew bending theory*), erdvinės santvaros modelis (*space truss model*) ir kintamo kampo erdvinės santvaros modelis (*variable angle space truss model*). Tamprumo teorija nagrinėja sukamų gelžbetoninių elementų elgseną iki plyšių atsiradimo. Įstrižojo lenkimo teorija ir erdvinės santvaros modeliu nustatoma sukamo gelžbetoninio elemento laikomoji galia, tačiau šiais metodais negalima nustatyti elemento elgsenos. Kintamo kampo erdvinės santvaros modeliu galima nagrinėti sukamų gelžbetoninių elementų elgseną netiesinėje stadijoje, juo gana tiksliai nusakoma elementų sukamoji galia. Naudojantis aptartų teorijų formulėmis ir išvedimais galima apskaičiuoti, kokią įtaką sukamo gelžbetoninio elemento stiprumui turi išankstinis apspaudimas.

Pagrindiniai šio darbo tikslai:

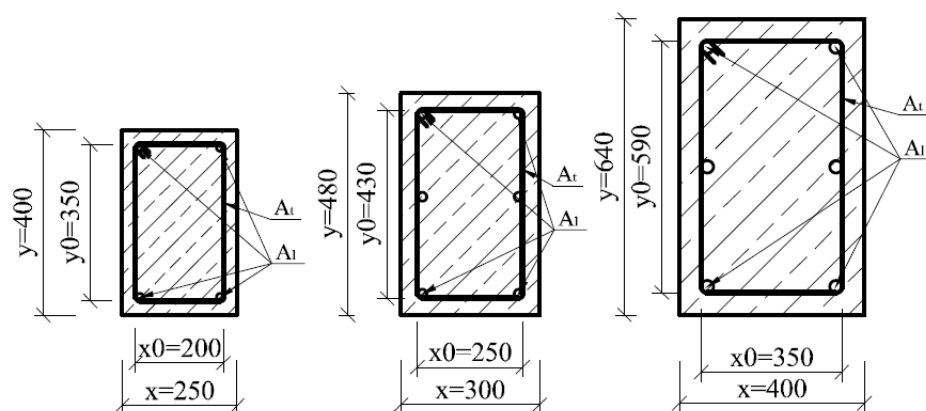
1. Nustatyti, kokią įtaką turi išankstinio paspaudimo dydis sukamo gelžbetoninio elemento stiprumui.
2. Nustatyti armatūros kiekio poveikį sukamo elemento elgsenai ir laikomajai galiai.

2. SUKAMŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ANALIZĖ

2.1. Armatūros kiekio įtaka sukamų gelžbetonių elementų elgsenai

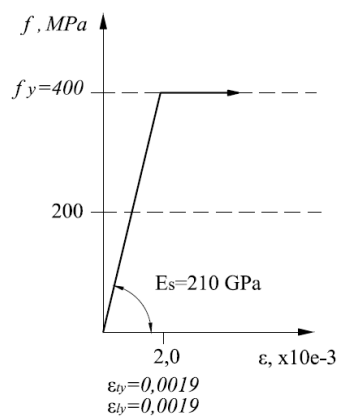
Sukimo momento - sąsūkio kreivės sudarymui buvo atliktas sukamų gelžbetoninių elementų skaitinis eksperimentas. Pagal skyriuje 1.3.1 aptartą teoriją, sudaromos sukamų elementų elgsenos kreivės, taip pat nustatoma, kokią įtaką armatūros keikis turi įtempių pasiskirstymui armatūroje.

Norint sužinoti kokią įtaką sukamo gelžbetoninio elemento elgsenai turi armatūros kiekis, skaitino eksperimento metu, buvo išnagrinėtos trys skirtingo skerspjūvio 0,25 x 0,4 m; 0,3 x 0,48 m; 0,4 x 0,64 sijos, sudarant jų sukimo momento - sąsūkio ($T - \theta$) kreives, keičiantis armatūros kiekiui.



2. 1 pav. Sijų, naudojamų skaitiniam eksperimentui skerspjūviai

Visos sijos pagamintos iš tokio paties betono, kurio gniuždomasis stipris $f_c = 33MPa$, tamprumo modulis $E_c = 31 GPa$, kitaip sakant buvo pasirinkta C25/30 betono klasė ir naudojamos charakteristinės mechaninių savybių reikšmės. Sudarant sukimo momento - sąsūkio kreives tariama, kad betonas dirba pagal šlyties veikiamo elemento modelį (*Softening Effect*), aprašytą 1.3.1 poskyryje (žr. 1.8 pav.). Bendras, skersinės ir išilginės, armatūros kiekis skerspjūvyje kinta ribose nuo 0,5 % iki 4,1 %, armatūros klasė S400, kurios takumo ribos įtempiai $f_y = 400MPa$. Armatūra dirba pagal idealiai tampriai-plastinės medžiagos modelį (žr. 2.2 pav.).



2. 2 pav. Plieno įtempių ir deformacijų kreivė, vaizduojanti idealiai tampriai plastinės medžiagos modelį

Atliekant skaitinį eksperimentą, sukimo momentas keliamas iki tol, kol elementas visiškai suyra. Norint sužinoti kaip dirba armatūra, sukamame elemente, buvo sudarytos diagramos, kurios nusako kaip priklauso skersinės armatūros įtempiai, nuo veikiančio sukimo momento.

Sukamos gelžbetoninės 0,25 x 0,40 m matmenų sijos elgsena

Pateikiama 0,25 x 0,40 m matmenų sijos elgsenos kreivės prie kiekvieno armavimo procento. Taip pat nustatoma, kokie įtempiai veikia skersinėje armatūroje, didėjant sukimo momentui. Iš sukimo momento – sąsūkio kreivių nustatomas sukimo momentas kai atsiveria plyšys, sukimo momentas kai pradeda tekėti armatūra, sukimo momentas kai elementas visiškai suyra taip pat nustatomas elemento standumas iki plyšių atsivėrimo ir jam atsivėrus.

Sijų, skerspjūvio charakteristikos, fizinės ir mechaninės savybės, armatūros plotai ir skersinės armatūros žingsnis, pateikti 2 lentelėje.

2. lentelė 0,25 x 0,40 m sijų skerspjūvio matmenys, fizinės ir mechaninės charakteristikos

Sijos šifras	y, m	x, m	y ₀ , m	x ₀ , m	f _c , MPa	f _y , MPa	A _l , m ² x10 ⁻⁴	A _t , m ² x10 ⁻⁴	s, m	ρ _l , %	ρ _t , %	ρ _{tot} , %
(B1 0.57)	0,4	0,25	0,35	0,20	33	400	2.012	0.283	0.1	0.201	0.368	0.569
(B1 1.11)							4.524	0.503	0.1	0.452	0.654	1.11
(B1 1.67)							8.04	0.785	0.125	0.804	0.864	1.667
(B1 2.00)							10.16	1.131	0.15	1.016	0.98	2.0
(B1 2.48)							10.16	1.131	0.1	1.016	1.47	2.48
(B1 3.00)							15,20	1,131	0,1	1,52	1,47	2,99
(B1 3,50)							17,78	1,131	0,085	1,73	1,78	3,51
(B1 4,00)							19,64	1,131	0,075	1,964	1,96	3,924

Nustatant sijų elgsenos ($T - \theta$) kreives, iš pradžių nustatoma tiesinė elgsena. Nustatomas elemento plyšio atsiradimo momentas, šį momentą atitinkantis susisukimas, tada surandamas elemento standumas iki plyšio atsiradimo. Naudojantis *Hsu* išvesta formule, pagal įstrižojo lenkimo teoriją, surandamas elemento standumas po plyšių atsivėrimo. Sukamo gelžbetoninio elemento tiesinę elgseną, iki atsirandant plyšiams ir jiems atsiradus, aprašantys dydžiai pateikiami 3. lentelėje.

3. lentelė skaičiavimo rezultatai 0,25x0,40 m skerspjūvio sijos, armuotos skirtingu kiekiu armatūros, tiesinei analizei aprašyti

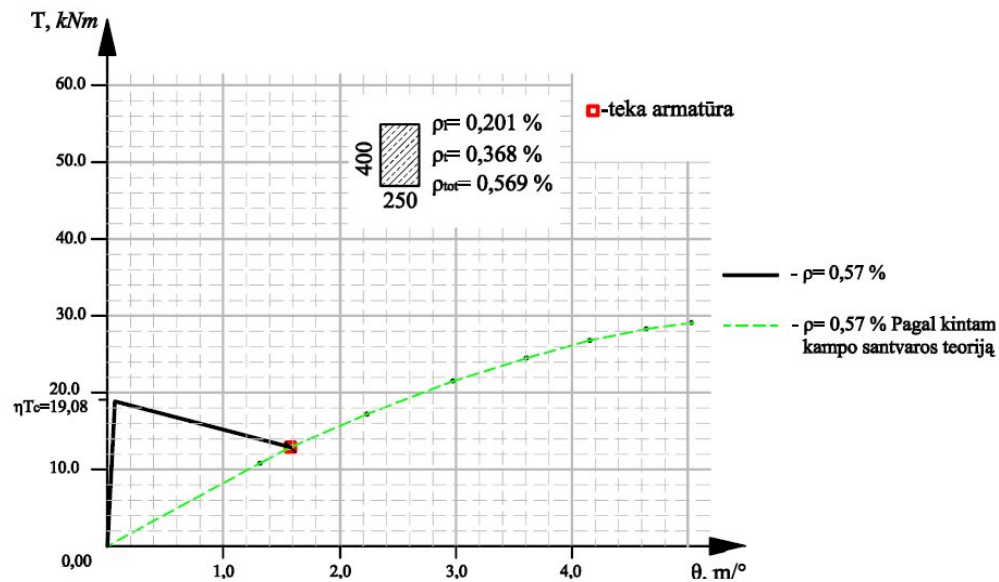
Sijos šifras	T_{cr} , kNm	$(GC)^I$, kNm ²	θ_{cr}^I , °/m	ηT_c , kNm	$(GC)^{II}$, kNm ²	θ_{cr}^{II} , °/m
(B1 0.57)	19,67	16469	0,068	19,08	179	0,188
(B1 1.11)	20,01		0,067		355	0,161
(B1 1.67)	20,51		0,067		514	0,159
(B1 2.00)	20,80		0,072		650	0,149
(B1 2.48)	21,10		0,074		800	0,148
(B1 3.00)	21,50		0,075		973	0,144
(B1 3.50)	21,90		0,076		1142	0,143
(B1 4.00)	22,20		0,077		1277	0,142

Netiesinę sukamojo gelžbetoninio elemento elgseną aprašoma pasinaudojus kintamo kampo santvaros teorija (*Variable Angle Truss-Model*). Tariaama, kad sukamos sijos netiesinė elgsena prasideda tada, kai pradeda tekėti skersinė arba išilginė armatūra arba netiesiškai pradeda deformuotis betonas. Naudojantis kintamo kampo santvaros teorija galima nustatyti, kokią deformaciją pasiekia betonas ir armatūra esant tam tikram sukimo momentui, taip pat sužinoma, koks efektyvus sienutės storis įsitraukia į darbą, bei nustatoma kiek susisuka elementas.

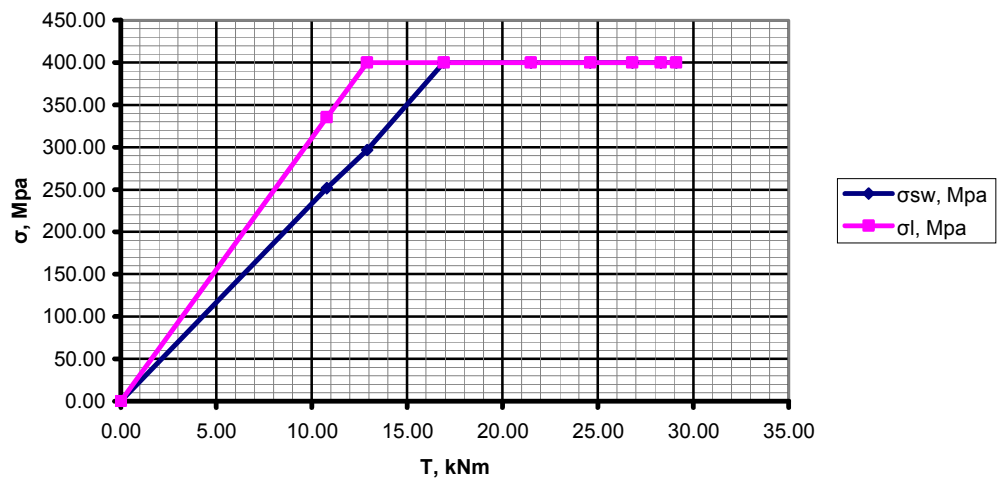
0,25 x 0,40 m sijų, kai armavimo procentas kinta 0,5 - 4 %, skaičiuojant pagal kintamo kampo erdvinės santvaros teoriją, rezultatai pateikti 3 – 11 lentelėse, o elgsenos kreivės 2.3 - 2.21 pav.

4. lentelė Elemento (B1 0.57) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (*Variable Angle Truss-Model*)

T (kNm)	Deformacija betone $\varepsilon_{ds} (x10^{-3})$	Deformacija išilginėje armatūroje $\varepsilon_l (x10^{-3})$	Deformacija skersinėje armatūroje $\varepsilon_t (x10^{-3})$	Efektyvusis sienutės storis t_d, m	Kampas tarplyšio ir sijos ašies $\alpha, ^\circ$	Betono susilpninimo koef. $1/\lambda$	Susisukimas $\theta (^\circ/m)$
10.80	0,50	1,597	1,199	0,0219	48,50	0,279	1,318
12.90	0,63	1,900	1,412	0,0230	48,60	0,287	1,582
17.20	1,00	2,581	1,939	0,0257	48,36	0,305	2,240
21.50	1,50	3,290	2,470	0,0290	48,25	0,328	2,982
24.60	2,00	3,818	2,876	0,0319	48,14	0,345	3,616
26.80	2,50	4,217	3,182	0,0346	48,03	0,360	4,163
28.30	3,00	4,520	3,416	0,0372	47,92	0,377	4,650
29.10	3,50	4,694	3,527	0,0400	47,88	0,395	5,040



2. 3 pav. $\rho_{tot} = 0,57 \%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 0,57) sukimo momento-sąsūkio ($T - \theta$) diagrama



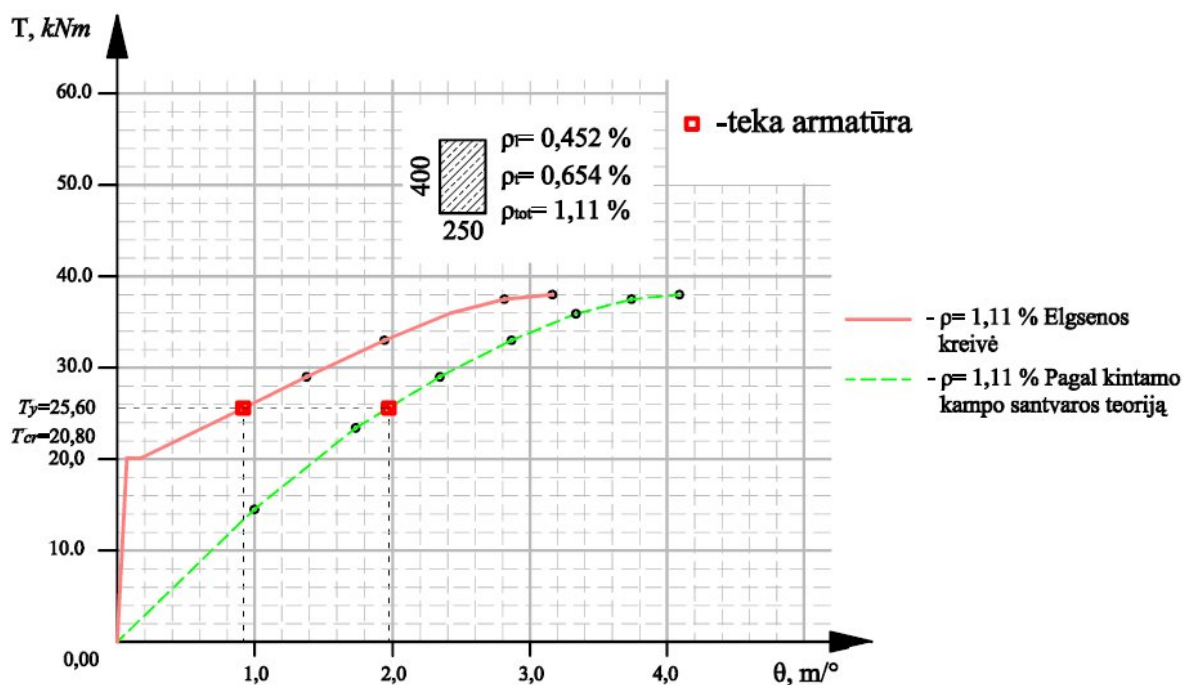
2. 4 pav. (B1 0,57) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento

Iš 2.3 pav. matyti, kad elemento sukimo momento - sąsūkio kreivė po staigaus kilimo staigiai pradeda kristi žemyn. Tai paaiškinama tuo, kad sutrūkus elementui armatūroje iš kart pasireiškia takumo įtempiai. Sukamo elemento betonas atlaiko $T = 19.08$ (kNm) dydžio sukimo momentą, jam sutrūkus įtempiai persiskirsto į armatūrą, tačiau jos yra per mažai, kad suteiktų elementui papildomo stiprumo, ji tik pristabdo elemento staigų suirimą. Tokio elemento stiprumas aprašomas kaip betoninio elemento.

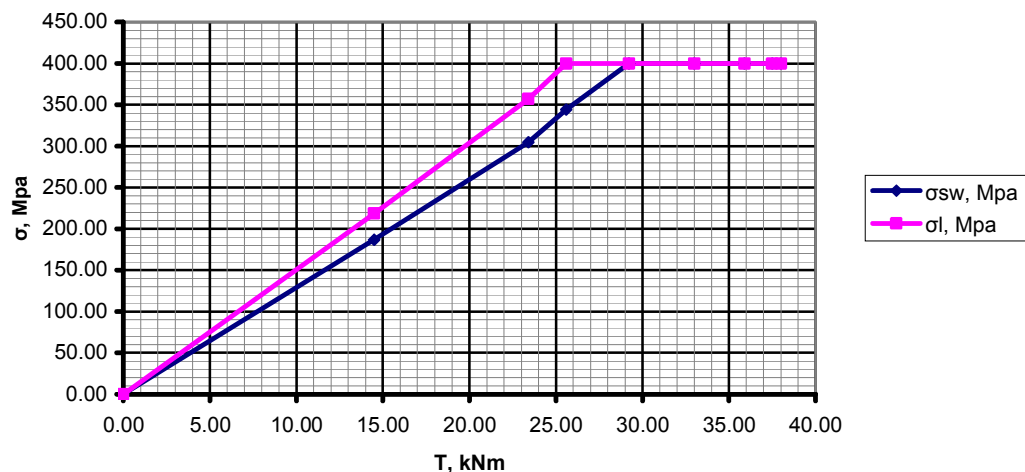
Iš 2.4 pav. matome, kaip pasiskirsto skersinės ir išilginės armatūros įtempiai, didėjant sukimo momentui. Kaip matome, išilginėje armatūroje takumo įtempiai pasireiškia prie mažesnio sukimo momento, negu skersinėje armatūroje, tai galima paaiškinti tuo, kad išilginės armatūros yra mažiau lyginant su skersinės armatūros kiekiu.

5. lentelė Elemento (B1 1.11) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (*Variable Angle Truss-Model*)

T (kNm)	Deformacija betone $\varepsilon_{ds} (x10^{-3})$	Deformacija išilginėje armatūroje $\varepsilon_l (x10^{-3})$	Deformacija skersinėje armatūroje $\varepsilon_t (x10^{-3})$	Efektyvusis sienutės storis t_d, m	Kampas tarplyšio ir sijos ašies $\alpha, ^\circ$	Betono susilpninimo koef. $1/\lambda$	Susisukimas $\theta (^\circ/m)$
14.5	0.5	1.04	0.89	0.0286	46.77	0.333	1.000
23.4	1.0	1.70	1.45	0.0330	46.75	0.353	1.739
25.6	1.32	1.90	1.64	0.0360	46.54	0.375	2.067
29.0	1.5	2.16	1.87	0.0366	46.49	0.378	2.353
33.0	2.0	2.17	2.49	0.0399	46.40	0.395	2.875
35.9	2.5	2.75	2.41	0.0429	46.33	0.415	3.345
37.5	3.0	2.92	2.56	0.0459	46.25	0.432	3.750
38.0	3.5	3.00	2.65	0.0490	46.15	0.450	4.100



2. 5 pav. $\rho_{tot} = 1.11\%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 1.11) sukimo momento-sąsukio ($T - \theta$) diagrama

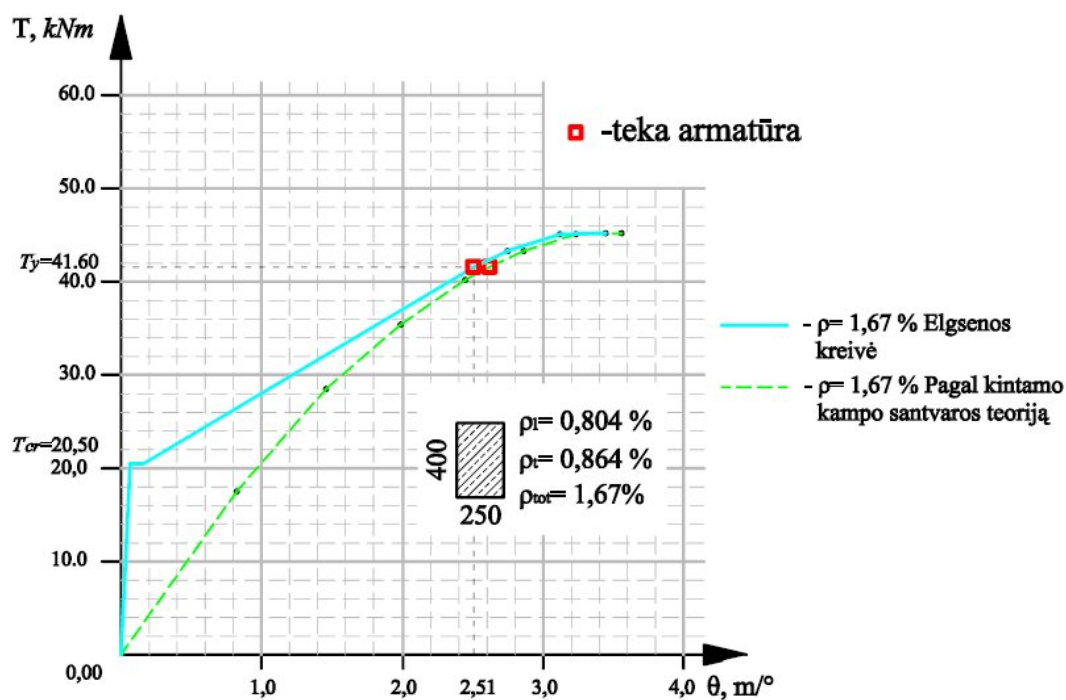


2. 6 pav. (B1 1.11) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento

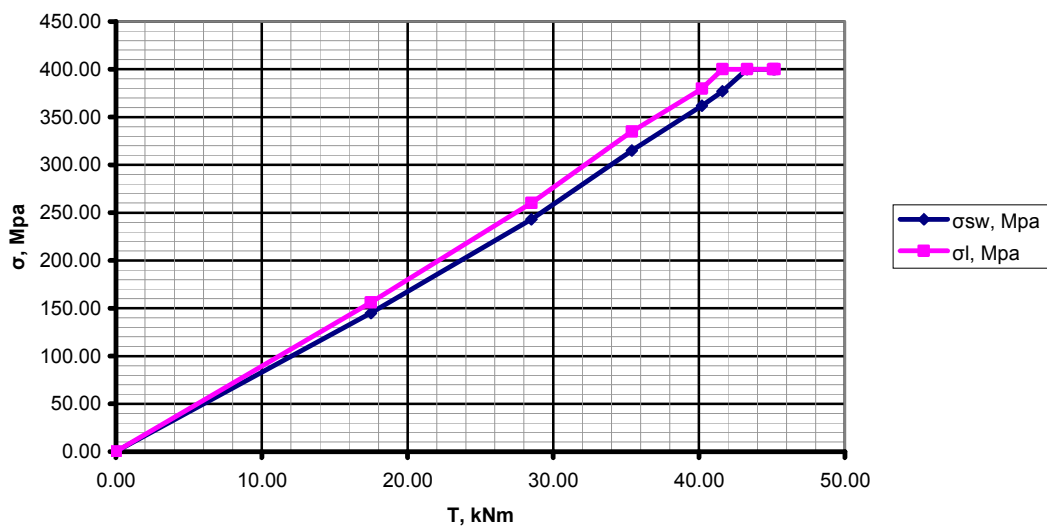
Iš sukamo elemento elgsenos kreivės (žr. 2.5 pav.) matyti, jog esant 1,11 % armavimo, elementas suyra prie didesnio sukimo momento, vadinasi armatūra ištraukia į darbą. Elemente plyšiai atsiranda, kai sukimo momentas pasiekia $T_{cr} = 20.10 \text{ kNm}$, kreivėje matosi horizontali aikštelė, kuri vystosi nesikeičiant plyšimo momentui. Armatūra pradeda tekėti kai sukimo momentas pasiekia $T_y = 25,60 \text{ kNm}$ reikšmę, iš 2.6 pav. matyti, kad takumo įtempius pirma pasiekia išilginė armatūra, tačiau jos kiekis yra mažesnis negu skersinės armatūros $\rho_l = 0.69\rho_t$.

6. lentelė Elemento (B1 1.67) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (*Variable Angle Truss-Model*)

T (kNm)	Deformacija betone $\varepsilon_{ds} (x10^{-3})$	Deformacija išilginėje armatūroje $\varepsilon_l (x10^{-3})$	Deformacija skersinėje armatūroje $\varepsilon_t (x10^{-3})$	Efektyvusis sienutės storis t_d, m	Kampas tarplyšio ir sijos ašies $\alpha, ^\circ$	Betono susilpninimo koef. $1/\lambda$	Susisukimas $\theta (^\circ/m)$
17.5	0.5	0.743	0.690	0,035	45,80	0,366	0,819
28.5	1.0	1.239	1.157	0,039	45,71	0,393	1,462
35.4	1.5	1.489	1.571	0,043	45,54	0,417	1,994
40.2	2.0	1.717	1.812	0,047	45,52	0,437	2,454
41.6	2.2	1.900	1.795	0,048	45,48	0,445	2,626
43.3	2.5	1.985	1.895	0,050	45,43	0,456	2,871
45.1	3.0	2.100	2.015	0,053	45,36	0,476	3,243
45.2	3.5	2.143	2.076	0,056	45,27	0,495	3,568



2. 7 pav. $\rho_{tot} = 1.67\%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 1.67) sukimo momento-šąsūkio ($T - \theta$) diagrama



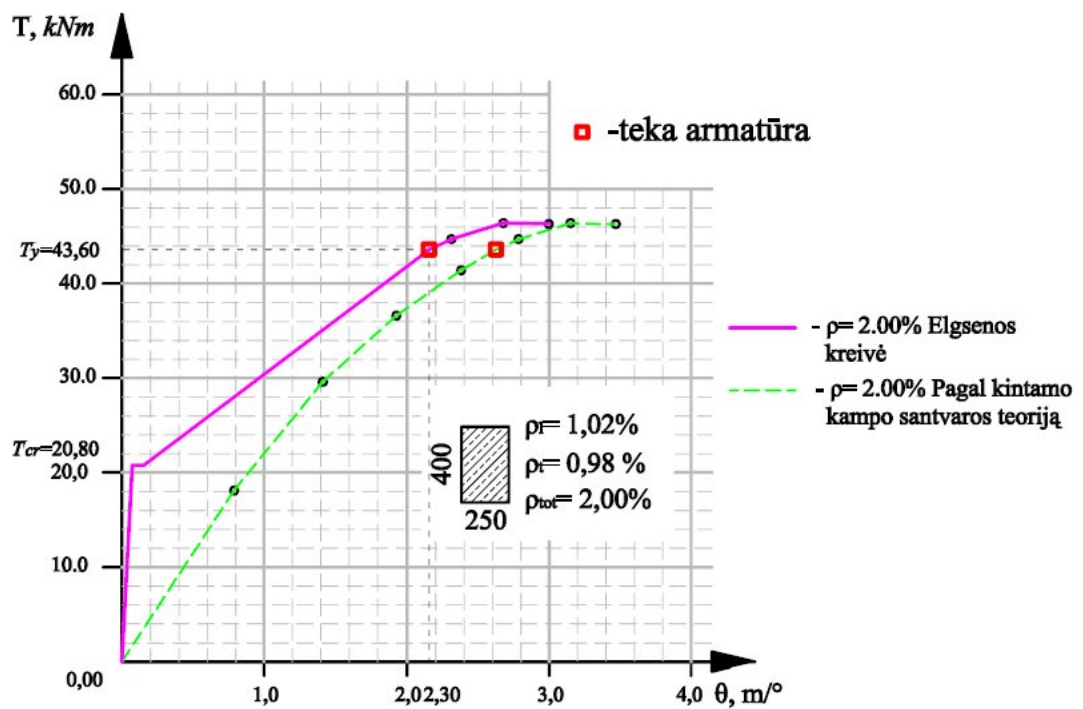
2. 8 pav. (B1 1.67) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento

Analizuojant sukamo sijos (B1 1.67) elgsenos kreivę, kai armavimo procentas $\rho_{tot} = 1.67\%$, matome jog elementas suplyšta, kai sukimo momento vertė pasiekia $T_{cr} = 20.50 \text{ kNm}$, o armatūra

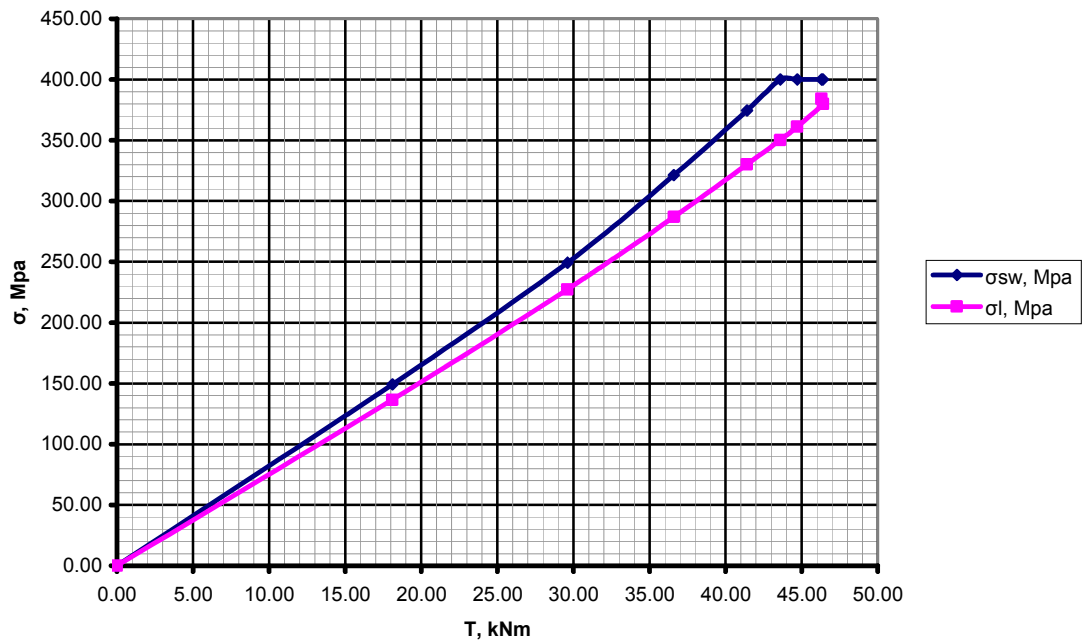
pradeda tekėti esant $T_y = 41,60 \text{ kNm}$ sukimo momentui. Kai sukimo momentas pasiekia reikšmę, kai pradeda tekėti armatūra, elemento sąsūkis tampa lygus $\theta_y = 2.51^\circ / m$. Pagal 2.9 pav. matosi jog skersinė ir išilginė armatūra dirba panašiai iki tekėjimo ribos, taip yra todėl, kad skersinės ir išilginės armatūros kiekis skerspjūvyje skiriasi nedaug.

7. lentelė Elemento (B1 2,00) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (*Variable Angle Truss-Model*)

T (kNm)	Deformacija betone $\varepsilon_{ds} (x10^{-3})$	Deformacija išilginėje armatūroje $\varepsilon_l (x10^{-3})$	Deformacija skersinėje armatūroje $\varepsilon_t (x10^{-3})$	Efektyvusis sienutės storis t_d, m	Kampas tarplyšio ir sijos ašies $\alpha, ^\circ$	Betono susilpninimo koef. $1/\lambda$	Susisukimas $\theta (^\circ / m)$
18.1	0,5	0.650	0.710	0.036	44.10	0.375	0.79
29.6	1,0	1.083	1.188	0.040	44.10	0.400	1.42
36.6	1,5	1.366	1.530	0.045	43.95	0.424	1.93
41.4	2,0	1.573	1.783	0.048	43.90	0.444	2.39
43.6	2,3	1.668	1.904	0.050	43.91	0.459	2,64
44.7	2,5	1.720	1.958	0.051	43.90	0.464	2.79
46.4	3,0	1.810	2.083	0.054	43.89	0.483	3.16
46.3	3,5	1.830	2.013	0.058	43.90	0.500	3.48



2. 9 pav. $\rho_{tot} = 2,00\%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 2,00) sukimo momento-sąsūkio ($T - \theta$) diagrama



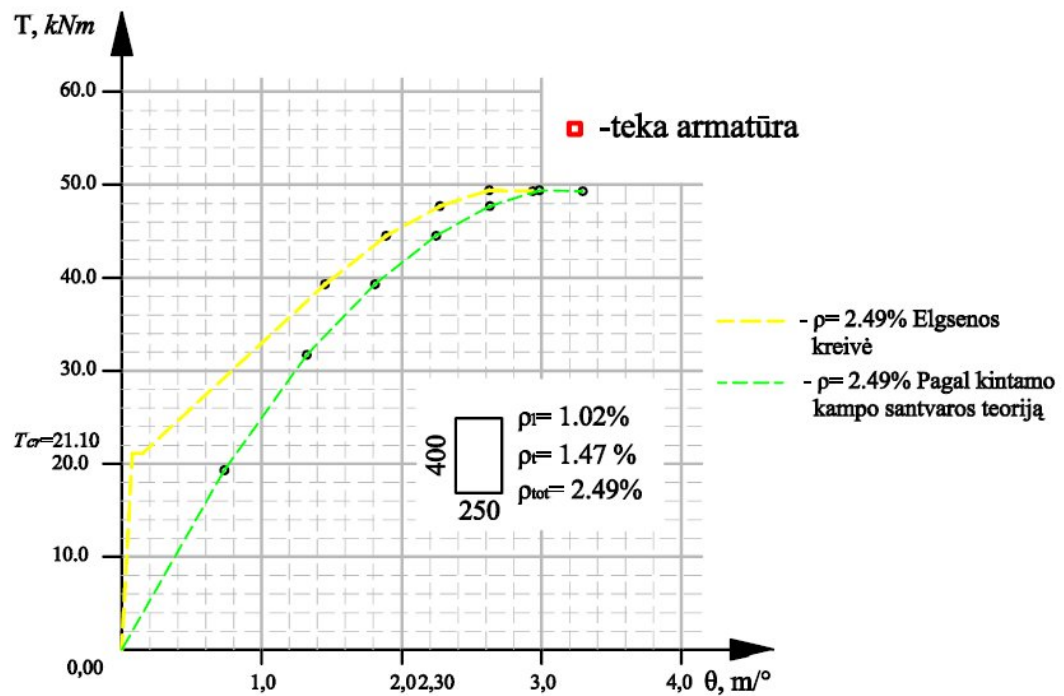
2. 10 pav. (B1 2,00) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento

Iš $(T - \theta)$ diagramos matome, kad sijoje plyšiai atsiranda, kai sukimo momentas pasiekia $T_{cr} = 20.80 \text{ kNm}$ reikšmę, armatūroje takumo įtempimai pasireiškia sukimo momentui esant $T_y = 43.60 \text{ kNm}$, sija, kai armatūroje pasireiškia takumo įtempimai, susisuka $\theta_l = 2.30^\circ / m$. Kaip matome, pradėjus tekėti armatūrai, sijos elgsena pradeda kisti pagal netiesinę priklausomybę, deformacijos pradeda vystytis žymiai greičiau, palyginus su stadija kai elementas dirba tampriai.

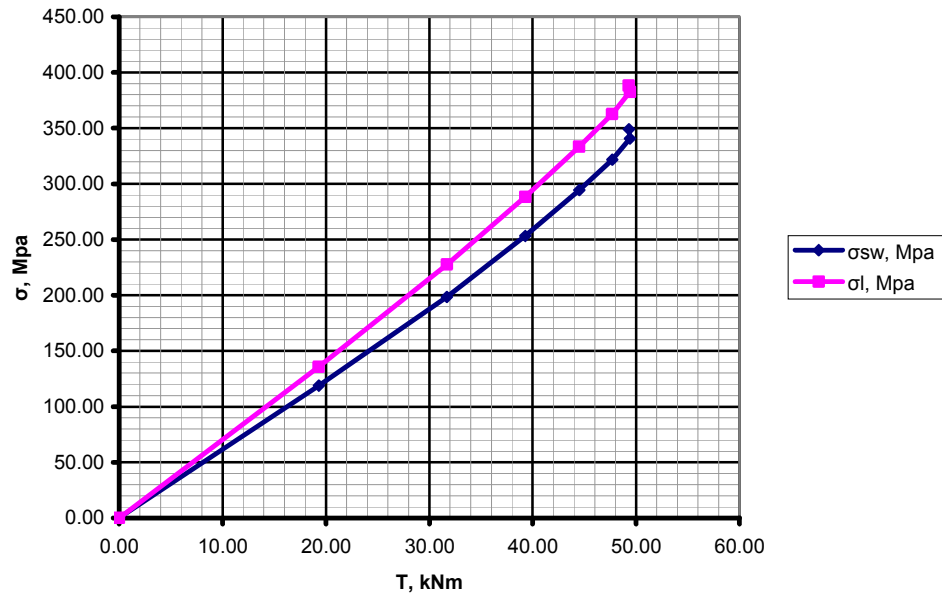
Panagrinėjus įtempių armatūroje pasiskirstymo kreivę, matome, kad išilginė armatūra takumo įtempių nepasiekia, iki pat sijos suirimo ji dirba tampriai, tačiau skersinėje armatūroje pasireiškia takumo įtempiai, kas iššaukia netiesinę elemento elgseną. Įtempiai armatūroje, tiek skersinėje, tiek išilginėje, pasiskirsto pagal tiesinę priklausomybę.

8. lentelė Elemento (B1 2,48) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (*Variable Angle Truss-Model*)

T (kNm)	Deformacija betone $\varepsilon_{ds} (x10^{-3})$	Deformacija išilginėje armatūroje $\varepsilon_l (x10^{-3})$	Deformacija skersinėje armatūroje $\varepsilon_t (x10^{-3})$	Efektyvusis sienutės storis t_d, m	Kampas tarplyšio ir sijos ašies $\alpha, ^\circ$	Betono susilpninimo koef. $1/\lambda$	Susisukimas $\theta (^{\circ}/m)$
19.30	0,5	0.647	0.565	0,039	46,40	0,392	0,735
31.70	1,0	1.083	0.945	0,043	46,33	0,417	1,325
39.30	1,5	1.373	1.206	0,047	46,20	0,440	1,815
44.50	2,0	1.587	1.402	0,051	46,09	0,463	2.253
47.70	2,5	1.728	1.532	0,054	46,00	0,481	2,639
49.40	3,0	1.821	1.622	0,058	45,91	0,500	2,993
49.30	3,5	1.849	1.662	0,061	45,82	0,518	3,305



2. 11 pav. $\rho_{tot} = 2,49\%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 2,49) sukimo momento-sąsūkio ($T - \theta$) diagrama

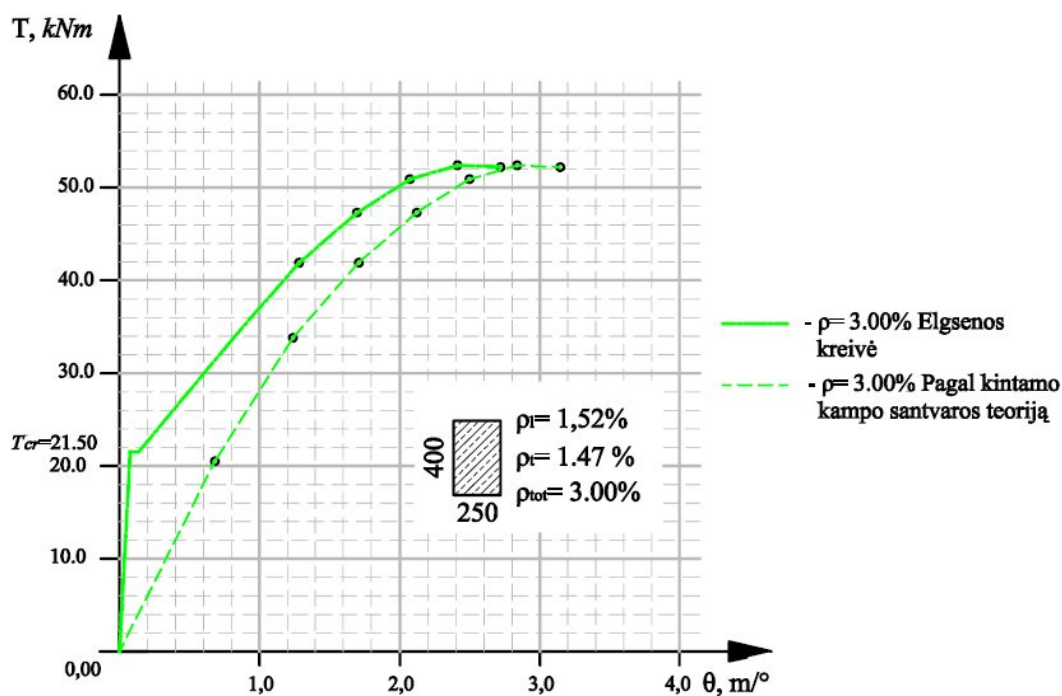


2. 12 pav. (B1 2,49) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento

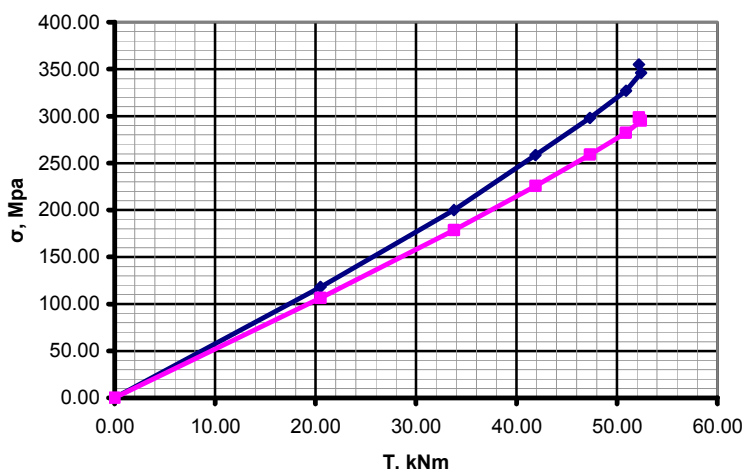
Sukamo gelžbetoninio elemento, armuoto $\rho_{tot} = 2,49 \%$ kiekiu armatūros, plyšio atsiradimo sukamasis momentas yra $T_{cr} = 21.10 \text{ kNm}$. Kaip matome iš sijos elgsenos kreivės (žr. 2.12 pav.), elemento armatūra nepasiekia takumo ribos, vadinasi elementas yra perarmuotas ir jo stiprumą nusako betono suirimas, elementas pradeda elgtis pagal netiesinę priklausomybę, kai sukimo momentas pasiekia $T = 39.9 \text{ kNm}$ reikšmę. Iš diagramų pavaizduotų 3.12 pav. matome, kad sukimo momentui pasiekus ekstremalią reikšmę, didžiausi įtempiai gaunami išilginėje armatūroje, jie siekia $\sigma_l = 388 \text{ MPa}$.

9. lentelė Elemento (B1 3,00) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (*Variable Angle Truss-Model*)

T (kNm)	Deformacija betone $\varepsilon_{ds} (x10^{-3})$	Deformacija išilginėje armatūroje $\varepsilon_l (x10^{-3})$	Deformacija skersinėje armatūroje $\varepsilon_t (x10^{-3})$	Efektyvusis sienutės storis t_d, m	Kampas tarplyšio ir sijos ašies $\alpha, ^\circ$	Betono susilpninimo koef. $1/\lambda$	Susisukimas $\theta (^{\circ}/m)$
20.50	0,5	0.506	0.562	0,042	44,00	0,410	0,683
33.80	1,0	0.850	0.952	0,046	44,00	0,433	1,241
41.90	1,5	1.075	1.231	0,050	43,90	0,457	1,713
47.30	2,0	1.233	1.419	0,054	43,88	0,478	2,128
50.90	2,5	1.344	1.558	0,057	43,89	0,500	2,506
52.40	3,0	1.405	1.648	0,060	43,88	0,518	2,848
52.20	3,5	1.421	1.690	0,064	43,86	0,538	3,156



2. 13 pav. $\rho_{tot} = 3.00\%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 3,00) sukimo momento-šąsūkio ($T - \theta$) diagrama

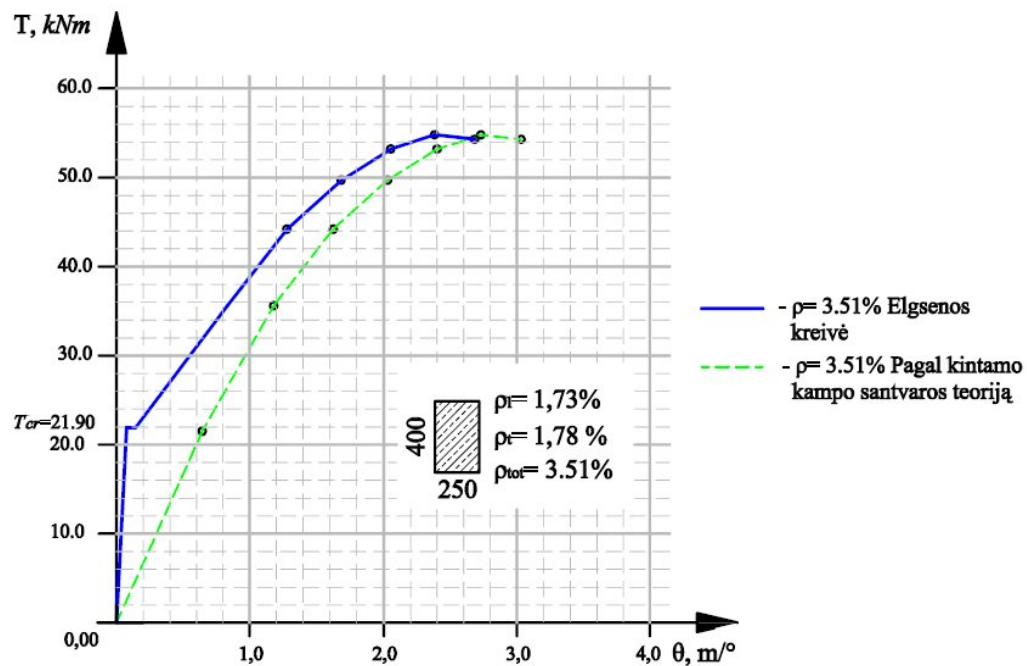


2. 14 pav. (B1 3,00) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento

Pagal sijos (B1 3,00) deformavimosi kreivę galima nustatyti, kad plyšio atsiradimo momentas yra $T_{cr} = 21.50 kNm$, skerspjuvis maksimaliai gali atlaikyti $T = 52.4 kNm$ sukimo momentą. Netiesinė elemento elgsena prasideda kai sukimas pasiekia $T = 41,9 kNm$ reikšmę. Maksimalūs įtempiai išilginėje armatūroje, atsiradę prieš elemento suirimą, yra $\sigma_l = 354.9 MPa$, skersinės armatūros įtempiai $\sigma_t = 298 MPa$.

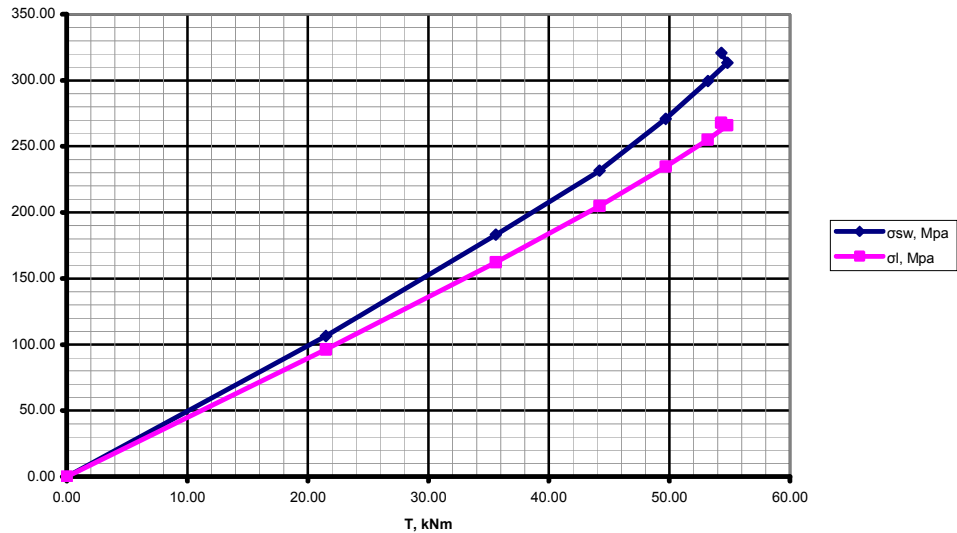
10. lentelė Elemento (B1 3,50) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (*Variable Angle Truss-Model*)

T (kNm)	Deformacija betone $\varepsilon_{ds} (x10^{-3})$	Deformacija išilginėje armatūroje $\varepsilon_l (x10^{-3})$	Deformacija skersinėje armatūroje $\varepsilon_t (x10^{-3})$	Efektyvusis sienutės storis t_d, m	Kampas tarplyšio ir sijos ašies $\alpha, ^\circ$	Betono susilpninimo koef. $1/\lambda$	Susisukimas $\theta (^{\circ}/m)$
21.50	0,5	0.458	0.507	0,045	44,10	0,424	0,644
35.60	1,0	0.773	0.872	0,049	43,95	0,448	1,182
44.20	1,5	0.975	1.103	0,053	44,00	0,472	1,629
49.70	2,0	1.117	1.290	0,056	43,90	0,493	2,037
53.20	2,5	1.215	1.426	0,060	43,85	0,513	2,409
54.80	3,0	1.267	1.492	0,063	43,90	0,532	2,739
54.30	3,5	1.275	1.528	0,066	43,88	0,549	3,041



2. 15 pav. $\rho_{tot} = 3.51\%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 3,51) sukimo momento-sąsūkio ($T - \theta$) diagrama

Pagal sijos (B1 3,51) deformavimosi kreivę galima nustatyti, kad plyšio atsiradimo momentas yra $T_{cr} = 21.90$ kNm, skerspjūvis maksimaliai gali atlaikyti $T = 54.8$ kNm sukimo momentą. Netiesinė elemento elgsena prasideda kai sukimas pasiekia $T = 44,2$ kNm reikšmę. Maksimalūs įtempimai išilginėje armatūroje, atsiradę prieš elemento suirimą, yra $\sigma_l = 267.8$ MPa, skersinės armatūros įtempimai $\sigma_t = 320.8$ MPa, nei skersinė, nei išilginė armatūra takumo įtempių nepasiekia.

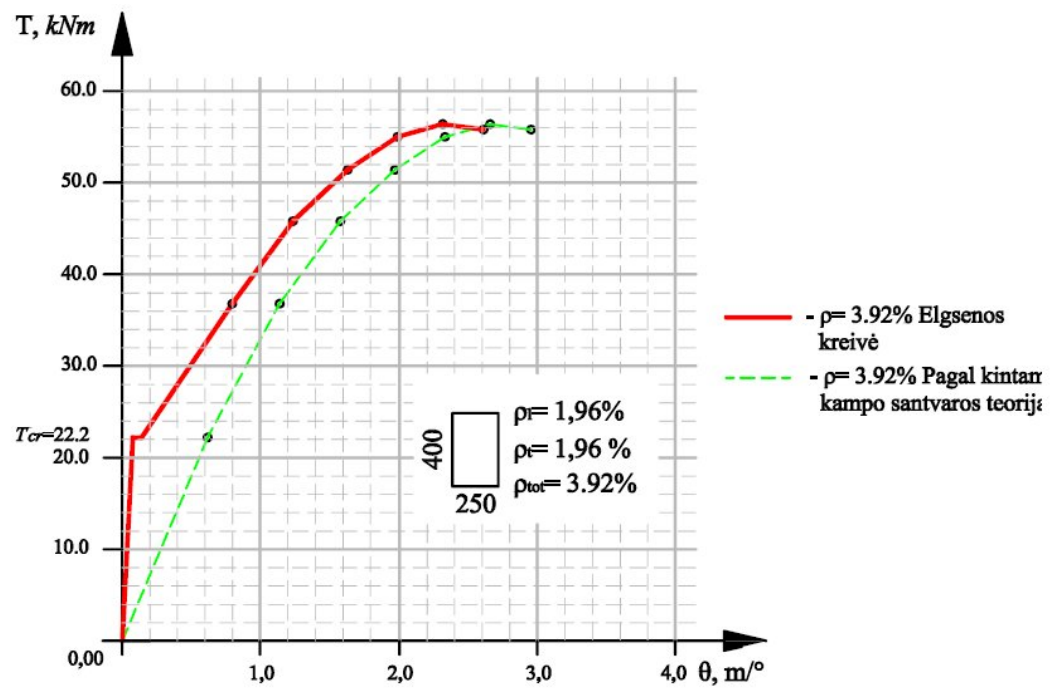


2. 16 pav. (B1 3,51) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento

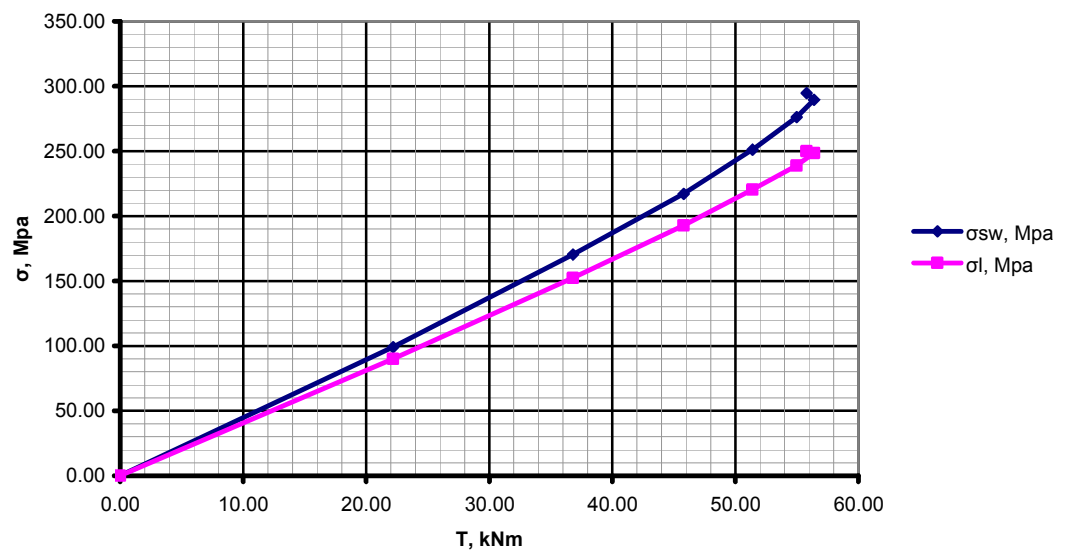
11. lentelė Elemento (B1 3,92) skaičiavimo duomenys pasinaudojus kintamo kampo erdvinės santvaros teorija (*Variable Angle Truss-Model*)

T (kNm)	Deformacija betone $\varepsilon_{ds} (x10^{-3})$	Deformacija išilginėje armatūroje $\varepsilon_l (x10^{-3})$	Deformacija skersinėje armatūroje $\varepsilon_t (x10^{-3})$	Efektyvusis sienutės storis t_d, m	Kampas tarplyšio ir sijos ašies $\alpha, ^\circ$	Betono susilpninimo koef. $1/\lambda$	Susisukimas $\theta (^{\circ}/m)$
22.20	0,5	0.429	0.472	0,046	44,15	0,434	0,620
36.80	1,0	0.725	0.811	0,050	44,05	0,458	1,142
45.80	1,5	0.918	1.034	0,054	44,06	0,483	1,582
51.40	2,0	1.049	1.196	0,058	44,03	0,503	1,977
55.00	2,5	1.138	1.315	0,061	44,00	0,524	2,340
56.40	3,0	1.184	1.379	0,065	44,02	0,541	2,667
55.80	3,5	1.190	1.403	0,068	44,02	0,559	2,964

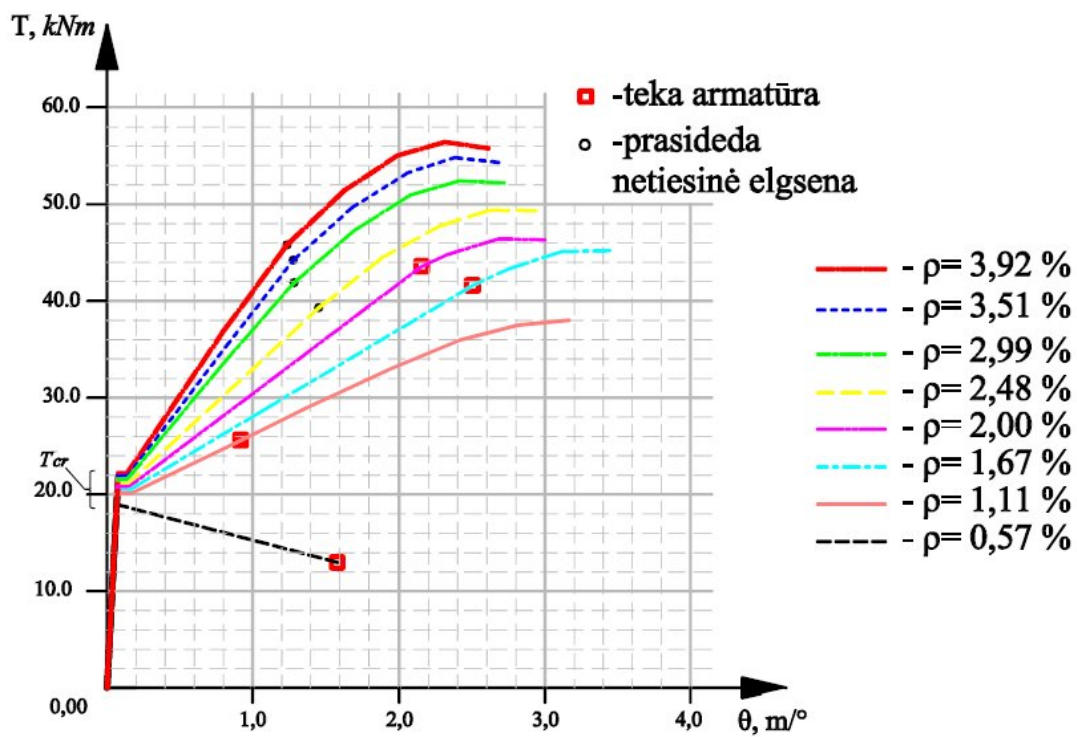
Pagal sijos (B1 3,92) deformavimosi kreivę galima nustatyti, kad plyšio atsiradimo momentas yra $T_{cr} = 22.20 \text{ kNm}$, skerspjūvis maksimaliai gali atlaikyti $T = 54.8 \text{ kNm}$ sukimo momentą. Netiesinė elemento elgsena prasideda kai sukimas pasiekia $T = 44,2 \text{ kNm}$ reikšmę. Maksimalūs įtempimai išilginėje armatūroje, atsiradę prieš elemento suirimą, yra $\sigma_l = 267.8 \text{ MPa}$, skersinės armatūros įtempimai $\sigma_t = 320.8 \text{ MPa}$.



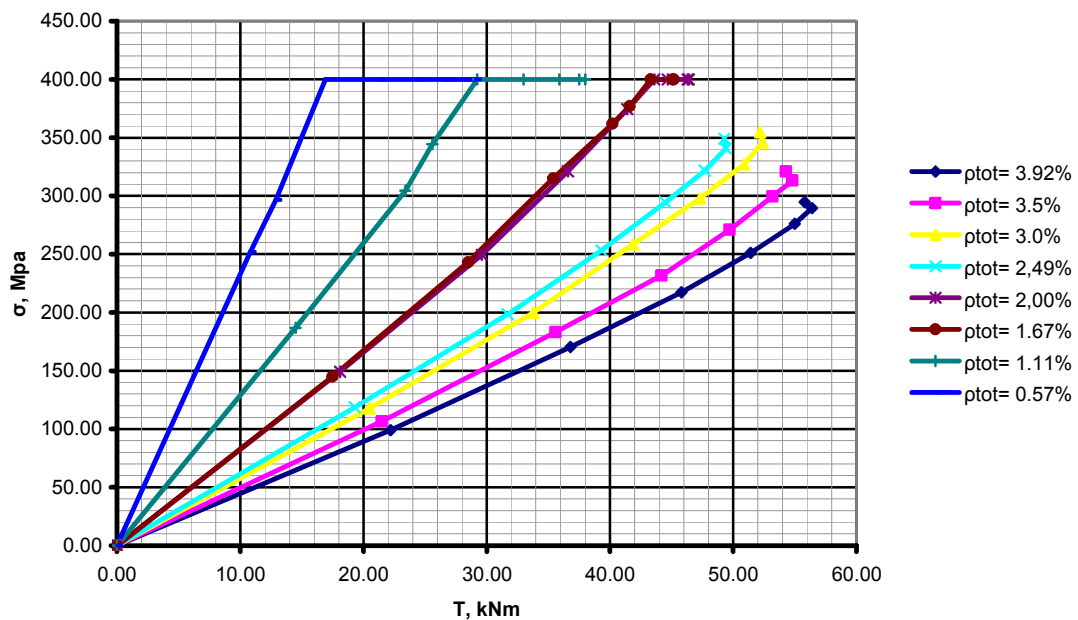
2. 17 pav. $\rho_{tot} = 3.92\%$ armuotos sukamos gelžbetoninės sijos (B1 3,92) sukimo momento-sąsūkio ($T - \theta$) diagrama



2. 18 pav. (B1 3,92) sijos skersinės ir išilginės armatūros įtempių pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančio sukimo momento



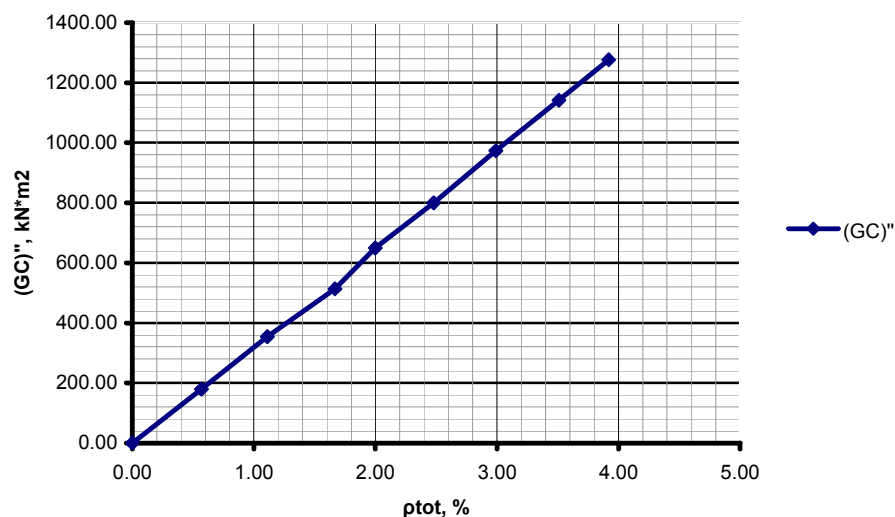
2. 19 pav. Sukamos gelžbetoninės sijos (0,25x0,40 m) sukimo momento - sąsukio ($T - \theta$) diagramos kitimas, keičiantis armatūros kiekiui



2. 20 pav. Įtempiai skersinėje armatūroje, priklausomai nuo sukimo momento dydžio, 0.25x0.64 m skerspjūvio sijoje

Palyginus skirtingai armuotos 0,25 m x 0,40 m skerspjūvio sijos elgsenos kreives (žr. 2.19 pav.), matome, kad elemento standumas iki plyšio atsiradimo išlieka toks pat, didėjant armatūros kiekiui, vadinasi armatūra elemento elgsenai iki plyšio atsiradimo įtakos neturi. Kai sija armuota $\rho_{tot} = 0,57\%$ armatūros, plyšys joje atsiranda, sukimo momentui pasiekus $T_{cr} = 19,08 \text{ kNm}$ reikšmę, o kai armuota $\rho_{tot} = 3,92\%$ - tai $T_{cr} = 22,2 \text{ kNm}$. Palyginus sijų, armuotų mažiausiu ir didžiausiu armatūros kiekiu, plyšio atsiradimo momentus, matome, kad skirtumas tarp jų yra tik 10 %, vadinasi armatūros kiekis sukamo elemento plyšio atsiradimui didelės įtakos neturi.

Palyginus sijų, su skirtingu armavimu, standumą po plyšių atsiradimo (žr. 2.19 pav.), matome, kad didėjant armatūros kiekiui – didėja elemento standumas, sudarius standumo priklausomybės nuo armavimo procento grafiką (žr. 2.21 pav.), matome, jog standumas didėja proporcingai armatūros kiekiui. Palyginus mažiausiai ir daugiausiai armuotų elementų standumus, gauname, kad jie skiriasi 7 kartus.



2. 21 pav. Armatūros kiekio įtaka elemento standumui po plyšių atsivėrimo

Esant armavimui didesniai kaip $\rho_{tot} = 2,00\%$, armatūra nepasiekia takumo įtempimų iki pat elemento suirimo. Šiuo atveju betono suirimas yra pagrindinis veiksnys nusakantis sukamo gelžbetoninio elemento laikomąją galią. Įtempimams pasiekus betono gniuždomąjį stiprį, elementas netenka savo laikomosios galios. Tuomet kai betonas suyra greičiau negu armatūra pasiekia takumo įtempimus, laikoma, kad elementas yra perarmuotas.

Sukamos gelžbetoninės 0,30 x 0,48 m matmenų sijos elgsena

12. lentelė 0,30x 0,48 m sijų skerspjūvio matmenys, fizinės ir mechaninės charakteristikos

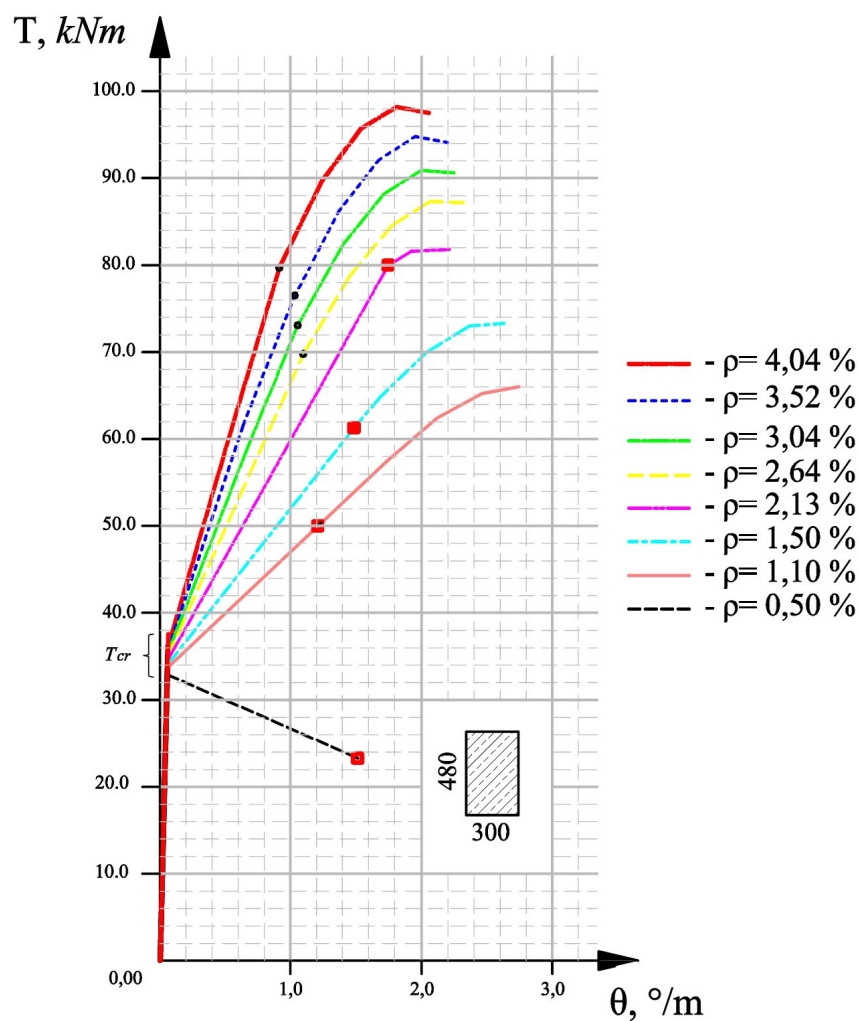
Sijos šifras	y, m	x, m	y_0, m	x_0, m	f_c, MPa	f_y, MPa	$A_l, m^2 \times 10^{-4}$	$A_t, m^2 \times 10^{-4}$	s, m	$\rho_l, \%$	$\rho_t, \%$	$\rho_{tot}, \%$
(B2 0.50)	0,48	0,30	0,43	0,25	33	400	3,521	0,503	0,215	0,245	0,253	0,50
(B2 1.10)							8,04	0,503	0,100	0,558	0,545	1,10
(B2 1.50)							10,74	1,131	0,162	0,746	0,756	1,50
(B2 2.00)							15,20	1,131	0,115	1,06	1,07	2,13
(B2 2.48)							18,84	1,540	0,125	1,31	1,33	2,64
(B2 3.00)							21,98	1,540	0,110	1,53	1,52	3,04
(B2 3,50)							25,40	1,540	0,095	1,76	1,76	3,52
(B2 4,00)							29,46	1,540	0,083 5	2,04	2,00	4,04

Apskaičiuojama 3.11 lentelėje aprašytų sijų tiesinė elgsena iki ir po plyšio atsiradimo. Sudaromi grafikai, vaizduojantys sijų elgseną, priklausomai nuo armatūros kiekio. Taip pat nustatoma, kokie įtempiai veikia sijos armatūroje didėjant sukimo momentui.

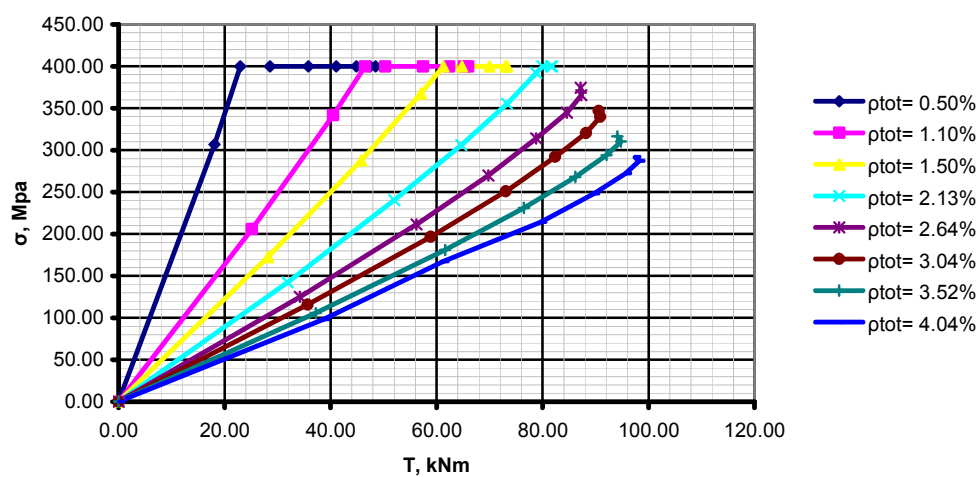
Kaip matome iš 3.11 lentelės, yra išlaikoma sąlyga, kad skersinės ir išilginės armatūros armavimo procentas elemente turi būti vienodas.

13. lentelė skaičiavimo rezultatai 0,25x0,40 m skerspjūvio sijos, armuotos skirtingu kiekiu armatūros, tiesinei analizei aprašyti

Sijos šifras	T_{cr}, kNm	$(GC)^I, kNm^2$	$\theta_{cr}^I, ^\circ/m$	$\eta T_c, kNm$	$(GC)^{II}, kNm^2$	$\theta_{cr}^{II}, ^\circ/m$
(B3 0.57)	32,92	34150	0,055	32,97	363	-0,008
(B3 1.10)	33,70		0,057		805	0,052
(B3 1.50)	34,22		0,057		1095	0,065
(B3 2.00)	35,01		0,059		1547	0,076
(B3 2.64)	35,69		0,060		1927	0,081
(B 3.00)	36,20		0,061		2219	0,084
(B1 3.50)	36,82		0,062		2567	0,086
(B1 4.00)	37,50		0,063		2949	0,088



2. 22 pav. Sukamos gelžbetoninės sijos (0,30x0,48 m) sukimo momento – sąsukio ($T - \theta$) diagramos kitimas, keičiantis armatūros kiekiui



2. 23 pav. Įtempiai skersinėje armatūroje, priklausomai nuo sukimo momento dydžio, 0.30x0.48 m skerspjuvio sijoje

Sukamos gelžbetoninės 0,40 x 0,64 m matmenų sijos elgsena

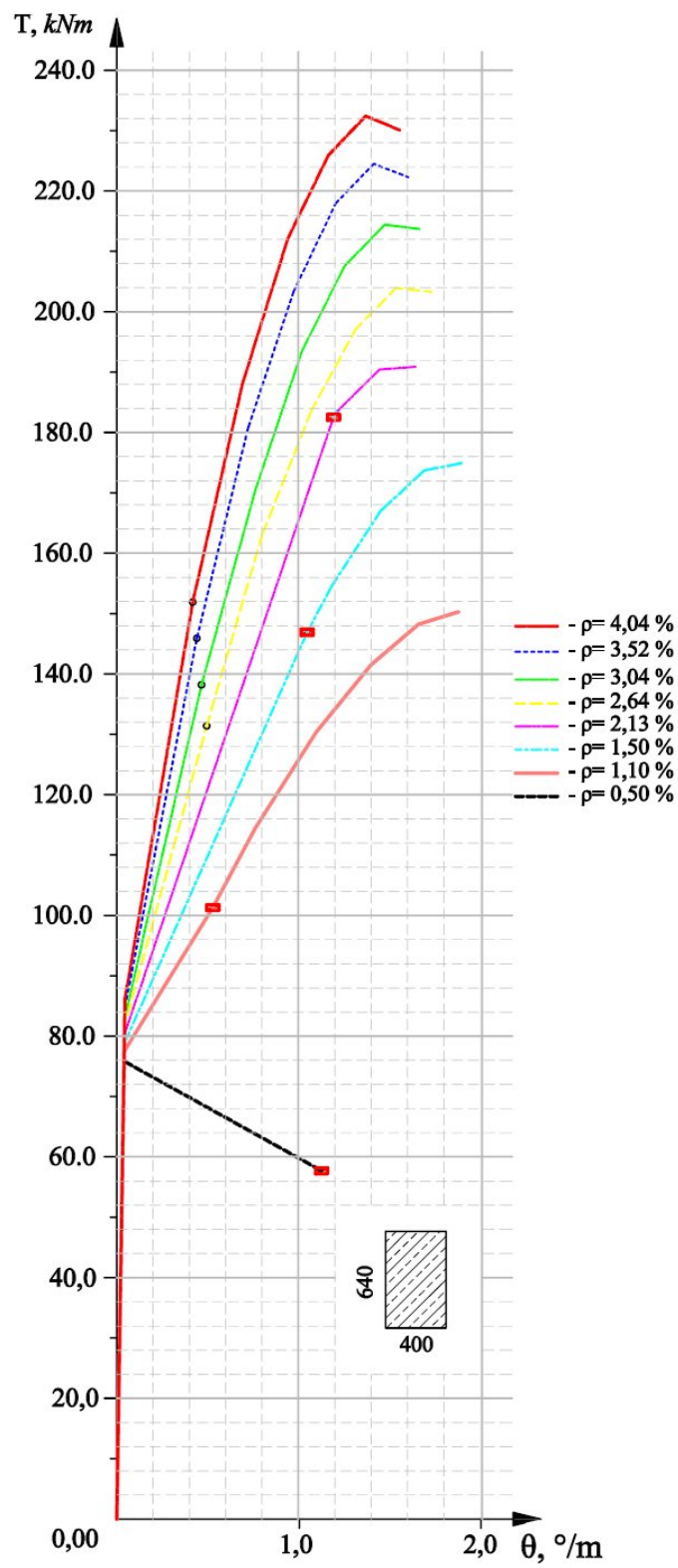
14. lentelė 0,40x 0,64 m sijų skerspjūvio matmenys, fizinės ir mechaninės charakteristikos

Sijos šifras	y, m	x, m	y_0, m	x_0, m	f_c, MPa	f_y, MPa	$A_t, m^2 \times 10^{-4}$	$A_t, m^2 \times 10^{-4}$	s, m	$\rho_l, \%$	$\rho_t, \%$	$\rho_{tot}, \%$
(B3 0.50)	0,64	0,4	0,59	0,35	33	400	6,786	0,503	0,155	0,265	0,264	0,529
(B3 1.10)							12,70	0,503	0,083	0,496	0,492	0,988
(B3 1.50)							19,64	1,131	0,120	0,767	0,766	1,530
(B3 2.00)							25,40	1,131	0,090	0,992	1,021	2,010
(B3 2.48)							32,16	1,54	0,10	1,26	1,25	2,510
(B3 3.00)							38,00	1,54	0,085	1,485	1,475	2,96
(B3 3,50)							45,60	2,01	0,095	1,781	1,719	3,50
(B3 4,00)							51,20	2,01	0,082	2,00	2,00	4,00

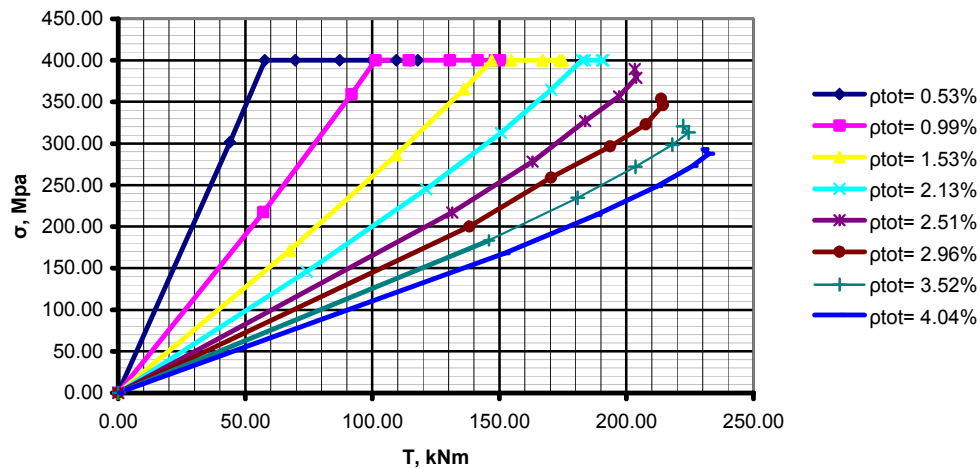
15. lentelė skaičiavimo rezultatai, 0,40x0,64 m skerspjūvio sijos, armuotos skirtingu kiekiu armatūros, tiesinei analizei aprašyti

Sijos šifras	T_{cr}, kNm	$(GC)^I, kNm^2$	$\theta_{cr}^I, ^\circ/m$	$\eta T_c, kNm$	$(GC)^{II}, kNm^2$	$\theta_{cr}^{II}, ^\circ/m$
(B3 0.57)	75,84	10793	0,04	78,15	1338	-0,099
(B3 1.10)	77,20		0,041		2501	-0,022
(B3 1.50)	78,82		0,042		3878	0,010
(B3 2.00)	80,25		0,043		5092	0,024
(B3 2.48)	81,72		0,043		6343	0,032
(B3 3.00)	83,05		0,044		7479	0,038
(B1 3.50)	84,67		0,045		8854	0,042
(B1 4.00)	86,13		0,046		10097	0,045

14 lentelėje parodyta, jog pirmose dvejose sijose, kai armatūros kiekis dar mažas, tiesinės analizės, po plyšio atsivėrimo, pradžia prasideda sąsūkio neigiamoje reikšmėje. Tai reiškia, kad nėra horizontalios takumo aikštelės, kurioje įtempiai persiskirsto iš betono į armatūrą. Elemento elgsena iš karto pereina iš tiesinės nesupleišėjusios į tiesinę supleišėjusią stadiją.



2. 24 pav. Sukamos gelžbetoninės sijos (0,40x0,64 m) sukimo momento- sąsukio ($T - \theta$) diagramos kitimas, keičiantis armatūros kiekiui



2. 25 pav. Įtempiai skersinėje armatūroje, priklausomai nuo sukimo momento dydžio, 0,40x0,64 m skerspjūvio sijoje

Skyriuje išnagrinėta 0,25x0,40 m; 0,30x0,48 m; 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų sukimo momento - sąsūkio kreivės, kintant armatūros kiekiui elemente, taip pat nustatyta kokie įtempiai pasireiškia armatūroje didėjant sukimo momentui, kai elemente armatūros kiekis kinta nuo $\rho_{tot} = 0.5 \%$ iki $\rho_{tot} = 4.0 \%$. Nustatyta, kad armatūros kiekis turi didelės įtakos elemento elgsenai po plyšių atsiradimo: padidėja standumas ir elemento laikomoji galia. Sukimo momento - sąsūkio kreivėse ($T - \theta$) matome, kad armatūros kiekis elemento standumui iki plyšių atsiradimo jokios įtakos nedaro, vadinasi šis standumas priklauso tik nuo elemento matmenų, formos ir betono klasės, tačiau armatūra turi nežymų poveikį plyšio atsiradimo sukimo momento dydžiui.

Kaip matome iš sukimo momento - sąsūkio grafikų, armavimo procentui esant 0.5 %, sutrūkus elementui armatūra pradeda tekėti prie mažesnio sukamojo momento, negu elemente atsiranda plyšiai.

Didėjant armavimo procentui elemente, mažėja įtempimai armatūroje. Sukamų sijų elgsenos kreivėse matome, kad kai bendras, skersinės ir išilginės armatūros, armavimo kiekis pasiekia 2-2,5% elemento tūrio, tai armatūra nustoja tekėti. Tuomet gaunamas perarmuotas elementas, kuriame betonas suyra greičiau, negu pradeda tekėti armatūra. Galima išskirti tris armavimo variantus-nepakankamai armuotas, normaliai armuotas, perarmuotas elementas. Normaliai armuotame elemente armatūra pradeda tekėti, arba įtempimai yra artimi takumo įtempimams, kai betonas pasiekia ribinę deformaciją.

Palyginus 25x0,40 m, 0,30x0,48 m, 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų, plyšio atsiradimo sukamuosius momentus, gauname kad didėjant skerspjūvio plotams, elemento plyšimo stiprumas

taip pat didėja, kai armavimo procentas yra toks pat, vadinasi elemento stiprumas ir standumas labai priklauso nuo skerspjūvio matmenų ir skerspjūvio ploto.

2.2. Armatūros kiekio įtaka sukamų gelžbetoninių elementų stiprumui, skaičiuojant pagal erdvinės santvaros metodą, ACI 318-05 ir EC2 normas

Eksperimente buvo ištirtos 0,25x0,40 m; 0,30x0,48 m; 0,40x0,64 m skerspjūvio sijos, jose buvo keičiamas armatūros kiekis nuo $\rho_{tot} = 0.5 \%$ iki $\rho_{tot} = 4,0 \%$ bei sudaromi sukimo momento-sąsūkio ($T - \theta$) grafikai. Iš grafikų nustatoma sukimo momento reikšmė, kai pradeda tekėti viena iš skersinės ar išilginės armatūros, ši reikšmė laikoma sukamo elemento stiprumu. Jeigu elementas yra perarmuotas ir armatūra takumo įtempimų nepasiekia, tada tariama, kad elementas praranda savo laikomąją galią, kai suyra betonas.

Naudojantis ACI 318-05 ir EC2 normomis apskaičiuojamas sukamasis stiprumas sijų, kurioms buvo nustatyti sukimo momento - sąsūkio grafikai. Suradus sukamuosius stiprumus pagal ACI 318-05 ir EC2 normas, jie palyginami su reikšmėmis, gautomis, skaičiuojant pagal mokslininko Hsu (1967) pateiktą kintamo kampo erdvinės santvaros modelį (*Variable Angle Space Truss Analogy*).

Sudaromi grafikai, vaizduojantys sukamų gelžbetoninių sijų stiprumo kitimą, didėjant armatūros kiekiui elemente.

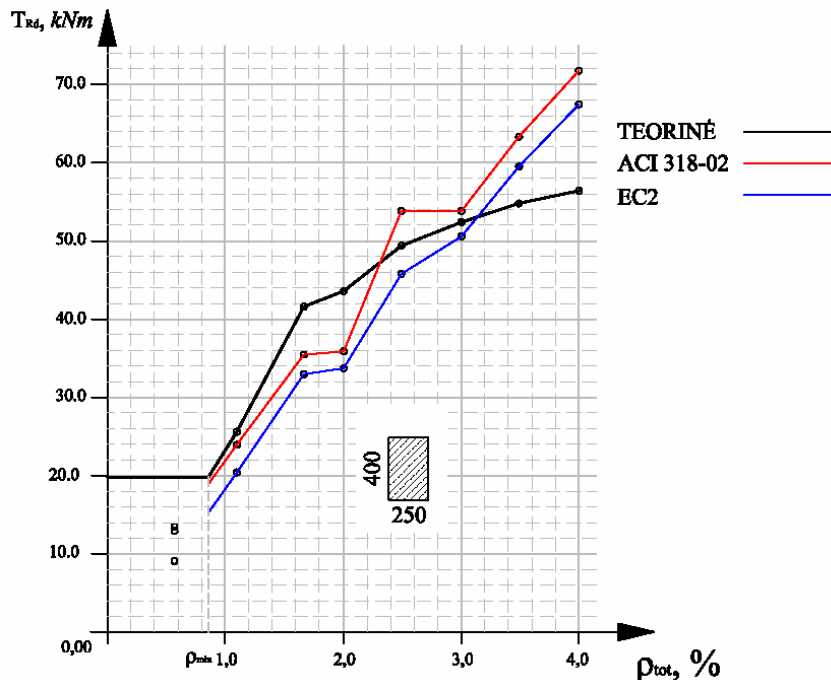
16. lentelė 0,25x0,40 m sijos stiprumo skaičiavimo rezultatai, kai didėja armatūros kiekis, skaičiuojant pagal erdvinės santvaros teoriją ir pagal ACI 318-02 ir EC2 projektavimo normas.

Sijos šifras	Suminis armatūros kiekis elemente, ρ , %	Teorinis stipris $T_{u, teor}$, kNm	Stipris apskaičiuotas pagal EC2, $T_{u, EC2}$	$\frac{T_{u, EC2}}{T_{u, teor}}$	Stipris apskaičiuotas pagal ACI 318-02, $T_{u, ACI}$	$\frac{T_{u, ACI}}{T_{u, teor}}$
(B1 0,53)	0.57	12.90	9.07	0.70	13.47	1.04
(B1 1,11)	1.11	25.60	20.40	0.80	23.94	0.94
(B1 1,67)	1.67	41.60	32.96	0.79	35.50	0.85
(B1 2,00)	2.00	43.60	33.73	0.77	35.90	0.82
(B1 2,48)	2.48	49.40	45.80	0.93	53.80	1.09
(B1 2,99)	2.99	52.40	50.60	0.97	53.80	1.03
(B1 3,51)	3.51	54.80	59.52	1.09	63.30	1.16
(B1 3,92)	3.92	56.40	67.50	1.20	71.80	1.27

Pagal skaičiavimais gautus duomenis, kurie surašyti į 16 lentelę, gauname, kad pagal erdvinės santvaros teoriją apskaičiuotos laikomosios galios rezultatai, vidutiniškai skiriasi apie 17 %, lyginant su rezultatais, gautais skaičiuojant pagal EC2. Iš lentelės matome, kad didžiausias

skirtumas tarp rezultatų yra esant mažam armavimo procentui ir kai elementas yra perarmuotas. Kai armatūros kiekis elemente kinta nuo $\rho_{tot} = 2\%$ iki $\rho_{tot} = 3\%$, skirtumas tarp rezultatų yra tik 3-9%. Vadinasi tiksliausi skaičiavimai gaunami normaliai armuotiems elementams.

Apskaičiavus sukamo elemento laikomąją galią pagal ACI 318-05 normas, kai armatūros procentas didėja nuo $\rho_{tot} = 0.5\%$ iki $\rho_{tot} = 4.0\%$, žingsnį imant 0.5% , gauname, kad rezultatai skiriasi apie 12% , lyginant su rezultatais gautais skaičiuojant pagal kintamo kampo erdvinės santvaros modelį.

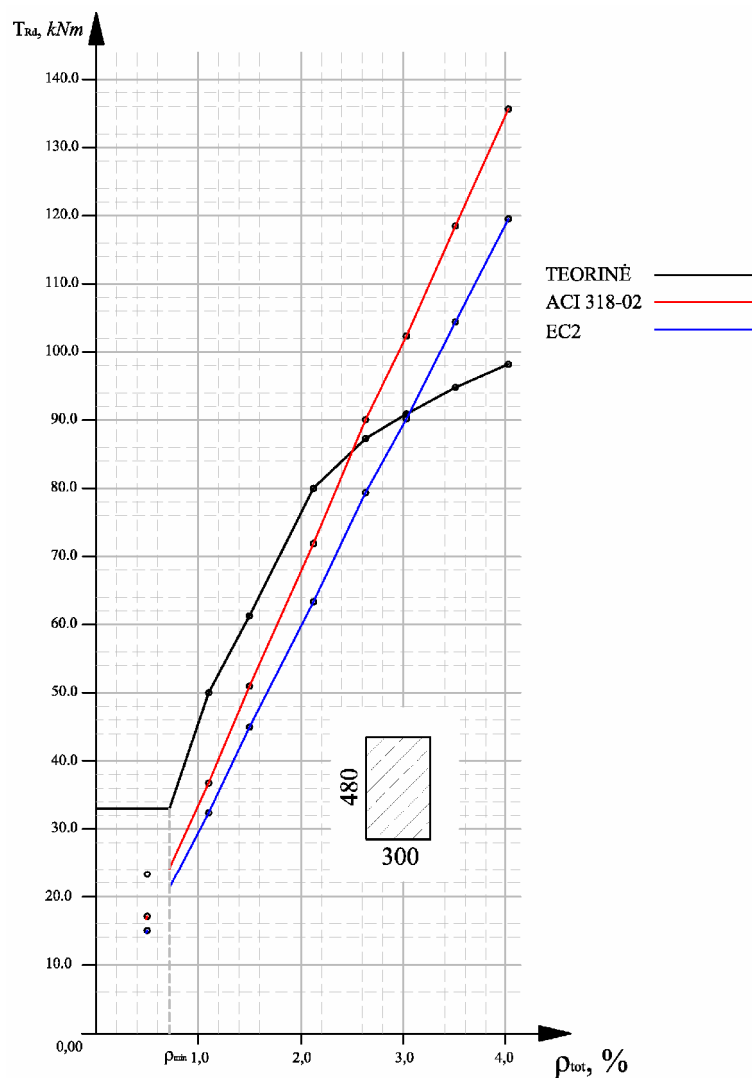


2. 26 pav. 0,25x0,40 m skerspjūvio sijos laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui

Iš 2.26 pav. matome, kad sukamojo gelžbetoninio elemento laikomoji galia, didėjant armavimo procentui, kinta pagal panašų charakterį, skaičiuojant pagal ACI 318 – 05 ir EC2. Kreivėse pastebimi staigūs laikomosios galios kitimo šuoliai, kai tuo tarpu skaičiuojant pagal teorinius metodus, laikomoji galia kinta tolygiai, didėjant armavimo procentui. Šie šuoliai atsiranda todėl, kad didinant bendrą armavimo procentą, skersinės armatūros kiekis buvo išlaikomas toks pat, o didinamas tik išilginės armatūros kiekis. Panagrinėjus ACI 318 – 05 formulę (35) stiprumui skaičiuoti, matome, kad sukamo gelžbetoninio elemento stiprumas priklauso tik nuo skersinės armatūros kiekio, todėl didinant bendrą armavimo procentą, o skersinės armatūros kiekį išlaikant tokį patį, elemento stiprumas nekinta. Šis šuolis matosi kai armatūros kiekis elemente yra nuo $\rho_{tot} = 1.5 \div 2\%$ ir $\rho_{tot} = 2.5 \div 3\%$.

17. lentelė 0,30x0,48 m sijos stiprumo skaičiavimo rezultatai, kai didėja armatūros kiekis, skaičiuojant pagal erdvinės santvaros teoriją ir pagal ACI 318-02 ir EC2 projektavimo normas.

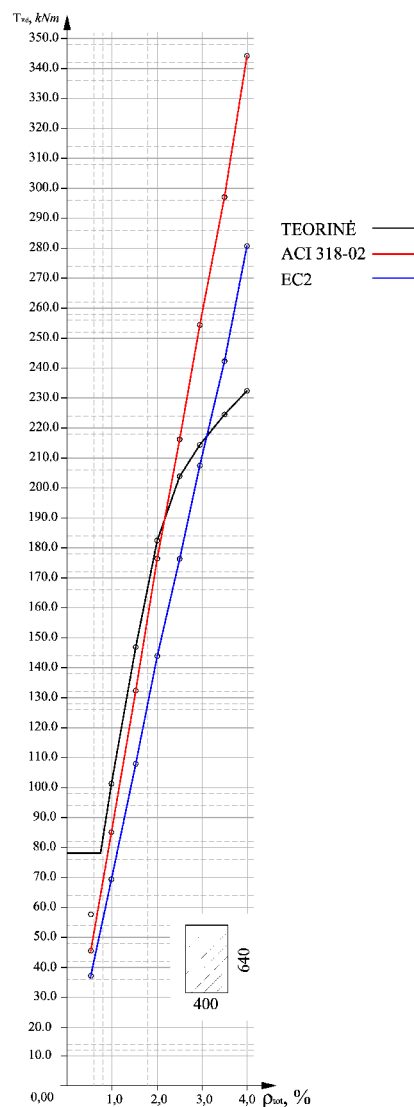
Sijos šifras	Suminis armatūros kiekis elemente, ρ , %	Teorinis stipris $T_{u, teor}$, kNm	Stipris apskaičiuotas pagal EC2, $T_{u, EC2}$	$\frac{T_{u, EC2}}{T_{u, teor}}$	Stipris apskaičiuotas pagal ACI 318-02, $T_{u, ACI}$	$\frac{T_{u, ACI}}{T_{u, teor}}$
(B2 0.50)	0.50	23.30	15.00	0.64	17.10	0.73
(B2 1.10)	1.10	50.00	32.40	0.65	36.80	0.74
(B2 1.50)	1.50	61.30	45.00	0.73	51.00	0.83
(B2 2.00)	2.13	80.00	63.35	0.79	71.90	0.90
(B2 2.48)	2.64	87.30	79.40	0.91	90.00	1.03
(B2 3.00)	3.04	90.90	90.20	0.99	102.3	1.13
(B2 3,50)	3.52	94.80	104.4	1.10	118.5	1.25
(B2 4,00)	4.04	98.20	119.5	1.22	135.6	1.38



2. 27 pav. 0,30x0,48 m skerspjūvio sijos laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui

18. lentelė 0,4x0,64 m sijos stiprumo skaičiavimo rezultatai, kai didėja armatūros kiekis, skaičiuojant pagal erdvinės santvaros teoriją ir pagal ACI 318-02 ir EC2 projektavimo normas.

Sijos šifras	Suminis armatūros kiekis elemente, ρ , %	Teorinis stipris $T_{u, teor}$, kNm	Stipris apskaičiuotas pagal EC2, $T_{u, EC2}$	$\frac{T_{u, EC2}}{T_{u, teor}}$	Stipris apskaičiuotas pagal ACI 318-02, $T_{u, ACI}$	$\frac{T_{u, ACI}}{T_{u, teor}}$
(B3 0.50)	0.53	57.70	37.20	0.64	45.60	0.79
(B3 1.10)	0.99	101.3	69.40	0.69	85.10	0.84
(B3 1.50)	1.53	146.9	107.9	0.73	132.4	0.90
(B3 2.00)	2.01	182.5	143.9	0.79	176.5	0.97
(B3 2.48)	2.51	203.9	174.4	0.86	216.3	1.06
(B3 3.00)	2.96	214.4	207.5	0.97	254.4	1.19
(B3 3.50)	3.50	224.4	242.3	1.08	297.1	1.32
(B3 4.00)	4.00	232.4	280.7	1.21	344.2	1.48

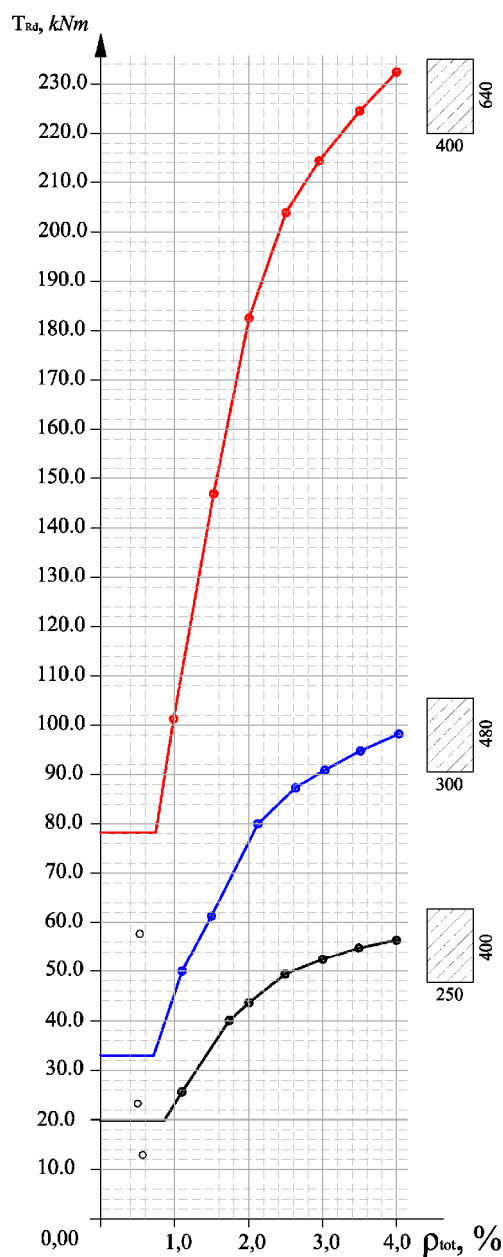


2. 28 pav. 0,40x0,64 m skerspjūvio sijos laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui

Atlikus grafikų, pateiktų 2.27 ir 2.28 pav., analizę matome, kad elemento laikomoji galia, skaičiuojant pagal ACI 318-02 ir EC2, tiesiai proporcingai priklauso nuo armavimo procento t.y. didėjant armavimo procentui, elemento sukamasis stipris didėja pagal tiesinę priklausomybę. Kreivė gauta skaičiuojant teoriniais metodais, kol armatūros yra mažiau kaip 2 %, kinta pagal tiesinę priklausomybę, tačiau armatūros kiekiui pasiekus maždaug 2 % elemento tūrio, tiesė išsikreivina ir pradeda kisti pagal netiesinį dėsnį. Skaičiuojant pagal teorinį (*kintamo kampo erdvinės santvaros*) metodą yra įvertinamas skersinės ir išilginės armatūros bei betono darbas, taigi armatūros kiekiui esant daugiau kaip 2 % elemento tūrio, suirimas pasireiškia kai gniuždomas betonas pasiekia savo stiprumą, todėl kreivė, nusakanti betono stiprumo priklausomybę nuo armatūros kiekio, išsikreivina.

Atlikus rezultatų, skaičiuojant pagal teorinį metodą, ACI 318 – 05 ir EC2, palyginimą gaunama, kad neatitikimas tarp teorinio metodo ir normų, tiek ACI 318 – 05 tiek EC2 yra apie 20 %. Lyginant normas, rezultatai apskaičiuoti pagal amerikiečių normas, yra apie 17 % didesni, už apskaičiuotus, naudojantis Europos normomis. Nors EC2 duoda tris sąlygas sukamajam elemento stiprumui apskaičiuoti, tačiau atlikus skaičiavimus pastebėta, jog daugiausia stiprumas priklauso nuo skersinės armatūros kiekio elemente.

Pagal pateiktus grafikus matome, jog kreivės, apskaičiuotos pagal normų reikalavimus, kerta teorinę kreivę, tada kai sukamos sijos stiprumas pradeda priklausyti ne nuo armatūros, o nuo betono suirimo. Apskaičiavus gausiai armuotų elementų stiprumą pagal normų reikalavimus, gautume kad jis būtų didesnis už teorinį tuo pačiu ir tikrąjį stiprumą. Vadinasi ACI 318 – 05 ir EC2 normos neįvertina didelio armatūros kiekio poveikį sukamam elementui. EC2 normose formule (37) įvertinamas betono darbas sukamame elemente, tačiau kaip matome iš teorinės ir EC2 kreivės, elemento teoriniam stiprumui pradėjus kisti netiesiškai, EC2 kreivė toliau kinta tiesiškai. Vadinasi netiesinis elemento darbas EC2 normose įvertinamas netiksliai.



2. 29 pav. 0,25x0,40 m; 0,30x0,48 m; 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui

2.3 Išvados

Skyriuje išnagrinėta 0,25x0,40 m; 0,30x0,48 m; 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų sukimo momento - sąsūkio kreivės, kintant armatūros kiekiui elemente, taip pat nustatyta kokie įtempiai pasireiškia armatūroje didėjant sukimo momentui, kai elemente armatūros kiekis kinta nuo $\rho_{tot} = 0,5 \%$ iki $\rho_{tot} = 4,0 \%$. Nustatyta, kad armatūros kiekis turi didelės įtakos elemento elgsenai po plyšių atsivėrimo: padidėja standumas ir elemento laikomoji galia. Sukimo momento - sąsūkio

kreivėse ($T - \theta$) matome, kad armatūros kiekis elemento standumui iki plyšių atsiradimo jokios įtakos nedaro, vadinasi šis standumas priklauso tik nuo elemento matmenų, formos ir betono klasės, tačiau armatūra turi nežymų poveikį plyšio atsiradimo sukimo momento dydžiui.

2.29 pav. pavaizduota 0,25x0,40 m; 0,30x0,48 m; 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų stiprumo kitimas, didėjant armavimo procentui, skaičiuojant pagal kintamo kampo erdvinės santvaros modelį. Palyginus 0,25x0,40 m ir 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų plyšio atsiradimo momentus, gauname, kad skerspjūvio plotui padidėjus 2,56 karto, plyšio atsiradimo sukamasis momentas padidėja 4 kartus.

Iš grafikų matoma horizontali kreivių dalis, tai sukimo momentas, kurį atlaiko sukamo gelžbetoninio elemento betonas. Kaip matome iš 2.28 pav. armatūros kiekiui esant mažiau negu apytiksliai 0,8%, supleišėjus sukamam elementui, armatūra atlaiko mažesnę sukamąją momentą, negu betonas iki plyšio atsiradimo. Vadinasi elementas turi būti armuotas tiek, kad jo armatūra atlaikytų tokį sukamąjį momentą, kokį atlaiko betonas t.y. sukimo momentas, kurį atlaiko elementas, armuotas minimaliu kiekiu armatūros, turi būti lygus plyšio atsiradimo sukimo momentui.

Minimalus armatūros kiekis, sukamame elemente, yra apibrėžiamas ACI 318-05 projektavimo normose. Skaičiavimai parodė, jog šis armavimo procentas apskaičiuotas pagal amerikiečių normas yra apie 3 kartus mažesnis už gautą teoriniais metodais.

3. IŠ ANKSTO ĮTEMPŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ANALIZĖ

3.1. Išankstinio apspaudimo įtaka sukamų gelžbetoninių elementų laikomajai galiai

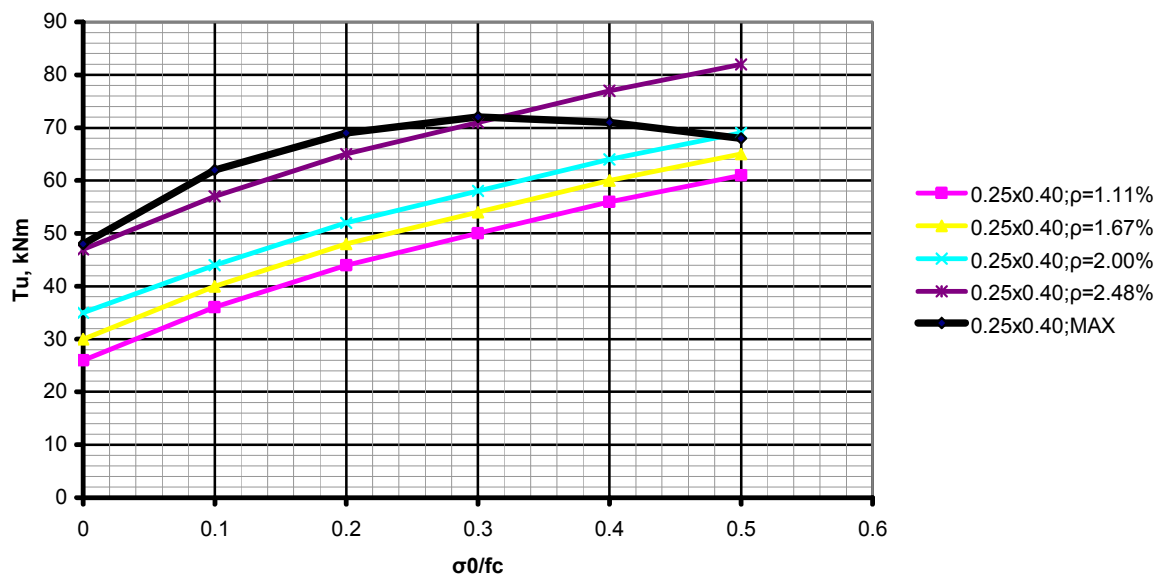
Nagrinėjant išankstinio įtempimo įtaką sukamo gelžbetoninio elemento stiprumui, buvo išnagrinėtos trijų skerspjūvių sijos 0,25 x 0,40 m, 0,30 x 0,48 m, 0,40 x 0,64 m. Buvo išlaikyta sąlyga, kad santykis tarp didesniosios ir mažesniosios kraštinių būtų $y/x=1.6$. Jos buvo apspaudžiamos išankstiniu įtempimu, kurio dydis lygus $\sigma_0 = 0.1f_c$, $\sigma_0 = 0.2f_c$, $\sigma_0 = 0.3f_c$, $\sigma_0 = 0.4f_c$, kur f_c – betono gniuždomasis stipris, ir nagrinėjama apspaudimo dydžio įtaka sukamų gelžbetoninių elementų stiprumui. Palyginimui pateikta skirtingai armuotų sijų stiprumo kitimas, didėjant išankstiniam apspaudimui.

Nustatyta kokią įtaką išanksto apspauštų gelžbetoninių sijų stiprumui turi armatūros kiekis elemente. Tam tikslui tiriamosios sijos buvo suarmuotos palaipsniui didėjančiu armatūros kiekiu ($\rho_{tot} = 1\%$, $\rho_{tot} = 1,5\%$, $\rho_{tot} = 2,0\%$, $\rho_{tot} = 2.5\%$) ir nustatyta kaip kinta apspausito elemento stiprumas didėjant armavimo procentui.

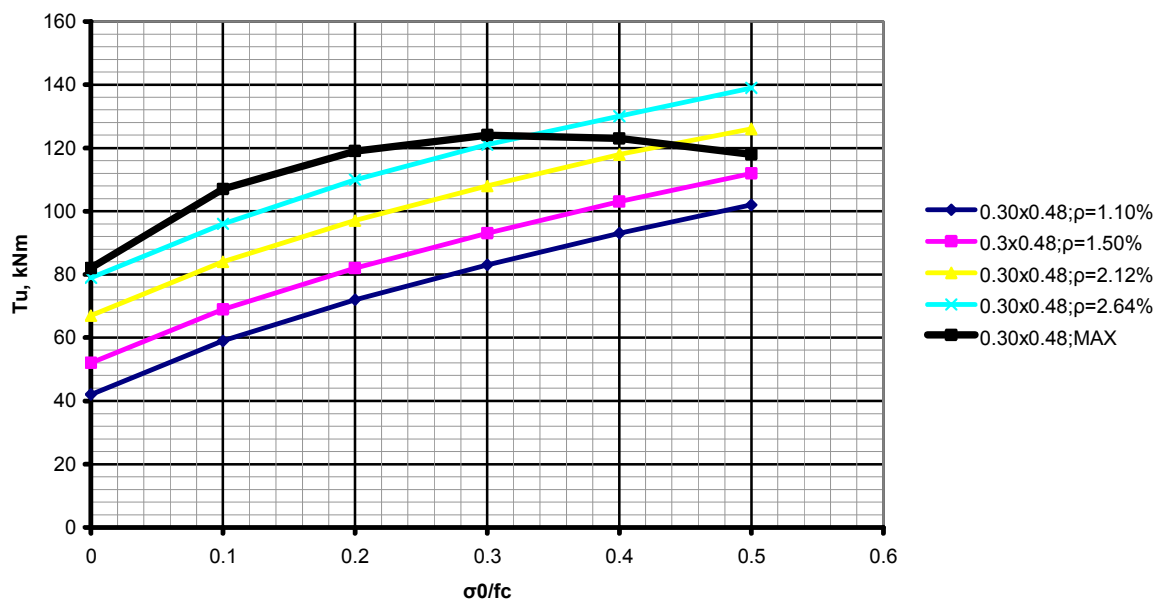
Kadangi sukamų gelžbetoninių elementų stiprumas priklauso nuo armatūros kiekio elemente ir betono stiprumo, tai esant dideliame armatūros kiekiui, betonas suyra dar nepradėjęs tekėti armatūrai. Tokioms sąlygoms gaunami perarmuoti elementai. Norint išvengti staigaus elemento suirimo kai suyra betonas, yra nustatomas maksimalus leidžiamas sukamasis momentas, kurį gali atlaikyti skerspjūvis. Sukamuose išanksto įtemptuose gelžbetoniniuose elementuose, apskaičiuojant maksimalų atlaikomą sukamąjį momentą, yra įvertinama apspaudimo įtaka.

$$T_{c,max} = \frac{\sum x^2 y}{3} (12\sqrt{f_c}) \left(1 - 0.833 \frac{\sigma}{f_c} \right) \left(\sqrt{1 + 10 \frac{\sigma}{f_c}} \right). \quad (42)$$

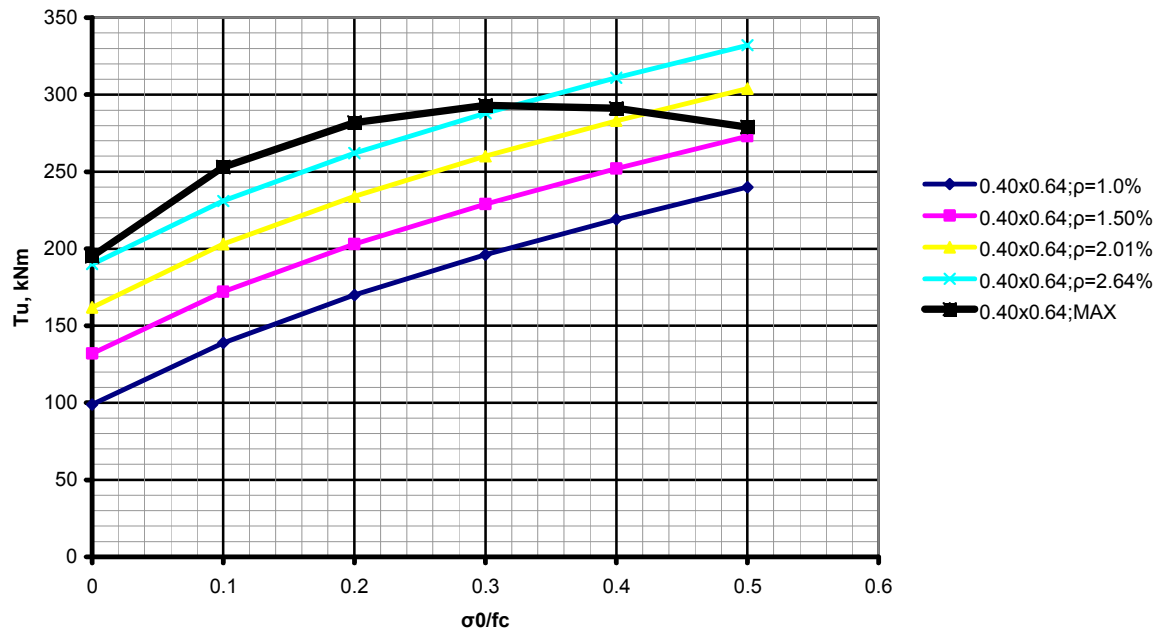
Atliekant formulės (42) analizę matome, kad maksimalus atlaikomas, gelžbetoninio elemento, sukamasis momentas priklauso nuo elemento skerspjūvio matmenų, betono stiprio ir apspaudimo jėgos, tačiau nepriklauso nuo armatūros stiprio ir kiekio elemente. Šia formule įvertinamas tik betono darbas iki suirimo ir apspaudimo dydis.



3. 1 pav. 0,25x0,40 m skerspjūvio sijų laikomosios galios kitimas, didėjant išankstiniam įtempimui, kai sijos armuotos $\rho_{tot} = 1,11\%$; $\rho_{tot} = 1,67\%$; $\rho_{tot} = 2,00\%$ ir $\rho_{tot} = 2,48\%$ armavimo procentu



3. 2 pav. 0,25x0,48 m skerspjūvio sijų laikomosios galios kitimas, didėjant išankstiniam įtempimui, kai sijos armuotos $\rho_{tot} = 1,10\%$; $\rho_{tot} = 1,50\%$; $\rho_{tot} = 2,12\%$ ir $\rho_{tot} = 2,64\%$ armavimo procentu

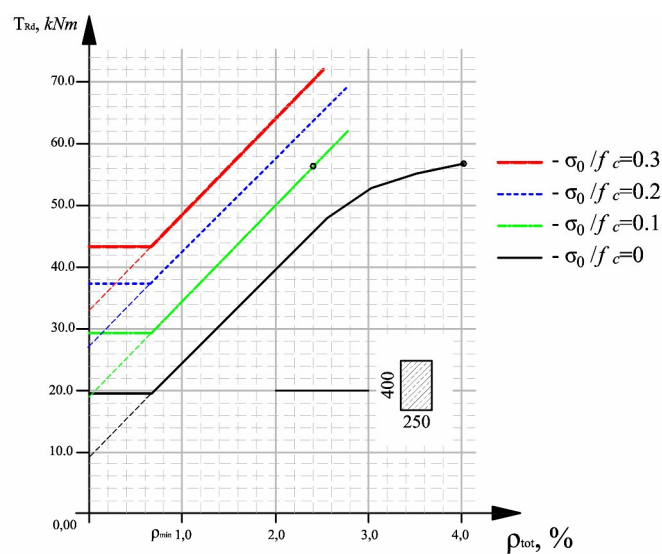


3. 3 pav. 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų laikomosios galios kitimas, didėjant išankstiniam įtempimui, kai sijos armuotos $\rho_{tot} = 1\%$; $\rho_{tot} = 1,50\%$; $\rho_{tot} = 2,01\%$ ir $\rho_{tot} = 2,64\%$ armavimo procentu

Skirtingai armuotų sijų kreivės, nusakančios elemento stiprumo priklausomybę nuo apspaudimo didumo, kinta pagal tokį patį charakterį, tačiau sijos su didesniu kiekiu armatūros atlaiko didesnį sukamąjį momentą. Arčiausiai kreivės, nusakančios maksimalų skerspjūvio atlaikomą sukimo momentą, yra sijų su $\rho_{tot} = 2,0 - 2,67\%$ armavimo procentu kreivės. Nustatyta, kad skirtumas tarp skirtingai armuotų elementų sukamųjų stiprumų įtemtojo gelžbetonio sijose yra toks pat kaip ir neįtemto gelžbetonio elementuose, tai patvirtina faktą, kad išankstinis apspaudimas padidina betono laikomąją galią, o armatūros įtaka išlieka tokia pati kaip ir neįtemptuose elementuose.

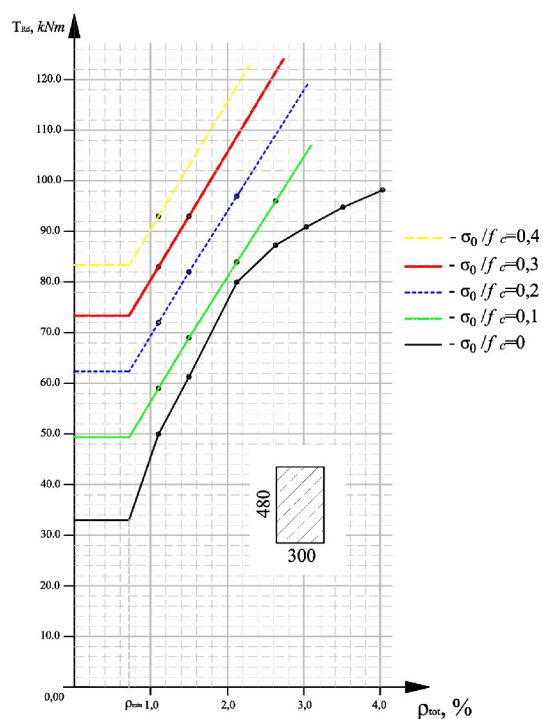
3.2. Armatūros kiekio įtaka iš anksto įtemptųjų gelžbetoninių elementų laikomajai galiai

Nagrinėjant armatūros kiekio įtaką sukamo gelžbetoninio elemento laikomajai galiai, buvo apskaičiuotos sijos su skirtingais išankstiniais apspaudimais. Tai leido nustatyti, kokią įtaką armatūros kiekis turi skirtingai apspaudstoms sijoms. Elementai buvo apspaudžiami $\sigma_0 = 0.1f_c$, $\sigma_0 = 0.2f_c$, $\sigma_0 = 0.3f_c$, $\sigma_0 = 0.4f_c$ išankstiniu įtempimu.



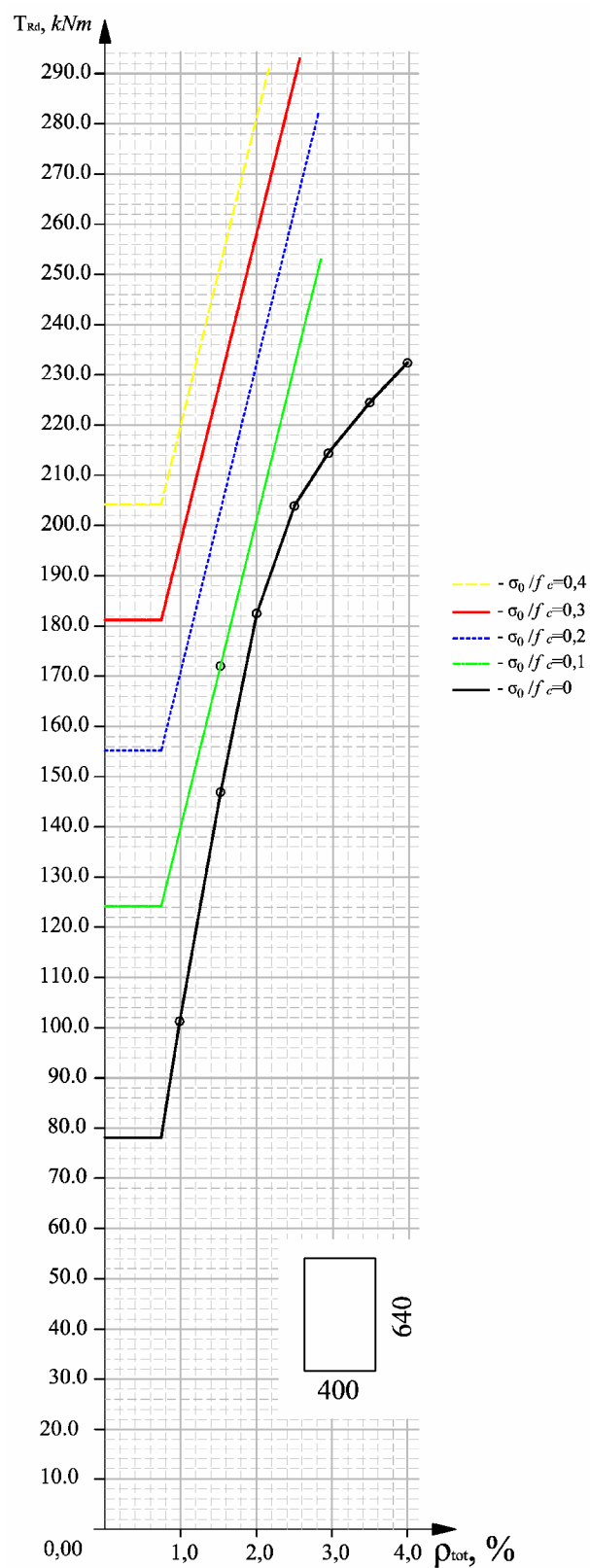
3. 4 pav. 0,25x0,40 m skerspjūvio sijų, su išankstiniu įtempimu ($\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.1$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.2$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.3$),

laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui



3. 5 pav. 0,30x0,48 m skerspjūvio sijų, su išankstiniu įtempimu ($\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.1$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.2$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.3$),

laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui



3. 6 pav. 0,40x0,64 m skerspjūvio sijų, su išankstiniu įtempimu

($\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.1$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.2$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.3$; $\frac{\sigma_0}{f_c} = 0.4$), laikomosios galios kitimas, didėjant armavimo procentui

3.3. Išvados

Sukamų gelžbetoninių elementų sukamoji galia didėja, didėjant išankstinio apspaudimo jėgai. Tačiau atsižvelgiant į didžiausią sukimo momentą, kurį gali atlaikyti skerspjūvis, matyti, kad maksimalus sukimo momentas pasiekiamas, kai apspaudimo įtempimai sudaro $0,3 f_c$, o po to apspaudimo įtaka mažėja.

Skirtingai armuotų sijų kreivės, nusakančios elemento stiprumo priklausomybę nuo apspaudimo didumo, kinta pagal tokį patį charakterį, tačiau sijos su didesniu kiekiu armatūros atlaiko didesnę sukamąją momentą. Arčiausiai kreivės, nusakančios maksimalų skerspjūvio atlaikomą sukimo momentą, yra sijų su $\rho_{tot} = 2,0 - 2.67 \%$ armavimo procentu kreivės. Nustatyta, kad skirtumas tarp skirtingai armuotų elementų sukamosios galios, įtemtojo gelžbetonio sijose yra toks pat kaip ir neįtempto gelžbetonio elementuose, tai patvirtina faktą, kad išankstinis apspaudimas padidina betono laikomąją galią, o armatūros įtaka išlieka tokia pati kaip ir neįtemptuose elementuose.

Didėjant armatūros kiekiui iš anksto įtemptose sijose, elemento stiprumas didėja proporcingai armatūros kiekiui, kai išankstinio apspaudimo dydis nekinta. Armatūros kiekio įtaka pasireiškia tada, kai armavimo procentas pasiekia apytiksliai $\rho_{tot} = 0.8 \%$, o iki tol elemento stiprumą nusako betono suirimas, toks pat minimalus armatūros kiekis yra ir neįtemptuose elementuose.

Išankstinis apspaudimas padidina sukamo elemento betono įtaką elemento stiprumui. Nagrinėdami kreives, nusakančias armatūros kiekio įtaką iš anksto įtemptų elementų stiprumui, matome, kad sijų su skirtingais apspaudimais kreivės išlieka lygiagrečios, tai parodo, kad armatūros įtaka iš anksto įtemptiems elementams yra tokia pati.

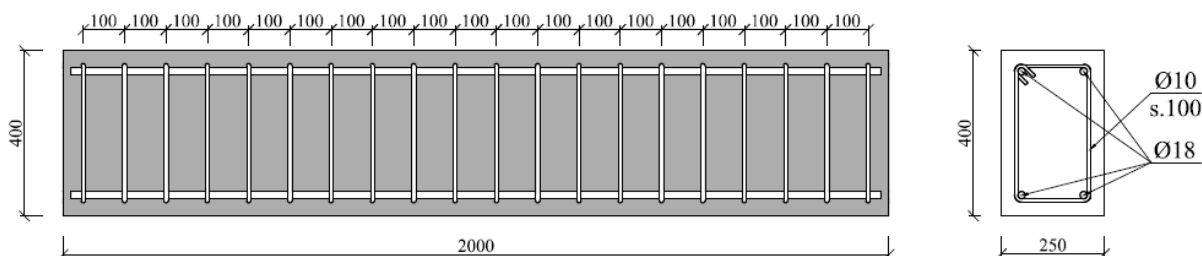
4. KOMPIUTERINĖ SUKAMO GELŽBETONINIO ELEMENTO ANALIZĖ

4.1. Sukamo elemento baigtinių elementų modelio sudarymas

4.1.1. Bendrosios žinios

Kompiuterine baigtinių elementų programa ANSYS 11.0 sumodeliuotas sukamo gelžbetoninio elemento trimatis (3D) modelis. Trimačio modelio sukūrimui programa ANSYS 11.0 turi būti įvertinta daug sąlygų, tam, kad gautume teisingus rezultatus. Modelį galima sukurti duomenis vedant komandų eilutėje ir naudojantis grafinę vartotojo valdymo sistema (Graphical User Interface- GUI). Šiuo atveju buvo naudojama grafinė vartotojo valdymo sistema (GUI).

Programa sudaromas 0,25 x 0,40 m skerspjūvio sijos trimatis modelis. Tariaama, kad sija betonuojama iš C25/30 klasės betono, kurio cilindrinis stipris gniuždymui yra $f_{cm} = 33 \text{ MPa}$, tempiamasis stipris $f_{ct} = 3 \text{ MPa}$, tamprumo modulis $E_{cm} = 31 \text{ GPa}$, Puasono koeficientas $\nu = 0.2$. Sija armuojama Ø18 išilgine armatūra ir Ø10 skersine armatūra. Skersinės armatūros žingsnis $s=10\text{cm}$. Skersinės ir išilginės armatūros stiprumas takumo riboje yra $f_y = 460 \text{ MPa}$.



4. 1 pav. Sija, naudojama kompiuteriniame modelyje

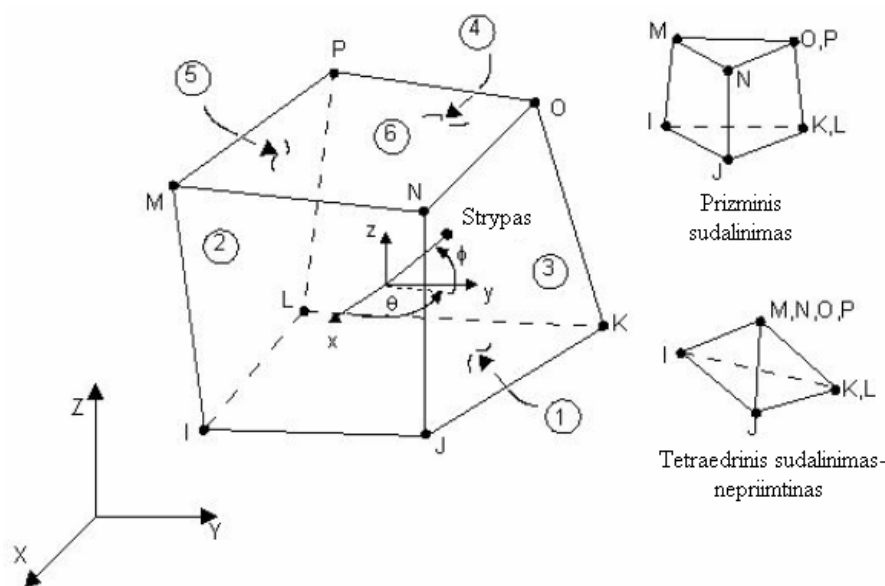
Kompiuterinėje programoje ANSYS 11.0 buvo stengiamasi kuo tiksliau atkartoti šios sijos geometriją (žr. 4.1 pav.).

Sudarant kompiuterinį modelį, buvo nustatinėjama, kokią įtaką daro išankstinis įtempimas, sukamo gelžbetoninio elemento plyšio atsiradimo sukimo momento dydžiui, taip pat palyginamas įtempių būvis sijoje be išankstinio įtempimo su sija, kurioje išankstinis įtempimas įvertinamas. Darbe analizuojamas elementas, kuris apsaustas 3MPa arba 6MPa išankstiniu apspaudimu.

Kompiuterinėje analizėje taip pat nagrinėjama kokią įtaką turi išankstinis apspaudimas elemento laikomajai galiai. Šiuo atveju tempimas betone neįvertinamas, laikoma, kad visus tempimo įtempimus perima skersinė ir išilginė armatūra.

4.1.2. Elementų tipai, naudojami kompiuteriniame modelyje

Sudarant kompiuterinį modelį buvo sukurtas stačiakampio gretasienio formos tūris, kuris suskirstomas į $0,05 \times 0,05 \times 0,05$ m. matmenų, kubo formos baigtinius elementus. Suskirstant baigtiniams elementams buvo priskirtos Solid65 tipo elementų savybės. Šis elementas turi aštuonis taškus, kurie turi tris laisvės laipsnius, jie gali pasislinkti x,y,z ašių linkmėmis. Solid65 elementas naudojamas betono modeliavimui, jis gali plastiškai deformuotis, jame gali atsirasti plyšiai visomis kryptimis pagal erdvinę Dekarto koordinačių sistemą. Schematinis Solid65 elemento vaizdas pavaizduotas 4.2 pav.



4. 2 pav. Solid65 tipo baigtinis elementas

Solid45 tipo elementai naudojami vaizduojant plienines plokštes elemento apkrovimo ir atramos vietose. Plieninės plokštės naudojamos norint panaikinti įtempių koncentraciją po apkrova ir ties atramomis. Šis elementas, kaip ir Solid65 tipo elementas, turi 8 taškus, kurie turi po tris laisvės laipsnius, su galimybe pasislinkti x,y ir z ašių linkmėmis.

4.1.3. Tikrosios konstantos (Real Constants) komanda baigtiniams elementams

Real constants komanda Solid65 baigtiniam elementui, užduodama, koks bus elementas. Vienu atveju elementas gali būti betoninis, kitu gelžbetoninis. Jeigu elementas yra gelžbetoninis, tuomet baigtiniam elementui užduodamos betono ir armatūros savybės. Užduodant armatūros savybes nustatoma iš kokios medžiagos yra armatūra, užrašomos medžiagos mechaninės savybės, armavimo procentas, atsižvelgiant į elemento dydį, taip pat nustatoma kokią kampą strypas sudaro su sijos išilgine ašimi.

19. lentelė Elementų tikrosios konstantos (Real Constants)

Tikrosios konstantos Nr.	Elemento tipas	Konstantos			
1	Solid65		1 strypas	2 strypas	3 strypas
		Medžiagos Nr.	2	2	2
		Armavimo %	0.1016	0.01131	0.01131
		Kampas α , °	0	90	90
		Kampas β , °	0	0	90
2	Solid65		1 strypas	2 strypas	3 strypas
		Medžiagos Nr.	2	0	0
		Armavimo %	0.02262	0	0
		Kampas α	90	0	0
		Kampas β	0	0	0
3	Solid65		1 strypas	2 strypas	3 strypas
		Medžiagos Nr.	2	0	0
		Armavimo %	0.02262	0	0
		Kampas α	90	0	0
		Kampas β	90	0	0
4	Solid45				

Šiuo atveju sijos gelžbetoninei daliai užduodamos trys skirtingos tikrosios savybės (Real constants), nes armatūra patenka tik į išorinius baigtinius elementus. Kampiniuose baigtiniuose elementuose įvedama išilginė armatūra, bei dalis skersinės. Elementuose, kurie sutampa su sijos ilgesniaja ir trumpesniaja kraštinėmis įvedama tik skersinė armatūra. Solid45- metaliniam elementui neužduodama jokių tikrųjų konstantų.

4.1.4. Medžiagų mechaninės savybės

Norint kuo tiksliau išreikšti tikrą sukamos sijos darbą, sijos baigtiniams elementams buvo priskirtos tikrosios medžiagų savybės. Solid65 tipo elementų betono darbas aprašomas įvertinant medžiagos netiesiškumą. Netiesinis medžiagos darbas aprašomas naudojantis Eurocode 2 (1992) pateikta formule:

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}. \quad (43)$$

Čia:

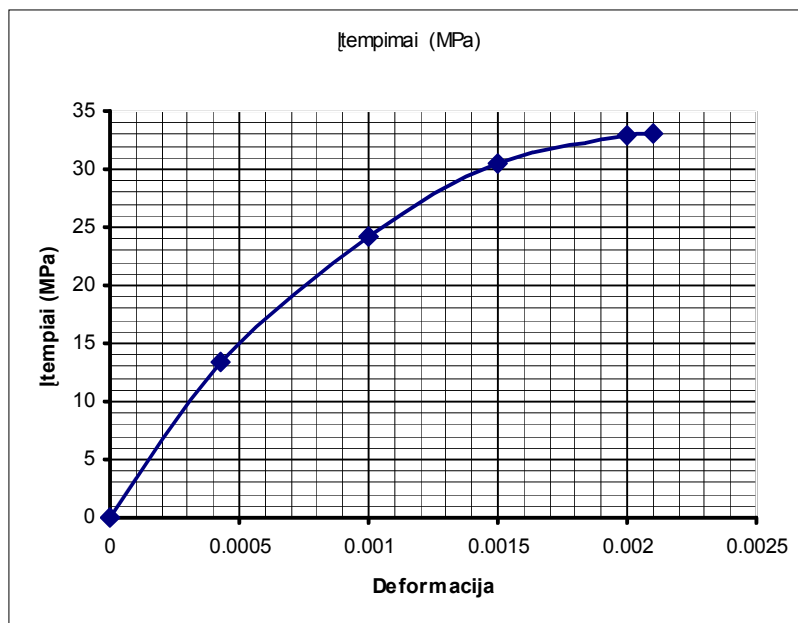
$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}};$$

ε_{c1} - deformacija kai įtempimai betone pasiekia didžiausią reikšmę f_c ;

$$k = (1.1E_{c,nom}) \cdot \frac{\varepsilon_{cl}}{f_c}; \quad (44)$$

$E_{c,nom}$ - nominalus betono deformacijų modulis imamas E_c ;

Deformacija ε_c	Įtempimai σ_c (MPa)
0.00043	13.33
0.0010	24.24
0.0015	30.44
0.0020	32.93
0.0021	33.00



4. 3 pav. Betono įtempių- deformacijų kreivė, veikiant vienašiai gniuždymui

Sudarant vienašio gniuždymo veikiamo betono įtempių - deformacijų kreivę, laikoma, kad betonas dirba tampriai iki tol, kol įtempiai pasiekia reikšmę $0,4f_c$, o po to betonas pradeda dirbti netiesiškai. Šis netiesiškumas aprašomas (43) formule. Apskaičiavus įtempį prie pasirinktos deformacijos gaunama kreivė (žr. 4.3 pav.).

Be medžiagos netiesiškumo Solid65 elementui galima įvesti ir kitas betono savybes, tokias kaip betono įtempimus kada atsiranda atviras plyšys, betono įtempimus kada atsiranda uždaras plyšys, koeficientus, įvertinančius atviro ir uždaro plyšio atsiradimą ir t.t.

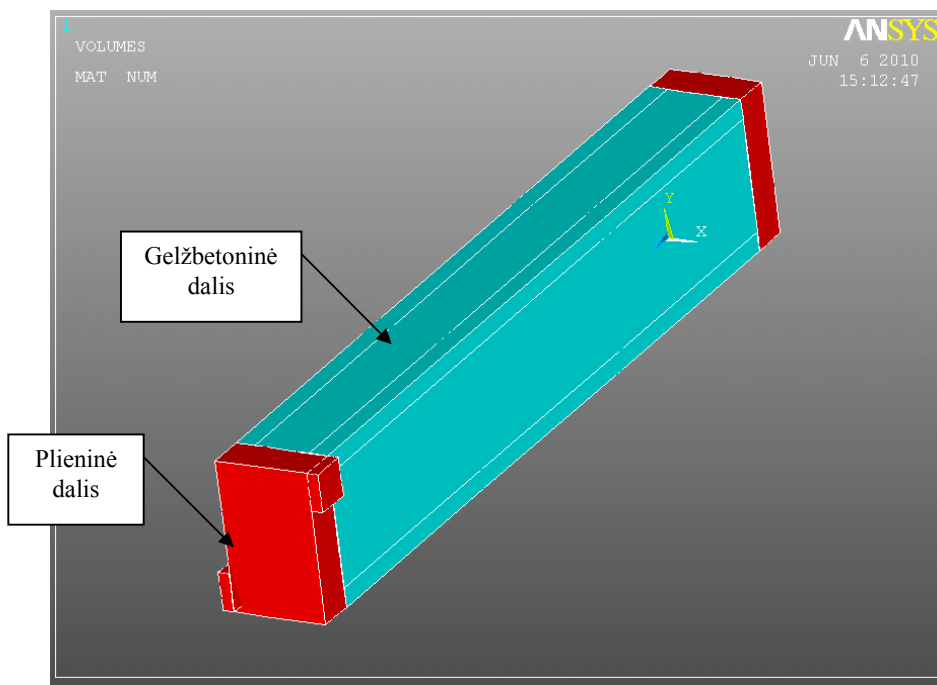
Armatūros darbas aprašomas, kaip idealiai tampriai plastinės medžiagos. Armatūra praranda savo stiprumą, kai įtempimai pasiekia $f_y = 460$ MPa. Ribinės deformacijos apskaičiuojamos pasinaudojant Huko dėsnio $\varepsilon_y = f_y / E_s = 0,00219$.

4.1.5. Modelio sudarymas

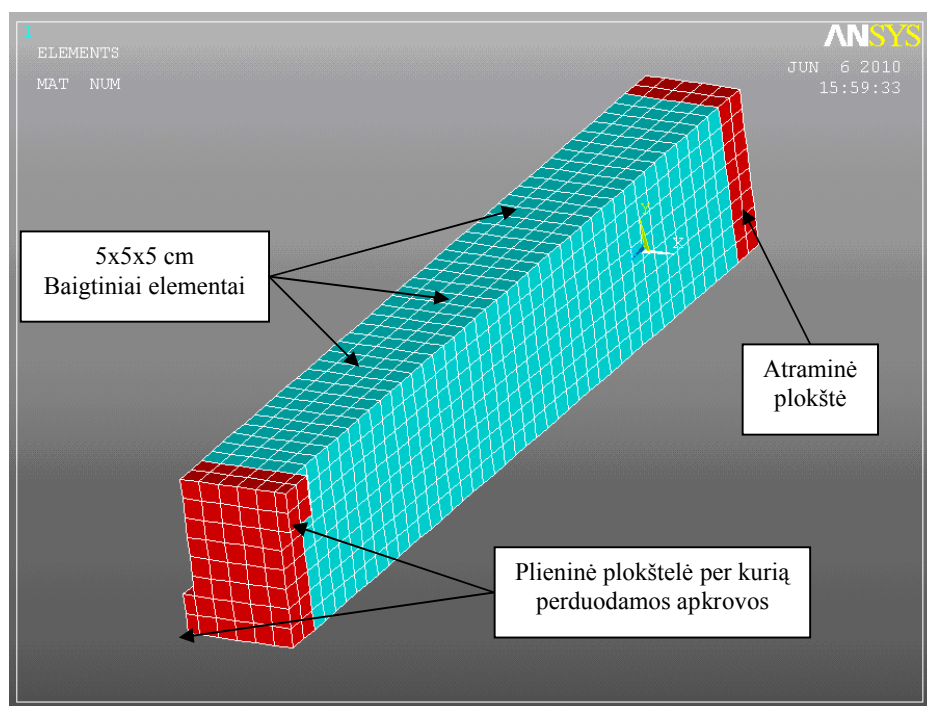
Sudarant modelį buvo sukurti trys stačiakampiai gretasieniai, kurie vaizduoja sukamą gelžbetoninę siją, plieninę plokštę atramoje ir apkrovimo vietoje. Gelžbetoninė dalis sumodeliuota

0,25x0,40m skerspjūvio ir 2 m. ilgio. Plieninės dalys sumodeliuotos tokio paties skerspjūvio kaip ir sija, tačiau jų ilgis yra 0,1m.

Sumodeliuoti tūriai sudalinami į baigtinius elementus. Buvo stengiamasi, kad sudalinimas būtų tvarkingas, iš kubo formos elementų, kurių matmenys 0,05x0,05x0,05 m. Tūriniai elementai, vaizduojantys metalines dalis ir gelžbetoninę siją, pavaizduoti 4.4 pav., sudalinimas baigtiniais elementais 4.5 pav.



4. 4 pav. Tūriniai elementai vaizduojantys gelžbetoninę siją ir metalines dalis



4. 5 pav. Sija ir metalinė dalis sudalinta į baigtinius elementus

4.1.6. Apkrovos ir įtvirtinimas

Sukamas gelžbetoninis elementas nagrinėjamas kaip gembinė sija, kurios vienas galas įtvirtintas. Įtvirtinimas įvedamas visuose baigtinių elementų taškuose, kurie sutampa su sijos įtvirtinimo plokštuma. Taškuose uždedamas ribojimas pasislinkti visomis koordinatinių ašių kryptimis.

Sijos viršuje ir apačioje, tačiau priešingose skerspjūvio pusėse, uždedama išskirstyta, priešingų krypčių apkrova, taip norint sukurti jėgų petį, kuris sukeltų sukimą elemente. Išankstinis apspaudimas įvertinamas, kaip išorinės apkrovos poveikis elementui. Darbe analizuojamas elementas, kuris apsaustas $3MPa$, $6MPa$ išankstiniu apspaudimu.

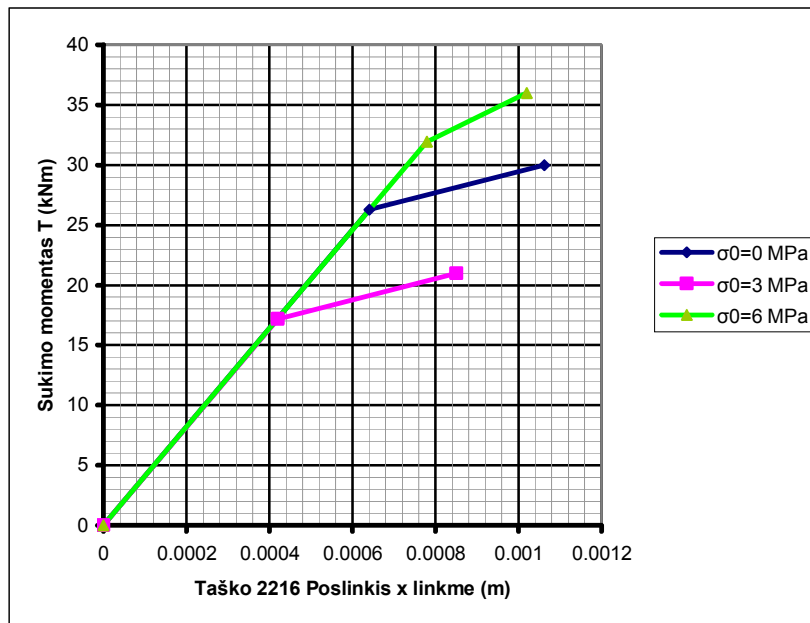
4.2. Kompiuterinė analizė

4.2.1. Apspaudimo įtaka sukamo elemento elgsenai, plyšio atsiradimo momentu

Nagrinėjant literatūrą apie sukamus gelžbetoninius elementus su išankstiniu apspaudimu ir be jo, buvo nustatyta, kad išankstinis apspaudimas didžiausią įtaką turi sukamo elemento plyšio atsiradimui. Kitaip sakant, sukamas elementas yra apspaudžiamas, dėl to padidėja atsparumas plyšių atsiradimui.

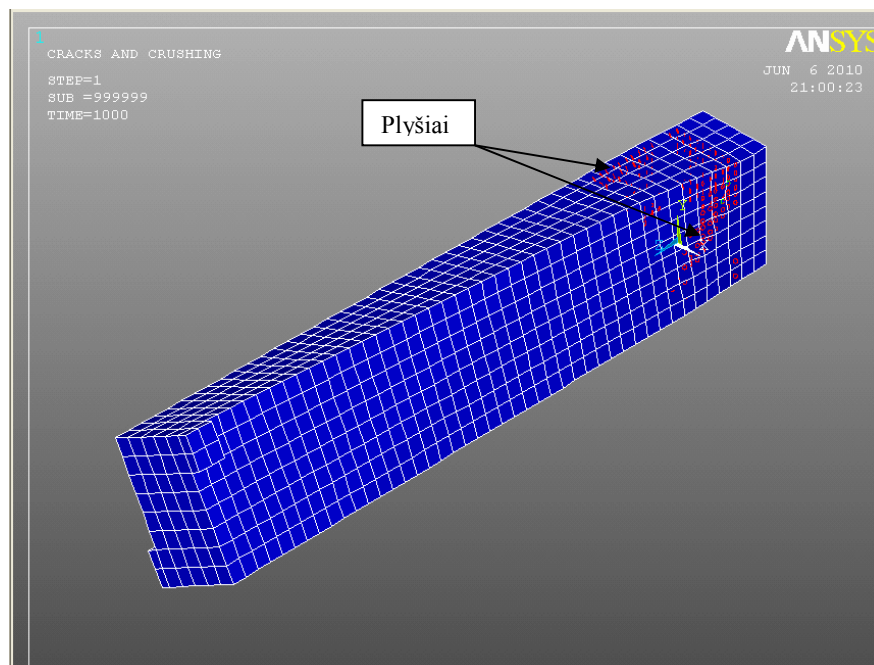
Šiame skyriuje nagrinėjama apspaudimo įtaka sukamo gelžbetoninio elemento plyšių atsiradimui. Nagrinėjama gelžbetoninė sija, kuri apspaudžiama $3MPa$ ir $6MPa$ dydžio išankstiniu apspaudimu. Kompiuterinėje baigtinių elementų programoje ANSYS 11.0 palaipsniui keliama apkrova, sukelianti sukimą elemente. Nustatoma, prie kokios apkrovos elemente atsiranda plyšiai bei išnagrinėjamas įtempimų būvis sijose be įtempimo ir su išankstiniu įtempimu.

Nustatoma apkrovos – poslinkio kreivė, kurioje vaizduojama, kaip kinta kampinio taško poslinkis didėjant sukimo momentui.

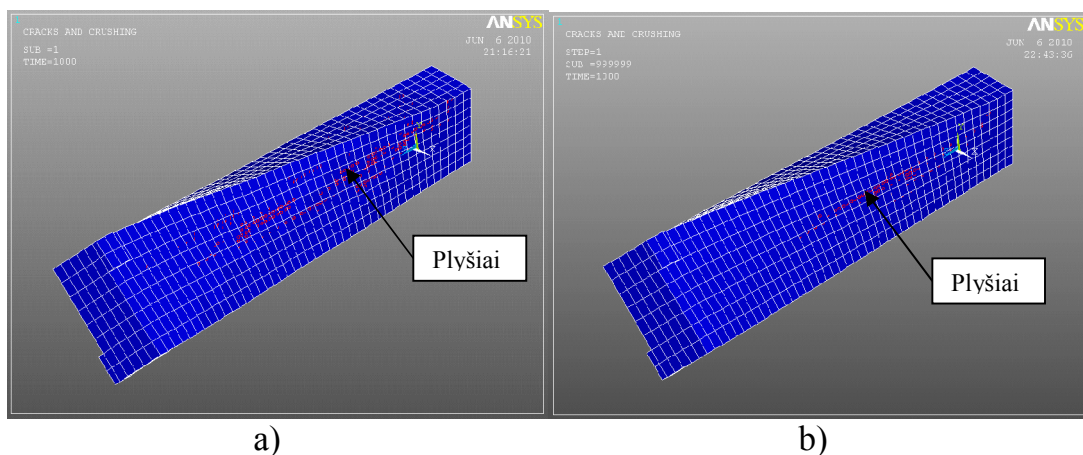


4. 6 pav. Sijų su $\sigma_0 = 0$ MPa , $\sigma_0 = 3$ MPa , $\sigma_0 = 6$ MPa išankstiniu įtempimu apkrovos – poslinkių grafikas

Iš 4.6 pav. parodytos sukimo momento - poslinkio kreivės. Šių kreivių lūžis parodo, jog sukamame elemente atsiranda plyšys, o atsiradus plyšiui pasikeičia elemento standumas. Sukimo momento reikšmė šiame lūžyje nusakoma kaip plyšio atsiradimo sukimo momentas. Didėjant išankstiniam įtempimui, didėja ir plyšio atsiradimo sukimo momento reikšmė, tačiau sukamasis standumas išlieka toks pat.

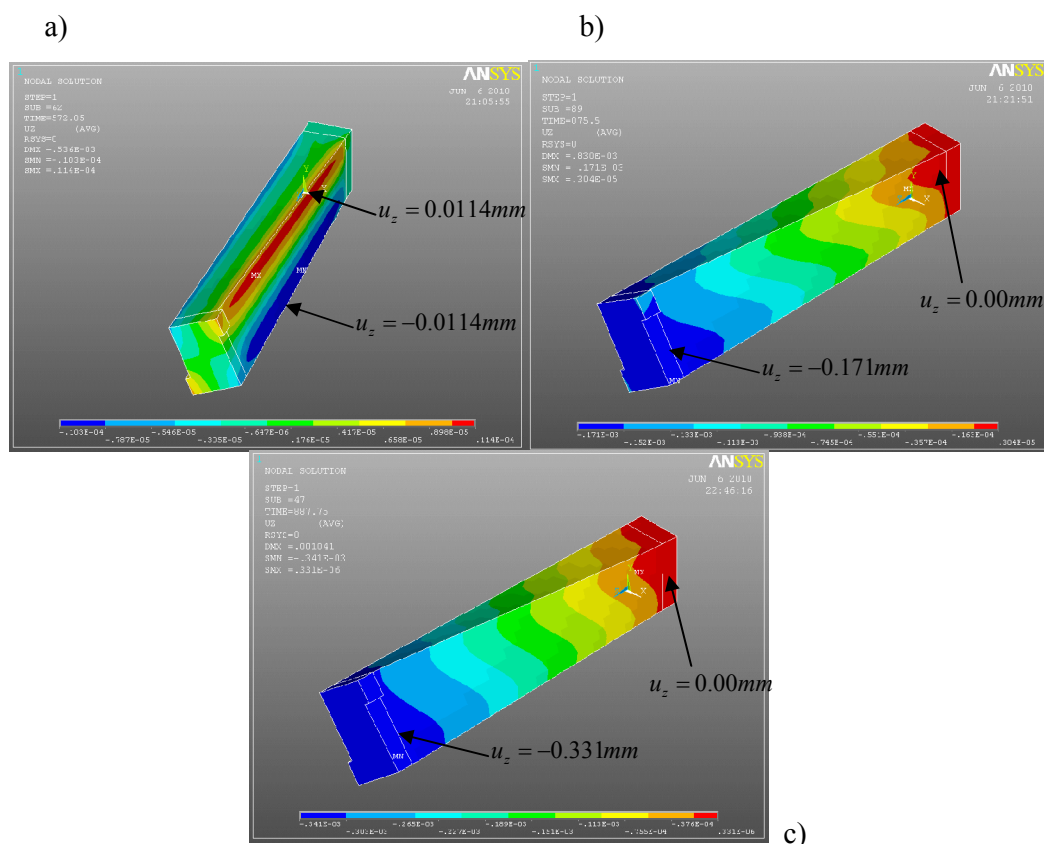


4. 7 pav. Plyšių atsivėrimas sukamoje sijoje be išankstinio apspaudimo



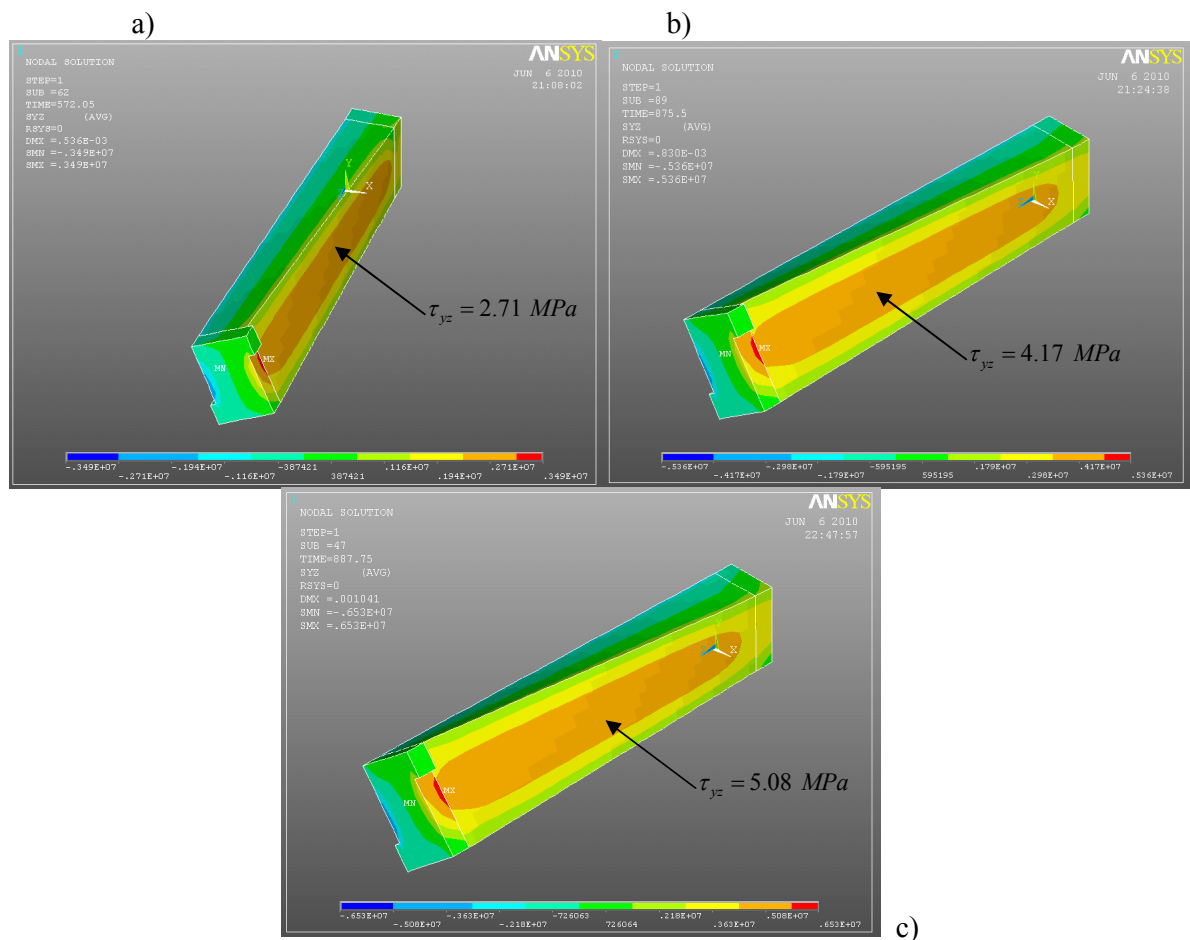
4. 8 pav. Atsivėrę plyšiai: a) sija su 3 MPa išankstiniu apspaudimu; b) sija su 6 MPa išankstiniu apspaudimu

4.7 ir 4.8 pav. parodytas deformuotas sukamų elementų būvis, su atsivėrusiais plyšiais. Pastebima, kad sijose be išankstinio apspaudimo plyšiai atsiranda atraminėje zonoje. Sijose, kuriose išankstinis apspaudimas įvertinamas, plyšiai išsidėsto lygiagrečiai sijos išilginei ašiai. Taip pat pastebima, jog pirmiausia plyšiai atsiveria didesnioje skerspjūvio kraštinėje.



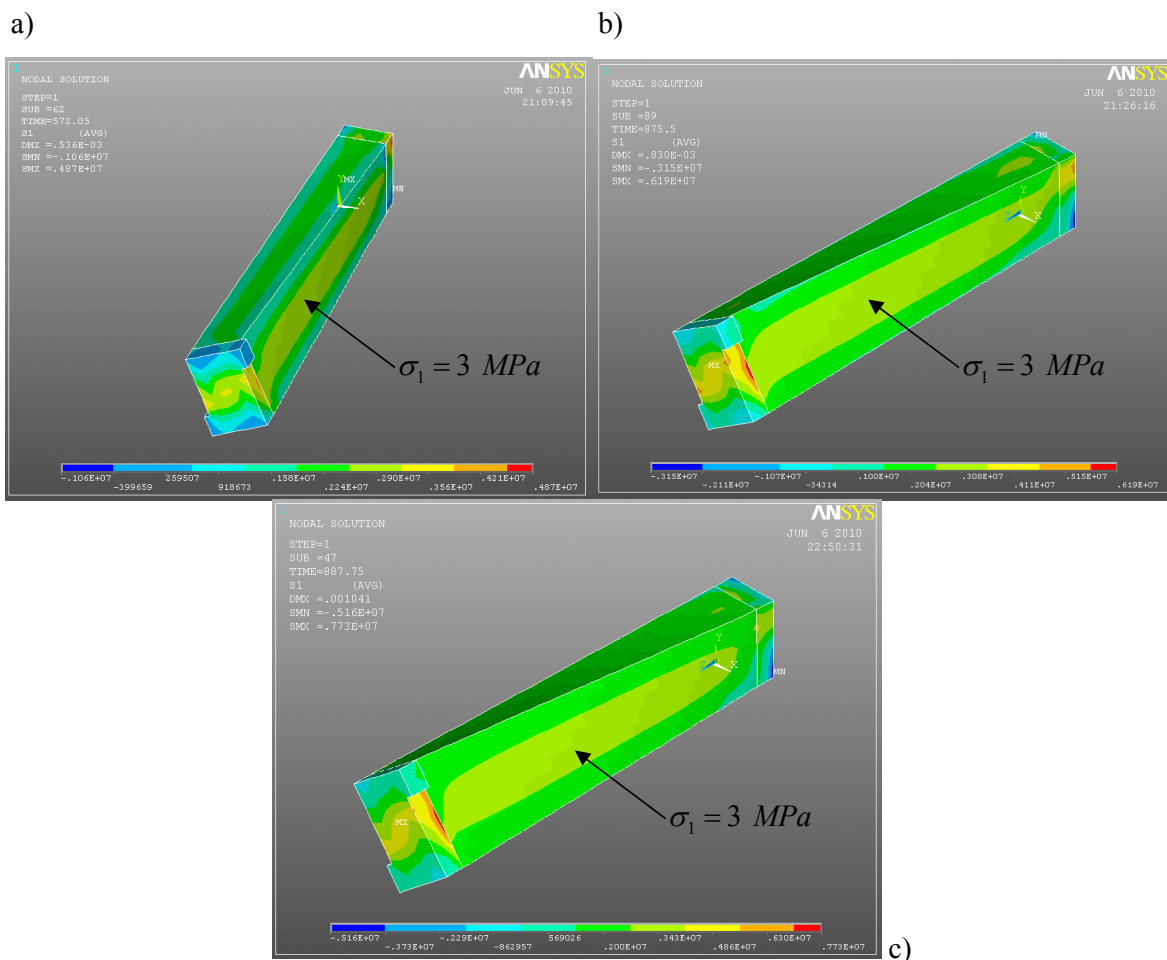
4. 9 pav. Sukamo elemento poslinkiai išilgai sijos ašiai: a) neįtempta sija; b) Sija su 3 MPa išankstiniu įtempimu; c) sija su 6 MPa įtempimu;

4.9 pav. pavaizduotas deformuotas sijų būvis su poslinkiais, kurie sutampa su sijos išilgine ašimi. Sijose be išankstinio įtempimo poslinkiai išilgai sijos ašiai pasiskirstę netolygiai. Vienuose skerspjūvio kampuose pastebimas sijos pailgėjimas, o priešinguose jiems kampuose - sutrumpėjimas (4.9 pav. a). Pridėjus išankstinį įtempimą, sija apgniuždoma. Kampuose, kuriuose buvo pastebimas sijos pailgėjimas, apgniuždymo įtempimai juos kompensuoja. Didėjant apspaudimo jėgai, poslinkiai pasiskirsto tolygiau.



4. 10 pav. Tangentiniai įtempiai yz plokštumoje: a) neįtempta sija; b) sija su 3 MPa išankstiniu įtempimu; c) sija su 6 MPa įtempimu.

4.10 pav. pavaizduotas deformuotas sijų būvis su tangentiniais įtempiais yz plokštumoje, ši plokštuma sutampa su sijos didesniosios kraštinės plokštuma. Kaip matome, tangentiniai įtempiai, momentu, kai sijoje atsiranda plyšiai, didėja didėjant apspaudimo jėgai. Taip yra todėl, kad sijose su išankstiniu apspaudimu plyšiai atsiranda veikiant didesniam sukimo momentui, kurie sukelia sijoje didesnius tangentinis įtempius.



4. 11 pav. Normaliniai svarbiausieji tempimo įtempiai σ_1 : a) neįtempta sija; b) sija su 3 MPa išankstiniu įtempimu; c) sija su 6 MPa įtempimu.

4.11 pav. pavaizduotos svarbiausiųjų normalinių įtempių σ_1 pasiskirstymas sijos išorinėse kraštinėse. Svarbiausieji σ_1 įtempiai atitinka tempimo įtempius. Kaip matome iš 4.11 pav. tempimo įtempiai, plyšio atsiradimo momentu, nepriklauso nuo išankstinio apspaudimo dydžio. Nes tiek įtemptose, tiek neįtemptose sijose plyšiai atsiranda tada, kai tempimo įtempiai pasiekia tempiamąjį betono stiprį. Šiuo atveju baigtinių elementų programoje ANSYS 11.0 buvo užduotas tempiamasis betono stipris $f_{ct} = 3 \text{ MPa}$.

4.3. Išvados

Skyriuje išnagrinėta gelžbetoninė sija veikiant sukimui, naudojantis baigtinių elementų programa ANSYS 11.0. Buvo nagrinėjama, kaip priklauso plyšio atsiradimo sukamasis momentas nuo išankstinio įtempimo dydžio. Taip pat buvo nustatyta kaip keičiasi įtempimų ir deformacijų būvis sukamuose elementuose su išankstiniu įtempimu ir be jo.

Nustatyta, kad didėjant išankstiniam įtempimui, didėja ir sijos atsparumas plyšio atsiradimui. Sijos išankstiniam įtempimui padidėjus nuo 0 iki 3 MPa , sijos plyšio atsiradimo sukamasis momentas T_{cr} padidėja nuo 17,18 kNm iki 26,28 kNm . Tai reiškia, kad pridėjus išankstinį įtempimą lygų 10 % nuo betono gniuždomojo stiprio, atsparumas plyšiams padidėja 50 %. Jeigu pridėtume išankstinį įtempimą lygų 20 % nuo betono gniuždomojo stiprio, tai atsparumas padidėtų 2 kartus.

Nagrinėjant tangentinių ir normalinių įtempių pasiskirstymą sukamame elemente su išankstiniu įtempimu ir be jo, buvo pastebėta, kad didėjant išankstiniam įtempimui, didėja ir tangentinių įtempių reikšmė, plyšio atsiradimo momentu. Taip yra todėl, kad didėja plyšio atsiradimo momentas, o tangentiniai įtempimai tiesiogiai nuo jo priklauso. Normalinių tempimo įtempių reikšmės išlieka tokios pačios, lyginant su sijomis be išankstinio įtempimo.

IŠVADOS

1. Atliekant skaičiavimo metodų analizę, išnagrinėti pagrindiniai šiuo metu naudojami metodai sukamiems gelžbetoniniams elementams apskaičiuoti: tamprumo teorija (*St. Venant*), įstrižojo lenkimo teorija (*skew bending theory*), erdvinės santvaros modelis (*space truss model*) ir kintamo kampo erdvinės santvaros modelis (*variable angle space truss model*). Tamprumo teorija nagrinėja sukamų gelžbetoninių elementų elgseną iki plyšių atsiradimo. Įstrižojo lenkimo teorija ir erdvinės santvaros modeliu nustatoma sukamo gelžbetoninio elemento laikomoji galia, tačiau šiais metodais negalima nustatyti elemento elgsenos. Kintamo kampo erdvinės santvaros modeliu galima nagrinėti sukamų gelžbetoninių elementų elgseną netiesinėje stadijoje, juo gana tiksliai nusakoma elementų sukamoji galia.
2. Atlikus armatūros kiekio įtakos sukamam gelžbetoniniam elementui nustatymą, pastebėta, kad armatūros kiekis elemento elgsenai iki plyšių atsiradimo įtakos neturi. Iki plyšių atsiradimo dirba tik elemento betonas, todėl elemento standumas ir plyšio atsiradimo sukamasis momentas priklauso tik nuo betono stiprio ir elemento išorinių matmenų. Armatūros įtaka sukamo gelžbetoninio elemento plyšio atsiradimo momentui yra minimali, todėl galima jos nevertinti.
3. Sukamųjų gelžbetoninių elementų standumas, atsivėrus plyšiams, priklauso nuo armatūros kiekio elemente. Elemento standumas didėja proporcingai armatūros kiekiui sukamame gelžbetoniniame elemente.
4. Atlikus armatūros kiekio įtakos sukamo gelžbetoninio elemento elgsenai ir sukamajai galiai analizę pastebėta, kad armatūros kiekiui esant iki $\rho_{tot} \sim 0.8 \%$, elementas atlaiko tokį sukimo momentą, kokį atlaiko sukimo jėgos veikiamo elemento betonas, skaičiuojant pagal tamprumo teoriją. Vadinasi, armatūros kiekis sukamame elemente turi būti ne mažesnis kaip $\rho_{tot} = 0.8 \%$ tiek įtemptuose, tiek neįtemptuose elementuose. Kai sijų suminis, skersinės ir išilginės armatūros, armavimo procentas kinta nuo $\rho_{tot} = 0.5$ iki $\rho_{tot} = 4\%$, nustatyta, kad armatūros kiekiui pasiekus $\rho_{tot} = 2 - 2.5 \%$ ribą, sukamo gelžbetoninio elemento laikomoji galia pradeda priklausyti ne nuo armatūros, o nuo betono suirimo tiek neįtemptiems, tiek įtemptiems elementams.
5. Sukamų gelžbetoninių elementų stiprumas didėja, didėjant išankstinio apspaudimo jėgai. Tačiau atsižvelgiant į didžiausią sukimo momentą, kurį gali atlaikyti skerspjuvis, matyti, kad maksimalus sukimo momentas pasiekiamas, kai apspaudimo įtempiai sudaro $0,3 f_c$, o po to apspaudimo įtaka mažėja. Vadinasi, sukamus elementus efektyviausia apspausti tokio dydžio išankstiniu apspaudimu, kai jo dydis sudaro 30% betono gniuždomojo stiprio.

Sukamų įtemptojo gelžbetonio elementų laikomajai galiai armatūra turi tokią pačią įtaką, kaip ir neįtemptiems elementams.

6. Atlikus sukamų gelžbetoninių elementų kompiuterinę analizę, pasinaudojant baigtinių elementų programa ANSYS 11.0, nustatyta, kad išankstinis įtempimas padidina sukamo gelžbetoninio elemento atsparumą plyšių atsiradimui, taip pat pakeičia elemento įtempių ir deformacijų būvį.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- ACI Committee 318 (1995) Building Code Requirements for Reinforced Concrete, (ACI 318-95), American Concrete Institute, Detroit, MI
- ACI Committee 318 (2005) Building Code Requirements for Reinforced Concrete, (ACI 318-05), American Concrete Institute, Detroit, M
- Abdel Wahid Hago (2006). Direct Design of Reinforced Concrete Beams Under Combined Bending, Shear and Torsion. Sultan Qaboos University, Sultanate of Oman
- Ádám Csikós, 1998. Torsion Of Reinforced Concrete Beams. Technical university of Budapest, Department of reinforced concrete structures
- Ahmed Saad Eldin MORGAN, 1999. The Size Effect on Torsion Strength of Concrete Beams. Department of civil engineering.
- Dr. Amlan, K. Sengupta and Prof. Devdas Menon; 5.4 Analysis for Torsion, Indian Institute of Technology Madras
- Ameli M. and Ronagh H.R. (2007). TREATMENT OF TORSION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN CURRENT STRUCTURAL STANDARDS. Division of Civil Engineering, School of Engineering, University of Queensland, QLD, 4072, Australia
- Andersen P (1935) Experiments with concrete in torsion. Trans ASCE 100:949–983
- Analysis and design for torsion. Chapter 3. Handbook 2002
- CEB-FIP (1978) Model code for concrete structures. CEBFIP International Recommendations, 3rd edn. Paris, 348 pp
- CEN EN 1992-1-1 (2002) Eurocode 2: design of concrete structures—Part 1: general rules and rules for buildings, April 2002
- Collins MP (1973) Torque-twist characteristics of reinforced concrete beams. Inelasticity and non-linearity in Structural Concrete Study No. 8. University of Waterloo Press, Waterloo, Ontario, Canada, pp 211–232;
- El-Niema E.I., Mohamed A.Z., Moh. Ahmed S. E. (1992). Combined bending and torsion of reinforced concrete beams. University of Khartoum. Faculty of engineering and architecture.
- Hao-Jan Chiu, I-Kuang Fang, Wen-Tang Young, Jyh-Kun Shiau (2006). Behavior of reinforced concrete beams with minimum torsional reinforcement. Department of Civil Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, 701, Taiwan, ROC.
- Hossain T. & P. Mendis, T. Aravinthan & G. Baker (2008) Torsional resistance of high-strength concrete beams. University of Melbourne, Victoria, Australia; University of Southern Queensland, Queensland, Australia

Hsu TTC (1968) Torsion of structural concrete—Behavior of reinforced concrete rectangular members torsion of structural concrete SP-18. American Concrete Institute, Detroit, pp 261–306

Hsu TTC (1973) Post-cracking torsional stiffness of reinforced concrete sections. J Am Concrete Inst Proc 70(5):352–360

Hsu TTC, Mo YL (1985) Softening of concrete in torsional members—Theory and tests. J Am Concrete Inst Proc 82(3):290–303

Hsu TTC (1979) Discussion of pure torsion in rectangular sections—A re-examination. In: McMullen AE, Rangan BV, J Am Concrete Inst Proc 76(6):741–746

Jokūbaitis V. ir kt. Gelžbetoninės ir mūrinės konstrukcijos. Vilnius: Mokslas, 1992, 392 p.

Yong-Hak Leea, Won-Jin Sungb, Tae-Hyung Leea, Kee-Won Seonga (2006). Finite element formulation of a composite double T-beam subjected to torsion. Civil Engineering Department, Konkuk University, 1-Hwayang-dong, Kwangjin-gu, Seoul 143-701, Republic of Korea.

Lui's F. A. Bernardo & Sérgio M. R. Lopes (2008), Behaviour of concrete beams under torsion: NSC plain and hollow beams. Materials and Structures (2008) ISSN: 41:1143–1167;

Mahommad Najim Mahmood (2007). Nonlinear analysis of reinforced concrete beams under pure torsion. Department of Civil engineering, Mosul university, Mosul, Iraq.

Mahammad Najim Mahmood (2007). ACI code provision for torsion design of reinforced concrete beams, A need for revision. Department of Civil engineering, Mosul university, Mosul, Iraq.

Marčiukaitis G., Jonaitis B., Papinigis V., Valivonis J. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas pagal Euronormas. Vilnius: Technika, 2007

Mazars J., Kotronis P., Ragueneau F., Casaux G. (2005). Using multifiber beams to account for shear and torsion. Applications to concrete structural elements. Laboratoire Sols, Solides, Structures (3S), Domaine Universitaire, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

Navarro Gregoria J., Miguel Sosaa P., Fernández Pradaa M.A., Filip C. Filippou. (2007). A 3D numerical model for reinforced and prestressed concrete elements subjected to combined axial, bending, shear and torsion loading. Department of Construction Engineering and Civil Engineering Projects, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, Spain.

Rausch E (1929) Berechnung des Eisenbetons gegen Verdrehung (Design of reinforced concrete in torsion). Ph.D. Thesis, Berlin, 53 pp

Saint-Venant A. J. C. B., 1855, Memoire sur la Torsion des Prismes, Mem. Divers Savants, 14, pp. 233-560

Valivonis J., Marčiukaitis G., Jonaitis B., Šneideris A. Analysis of behavior of prestressed concrete structures subjected to torsion and flexion

Vecchio FJ, Collins MP (1981) Stress-strain characteristics of reinforced concrete in pure shear. IABSE Colloquium, Advanced Mechanics of Reinforced concrete, Delft, Final Report, pp 211–225

Wolanski A.J. Flexural behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis. Graduate thesis for the degree of master of science, Milwaukee, Wisconsin, 2004

S. Panchacharam and A. Belarbi, “Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites,” First FIB Congress, Osaka, Japan, October 13-19, 2002