



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Egidijus Venckus

**GELŽBETONINIŲ TRUMPŲ SIJŲ ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ BŪVIO
ANALIZĖ**

ANALYSIS OF STRESS AND STRAIN STATE OF SHORT BEAMS

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Egidijus Venckus

**GELŽBETONINIŲ TRUMPŲ SIJŲ ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ BŪVIO
ANALIZĖ**

ANALYSIS OF STRESS AND STRAIN STATE OF SHORT BEAMS

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis 02T

Vadovas dr. Remigijus Šalna

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas lekt. Lina Rutkienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEOMINIO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽIETOSINIŲ IR NUBŪDŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Technologijų mokymai

Statybos inžinerijos mokslų kryptis

Statybos inžinerijos mokslų kryptis

Statybos kompiuterinė mokymų programa, vadovavimo kodas 621002001

Statybos konstrukcijų specializacija

TVIRTINU

Kancleriaus vardu

(Parašas)

Darius Valionis

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

2012-11-12 Nr.

Vilnius

Studentas (ai) Algirdas Poneckas

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Gelžbetoninių trumpų slėgių įtempiai ir deformacijos būvės analizė
patvirtinta 2012 m. spalio 29 d. dekanato įsakymu Nr. 518ST

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2013 m. birželio 1 d.

BAGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

*Atlikti slėgių trumpų slėgių statinio būklės
apibūdinimą bei jo būklės ir būklės pakeitimų
priežastis, būklės ir būklės pakeitimų
deformacijos būvės. Taip pat atlikti slėgių
statinio būklės ir būklės pakeitimų
būvės pakeitimų. Būklės pakeitimų būvės
būvės pakeitimų būvės.*

Baigiamojo darbo rengimo kordinatorius: dr. Lina Rutkienė

(Vardas, pavardė, vardas, pavardė)

Vadovas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

(Vardas, pavardė)

Rimigijus Salna, dr.

(Vardas, pavardė, vardas, pavardė)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Egidijus Vendus, 20073592

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, PKfm-11

(Studijų programa, studijų grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2013 m. gegužės 2 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Gedimino rūpų trumpų sijų tempių ir deformacijų būvio analizė“ patvirtintas 2012 m. spalio 23 d. dekanų potvarkiu Nr. 518st, yra savarakiškai pareiškimas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ir netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodomis.

Parengiant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokininkai ir specialistai Remigijus Šaina. Mano darbu vadovavo dr. Remigijus Šaina.

Kitų asmenų indėlis į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parasas)

Egidijus Vendus

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Gelžbetoninių ir mūrinų konstrukcijų katedra

ISBN _____ ISSN _____
Egz. k. _____
Data _____

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos baigiamasis darbas
Pavadinimas **Gelžbetoninių trumpų sijų įtempių ir deformacijų būvio analizė**
Autorius **Egidijus Venckus**
Vadovas **dr. Remigijus Šalna**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe tiriamas trumpų sijų įtempių ir deformacijų būvis. Analizuojami penki skaičiavimo modeliai ir dvi projektavimo normos: Eurokodas (LST EN 1992-1-1:2005) ir Lietuvos Statybos techninis reglamentas (STR 2.05.05:2005). Analizuojama įtėjos peties ir aukščio santykio a/h ir armatūros kiekio įtaka trumpų sijų įtempių ir deformacijų būviui bei suirimo tipui. Modeliams patikrinti atliekami eksperimentiniai tyrimai.

Darbą sudaro penki skyriai, išvados, literatūros sąrašas ir priedas. Įvade aptariamos problemos ir formuluojami darbo tikslai. Pirmame skyriuje apibūdinamos trumpos sijos, praktiniai pavyzdžiai ir suirimo tipai. Antrame skyriuje apžvelgiami trumpų sijų laikomosios galios skaičiavimo modeliai. Trečiame skyriuje atliekama laikomosios galios skaičiavimo modelių parametrinė analizė. Ketvirtame skyriuje aprašomi atlikti eksperimentiniai tyrimai, pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai. Penktame skyriuje atliekamas teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas. Aptariami pagrindiniai skirtumai ir nustatomas tiksliausias eksperimentinius rezultatus atitinkantis metodas. Suformuluotos baigiamosios išvados. Darbo apimtis – 72 p. teksto be priedu, 53 iliustracijos, 12 lentelių, 37 bibliografinių šaltinių. Atskirai pridedamas darbo priedas.

Prasminiai žodžiai

Trumpa sija, šyties stipris, gelžbetonis, pleišėjimas, laikomoji galia, įtėjos peties ir aukščio santykis

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

ISBN 2539
Copies No.
Date

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Final thesis
Title **Analysis of stress and strain state of short beams**
Author **Egidijus Venckus**
Academic supervisor **Dr Remigijus Šalna**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

The master thesis deal with analysis of the stress and strain state of short beams. Five strenght design models and two design codes: Eurocode 2 (LST EN 1992-1-1:2005) and Lithuanian building technical regulations (STR 2.05.05:2005) were analyzed. Experimental studies were carried out for examination of the models. The influence of the volume of longitudinal reinforcement and shear span to height ratio for short beams stress and strain state and failure character is also analyzed. The work consists of five chapters, conclusions, references and appendix. The introduction deals with problems of short beams design and aim of the work. The first chapter describes the characteristics of short beams and failure character. The strength capacity of design models in the second chapter are described. In the third chapter parametric analysis of strenght design models was carried out. The fourth chapter presents the experimental results. The fifth chapter describes comparison of experimental and theoretical results. It discusses the main differences and determine the most accurate method of complying with the experimental results. Final conclusions are formulated. Thesis consist - 72 p. text without appendices, 53 illustrations, 12 tables, 37 references.

Keywords

Shorts beam, shear strenght, reinforced concrete, cracking, strenght capacity, shear span

Turinys

Paveikslų sąrašas	9
Lentelių sąrašas.....	11
IVADAS.....	12
1. TRUMPŲ SIJŲ PANAUDOJIMO IR SUIRIMO TIPŲ APŽVALGA	14
1.1. Konstrukcijos apibūdinimas	14
1.2. Trumpų sijų praktiniai pavyzdžiai	15
1.3. Trumpų sijų suirimo tipai	16
1.4. Įtempių pasiskirstymas trumpose sijose	20
1.5. Dydžio efektas trumpose sijose	21
1.6. Pirmo skyriaus išvados.....	22
2. TRUMPŲ SIJŲ LAIKOMOSIOS GALIOS SKAIČIAVIMO MODELIŲ APŽVALGA	22
2.1. Trumpų sijų skaičiavimas pagal P. Nagarajano ir T. M. Pillai (Nagarajan ir Pillai 2008) modelį.....	22
2.2. Trumpų sijų skaičiavimas pagal N. Zhango ir K. H. Tano (Zhang ir Tan 2007) modelį	25
2.3. Trumpų sijų skaičiavimas pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) modelį.....	27
2.4. Trumpų sijų skaičiavimas pagal G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) modelį.....	28
2.5. Laikomosios galios skaičiavimas pagal C. Y. Tango (Tang 2004) modelį	30
2.6. Trumpų sijų skaičiavimas pagal projektavimo normas	31
2.6.1. Trumpų sijų skaičiavimas pagal STR (STR 2.05.05:2005)	31
2.6.2. Trumpų sijų skaičiavimas pagal Eurokodą (LST EN 1992-1-1:2005)	34
2.7. Antro skyriaus išvados	35
3. TRUMPŲ SIJŲ SKAIČIAVIMO MODELIŲ PARAMETRINĖ ANALIZĖ.....	36
3.1. Jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose.....	37
3.2. Išilginės armatūros įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose	40
3.3. Skersinės armatūros įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose	41
3.4. Betono stiprio įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose	42
3.5. Trečio skyriaus išvados	43
4. GELŽBETONINIŲ TRUMPŲ SIJŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	44
4.1. Betono, naudoto trumpų sijų bandiniams, gniuždomojo stiprio nustatymas	44
4.2. Gelžbetoninių trumpų sijų savybių, esant dviašiam įtempių būviui, eksperimentinis tyrimas.....	46
4.2.1. Eksperimentinio tyrimo tikslas.....	46
4.2.2. Eksperimento programos sudarymas.....	46

4.2.3. Eksperimentinių bandymų eiga.....	49
4.3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai	51
4.3.1. Eksperimento metu gauti trumpų sijų įlinkiai.....	51
4.3.2. Pirmos serijos sijų pleišėjimas ir suirimo tipai	53
4.3.3. Antros serijos sijų pleišėjimas ir suirimo tipas	56
4.3.4. Eksperimento metu gautos trumpų sijų deformacijos	58
4.4. Ketvirtą skyriaus išvados	67
5. EKSPERIMENTINIŲ IR TEORINIŲ TRUMPŲ SIJŲ LAIKOMOSIOS GALIOS SKAIČIAVIMO REZULTATŲ PALYGINIMAS	68
5.1. Rezultatų palyginimas, kai $\rho_l = 0,34$ %.....	70
5.2. Rezultatų palyginimas, kai $\rho_l = 0,75$ %.....	71
5.3. Rezultatų palyginimas, kai $\rho_l = 1,03$ %.....	72
5.4. Penkto skyriaus išvados	73
Išvados	74
LITERATŪRA	76

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Trumpos sijos skaičiuojamoji schema	14
1.2 pav. Trumpų sijų pavyzdžiai: a) polių galvenos; b) perdavimo sijos; c) skersinės sijos;	15
1.3 pav. Trumpa sija tilto konstrukcijoje (Birrcher 2009)	15
1.4 pav. Trumpų sijų praktiniai pavyzdžiai (Tuchscherer 2008).....	16
1.5 pav. Suirimas dėl lenkimo (Subedi ir Vardy 1996)	17
1.6 pav. Suirimas dėl lenkimo su šlytimi (Subedi ir Vardy 1996)	17
1.7 pav. Suirimas dėl įstrižo kirpimo (Subedi ir Vardy 1996)	18
1.8 pav. Atraminė detalė (Hawkins 1968)	18
1.9 pav. Įstriži plyšiai tilto sijoje (Birrcher 2009)	19
1.10 pav. Plyšių susidarymas lenkiamose trumpose tiltų konstrukcijose (Birrcher 2009)	19
1.11 pav. Plyšių susidarymo pavyzdys (Rigotti 2002)	20
1.12 pav. Svarbiausiųjų įtempių veikimo trajektorijos ilgesnėje ir trumpesnėje sijos dalyje (Tuchscherer ir Birrcher 2011)	21
2.1 pav. Skaičiuojamoji schema pagal P. Nagarajano ir T. M. Pillai (Nagarajan ir Pillai 2008) modelį.....	22
2.2 pav. Trumpos sijos skaičiuojamoji schema pagal N. Zhango ir K. H. Tano (Zhang ir Tan 2007) modelį.....	25
2.3 pav. Trumpos sijos skaičiuojamoji schema pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) modelį	27
2.4 pav. Trumpos sijos skaičiuojamoji schema pagal G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) modelį.....	28
2.5 pav. Trumpos sijos skaičiuojamoji schema pagal C.Y. Tango (Tang 2006) modelį	30
2.6 pav. Elemento atsparumo skersinei jėgai skaičiuojamoji schema (STR 2.05.05:2005)	32
2.7 pav. Sijos su apkrova šalia atramos skaičiuojamoji schema (LST EN 1992-1-1:2005)	34
3.1 pav. Trumpose sijose atsirandantis arkos efektas (Su ir Chandler 2001).....	37
3.2 pav. Jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtaka trumpų sijų stiprumui	38
3.3 pav. Jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtaka trumpų sijų stiprumui	39
3.4 pav. Išilginio armavimo įtaka trumpų sijų stiprumui (pradiniai duomenys: $f_c = 36,3 \text{ MPa}$, $a/h=1$, $\rho_{sw} = 1,14 \%$).....	40
3.5 pav. Skersinio armavimo įtaka trumpų sijų stiprumui (pradiniai duomenys: $f_c = 36,3 \text{ MPa}$, $a/h=1$, $\rho_s = 0,19 \%$)	41
3.6 pav. Betono stiprio įtaka trumpų sijų stiprumui (pradiniai duomenys: $a/h=1$, $\rho_s = 0,34 \%$, $\rho_{sw} = 1,14 \%$)	43
4.1 pav. Betono kubelių bandymas	45

4.2 pav. Sijų bandinių armavimas: a) 3 bandiniai - $a/h = 1$, a) 3 bandiniai - $a/h = 0,5$	47
4.3 pav. Armatūros karkasas bandinio armavimui	48
4.4 pav. Betono teslos paruošimas	48
4.5 pav. Bandinių betonavimas	48
4.6 pav. Bandinių, skirtų betono savybėms nustatyti, betonavimas	49
4.7 pav. Trumpų sijų bandymo schema ir matuoklių išdėstymas	49
4.8 pav. Matuoklių išdėstymas eksperimentinėje bazėje	50
4.9 pav. Sijų bandymo eiga	50
4.10. Pirmos serijos bandinių apkrovų ir įlinkių kreivės	52
4.11 pav. Antros serijos bandinių apkrovų ir įlinkių kreivės	53
4.12 pav. Sijos SS1-1 suirimas, kai $a/h=1$, $\rho_l = 0,34\%$	54
4.13 pav. Sijos SS1-2 plyšių plitimas, kai $a/h=1$, $\rho = 0,75\%$	54
4.14 pav. Bandinio SS1-3 pleišėjimas, kai $a/h=1$, $\rho_l = 1,03\%$	55
4.15 pav. Sijos SS2-1 pleišėjimas, kai $a/h=0,5$, $\rho_l = 0,34\%$	56
4.16 pav. Sijos SS2-2 pleišėjimas, kai $a/h=0,5$, $\rho_l = 0,75\%$	57
4.17 pav. Sijos SS2-3 pleišėjimas, kai $a/h=0,5$, $\rho_l = 1,03\%$	58
4.18 pav. Pirmos serijos sijų svarbiausių deformacijų pasiskirstymas, kai $a/h = 1$	59
4.19 pav. Antros serijos sijų svarbiausių deformacijų pasiskirstymas, kai $a/h = 0,5$	60
4.20 pav. Sijos SS1-1 svarbiausios deformacijos ir jų krypties kampai	61
4.21 pav. Sijos SS1-2 svarbiausios deformacijos ir jų krypties kampai	62
4.22 pav. Sijos SS1-3 svarbiausios deformacijos ir jų krypties kampai	63
4.23 pav. Sijos SS2-1 svarbiausios deformacijos ir jų krypties kampai	65
4.24 pav. Sijos SS2-2 svarbiausios deformacijos ir jų krypties kampai	65
4.25 pav. Sijos SS2-2 svarbiausios deformacijos ir jų krypties kampai	66
5.1 pav. Trumpų sijų laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas ($2 \times \emptyset 8$, $\rho_l = 0,34\%$)	70
5.2 pav. Trumpų sijų laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas ($2 \times \emptyset 12$, $\rho_l = 0,75\%$)	71
5.3 pav. Trumpų sijų laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas ($2 \times \emptyset 14$, $\rho_l = 1,03\%$)	72

Lentelių sąrašas

3.1 lentelė. Analitinio skaičiavimo pradiniai duomenys	36
3.2 lentelė. Jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtaka trumpų sijų stiprumui	38
3.3 lentelė. Išilginės armatūros kiekio įtaka trumpų sijų laikomosios galios padidėjimui	40
3.4 lentelė. Skersinės armatūros įtaka trumpų sijų laikomosios galios padidėjimui	41
3.5 lentelė. Betono stiprio įtaka trumpų sijų laikomosios galios padidėjimui	42
4.1 lentelė. Eksperimentinės programos betono sudėtis	44
4.2 lentelė. Bandinių betono stiprio nustatymas	45
4.3 lentelė. Bandinių geometriniai ir medžiagų parametrai	47
4.4 lentelė. Eksperimentinių bandymų laikomosios galios suvestinė.....	51
4.5 lentelė. Pirmos serijos sijų svarbiausiųjų deformacijų palyginimas, kai veikia skirtinga apkrova	60
4.6 lentelė. Pirmos serijos sijų svarbiausiųjų deformacijų palyginimas, kai veikia skirtinga apkrova	64
5.1 lentelė. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas	68

IVADAS

Sparti gamybos plėtra lemia didėjančių statybų skaičių. Tai sudaro pagrindą moksliniams tyrimams ir leidžia gautus rezultatus pritaikyti ir išbandyti naujai statomuose objektuose. Viena iš pagrindinių statybinių medžiagų šiuolaikinėse statybose yra gelžbetonis. Ši kompozitinė medžiaga labai vertinama dėl plačių panaudojimo galimybių, ilgaamžiškumo ir didelio stiprio. Todėl gelžbetoninės konstrukcijos yra vienos iš sparčiausiai tobulėjančių ir daugiausiai tiriamų konstrukcijų. Siekiant geriau pažinti ir prognozuoti gelžbetoninių elementų elgseną veikiant apkrovai tiriami konkretūs elementai: nuo masyvių konstrukcijų iki atskirų elementų. Vienas iš tokių nepakankamai ištirtų elementų yra trumpos sijos, kuriose susidaro sudėtingas įtempių deformacijų būvis. Trumpos sijos „sijos–sienelės“ yra plačiai naudojami struktūriniai elementai daugeliui konstrukcijų, nuo daugiaaukščių pastatų iki masyvių atraminių konstrukcijų. Trumpos sijos atpažįstamos pagal santykinai mažą jėgos peties ir aukščio a/d santykį.

Mokslo problemos aktualumas

Kaip rodo žinomų projektavimo normų ir įvairių skaičiavimo modelių analizė, trumpų sijų įtempių pasiskirstymas ir deformacinės savybės yra nepakankamai išnagrinėtos, nėra sukurtos bendros, gerai pagrįstos metodikos joms skaičiuoti. Nėra vienos nuomonės, kaip skaičiuoti trumpų sijų laikomąją galią, kai jėgos peties ir aukščio santykis mažiau už 3 (Subedi ir Vardy 1996). Minėtų veiksnių visuma rodo, kad ši tema reikalauja papildomų teorinių ir eksperimentinių tyrimų. Todėl tikslinga atlikti literatūroje pateiktų metodų lyginamąją analizę. Taip pat reikalinga sukurti eksperimentinę programą, atlikti bandymus, palyginti analitinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatus ir nustatyti, kuris teorinis modelis yra tiksliausias.

Svarbiausias šio darbo tyrimo objektas yra gelžbetoninių trumpų armatūros kiekio bei jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtaka įtempių ir deformacijų būviui. Autoriai skirtingai nurodo a/h santykį, nuo kurio sija laikoma trumpa. Jėgos peties ir aukščio santykis $a/h < 2$, kai sija atremta ant dviejų atramų (Lu 2006). Autorius D. B. Bircheris (Bircher 2009) trumpos sijas charakterizuoja santykiu $a/h < 2$.

Analizuojama problema

Trumpose sijose veikiant apkrovai veikia sudėtingas įtempių ir deformacijų būvis, todėl sunku prognozuoti tokių elementų darbą esant kritinei apkrovai ir iš anksto numatyti suirimo tipą (Bircher 2009; Šalna 2008; 2002; Yang *et al.* 2003). Nėra priimta bendra reglamentuota trumpų sijų skaičiavimo metodika.

Skaičiavimams naudojantis įvairių autorių siūlomais metodais ir projektavimo normose pateiktomis rekomendacijomis gaunami rezultatai labai skiriasi (Tang ir Tan 2004; Tong ir Teng 2001; Foster ir Gilbert 1998). Skirtingose metodikose nevienodai vertinamos atrėmimo sąlygos, apkrovos perdavimo ir atrėmimo plokštelių dydžio reikšmė elemento įtempių pasiskirstymui, laikomajai galiai ir suirimo tipui (Zhang ir Tan 2007). Trumpose sijose pastebimas dydžio efektas, kuris vertinamas skirtingai (Cheng ir Tan 2006).

Tiksliui pasiekti keliami šie uždaviniai :

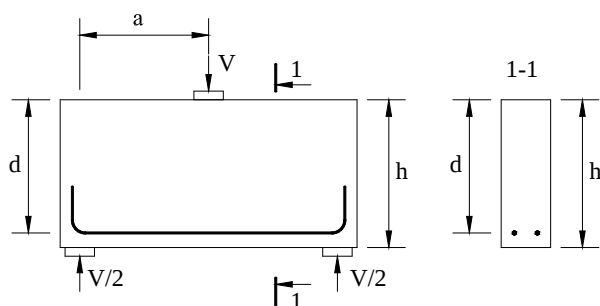
1. Atlikti išsamią literatūroje ir projektavimo normose pateiktų trumpų sijų skaičiavimo metodų analizę.
2. Įvairiais aspektais palyginti esamus skaičiavimo metodus ir nustatyti svarbiausius veiksnius, lemiančius įtempių ir deformacijų pasiskirstymą, laikomąją galią ir suirimo tipą trumpose sijose.
3. Pagal analitinės modelių analizės rezultatus nustatyti problemines vietas ir sudaryti eksperimentinių bandymų programą trumpų sijų įtempių ir deformacijų būviui ištirti.
4. Atlikti bandymus ir palyginti gautus rezultatus bei patikrinti, kuris teorinis modelis yra tiksliausias.
5. Ištirti trumpų sijų darbą veikiant apkrovai, suirimo tipus, plyšių kitimo pobūdį.

Pagrindinis šio darbo tikslas yra ištirti įtempių ir deformacijų pasiskirstymą trumpose sijose veikiant apkrovai ir nustatyti armatūros kiekio bei jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtaką jų kitimui.

1. TRUMPŲ SIJŲ PANAUDOJIMO IR SUIRIMO TIPŲ APŽVALGA

1.1. Konstrukcijos apibūdinimas

Daugelis autorių trumpas sijas apibūdina panašiai, skiriasi tik priimamas aukščio ir jėgos peties santykis. Trumpa sija yra charakterizuojama santykiu tarp atstumo nuo apkrovos pridėjimo vietos iki atramos a arba ir naudingo skerspjūvio aukščio d arba viso sijos aukščio h . Trumpos sijos skaičiuojamoji schema pateikta 1.1 pav. Trumpose sijose negalioja plokščių pjūvių hipotezė.



1.1 pav. Trumpos sijos skaičiuojamoji schema

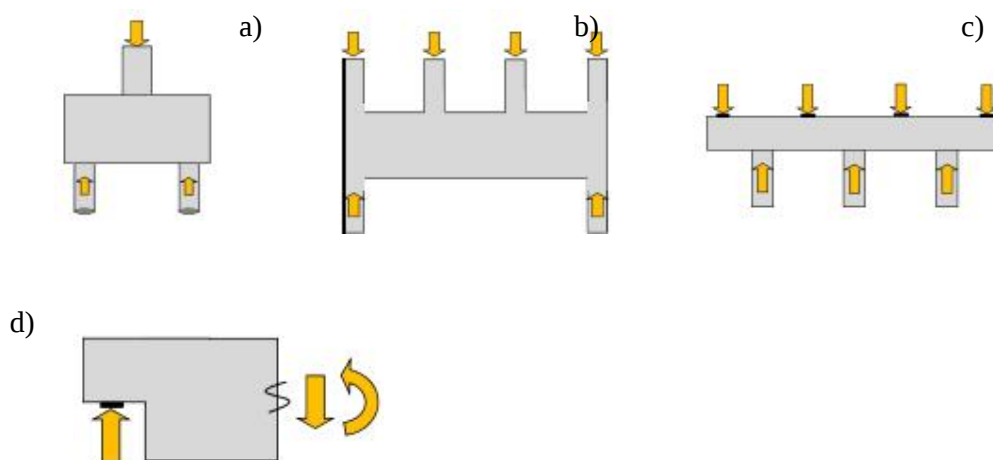
Trumpos sijos yra plačiai naudojami struktūriniai elementai daugeliui konstrukcijų, nuo aukštų pastatų iki masyvių atraminių konstrukcijų. Jos naudojamos kaip pamatų sijos, skersinės tiltų sijos, polių galvenos ir kai kurios sienos (Subedi ir Vardy 1996; Marti 1985; Kong *et al.* 1972; Tuchscherer 2008.). Gelžbetoninių rėmų kampai taip pat vertinami kaip trumpos sijos. Terminas trumpa sija atitinka kiekvieną siją, kurios jėgos peties ir aukščio santykis a/h yra mažesnis nei 3 (Su ir Chandler 2001; Subedi ir Vardy 1996, Besser *et al.* 1984). Sija yra laikoma trumpa, kai jėgos peties ir aukščio santykis yra mažesnis nei 2, kai sija atremta paprastai ant dviejų atramų (Smith ir Vantsiotis 1982, Tan *et al.* 2001; Zhang ir Tan 2007; Nagarajan ir Pillai 2008). Sija vertinama kaip trumpa, kai $a/d < 2,5$ (Shin *et al.* 1999; Kong 2003; Tsuchiya *et al.* 2002; Tang 2004; Tong ir Tang 2003; Yang ir Chung 2003). Dėl tokių matmenų proporcijų jėgos perdavimas tokiuose elementuose labai skiriasi nuo ilgų sijų ir jų stiprumas labiau priklauso nuo šlyties, o ne nuo lenkimo (Subedi 1986).

Literatūroje aprašyti bandymai rodo, kad dažniausiai trumpų sijų suirimas įvyksta dėl kirpimo įstrižame pjūvyje, bet yra ir kitų suirimo tipų (Ragowsky ir Macgregor 1986; Subedi ir Vardy 1996; Oh ir Shin 2001; Chemrouk ir Kong 2004).

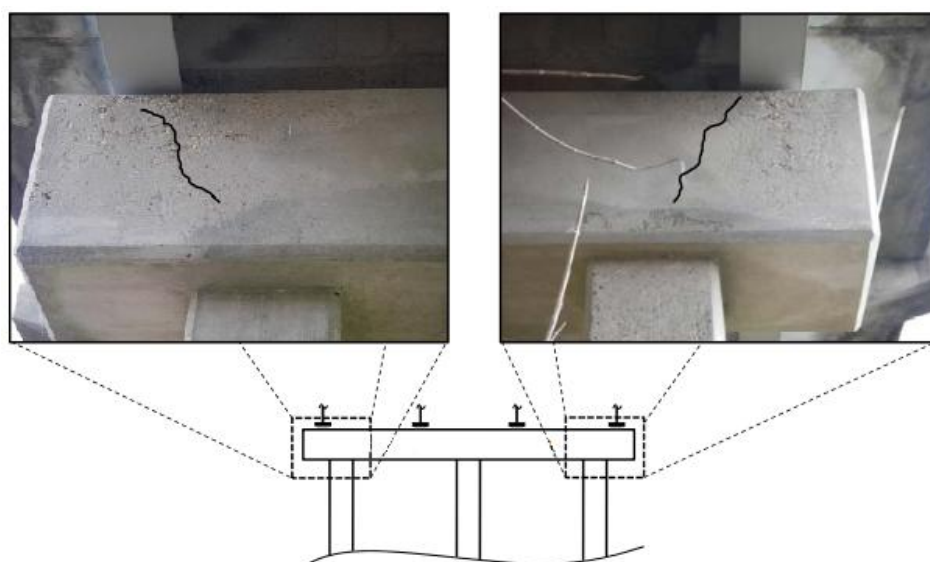
M. Rigotti (Rigotti 2002) teigia, kad trumpos sijos dažniausiai suyra dėl kirpimo įstrižame pjūvyje, kai $a/h \leq 2,32$.

1.2. Trumpų sijų praktiniai pavyzdžiai

Trumpos sijos statyboje dažnai naudojamos kaip pagrindiniai konstrukciniai elementai. Tai – polių galvenos, skersinės sijos, konsolės, kapiteliai, gembės ir kai kurios sienos (Collins ir Kuchma 1999; Bracci et al. 2000). Kai kurių trumpų sijų pavyzdžiai pateikti 1.2 – 1.4 pav.



1.2 pav. Trumpų sijų pavyzdžiai: a) polių galvenos; b) perdavimo sijos; c) skersinės sijos; d) konsolės (Bracci *et al.* 2000)



1.3 pav. Trumpa sija tilto konstrukcijoje (Bircher 2009)



1.4 pav. Trumpų sijų praktiniai pavyzdžiai (Tuchscherer 2008)

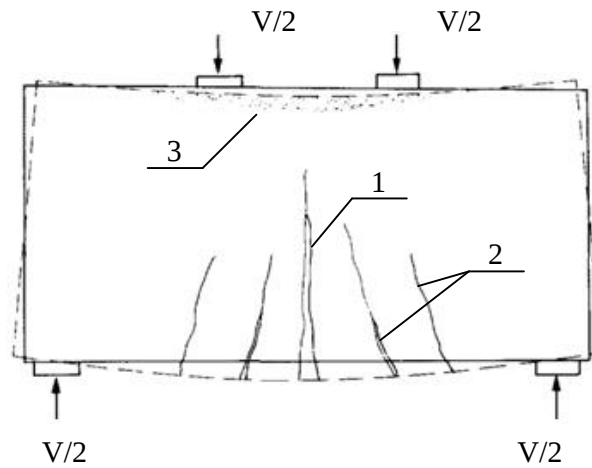
Iš apžvelgtų pavyzdžių matoma, kad trumpos gelžbetoninės sijos yra svarbūs ir dažnai naudojami konstrukciniai elementai.

1.3. Trumpų sijų suirimo tipai

G. T. Suiteris ir R. F. Manuelis (Suter ir Manuel 1971) ir N .K. Subedi ir E. Vardy (Subedi ir Vardy 1996) teigia, kad galimi 3 trumpų sijų surimo tipai:

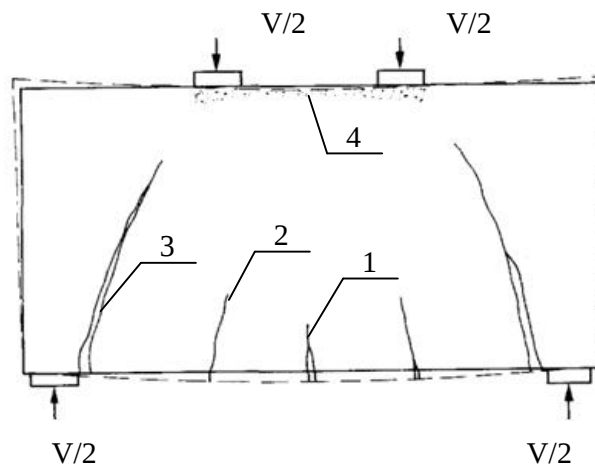
1. Suirimas dėl lenkimo (1.5 pav);
2. Suirimas dėl lenkimo ir šlyties (1.6 pav);
3. Suirimas dėl šlyties (1.7 pav);.

1. Esant nepakankamam armavimui apatinėje dalyje, todėl sija, kaip pavaizduota 1.5 pav. suyra nuo tempimo sijos ilgio viduryje. Tokio tipo trumpos sijos suirimas yra retas. Skaičiai ant schemos (1.5 pav.) nurodo plyšių susidarymo eiliškumą. Plyšiai pradeda atsiverti normaliniame pjūvyje. Kylant apkrovai nauji plyšiai atsiranda tolstant nuo centro link atramos.



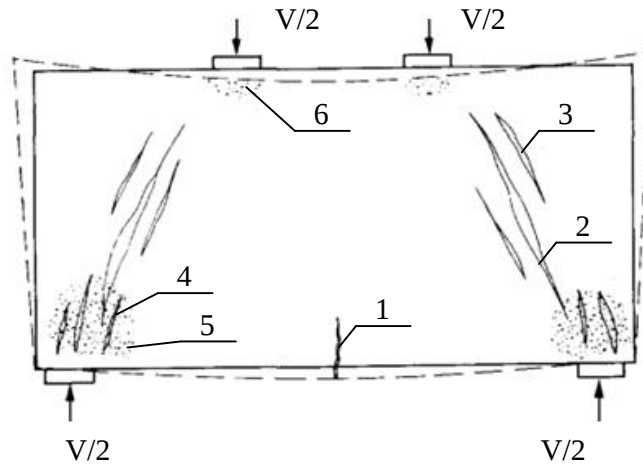
1.5 pav. Suirimas dėl lenkimo (Subedi ir Vardy 1996)

2. Antru atveju apatinėje dalyje yra vidutinis armatūros kiekis, todėl didėjant įstrižiams plyšiams atsiranda ir normaliniai plyšiai tarpatramio viduryje, jų susidarymas pavaizduotas 1.6 pav. Sija suyra dėl šlyties. Pagrindinis plyšys atsiranda įstrižai nuo atramos link apkrovos pridėjimo vietos.



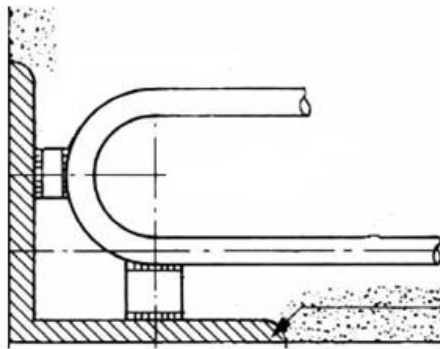
1.6 pav. Suirimas dėl lenkimo su šlytimi (Subedi ir Vardy 1996)

3. Pagrindinis plyšys taip pat tęsiasi tarp jėgos pridėjimo vietos ir atramos, bet jis didėja atvirkščiai (1.7 pav.). Plyšys buvo sukeltas daug trapesniu būdu nei pirmais dviem atvejais. Jis pradėjo didėti nuo sijos aukščio vidurio. Tai yra dažniausias trumpų sijų suirimo tipas.



1.7 pav. Suirimas dėl įstrižo kirpimo (Subedi ir Vardy 1996)

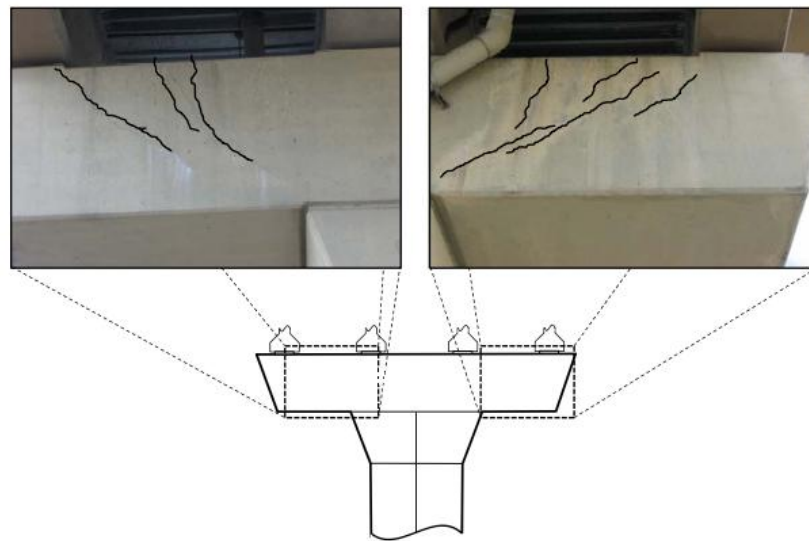
Veikiant apkrovai galimi vietinio gniuždymo atvejai ties apkrovos pridėjimo vietomis 6 zonoje ir ties atramomis 5 zonoje. Tai daro įtaką trumpų sijų įtempių ir deformacijų būviui bei mažina visos sijos laikomąją galią (Oh ir Shin 2001). Autoriai N. M. Hawkinsas (Hawkins 1968) ir N. K. Subedi ir E. Vardy (Subedi ir Vardy 1996) teigia, kad vietinio gniuždymo galima išvengti naudojant specialias detales ties atramomis (1.8 pav.). Atliekant bandymus ypatingas dėmesys turi būti skiriamas atrėmimo sąlygoms (Frosch 1999).



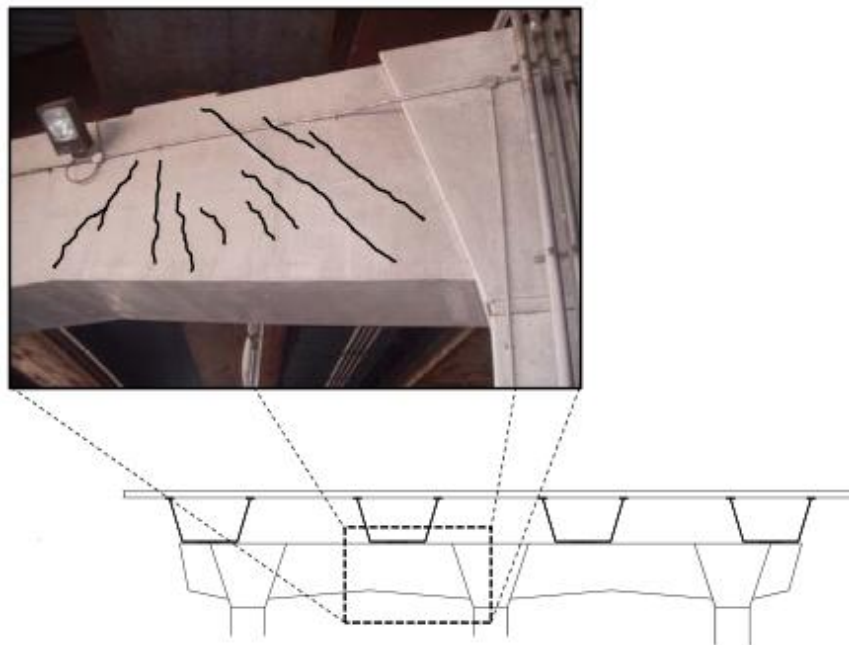
1.8 pav. Atraminė detalė (Hawkins 1968)

Kaip rodo literatūros šaltinių apžvalga, trumpų sijų suirimo tipą galima numatyti parenkant atitinkamą armavimo tipą ir armatūros kiekį. S. Tengas ir F. Kongas (Teng ir Kong 1997) teigia, kad didžiausią įtaką trumpų sijų stiprumui turi pagrindinė išilginė armatūra. Esant pakankamam armatūros kiekiui tempiamoje zonoje sija pradeda pleišėti ir suyra įstrižame pjūvyje (2 ir 3 tipai). Norint padidinti įstrižo pjūvio stiprumą ir sumažinti pleišėjimą, trumpos sijos turi būti armuojamos skersine armatūra, kurios tipas ir išdėstymas kiekvienu atveju parenkamas atskirai. (Tan et al. 1997). Trumpų sijų stiprumą ir suirimo tipą labiausiai lemia jėgos peties ir aukščio a/h santykis (Kong et al. 1995).

Trumpų sijų pleišėjimo pavyzdžiai pateikti 1.9 ir 1.10 pav.



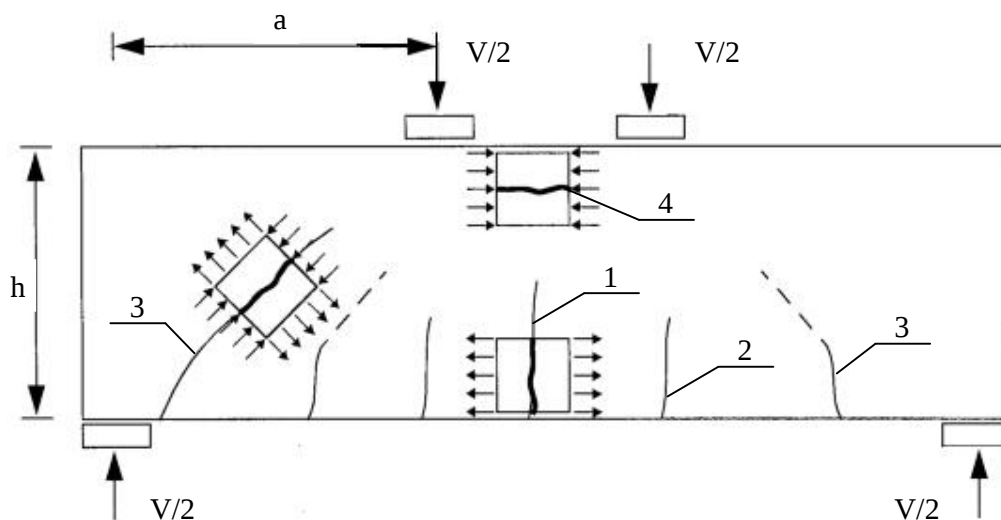
1.9 pav. Įstriži plyšiai tilto sijoje (Bircher 2009)



1.10 pav. Plyšių susidarymas lenkiamose trumpose tiltų konstrukcijose (Bircher 2009)

Plyšių susidarymo modelis pagal M. Rigotti (Rigotti 2002) pateiktas 1.11 pav.: pirmas plyšys atsiranda normaliniame pjūvyje sijos tarpatramio viduryje dėl to, kad tempiamoje zonoje pasiekiami ribiniai betono tempimo įtempiai. Plyšys iš sijos centro plinta vertikaliai aukštyn.

Antro tipo plyšiai atsiranda dėl sijoje veikiančio lenkimo momento ir šlyties. Jie plečiasi vertikaliai aukštyn, kol pasiekia pagrindinius armatūros strypus, tada užlinksta 45° kampu. Tokio tipo plyšiai atsiranda dėl dviašio tempimo ir gniuždymo įtempių būvio.



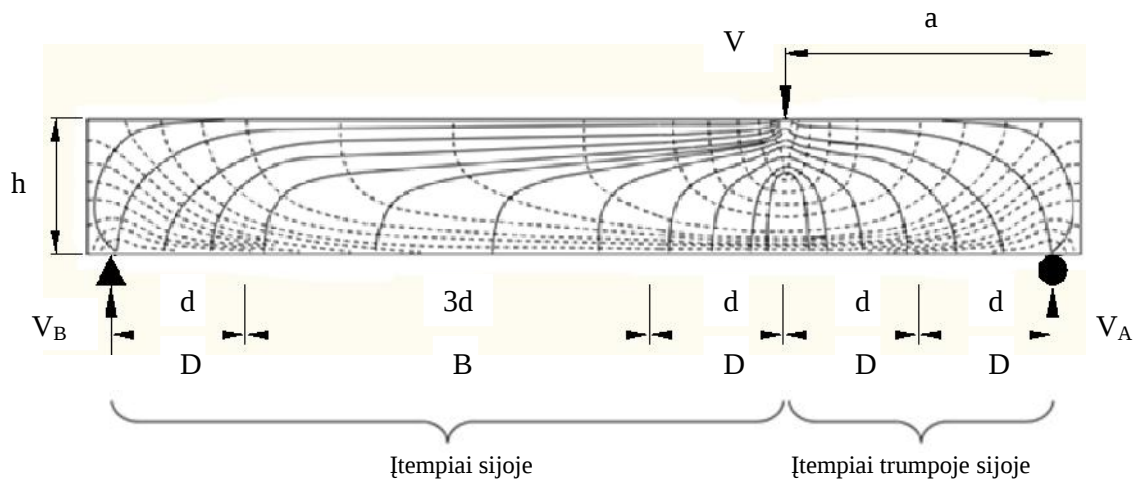
1.11 pav. Plyšių susidarymo pavyzdys (Rigotti 2002)

Paskutiniai atsiveria įstriži plyšiai, pažymėti 3 numeriu. Jie plečiasi nuo atramos įstrižai link apkrovos pridėjimo vietos (Rigotti 2002). Plyšiai susidaro, nes apkrauta sija veikia kaip arka ir atsiranda tada, kai įtempiai pasiekia ribinius betono tempimo įtempius f_{ct} (Kong et al. 1995).

1.4. Įtempių pasiskirstymas trumpose sijose

Vietos, kuriose įtempiai skerspjūvio aukštyje pasiskirsto netiesiškai vadinamos D sritimis. Sritys, kuriose įtempiai pasiskirsto tiesiškai, vadinamos B sritimis (Tuchscherer ir Bircher 2011). Nesimetriškai apkrauta sija su svarbiausiųjų įtempių trajektorijomis pateikta 1.12 pav.

Sijos šlyties zonoje yra dviašis įtempių būvis, sukeliantis įstrižo kirpimo jėgą. Jei sijos skersinės armatūros kiekis nepakankamas, tai įstrižo pjūvio atlaikoma kirpimo jėga priklauso nuo betono kerpamojo stiprio (Bircher 2009).



1.12 pav. Svarbiausių įtempių veikimo trajektorijos ilgesnėje ir trumpesnėje sijos dalyje
(Tuchscherer ir Bircher 2011)

Jeigu skersinio armavimo tinklo horizontalus ir vertikalus armavimas yra pakankamas, tada ir betonui supleišėjus jėgą perima armatūra. Kirpimo jėgos dydis priklauso nuo vertikalio ir horizontalio armavimo ir šlyties zonos geometrijos (Kong 2003).

1.5. Dydžio efektas trumpose sijose

Dydžio efektas trumpoms sijoms pasireiškia šlyties laikomosios galios pastovumu. Tai paaiškinama tuo, kad įstriži spyriai, kurie susidaro trumpoje sijoje, veikiant apkrovai, yra panašūs į gniuždomas betonines prizmes, kurių stipris yra pastovus. Nustatyta, kad bandinio aukščio padidėjimas neturi reikšmės galimai suirimo zonai, tai reiškia, kad elemento stiprumo padidėjimas yra gana nežymus (Zhang ir Tan 2007). Didžiausią įtaką bandinio laikomajai galiai turi atstumas nuo atramos iki apkrovos pridėjimo vietos (Mitchell et al. 2004).

K. H. Tangas ir G. H. Chengas (Tang ir Cheng 2006) teigia, kad ištyrus seriją prizminių sijų, kurioje skerspjūvis ir ilgis proporcingai didinami, laikomoji galia yra beveik nepriklausoma nuo dydžio, kai veikia šlyties jėgos. Taip pat nustatyta, kad atrėmimo ir apkrovimo plokštelės lemia įstrižo spyrio matmenis ir mazginės zonos dydį, taigi tai turi didelį poveikį visam elemento atsparumui šlyčiai.

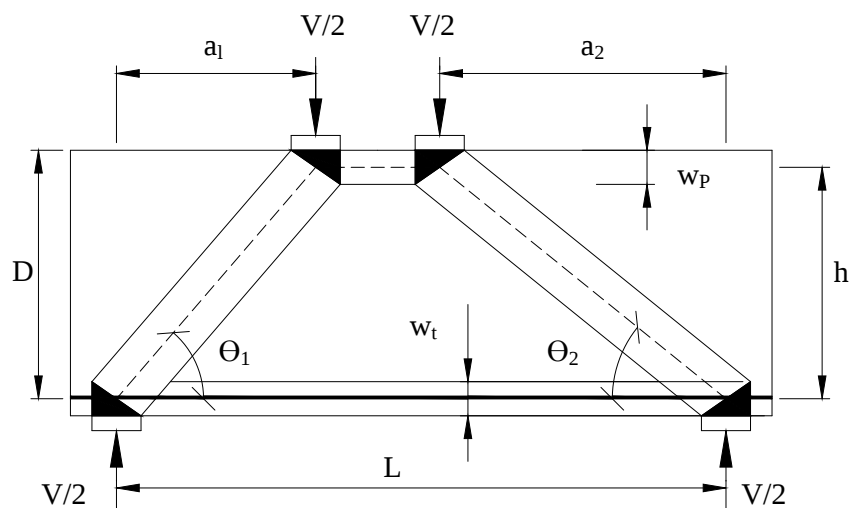
1.6. Pirmo skyriaus išvados

1. Atlikus literatūros šaltinių analizę nustatyta, kad trumpos sijos yra dažnai naudojami ir svarbūs konstrukciniai elementai.
2. Trumpų sijų suirimo tipas priklauso nuo atlaikomos įstrižo kirpimo jėgos ir pagrindinės armatūros laikomosios galios. Sijos įstrižo pjūvio stiprumas gali būti kontroliuojamas priklausomai nuo betono f_c ir nuo skersinės armatūros kiekio f_{sw} .
3. Trumpose sijose svarbiausieji įtempiai pasiskirsto skirtingai nei ilgose sijose. Trumpos sijos šlyties zonoje yra dviašis įtempių būvis, sukeliantis įstrižo kirpimo jėgą.

2. TRUMPŲ SIJŲ LAIKOMOSIOS GALIOS SKAIČIAVIMO MODELIŲ APŽVALGA

2.1. Trumpų sijų skaičiavimas pagal P. Nagarajano ir T. M. Pillai (Nagarajan ir Pillai 2008) modelį

Gniuždomos ir tempiamos zonos yra idealizuojamos ir paverčiamos į ekvivalentiškus spyrius ir stygą, kurie yra sujungti viename taške. Metodus dažniausiai naudojamas sijų D zonos (1.12 pav.) tyrimams ir detalizavimui, rėmų kampams, kapiteliams, gembėms ir toms vietoms, kur staiga keičiasi skerspjūvis. Pagrindiniai komponentai yra spyris, styga ir mazgas. Spyris yra gniuždomas elementas. Elementų išdėstymas pavaizduotas 2.1 pav.



2.1 pav. Skaičiuojamoji schema pagal P. Nagarajano ir T. M. Pillai (Nagarajan ir Pillai 2008) modelį

Spyrio laikomoji galia:

$$C = 0,45 \cdot f_{ck} \cdot b_s \cdot w_s \cdot b; \quad (3.1)$$

čia

f_{ck} – charakteristinis betono gniuždymo stipris;

b_s – įtempių mažinimo faktorius, kuris įvertina skirtingą spyrio tipą;

w_s – spyrio plotis;

b – sijos plotis;

Stygos laikomoji galia:

$$T = 0,87 \cdot f_y \cdot A_{st,b}; \quad (3.2)$$

Sulygę spyrio ir stygos laikomasias galias gauname reikiamą armatūros skerspjūvio plotą:

$$A_{st,b} = \frac{0,45 \cdot f_{ck} \cdot b_s \cdot w_s \cdot b \cdot \cos \alpha}{0,87 \cdot f_y}; \quad (3.3)$$

$$r_{t,b} = 100 \cdot \frac{A_{st,b}}{bd} = \frac{51,72 \cdot f_{ck} \cdot b_s \cdot w_s \cdot \cos \alpha}{f_y \cdot d}. \quad (3.4)$$

čia

$A_{st,b}$ – tempiamos armatūros skerspjūvio plotas;

α – spyrio pasvirimo kampas;

f_y – armatūros stipris pagal takumo ribą;

d – sijos naudingas aukštis.

Jei $A_{st} < A_{st,b}$, tada tempiama armatūra pasieks takumo ribą prieš tai, kai spyris pasieks savo laikomąją galią ir sija suirs dėl lenkimo.

Sijos lenkimo laikomosios galios skaičiavimas:

$$V_F = V_A + V_B = T \tan \alpha_1 + T \tan \alpha_2 = 0,87 \cdot f_y \cdot A_{st} \cdot (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2); \quad (3.5)$$

Tuo atveju, kai jėgos pridėtos simetriškai, $\tan \alpha_1 = \tan \alpha_2$. Sijos lenkimo laikomoji galia apskaičiuojama pagal (3.6) formulę.

$$V_F = T \tan \alpha_1 + T \tan \alpha_2 = 0,87 \cdot f_y \cdot A_{st} \cdot \left(\frac{2(D - 0,9 \cdot 2e)}{a} \right). \quad (3.6)$$

Jei $A_{st} > A_{st,b}$, tada spyris suirs prieš tai, tempiama armatūra pasieks takumo ribą. Sija suirs dėl šlyties.

Trumpos sijos šlyties laikomoji galia bus didžiausia iš atraminių reakcijų:

$$V_S = R_{\max} = C \cdot \sin \alpha = 0,45 \cdot f_{ck} \cdot b_s \cdot w_s \cdot b \cdot \sin \alpha; \quad (3.7)$$

$$w_t = 0,8 \cdot w_p; \quad (3.8)$$

$$w_t = 2 \cdot e; \quad (3.9)$$

$$w_s = w_t \cdot \cos \alpha + L_B \cdot \sin \alpha; \quad (3.10)$$

$$h = D - \frac{w_p}{2} - \frac{w_t}{2} = D - 0,9 \cdot w_t; \quad (3.11)$$

$$\tan \alpha = \frac{h}{a}; \quad (3.12)$$

$$d = D - e; \quad (3.13)$$

čia

e – apsauginis betono sluoksnis;

w_t – stygos plotis;

w_p – horizontalaus spyrio plotis;

L_B – atrėmimo plokštelės plotis;

D – sijos aukštis;

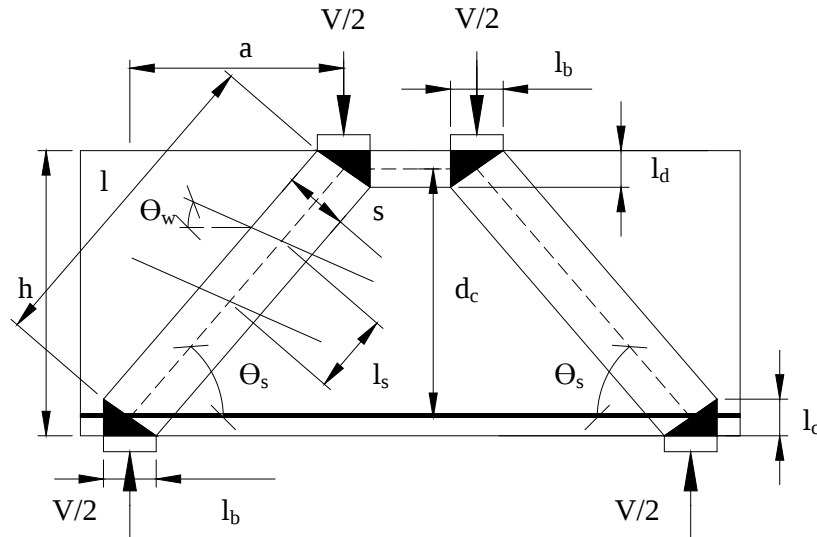
a – jėgos petys.

Sudėję šlyties ir lenkimo laikomąsias galias gauname bendrą sijos laikomąją galią:

$$V = V_s + V_f. \quad (3.14)$$

2.2. Trumpų sijų skaičiavimas pagal N. Zhango ir K. H. Tano (Zhang ir Tan 2007) modelį

Norėdami įvertinti skersinio armavimo poveikį autoriai suformulavo bendrą spyrio ir stygos modelį tiek įtemptoms, tiek neįtemptoms trumpoms sijoms. Skaičiuojamoji schema pateikta 2.2 pav.



2.2 pav. Trumpos sijos skaičiuojamoji schema pagal N. Zhango ir K. H. Tano (Zhang ir Tan 2007) modelį

Galutinė šlyties jėga V apskaičiuojama pagal (3.15) formulę:

$$V = \frac{1}{\frac{2 \cdot \sin 2q_s}{f_t \cdot A_c} + \frac{\sin q_s}{f_c \cdot A_{str}}}; \quad (3.15)$$

čia

q_s – įstrižo spyrio posvyrio kampas;

f_c – betono cilindrinis gniuždymo stipris;

A_c – sijos skerspjūvio plotas;

A_{str} – įstrižo spyrio skerspjūvio plotas;

f_t – apatinės mazgo zonos tempimo galia.

Pirmas narys įvertina tempiamą armatūrą, antras – tinklo armatūrą ir trečias – supleišėjusio betono tempimo stiprį.

$$f_t = \frac{4A_s f_y \sin q_s}{A_c} + \frac{f_{yw} A_{sw} \sin(q_s + q_w)}{A_c} + 0,31 \sqrt{f_c} \left(\frac{e_{cr}}{e_1} \right)^{0,4}; \quad (3.16)$$

čia

A_s, A_{sw} – išilginės ir tinklo armatūros suminis skerspjūvio plotas;

f_y, f_{yw} – atitinkamas išilginės ir skersinės armatūros stipris;

q_w – tinklo armatūros posvyrio kampas nuo horizontalės;

e_{cr} – betono deformacija skilimo metu, $e_{cr} = 0,00008$;

e_1 – betoninio spyrio deformacija.

$$e_1 = e_s + (e_s + e_2) \cot^2 q_s; \quad (3.17)$$

čia

e_s – išilginės armatūros tempimo deformacija;

e_2 – betoninio spyrio viršaus gniuždymo deformacija. Paprastai normalaus stiprio betonui $e_2 = 0,002$.

I (3.15) lygtį įstačius visų narių reikšmes gaunama:

$$V = \frac{1}{\frac{2 \cdot \sin 2q_s}{\frac{4A_s f_y \sin q_s}{A_c} + \frac{f_{yw} \cdot A_{sw} \cdot \sin(q_s + q_w)}{A_c} + 0,31\sqrt{f_c} \left(\frac{e_{cr}}{e_s + (e_s + e_2) \cot^2 q_s} \right)^{0,4} \cdot A_c} + \frac{\sin q_s}{f_c \cdot A_{str}}}; \quad (3.18)$$

$$d_c = h - c; \quad (3.19)$$

$$A_{str} = b \cdot l_b \cdot \sin q_s; \quad (3.20)$$

čia

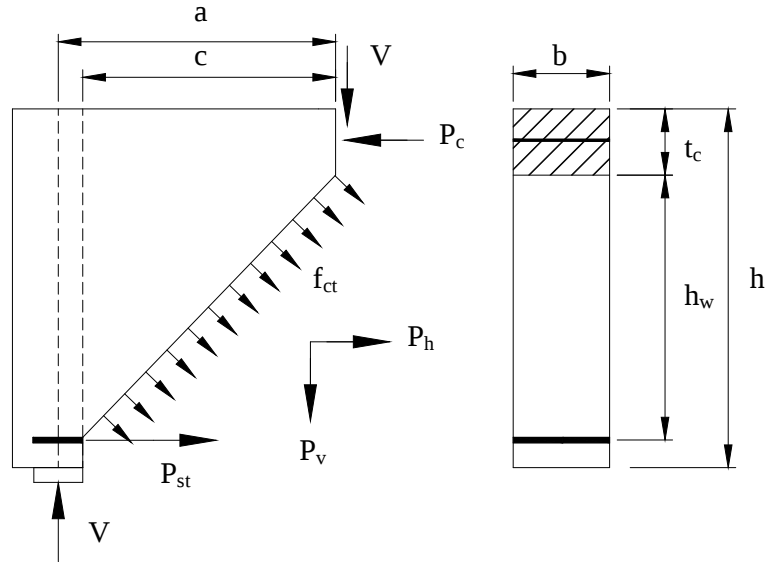
c – apsauginis betono sluoksnis;

d_c – atstumas nuo armatūros centro iki viršutinio spyrio centro;

l_b – atrėmimo plokštelės plotis;

2.3. Trumpų sijų skaičiavimas pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) modelį

Modelio skaičiuojamoji schema pateikta 2.3 pav.



2.3 pav. Trumpos sijos skaičiuojamoji schema pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) modelį

Laikomoji galia apskaičiuojama pagal (3.21) formulę.

$$V = \frac{(h_w^2 + c^2 + h_w t_c)}{a} \cdot b \cdot f_{ct} + \frac{(2h_w + t_c)}{a} \cdot P_{st} + \frac{h_w + t_c}{a} \cdot P_h + \frac{c}{a} \cdot P_v; \quad (3.21)$$

čia

a – atstumas nuo atraminės plokštelės centro iki apkrovos plokštelės krašto;

c – šlyties zonos plotis;

t_c – gniuždomos zonos aukštis;

h_w – šlyties zonos aukštis;

d – efektyvusis aukštis;

t_c – gniuždomos zonos aukštis;

f_y, f_{sy} – išilginės ir skersinės armatūros stipriai;

f_{ct} – betono tempiamasis stipris;

P_h – horizontali dedamoji;

P_v – vertikali dedamoji;

P_{st} – pagrindinės tempiamos armatūros dedamoji.

$$P_h = A_h \cdot f_{sy} ; \quad (3.22)$$

$$P_v = A_v \cdot f_{sy} ; \quad (3.23)$$

$$P_{st} = A_{st} \cdot f_y ; \quad (3.24)$$

čia

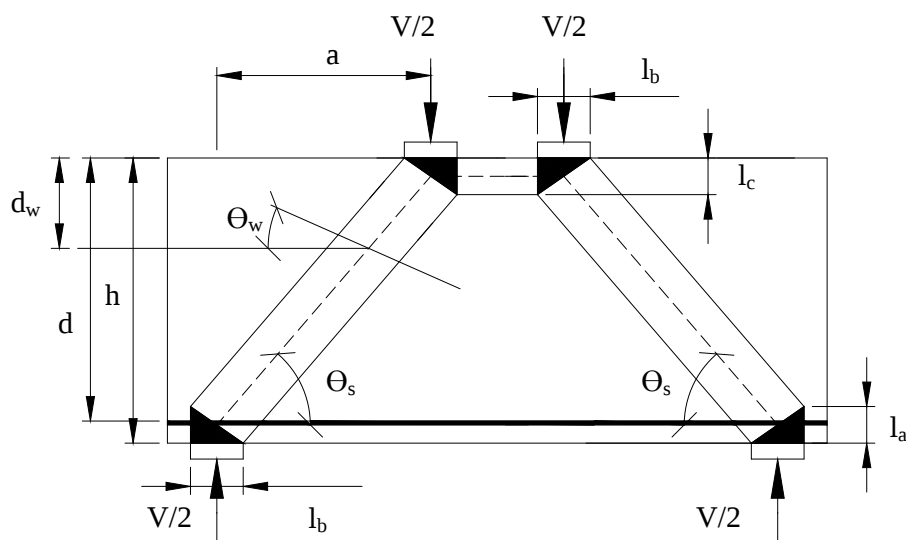
A_h – horizontalios tinklo armatūros plotas;

A_v – skersinės armatūros plotas;

A_{st} – tempiamos išilginės armatūros plotas;

2.4. Trumpų sijų skaičiavimas pagal G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) modelį

Modelyje nurodoma, kad įtempių laukas pasiskirsto ties spyrių susidarymo vietomis. Skaičiuojamoji schema pateikta 2.4 pav.



2.4 pav. Trumpos sijų skaičiuojamoji schema pagal G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) modelį

$$V = \frac{1}{\frac{2 \cdot \sin 2q_s}{f_t \cdot A_c} + \frac{\sin q_s}{u \cdot f_c \cdot A_{str}}} ; \quad (3.25)$$

čia

q_s – įstrižo spyrio posvyrio kampas;

f_c – betono gniuždymo stipris;

A_c – sijos skerspjūvio plotas;

A_{str} – įstrižo spyrio skerspjūvio plotas;

f_t – apatinės mazgo zonos tempimo galia;

u – efektyvumo koeficientas, įvertinantis dydžio efektą.

$$f_t = \frac{2A_s f_y \sin q_s}{\frac{A_c}{\sin q_s}} + \frac{2 \cdot f_{yw} A_{sw} \sin(q_s + q_w)}{\frac{A_c}{\sin q_s}} \cdot \frac{d_w}{d} + 0,5 \cdot \sqrt{f_c}; \quad (3.26)$$

Pirmas narys įvertina tempiamą armatūrą, antras – skersinę armatūrą, trečias – betono tempimo stiprį.

čia

A_s, A_{sw} – išilginės ir tinklo armatūros suminis skerspjūvio plotas;

f_y, f_{yw} – atitinkamas išilginės ir tinklo armatūros takumo stipris;

q_w – tinklo armatūros posvyrio kampas nuo horizontalės;

d_w – atstumas nuo sijos viršaus iki skersinės armatūros susikirtimo su įstrižo spyrio centru;

$$k = \sqrt{\frac{f_y}{f_t}} \cdot \frac{\sqrt{p}}{2}; \quad (3.27)$$

$$z = 0,5 + \sqrt{\frac{k \cdot d_s}{l_s}} \leq 1,2; \quad (3.28)$$

$$x = 0,8 + \frac{0,4}{\sqrt{1 + (l - s) / 50}}; \quad (3.29)$$

$$u = z \cdot x; \quad (3.30)$$

čia

k – armavimo faktorius;

z – efektyvumo faktorius;

x – efektyvumo faktorius;

d_s – minimalus išilginės armatūros skersmuo;

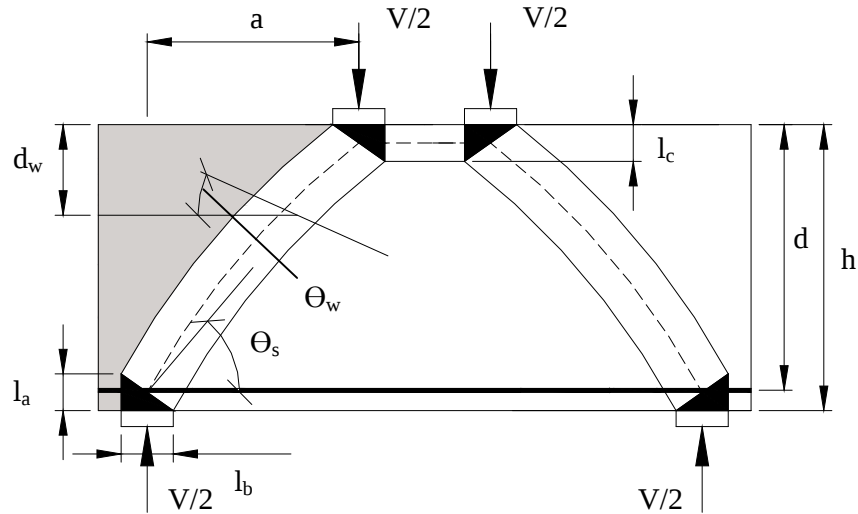
l – spyrio ilgis;

l_s – atstumas tarp skersinės armatūros strypų;

s – spyrio plotis.

2.5. Laikomosios galios skaičiavimas pagal C. Y. Tango (Tang 2004) modelį

Modelio skaičiuojamoji schema pateikta 2.5 pav.



2.5 pav. Trumpos sijos skaičiuojamoji schema pagal C.Y. Tango (Tang 2006) modelį

Trumpos sijos įstrižo pjūvio stiprumas apskaičiuojamas pagal (3.31) formulę.

$$V = \frac{1}{\frac{1}{V_{dc}} + \frac{1}{V_{ds}}} ; \quad (3.31)$$

čia

V_{dc} – įstrižo spyrio gniuždymo stipris;

V_{ds} – įstrižo spyrio skilimo stipris;

$$V_{dc} = f_c \cdot A_{str} \cdot \sin q ; \quad (3.32)$$

$$V_{ds} = f_{ct} \cdot A_{ct} \cdot \frac{1}{2 \cdot \cos q_s} + f_{yw} \cdot A_{sw} \cdot \frac{d_w - 0,5 \cdot l_c \cdot \sin(q_w + q_s)}{z_s \cdot \cos q_s} + f_y \cdot A_s \cdot \tan q_s ; \quad (3.33)$$

čia

f_{ct} – betono tempimo stipris;

f_c – betono gniuždymo stipris;

A_{ct} – įstrižo spyrio skerspjūvio plotas;

q_s – įstrižo spyrio posvyrio kampas;

q_w – skersinės armatūros posvyrio kampas;

A_c – sijos skerspjūvio plotas;

A_s, A_{sw} – išilginės ir tinklo armatūros skerspjūvio plotas;

f_y, f_{yw} – atitinkamas išilginės ir tinklo armatūros stipris;

d_w – atstumas nuo sijos viršaus iki skersinės armatūros susikirtimo su įstrižo spyrio centru;

z_s – atstumas tarp sijos tempiamos ir gniuždomos armatūros centrų;

l_c – viršutinio horizontalaus spyrios plotis, $l_c = l_a$;

l_a – stygos plotis.

$$A_{str} = b_w \cdot (l_a \cdot \cos q_s + l_b \cdot \sin q_s) ; \quad (3.34)$$

$$A_{ct} = \frac{b_w \cdot z_s}{\sin q_s} ; \quad (3.35)$$

$$l_a = 2 \cdot (h - d) . \quad (3.36)$$

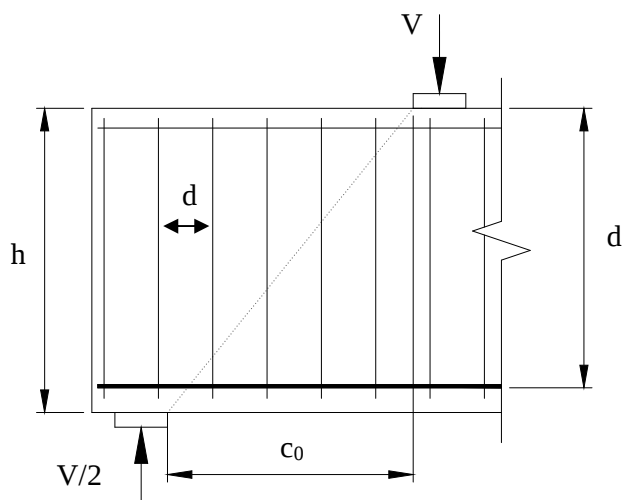
2.6. Trumpų sijų skaičiavimas pagal projektavimo normas

2.6.1. Trumpų sijų skaičiavimas pagal STR (STR 2.05.05:2005)

Sijų, apkrautų viena arba dviem sutelktomis jėgomis, nutolusiomis nuo atramų ne toliau nei d , taip pat trumpų sijų, kurių tarpatramis $l \leq 2d$ atsparumą skersinėms jėgoms rekomenduojama apskaičiuoti pagal betono zonos tarp apkrovos ir atramos gniuždymo stiprį kaip elementų su skersinės armatūra. Galima skaičiuoti ir kaip elementus be skersinės armatūros. Elementų įstrižo pjūvio atsparumą skersinių jėgų atžvilgiu reikia patikrinti, atsižvelgiant į betono gniuždymą STR (STR 2.05.05:2005).

2.6.1.1 Įstrižo pjūvio laikomosios galios skaičiavimas kaip elementų su skersine armatūra

Skaičiuojamoji schema pateikta 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Elemento atsparumo skersinei jėgai skaičiuojamoji schema (STR 2.05.05:2005)

Įstrižo pjūvio laikomoji galia skaičiuojama pagal (3.37) formulę:

$$V_{Rd,c} = \frac{j_{c2} \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d^2}{c_0} \leq V_{Ed}; \quad (3.37)$$

čia

j_{c2} – koeficientas (STR 2.05.05:2005, 15 lentelė);

f_{ctd} – skaičiuotinis betono tempimo stipris;

b – sijos plotis;

d – sijos naudingas aukštis;

c_0 – įstrižo pjūvio projekcija į skerspjuvio išilginę ašį.

$$c_0 = \sqrt{\frac{j_{c2} \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d^2}{n_{sw}}}; \quad (3.38)$$

čia

n_{sw} – sankabų ilgio vienetu atlaikoma jėga;

$$n_{sw} = \frac{f_{ywd} \cdot A_{sw}}{s_w}; \quad (3.39)$$

čia

f_{ywd} – skersinės armatūros stipris;

A_{sw} – skersinės armatūros plotas viename pjūvyje;

s_w – atstumas statmena kryptimi tarp skersinės armatūros strypų;

2.6.1.2 Trumpų sijų skaičiavimas pagal betono zonos tarp apkrovos ir atramos gniuždymo stiprį

Betono juostos tarp apkrovos pridėjimo vietos ir atramos gniuždymo stipris apskaičiuojamas pagal (3.40) formulę.

$$V_{Rd,cc} = 0,8 \cdot f_{w2} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot l_c \cdot \sin \alpha; \quad (3.40)$$

čia

f_{w2} – koeficientas, kurio įvertinamas skersinės armatūros išdėstymas;

f_{cd} – betono gniuždymo stipris;

E_s – armatūros plieno tamprumo modulis;

b – sijos plotis;

l_c – įstrižos gniuždomos juostos plotis;

α – kampas tarp gniuždomos juostos ir horizontalės.

$$l_c = l_{sup} \cdot \sin \alpha; \quad (3.41)$$

čia

l_{sup} – krūvio perdavimo ploto ilgis išilgai sijos.

$$f_{w2} = 1 + 5 \cdot a_1 \cdot r_{w1}; \quad (3.42)$$

Skersinio armavimo koeficientas:

$$r_{w1} = \frac{A_{sw}}{s_w \cdot b}; \quad (3.43)$$

čia

A_{sw} – skersinės armatūros, esančios vienoje plokštumoje skerspjūvio plotas;

s_w – atstumas statmena kryptimi tarp skersinės armatūros;

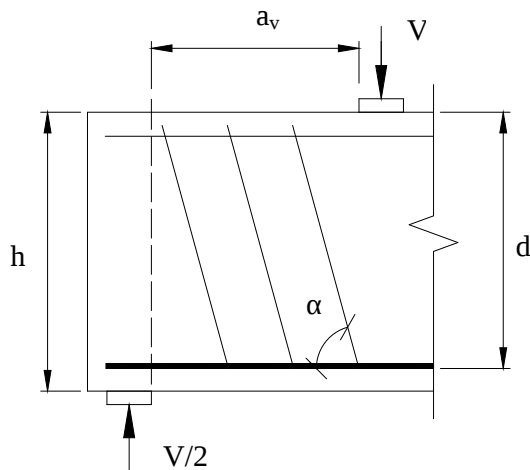
E_s – armatūros plieno tamprumo modulis;

b – sijos plotis;

a_1 – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis.

2.6.2. Trumpų sijų skaičiavimas pagal Eurokodą (LST EN 1992-1-1:2005)

Skaičiuojamoji schema pateikta 2.7 pav.



2.7 pav. Sijos su apkrova šalia atramos skaičiuojamoji schema (LST EN 1992-1-1:2005)

2.6.2.1 Sijų skaičiavimas, kai apkrova pridėta šalia atramos

Sijų be skersinės armatūros, kuriose apkrova veikia viršutinę pusę $0,5d \leq a_v \leq 2d$ skersinė jėga turi atitikti sąlygą:

$$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot b_w \cdot d \cdot n \cdot f_{cd} ; \quad (3.44)$$

čia

b_w – sijos plotis;

d – naudingas skerspjūvio aukštis;

n – supleišėjusio betono stiprio mažinimo koeficientas;

f_{cd} – skaičiuotinis betono stipris.

Elementuose, kuriuose vertinama skersinė armatūra, o apkrova veikia viršutinę dalį ($0,5d \leq a_v \leq 2d$) skersinė jėga turi atitikti sąlygą:

$$V_{Ed} \leq A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha ; \quad (3.45)$$

čia

A_{sw} – skersinės armatūros, kertančios įstrižą plyšį, skerspjūvio plotas;

f_{ywd} – skersinės armatūros skaičiuotinis stipris pagal takumo ribą;

α – kampas tarp skersinės armatūros ir skersinei jėgai statmenos sijos ašies.

Norint įvertinti ir betono ir skersinės armatūros darbą formulės (3.44) ir (3.45) sudedamos ir gaunama bendra laikomoji jėga.

2.7. Antro skyriaus išvados

1. Atlikta literatūros šaltinių apžvalga parodė, kad skaičiuojant trumpų sijų laikomąją galią nėra bendros metodikos. Visi apžvelgti modeliai yra empiriniai ar pusiau empiriniai, sukurti analizuojant atliktų eksperimentinių bandomų rezultatus ir remiantis ankstesnių autorių darbais.
2. Visuose modeliuose tiriamas trumpų sijų įtempių ir deformacijų būvis ir stiprumas įstrižame pjūvyje. Laikomoji galia siejama su tuo, kad dalį veikiančios apkrovos perima įstrižoje juostoje, tarp apkrovos ir atramos esantis betonas, o kita dalis tenka skersinei armatūrai. Atskiruose modeliuose jėgos dalis, kurią atlaiko betonas ir skersinė armatūra vertinama skirtingai.
3. Visų aptartų autorių metodai paremti arkos efektu trumpose sijose, kur didžiausią įtaką turi įstrižo spyrio geometrija, atrėmimo sąlygos, skersinio armavimo tipas ir strypų išdėstymas. Visuose modeliuose svarbiausi parametrai yra naudingas sijos aukštis, išilginis ir skersinis armavimas.
4. Eurokode (LST EN 1992-1-1:2005) ir STR (STR 2.05.05:2005) siūloma trumpas sijas skaičiuoti kaip elementus be skersinės armatūros, įvertinant tarp apkrovos ir atramos esančios įstrižos juostos betono gniuždymo stiprį. Skersinio armavimo įtaka vertinama atskirai.
5. Autorių N. Zhango ir K. H. Tano (Zhang ir Tan 2007) ir G. H. Chengo ir H. Tano (Cheng ir Tan2006) modeliuose perskaičiuojama spyrio zonos betono tempimo stipris, o STR (2005), C. Y. Tango (Tang 2004) ir N. K. Subedi (Subedi 1988) modeliuose tiesiogiai vertinamas betono tempimo stipris.

3. TRUMPŲ SIJŲ SKAIČIAVIMO MODELIŲ PARAMETRINĖ ANALIZĖ

Visi apžvelgti modeliai yra empiriniai ar pusiau empiriniai, sukurti, analizuojant atliktų eksperimentinių badymų rezultatus ir remiantis ankstesnių autorių darbais. Vyraujantys parametrai, į kuriuos atsižvelgiama visuose modeliuose, yra jėgos peties ir aukščio santykis a/h ir armatūros kiekis. Visuose autorių siūlomuose skaičiavimo modeliuose vertinama išilginės tempiamos armatūros įtaka trumpų sijų laikomajai galiai. Projektavimo normose STR (STR 2.05.05:2005) ir Eurokode (LST EN 1992-1-1:2005) išilginės tempiamos armatūros įtaka nevertinama. Visuose, išskyrus T. M. Pillai ir P. Nagarajano (Pillai ir Nagarajan 2008) modelyje, vertinamas skersinis armavimas.

Norint atlikti literatūros šaltiniuose pateiktų trumpų sijų skaičiavimo modelių parametrinę analizę ir jų palyginimą, pasirenkami pradiniai duomenys pateikti 3.1 lentelėje. Atliekant skaičiavimus su skirtingomis parametru (A_s , A_{sw} , f_c ir a/h) reikšmėmis nustatoma jų kitimo įtaka trumpų sijų įtempių ir deformacijų būviui bei laikomajai galiai. Skaičiavimo modelių parametrinis palyginimas pateiktas 3.2-3.5 lentelėse ir 3.2-3.5 pav. 3.1 lentelėje nurodomi kurie parametrai yra keičiami ir kokie yra pastovūs.

3.1 lentelė. Analitinio skaičiavimo pradiniai duomenys

Eil. Nr.	b, m	a, m	h, m	a/h	f_c, MPa	f_y, MPa	L_b, m	$A_s (n \times \emptyset)$	A_s, cm^2	$A_{sw} (n \times \emptyset)$	A_{sw}, cm^2
1	0,10	0,02	0,30	0,07	25,0	500	0,05	2×Ø6	0,57	2×Ø6	0,57
2	0,10	0,075	0,30	0,25	25,0	500	0,05	2×Ø8	1,01	2×Ø8	1,01
3	0,10	0,15	0,30	0,50	30,0	500	0,05	2×Ø10	1,57	2×Ø10	1,57
4	0,10	0,30	0,30	1,00	35,0	500	0,05	2×Ø12	2,26		
5	0,10	0,45	0,30	1,50	40,0	500	0,05	2×Ø14	3,08		
6	0,10	0,60	0,30	2,00	45,0	500	0,05				
7	0,10	0,75	0,30	2,50	50,0	500	0,05				
8	0,10	0,90	0,30	3,00	55,0	500	0,05				

Pastabos:

f_c – betono gniuždymo stipris apskaičiuotas eksperimento metu;

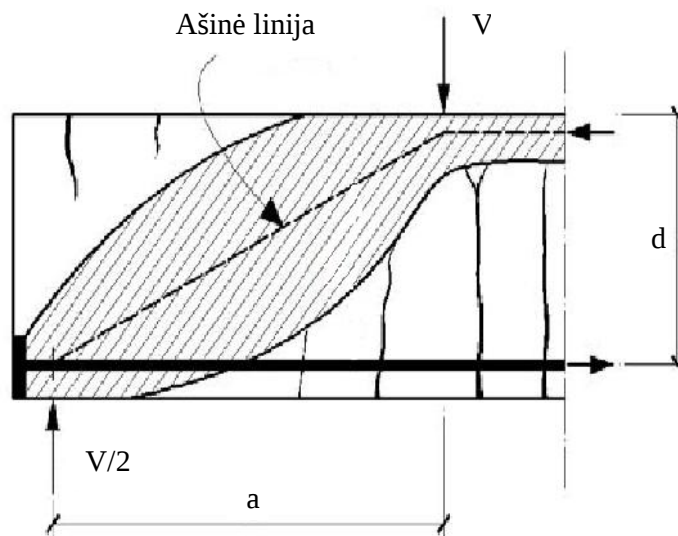
L_b – atrėmimo ir apkrovos perdavimo plokštelių plotis;

Jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtaka trumpų sijų įtempių ir deformacijų būviui bei laikomajai galiai tiriama keičiant apkrovos pridėjimo taško atstumą iki atramos. Sijos aukštis išlaikomas vienodas. Kadangi STR (2005) ir Eurokodo (2005) modeliuose jėgos pridėjimo atstumas nelemia trumpų sijų laikomosios galios, tai šiuose modeliuose a/h santykio įtaka vertinama keičiant sijų aukštį.

3.1. Jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose

Jėgos peties ir aukščio santykio įtaka trumpų sijų stiprumui visuose modeliuose vertinama skirtingai. Iš skaičiavimo rezultatų grafinio palyginimo (3.2 pav.) teigti, kad sijos su mažesniu a/h santykiu atlaiko didesnę skersinę jėgą. Taip yra dėl arkos efekto, kai pridėtos apkrovos perduodamos tiesiogiai į atramas. Apžvelgtuose modeliuose priimta, kad arkos efektas atsiranda trumpose sijose, kai jėgos peties ir naudingojo aukščio santykis $a/d < 3$ (Cheng ir Tan 2006). Pagal N. Zhango ir K. H. Tano (Zhang ir Tan 2007) bei T. M. Pillai ir Nagarajano (Nagarajan ir Pillai 2008) modelius, arkos efektas pastebimas, kai $a/d < 2$. G. H. Chengas ir K. H. Tanas (Cheng ir Tan 2006) taip pat nurodo, kad $a/d < 2$. Eurokode (2005) sija laikoma trumpa, kai $0,5d \leq a \leq 2d$.

3.1 pav. pateiktas idealizuotoje sijoje atsirandantis arkos efektas. Užbrūkšniuotas plotas rodo, kuriose vietose betonas yra gniuždomas, o už užbrūkšniuoto ploto esantis betonas gali supleišėti. Įstrižų gniuždymo įtempių intensyvumas priklauso nuo arkos ašinės linijos, pažymėtos 3.1 pav. punktyrine linija, posvyrio kampo. Šį kampą apibūdina jėgos peties ir aukščio ar naudingojo aukščio santykis. Akivaizdu, kad ilgesnėse sijose arkos posvyrio kampas yra mažesnis, todėl laikomoji galia gaunama taip pat mažesnė.



3.1 pav. Trumpose sijose atsirandantis arkos efektas (Su ir Chandler 2001)

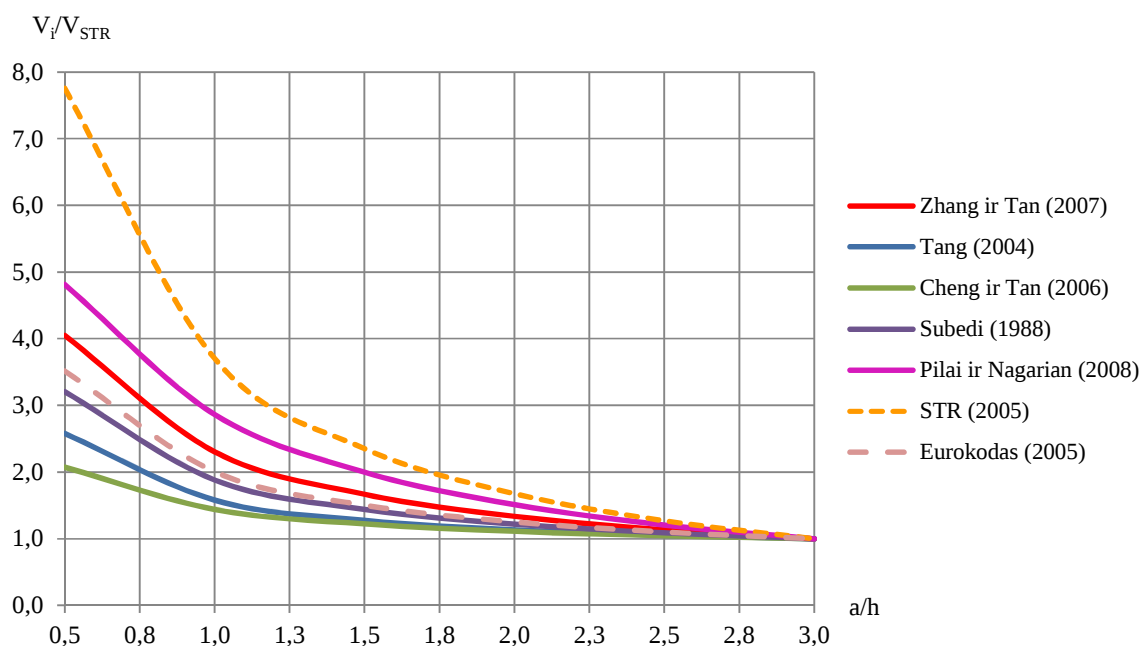
Pasirinkami pradiniai duomenys ($f_c = 36,3 \text{ MPa}$, $\rho_l = 0,34 \%$, $\rho_{sw} = 1,14 \%$). Didžiausia laikomoji galia ($305,74 \text{ kN}$) gauta skaičiuojant STR (2007) metodu, kai santykis $a/h=0,5$, o mažiausia ($85,10 \text{ kN}$) gaunama pagal G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) metodą. Didžiausia laikomosios galios reikšmė ($76,48 \text{ kN}$) gaunama, kai santykis $a/h=3$, gauta skaičiuojant pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) metodą.

Mažiausia laikomosios galios reikšmė (27,46 kN) gauta N. Zhango ir K. H. Tano (Zhang ir Tan 2007) metodu. Ši reikšmė prilyginama vienetui ir pagal ją skaičiuojamas visų metodų laikomosios jėgos pokytis. Skaičiavimų rezultatai pateikti 3.2 lentelėje. Grafinis metodų laikomosios galios santykio palyginimas, priklausomai nuo a/h santykio, pateiktas 3.2 pav.

3.2 lentelė. Jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtaka trumpų sijų stiprumui

a/h	Laikomosios galios padidėjimas kartais, n						
	Zhang ir Tan (2007)	Tang (2004)	Cheng ir Tan (2006)	Subedi (1988)	Pilai ir Nagarian (2008)	STR (2005)	EC (2005)
0,50	2,82	5,14	2,16	6,22	7,07	7,76	4,83
1,00	1,61	3,14	1,50	3,65	4,20	3,70	2,75
1,50	1,16	2,54	1,27	2,80	2,93	2,35	2,06
2,00	0,93	2,26	1,16	2,37	2,22	1,68	1,72
2,50	0,79	2,10	1,09	2,11	1,77	1,27	1,51
3,00	0,70	1,99	1,04	1,94	1,47	1,00	1,37

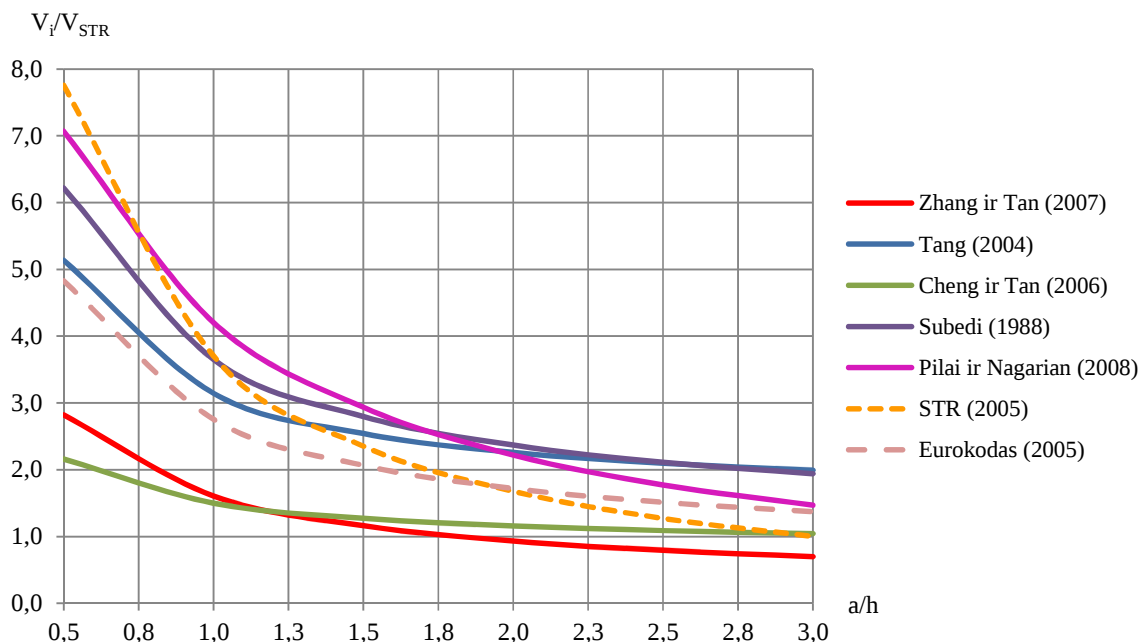
Atlikus analizę pastebima, kad visų metodų laikomosios galios ir a/h santykio priklausomybių kreivės yra panašios. Galima teigti, kad visų metodų laikomoji galia tiesiškai priklauso nuo a/h santykio iki santykio 1,25 (3.2 pav.). Santykiui a/h esant mažiau už 0,5 metodai pasidaro netikslūs ir sijų laikomoji galia ima neproporcingai didėti, todėl tai neanalizuojama.



3.2 pav. Jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtaka trumpų sijų stiprumui
(pradiniai duomenys: $f_c = 36,3 \text{ MPa}$, $\rho_l = 0,34 \%$, $\rho_{sw} = 1,14 \%$)

Didžiausią įtaką trumpų sijų stiprumui a/h santykis turi STR (2005) metode, kuriame a/h santykį sumažinus 6 kartus, laikomoji galia padidėja 7,76 karto (3.3 pav.). Mažiausią reikšmę šis parametras turi G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) modelyje. Santykiui a/h sumažėjus 6 kartus, laikomoji galia padidėjo 2,07 karto.

3.3 pav. pateiktas grafinis analizuojamų metodu laikomosios galios palyginimas su STR (2005) metodu.



3.3 pav. Jėgos peties ir aukščio santykio a/h įtaka trumpų sijų stiprumui
(pradiniai duomenys: $f_c = 36,3 \text{ MPa}$, $\rho_l = 0,34 \%$, $\rho_{sw} = 1,14 \%$.)

Iš grafinio rezultatų palyginimo 3.3 pav. matoma, kad esant skirtingiems jėgos peties ir aukščio santykiams atskirų skaičiavimo metodų rezultatai skiriasi. Didžiausia įtaka sijų stiprumui, a/h santykiui esant 0,5, gaunama skaičiuojant STR (2005) metodu. Mažiausia įtaka sijų stiprumui, kai $a/h=0,5$, gaunama skaičiuojant G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) metodu. Laikomosios galios reikšmės skiriasi 3,95 karto (3.3 pav.)

Lyginant metodus, a/h santykiui esant 3, gaunama, kad analizuojamais metodais apskaičiuotos laikomosios galios skiriasi 2,86 karto. Mažiausia įtaka sijų stiprumui, a/h santykiui esant 3, gaunama skaičiuojant N. Zango ir K. H. Tano (Zang ir Tan 2007) metodu. Mažiausia įtaka sijų stiprumui, kai $a/h=3$, gaunama skaičiuojant pagal C. Y. Tango (Tang 2004) metodą 3.3 pav.

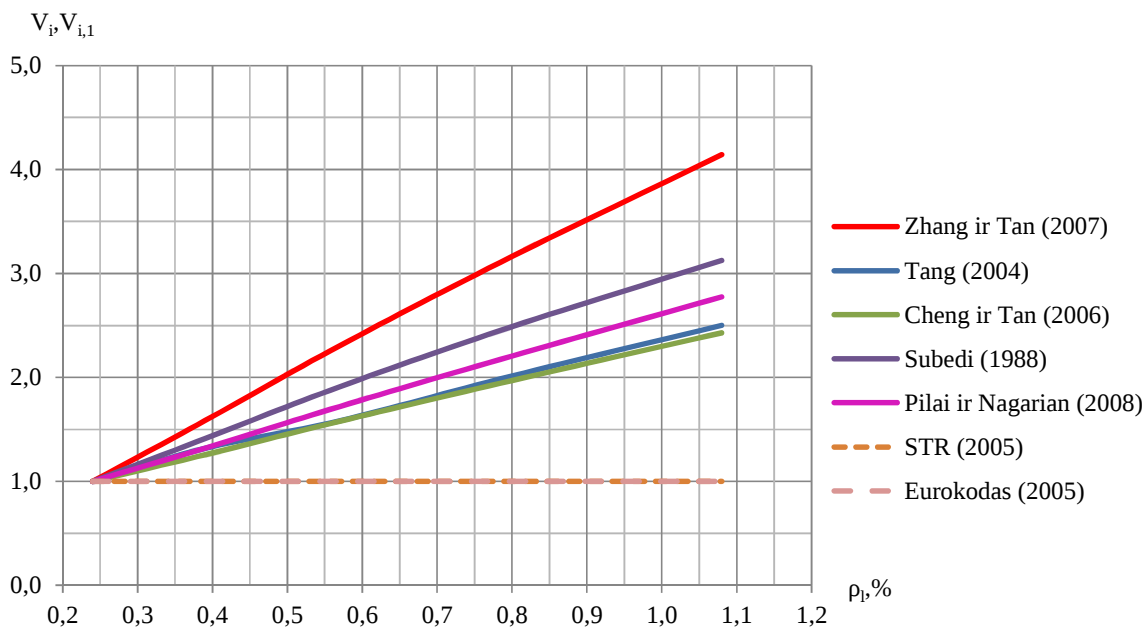
3.2. Išilginės armatūros įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose

Atlikus analizę nustatyta, kad visų skaičiavimo modelių laikomosios galios pokyčio priklausomybė nuo išilginės armatūros kiekio yra tiesinė. Parametrinio skaičiavimo rezultatai pateikti 3.3 lentelėje. Grafinis modelių rezultatų palyginimas pateiktas 3.4 paveiksle.

3.3 lentelė. Išilginės armatūros kiekio įtaka trumpų sijų laikomosios galios padidėjimui

$\rho_l, \%$	Laikomosios galios padidėjimas kartais, n						
	Zhang ir Tan (2007)	Tang (2004)	Cheng ir Tan (2006)	Subedi (1988)	Pillai ir Nagarajan (2008)	STR	EC
0,19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-
0,34	1,58	1,32	1,26	1,41	1,32	-	-
0,52	2,31	1,58	1,58	1,91	1,72	-	-
0,75	3,16	2,01	1,97	2,49	2,21	-	-
1,03	4,14	2,50	2,43	3,12	2,78	-	-

Eurokodo (2005) ir STR (2005) metoduose, skaičiuojant trumpų sijų laikomąją galią, tempiama armatūra nevertinama.



3.4 pav. Išilginio armavimo įtaka trumpų sijų stiprumui (pradiniai duomenys: $f_c = 36,3 \text{ MPa}$, $a/h=1$, $\rho_{sw} = 1,14 \%$)

Didžiausią įtaką trumpų sijų stiprumui išilginė armatūra turi N. Zango ir K. H Tano (Zang ir Tan 2007) modelyje, kuriame išilginės armatūros kiekį padidinus 5,42 karto, laikomoji

galia padidėja 4,14 karto (3.4 pav.). Mažiausią reikšmę šis parametras turi G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) modelyje, kai išilginės armatūros kiekis padidinamas 5,42 karto, stiprumas padidėja tik 2,43 karto. Lyginant šiuos metodus tarpusavyje, nustatyta, kad išilginio armavimo procentui esant 1,03 % laikomosios galios pokyčiai skiriasi 1,7 karto.

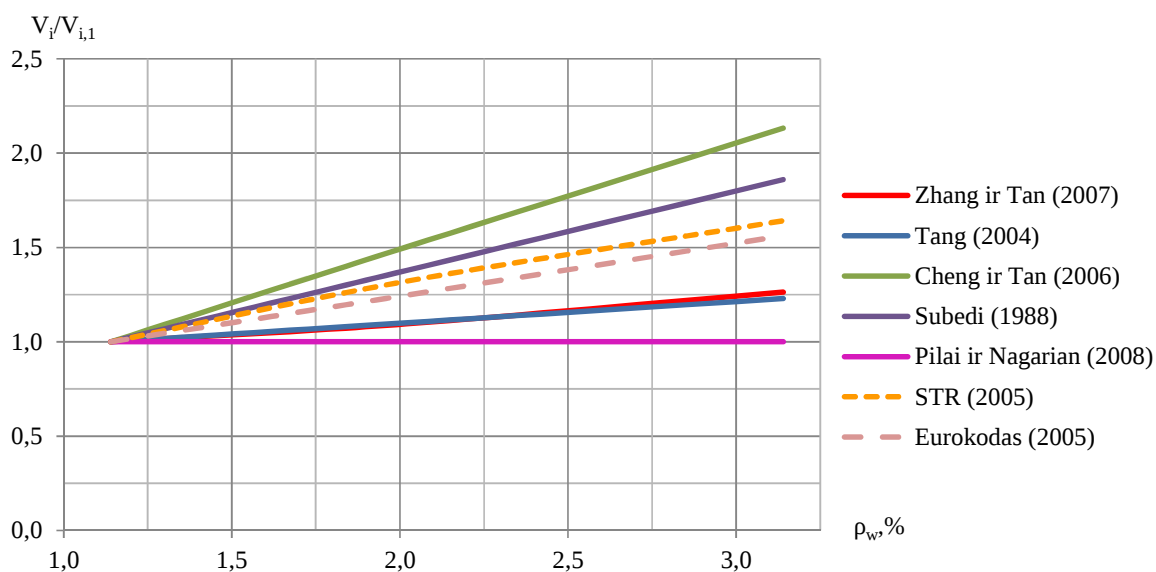
3.3. Skersinės armatūros įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose

Trumpų sijų laikomosios galios priklausomybės nuo skersinio armavimo analizės rezultatai pateikti 3.4 lentelėje. Autorių T. M. Pillai ir P. Nagarajano (Pillai ir Nagarajan 2008) skaičiavimo modelyje skersinis armavimas nevertinamas.

3.4 lentelė. Skersinės armatūros įtaka trumpų sijų laikomosios galios padidėjimui

	Laikomosios galios padidėjimas kartais, n						
ρ_w , %	Zhang ir Tan (2007)	Tang (2004)	Cheng ir Tan (2006)	Subedi (1988)	Pilai ir Nagarajan (2008)	STR (2005)	EC (2005)
1,14	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00
2,02	1,10	1,10	1,50	1,38	-	1,32	1,25
3,14	1,26	1,23	2,13	1,86	-	1,64	1,56

Trumpų sijų laikomosios galios skaičiavimo pagal analizuojamus modelius, priklausomai nuo skersinės armatūros kiekio, grafinis rezultatų palyginimas pateiktas 3.5 paveiksle. Visais atvejais laikomosios galios pokyčio priklausomybės nuo skersinės armatūros kiekio yra tiesinė.



3.5 pav. Skersinio armavimo įtaka trumpų sijų stiprumui (pradiniai duomenys: $f_c = 36,3 \text{ MPa}$, $a/h=1$, $\rho_s = 0,19 \%$)

Didžiausią įtaką skersinė armatūra turi pagal G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) modelį skaičiuojamam trumpų sijų stiprumui. Šiuo atveju skersinės armatūros kiekį padidinus 2,75 karto, laikomoji galia padidėja 2,13 karto. Mažiausią įtaką šis parametras turi C. Y. Tango (Tang 2004) modelyje, kai išilginės armatūros kiekiui padidėjus 2,75 karto, stiprumas padidėja 1,23 karto. Palyginus šiuos du metodus tarpusavyje gaunama, kad laikomosios galios padidėjimas, priklausomai nuo skersinio armavimo, skiriasi 1,69 karto (3.5 pav.).

3.4. Betono stiprio įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose

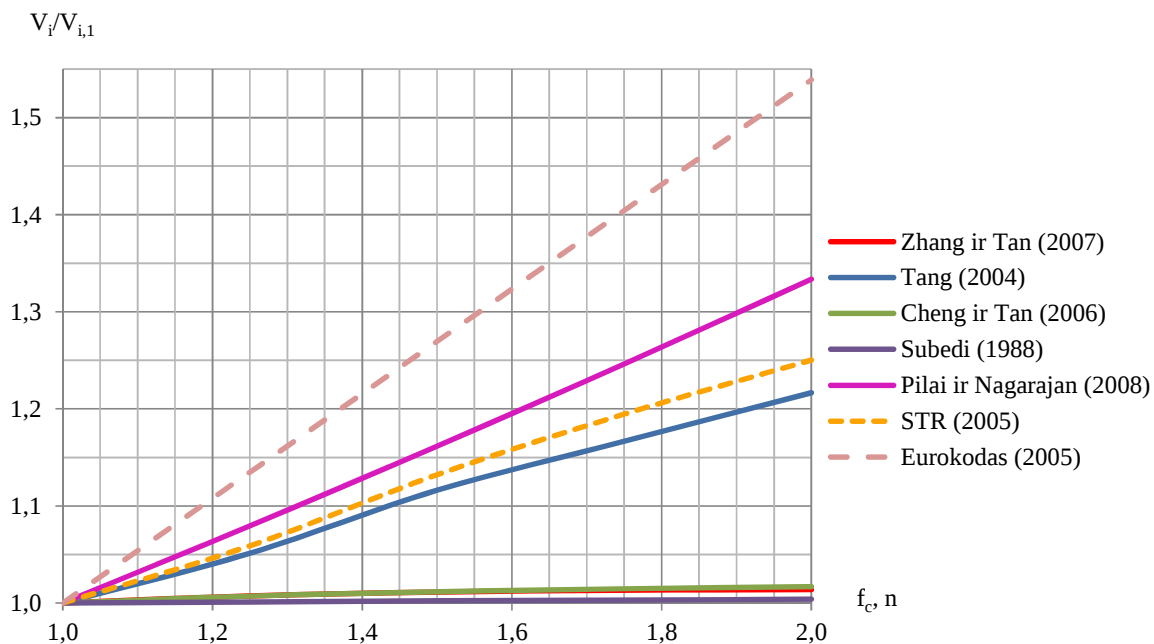
Betono stiprio įtaka laikomajai galiai vertinama visuose analizuojamuose trumpų sijų skaičiavimo modeliuose. Parametrinių skaičiavimo rezultatų pokyčiai kiekviename metode, keičiant betono stiprį, pateikti 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Betono stiprio įtaka trumpų sijų laikomosios galios padidėjimui

	Laikomosios galios padidėjimas kartais, n						
f_c, n	Zhang ir Tan (2007)	Tang (2004)	Cheng ir Tan (2006)	Subedi (1988)	Pilai ir Nagarian (2008)	STR (2005)	EC (2005)
1,00	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,25	1,007	1,051	1,007	1,001	1,079	1,059	1,135
1,50	1,011	1,116	1,012	1,002	1,162	1,132	1,269
1,75	1,013	1,167	1,015	1,003	1,246	1,195	1,404
2,00	1,014	1,217	1,017	1,004	1,334	1,250	1,539

Lyginant gautus skaičiavimo rezultatus pastebima, kad visų analizuojamų skaičiavimo modelių laikomosios galios priklausomybės nuo betono stiprio yra tiesinės (3.6 pav.).

Didžiausią įtaką betono stipris turi Eurokodo (LST EN 1992-1-1:2005) siūlomos metodikos trumpų sijų laikomosios galios padidėjimui. Kaip matoma iš grafinių laikomosios jėgos ir betono stiprio priklausomybių, pateiktų 3.6 pav. ir rezultatų, esančių 3.5 lentelėje, betono stiprį padidinus 2 kartus, laikomoji galia padidėja 1,54 karto.



3.6 pav. Betono stiprio įtaka trumpų sijų stiprumui (pradiniai duomenys: $a/h=1$, $\rho_s = 0,34\%$, $\rho_{sw} = 1,14\%$)

Mažiausią reikšmę betono stipris turi N. K. Subedi (Subedi 1988) metode, nes betono stipriui padidėjus 2 kartus, laikomoji galia padidėja tik 1,004 karto. N. K. Subedi (Subedi 1988) modelyje didesnę reikšmę turi išilginis ir skersinis armavimas bei sijos jėgos peties ir aukščio santykis a/h . Autorių N. Zango ir K. H. Tango (Zang ir Tang 2007) bei G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) modeliuose betono stipris taip pat turi mažą reikšmę.

3.5. Trečio skyriaus išvados

1. Atlikus septynių trumpų sijų skaičiavimo modelių parametrinę analizę nustatyta, kad didžiausią įtaką trumpų sijų stiprumui turi jėgos peties ir aukščio santykis a/h . Santykį a/h padidinus 6 kartus, sijos laikomoji galia modeliuose sumažėja nuo 2,07-7,76 karto. Nustatyta, kad a/h santykis didžiausią įtaką trumpos sijos stiprumui turi skaičiuojant pagal STR (2005). Santykiui a/h sumažėjus 6 kartus, sijos laikomoji galia padidėja 7,76 karto. Mažiausia įtaka, kai $a/h=0,5$ nustatyta G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) metode. Lyginant laikomosios galios pokytį gaunama, kad a/h santykiui padidėjus 6 kartus, stiprumas padidėja 2,07 karto.

2. Nustatyta, kad mažiausią įtaką trumpų sijų stiprumui turi betono stipris, kurį padidinus du kartus, laikomoji galia modeliuose padidėja nuo 1,004 iki 1,54 karto. Mažiausią reikšmę betono stipris turi N. K. Subedi (Subedi 1988) metodu apskaičiuotai trumpų sijų galiai. Didžiausią įtaką betono stipris turi skaičiuojant pagal Eurokodą (2005). Betono stiprį padidinus 2 kartus, laikomoji galia padidėja 1,54 karto.
3. Išilginės armatūros kiekį padidinus 5,42 karto, laikomoji galia modeliuose kinta nuo 2,43 iki 4,14 karto. Didžiausią įtaką išilginė armatūra turi N. Zango ir K. H Tano (Zang ir Tan 2007) modelyje, kuriame išilginės armatūros kiekį padidinus 5,42 karto, laikomoji galia padidėja 4,14 karto.
4. Skersinės armatūros kiekį padidinus 2,75 karto, esant tam pačiam atstumą tarp strypų, laikomoji galia atskiruose modeliuose pakinta nuo 1,23 iki 2,13 karto.

4. GELŽBETONINIŲ TRUMPŲ SIJŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Norint nustatyti, kuris teorinis trumpų sijų skaičiavimo modelis yra tiksliausias, reikalinga sudaryti eksperimentinę programą ir atlikti bandymus. Siekiant ištirti atskirų parametų įtaka trumpų sijų įtempių ir deformacijų būviui bei laikomajai galiai, pasirenkami bandiniai su skirtingais jėgos peties ir aukščio santykiais bei skirtingu armavimu.

4.1. Betono, naudoto trumpų sijų bandiniams, gniuždomojo stiprio nustatymas

Šiame eksperimente buvo tiriamos trumpų sijų bandiniams skirtos betono stiprio savybės. Gniuždomasis betono stipris buvo nustatomas bandant 4 etaloninius 150/150/150 *mm* kubelius.

Betono tešla buvo gaminama laboratorijoje, kurios sudėtis pateikta 4.1 lentelėje. Apkrovos kėlimo greitis buvo 11 *kN/s*. Betono kubelių eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikti 4.2 lentelėje.

4.1 lentelė. Eksperimentinės programos betono sudėtis

Medžiagos pavadinimas	Medžiagos kiekis <i>kg/m³</i>
	II serija
Cementas	450
Smėlis (0-4 <i>mm</i>)	730
Žvirgždas (4-16 <i>mm</i>)	1100
Vanduo	220

Apkrovai suteikti buvo naudojamas hidraulinis presas. Betono kubelių bandymas pavaizduotas 4.1 pav.



4.1 pav. Betono kubelių bandymas

4.2 lentelėje pateikti betono gniuždymo stiprio tyrimo rezultatai

4.2 lentelė. Bandinių betono stiprio nustatymas

Pavadinimas	h, mm	b, mm	l, mm	A, m^2	N, kN	f_{ci}, MPa	$f_{m,cubes}, MPa$
K-1	149,64	154,7	150,69	0,0231	824,2	35,60	36,31
	149,61	153,65	150,69	0,0230		35,85	
	149,31	153,23	150,69	0,0229		36,02	
K-2	149,77	153,27	150,7	0,0230	840,8	36,63	
	149,66	151,89		0,0227		36,99	
	149,69	151,41		0,0227		37,10	
K-3	151,34	149,31	149,35	0,0226	836,2	37,01	
	150,75	151,38		0,0228		36,64	
	149,9	154,55		0,0232		36,09	
K-4	151,22	150,07	150,51	0,0227	826,3	36,41	
	150,49	152,61		0,0230		35,98	
	149,67	155,8		0,0233		35,44	

Nustatyta, kad vidutinis betono gniuždymo stipris yra 36,31 MPa.

4.2. Gelžbetoninių trumpų sijų savybių, esant dviašiam įtempių būviui, eksperimentinis tyrimas

Šioje eksperimentinėje programoje tiriamos dvi bandinių serijos, kurios skirtos metaline armatūra armuotų trumpų sijų įtempių ir deformacijų būvio bei laikomosios galios priklausomybės nuo armatūros kiekio ir a/h santykio tyrimui.

4.2.1. Eksperimentinio tyrimo tikslas

1. Ištirti trumpų sijų įtempių ir deformacijų būvį;
2. Ištirti įtempių ir deformacijų būvio bei laikomosios galios priklausomybę nuo jėgos peties ir aukščio santykio ir armatūros kiekio;
3. Nustatyti trumpų sijų bandinių laikomąją galią;
4. Nustatyti trumpų sijų įlinkius ir jų pokytį, keičiant armatūros kiekį ir jėgos peties ilgį, veikiant apkrovai;
5. Nustatyti pirmo plyšio atsivėrimo jėgą, jo plyšių pasiskirstymą priklausomai nuo armavimo procento;
6. Papildyti trumpų sijų eksperimentinių bandymų duomenų bazę.

4.2.2. Eksperimento programos sudarymas

Remiantis atlikta teorinių modelių analize ir kitų autorių atliktų bandymų rezultatais, eksperimentui buvo pasirinktos dvi trumpų sijų bandinių serijos su skirtingais jėgos peties ir aukščio santykiais ($a/h=0,5$ ir $a/h=1$) bei trimis skirtingais tempiamos armatūros kiekiais ($\rho_l = 0,34 \%$, $0,75 \%$ ir $1,03 \%$). Skersinis armavimas visose sijose vienodas.

Tokie skirtingi jėgų pečiai buvo pasirinkti dėl to, kad įtempių būvį būtų galima analizuoti trečiame skyriuje nustatytose probleminėse zonose. Visų bandinių buvo po 1 vienetą. Iš viso išbandyti 6 elementai. Bandinių skerspjūvio matmenys – $h \times b = 300 \times 100 \text{ mm}$, ilgis – 750 mm ir 450 mm . Betono tešlos sudėtis pateikta 4.1 lentelėje, vandens ir cemento santykis – $W/C=0,489$. Vidutinės betono gniuždymo stipris pateiktas 4.2 lentelėje.

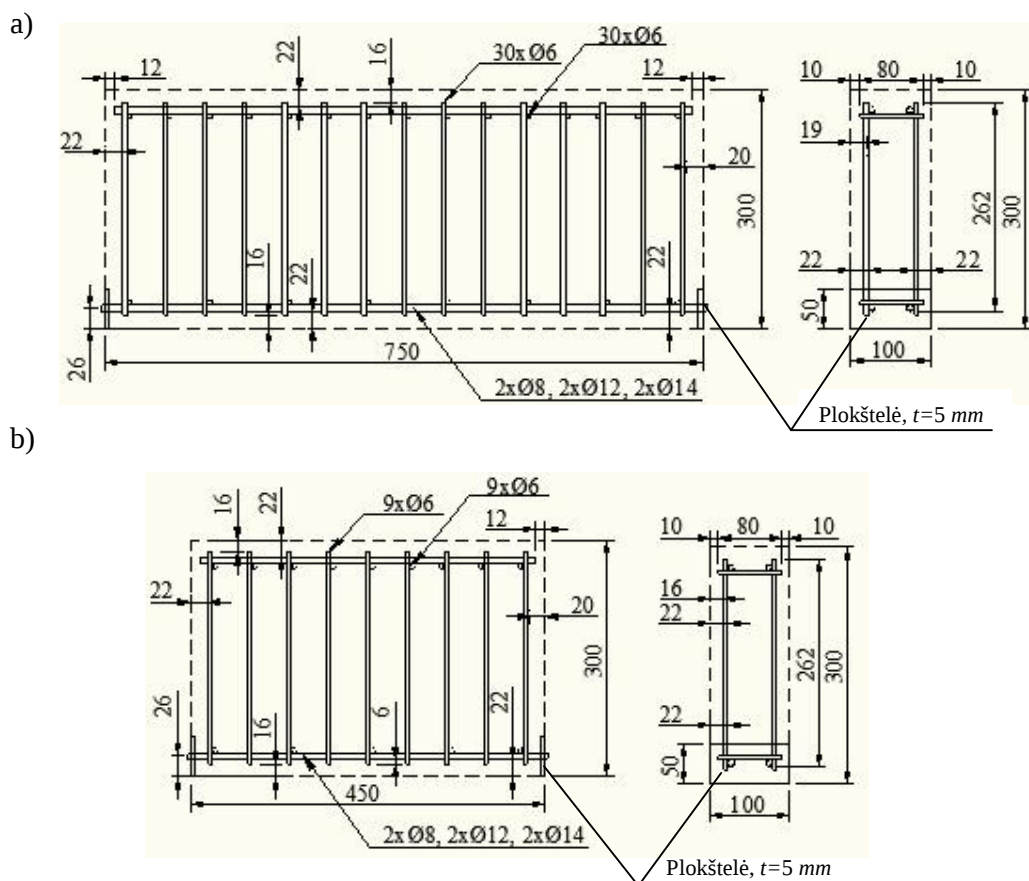
Bandinių paruošimas

Pasirinkti sijų bandinių parametrai pateikti 4.3 lentelėje. Laboratorijoje buvo suvirinti sijų armavimo strypynai. Pagamintas bandinio armatūros karkasas pavaizduotas 4.3 paveiksle. Pagaminus visus strypynus atliekami betono mišinio paruošimo ir betonavimo darbai, kurie pavaizduoti 4.4 – 4.6 pav.

4.3 lentelė. Bandinių geometriniai ir medžiagų parametrai

Bandinio pavadinimas	a/h	Geometriniai parametrai (mm)						Arma- vimas ($n \times \varnothing$)	$\rho_l, \%$	$\rho_{sw}, \%$	f_y, MPa	f_{yw}, MPa	f_c, MPa
		L	h	a	d	b	l_b						
I serija													
SS1-1	1	750	300	300	274	0,1	50	2×Ø8	0,34	1,14	610,0	610,0	36,31
SS1-2	1	750	300	300	272		50	2×Ø12	0,75	1,14			
SS1-3	1	750	300	300	271		50	2×Ø14	1,03	1,14			
II serija													
SS2-1	0,5	450	300	150	274	0,1	50	2×Ø8	0,34	1,14	610,0	610,0	36,31
SS2-2	0,5	450	300	150	272		50	2×Ø12	0,75	1,14			
SS2-3	0,5	450	300	150	271		50	2×Ø14	1,03	1,14			

Pagal užsiduotus elementų duomenis buvo parengti bandinių darbo brėžiniai (4.2 pav.).



4.2 pav. Sijų bandinių armavimas: a) 3 bandiniai - $a/h = 1$, a) 3 bandiniai - $a/h = 0,5$

Išilginės armatūros įtvirtinimui užtikrinti naudojamos metalinės plokštelės (50×100×5 mm).



4.3 pav. Armatūros karkasas bandinio armavimui

Laboratorijoje paruošiama betono tešla 4.4 pav.



4.4 pav. Betono tešlos paruošimas

Ant stendo paruošiami bandinių klojiniai, sudedami armatūros strypynai, supilamas ir sutankinamas betonas (4.5 pav.)



4.5 pav. Bandinių betonavimas

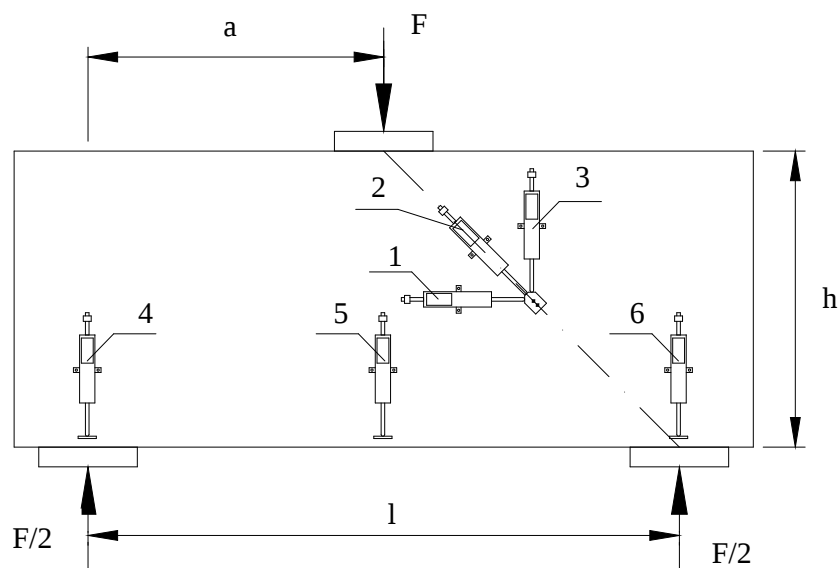


4.6 pav. Bandinių, skirtų betono savybėms nustatyti, betonavimas

Bandiniai palikti kietėti ir išbandyti po 28 parų.

4.2.3. Eksperimentinių bandymų eiga

Norint pritvirtinti įlinkių matuoklius buvo pagamintas specialus karkasas (4.8 pav.). Matuokliai 4 ir 6 buvo skirti matuoti įlinkiams ties atramomis, o 5 skirtas nustatyti įlinkiui ties sijos centru. Matuoklių išdėstymas pateiktas 4.7 pav.



4.7 pav. Trumpų sijų bandymo schema ir matuoklių išdėstymas

Ties bandinio svorio centru pritvirtinami elektroindukciniai deformacijų matuokliai, kurių išdėstymo schema pavaizduota 4.7 ir 4.8 pav. Ant preso atraminės plokštės surenkamas bandymo stendas. Bandinys ant atramų pastatomas taip, kad būtų išlaikytas pasirinktas jėgos peties ir aukščio santykis (4.9 pav.).



4.8 pav. Matuoklių išdėstymas eksperimentinėje bazėje

Ant sijos uždedama 5 cm pločio metalinė plokštelė, kuri skirta apkrovai perduoti. Stendas pastatomas taip, kad jėgos perdavimo plokštelė būtų tiksliai po preso centru (4.9 pav.). Prie deformacijų ir įlinkių matuoklių prijungiami laidai, kuriais perduodami duomenys į specialų prietaisą, kuris yra sujungtas su kompiuteriu. Speciali programine įranga fiksuoja matuoklių rodmenis 2 kartus per sekundę. Naudojant hidraulinio preso valdymo skydą, nustatoma maksimali galima apkrova, sudaromas apkrovos kėlimo ir išlaikymo grafikas (apkrova keliama po 0,2 kN/s, ją išlaikant 10 sekundžių). Bandymo metu iš abiejų pusių stebimas pirmo plyšio atsivėrimas ir pažymima pirmojo plyšio atsivėrimo apkrova bei plyšio vieta. Stebimas plyšių kitimas ir žymima kiekvienos plyšio ir jo atkarpos susidarymo apkrova. Nustatoma maksimali bandinio atlaikoma apkrova ir suirimo tipas.



4.9 pav. Sijų bandymo eiga

4.3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Eksperimentinių sijų bandymų rezultatų suvestinė pateikta 4.4 lentelėje. Iš eksperimentinių reikšmių matoma, kad 1 serijoje, kai $a/h=1$, laikomoji galia esant skirtingam armatūros kiekiui padidėja iki 2,13 karto. 2 serijos sijose, kur $a/h=0,5$, keičiant išilginės apatinės armatūros kiekį laikomoji galia padidėja tik 1,5 karto. Tai parodo, kad a/h santykiui mažėjant, didesnis armatūros kiekis turi mažesnę reikšmę trumpų sijų laikomosios galios prieaugiui. Vadinasi tokiu atveju tangentiniai įtempiai turi didesnę įtaką nei normaliniai. Sijos su yra ištiržame pjūvyje veikiamos svarbiausiųjų įtempių.

4.4 lentelė. Eksperimentinių bandymų laikomosios galios suvestinė

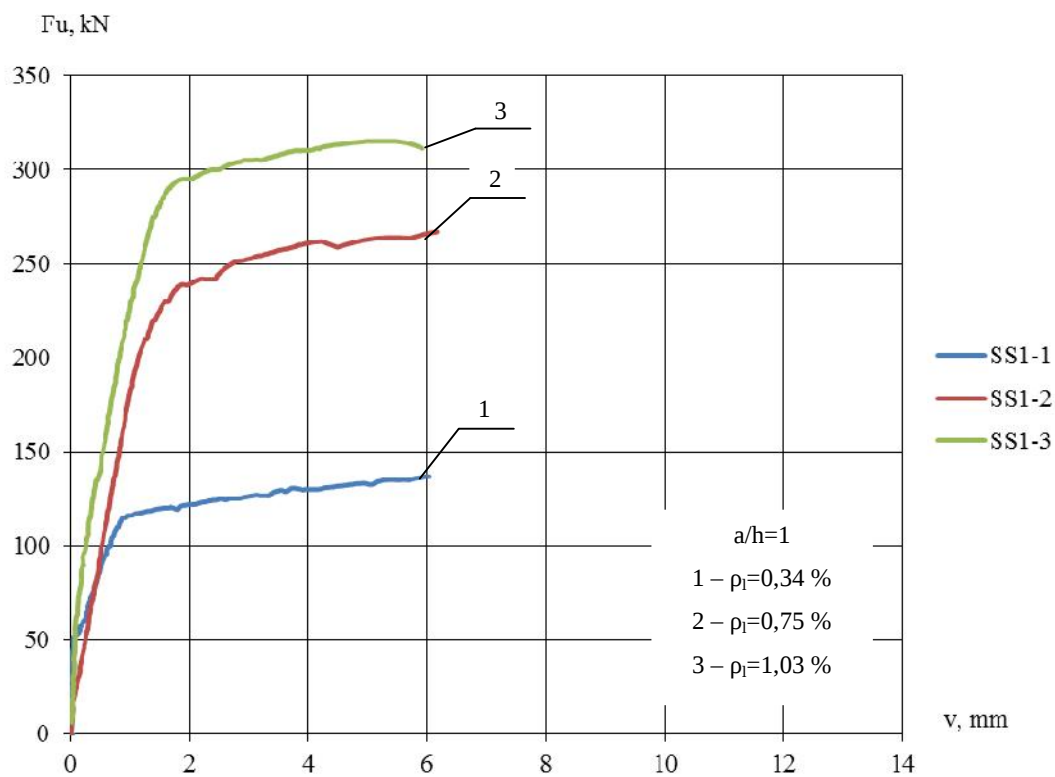
Pavadinimas	Armavimas	$\rho_l, \%$	a/h	$F_u, \text{ kN}$	$F_{u,l}/F_{ui}$	ΔF_{ui}	$F_{crc}, \text{ kN}$	$M_u, \text{ kNm}$
1 serija								
SS1-1	2×Ø8	0,34	1,0	147,6	1,00	1,00	54,0	44,29
SS1-2	2×Ø12	0,75	1,0	267,0	1,81	1,81	58,0	80,09
SS1-3	2×Ø14	1,03	1,0	315,0	2,13	2,13	73,0	94,50
2 serija								
SS2-1	2×Ø8	0,34	0,5	307,0	1,00	2,08	104,0	46,05
SS2-2	2×Ø12	0,75	0,5	429,0	1,40	2,91	146,0	64,35
SS2-3	2×Ø14	1,03	0,5	469,9	1,53	3,18	151,0	70,48

Sijų suirimo charakteriai ir laikomoji galia, esant skirtingiems a/h santykiams ir armavimo procentui ρ_l , buvo nevienodi.

4.3.1. Eksperimento metu gauti trumpų sijų įlinkiai

Eksperimento metu gauti abiejų serijų bandinių įlinkiai pavaizduoti 4.10 ir 4.11 pav. Sijos SS1-1 įlinkis, matuojant iki didžiausios apkrovos buvo 6,03 mm. Bandant siją SS1-2 buvo pasiektas 6,16 mm įlinkis. Serijos paskutinis bandinys SS1-3 bandymo pabaigoje įlinkio 5,92 mm.

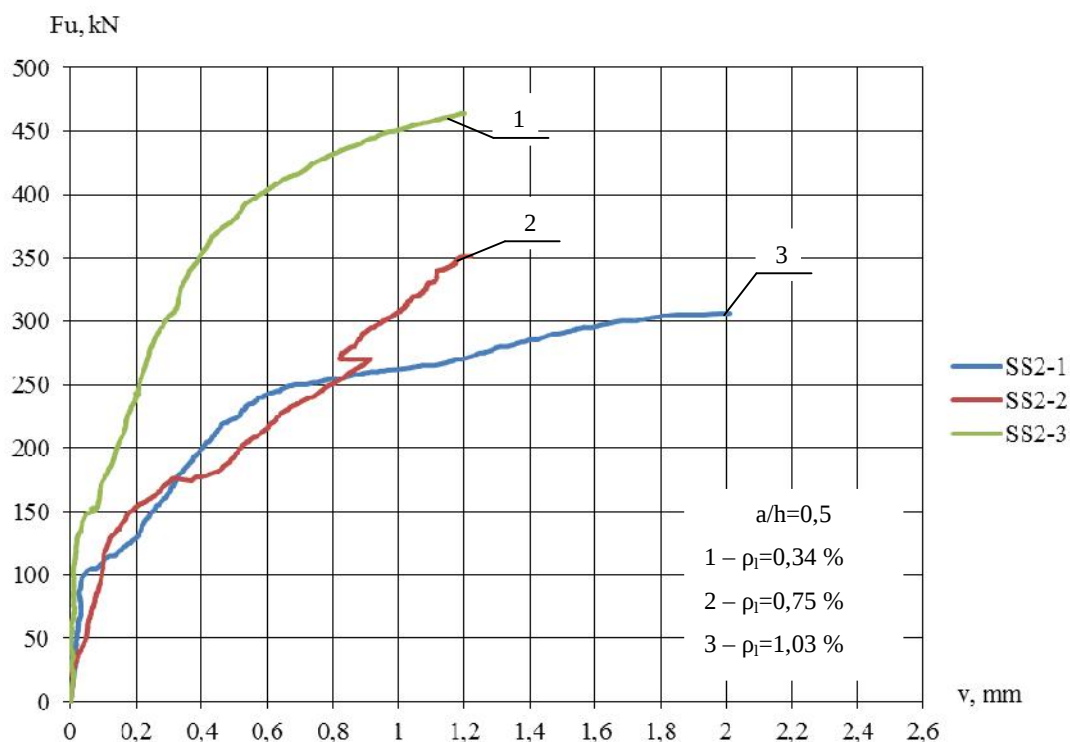
Palyginus įlinkių reikšmes, nustatyta, kad sijų įlinkiai, armatūros kiekiui padidėjus 3,03 karto, sumažėjo 1,02 karto. Matoma, kad įlinkiai, matuojant iki didžiausios apkrovos, skiriasi nežymiai, bet palyginus apkrovas, kurioms esant lyginami įlinkiai, pastebima, kad toks pat įlinkis (~6 mm), armatūros kiekiui ρ_l padidėjus (nuo 0,34 iki 1,03 %) pasiekiamas esant 2,13 kartų didesnei apkrovai.



4.10. Pirmos serijos bandinių apkrovų ir įlinkių kreivės

Sijos SS2-1 įlinkis, matuojant iki didžiausios apkrovos buvo 2,01 mm. Bandant siją SS2-2 buvo nustatytas 1,22 mm įlinkis. Sija SS1-3 įlinkio 1,02 mm.

Lyginant II serijos bandinių įlinkius, kai $a/h=0,5$, nustatyta, kad armatūros plotui padidėjus 3,03 karto, sijos įlinkis sumažėjo 1,97 karto. Didėjant armatūros plotui trumpų sijų įlinkis mažėja.



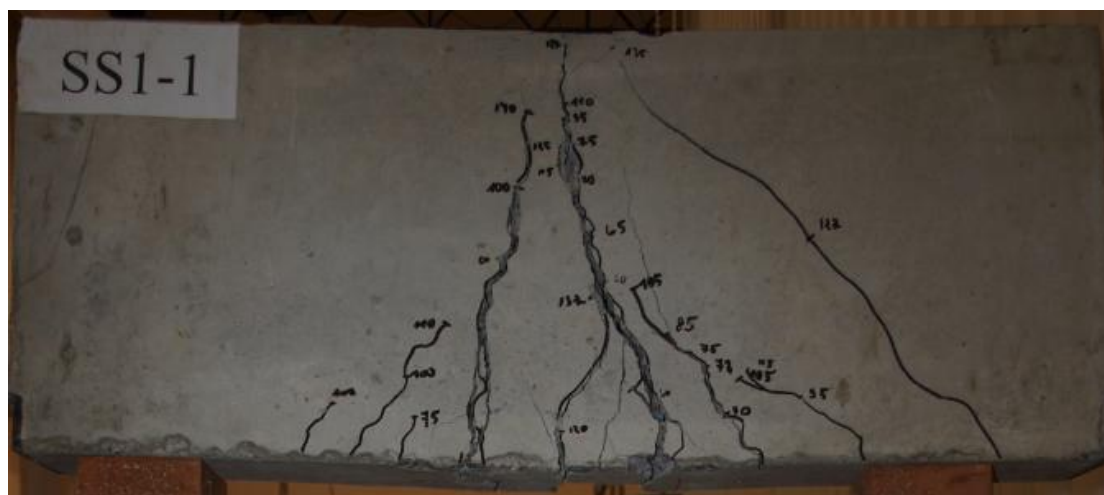
4.11 pav. Antros serijos bandinių apkrovų ir įlinkių kreivės

Palyginus I ir II serijų bandinius SS1-1 ir SS2-1, kurių tempiamos armatūros kiekis yra vienodas $\rho_l = 0,34 \%$, bet a/h santykis skiriasi 2 kartus, gaunama, kad įlinkiai skiriasi 3 kartus.

Lyginant sijas SS1-2 ir SS2-2 ($\rho_l = 0,75 \%$), gaunama, kad įlinkiai skiriasi 5,05 karto. Palyginus sijų SS1-3 ir SS2-3 ($\rho_l = 1,03 \%$) įlinkius, kai a/h santykis skiriasi 2 kartus, gaunama, kad įlinkis sumažėja 4,93 karto. Galima teigti, kad išilginės armatūros įtaka, esant mažesniai a/h santykiui, mažėja neproporcingai.

4.3.2. Pirmos serijos sijų pleišėjimas ir suirimo tipai

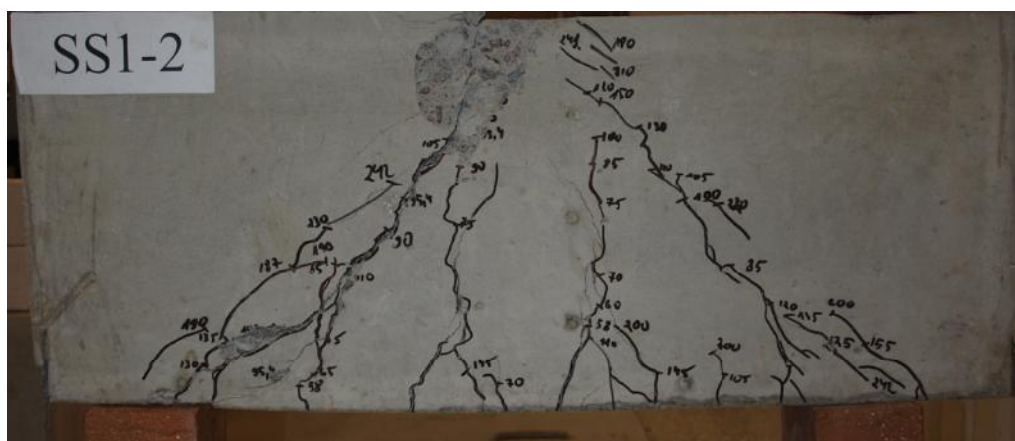
Sijos SS1-1 suirimas parodytas 4.12 pav. Pirmas plyšys, betonui pasiekus tempimo stiprio ribą, atsivėrė normaliniame pjūvyje, kai apkrova buvo 54 kN (0,37 F_u). Didinant apkrovą, pirmas plyšys tapo pagrindiniu normaliniu plyšiu (4.12 pav.). Pagrindinis plyšys išplito per visą sijos skerspjūvio aukštį, kai apkrova pakilo iki 110 kN.



4.12 pav. Sijos SS1-1 suirimas, kai $a/h=1$, $\rho_1 = 0,34 \%$

Apkrovai didėjant, tempiama armatūra pasiekė takumo ribą, skerspjūvis pasisuko gniuždomos zonos atžvilgiu ir bandinys suiro normaliniame pjūvyje dėl nepakankamo tempiamos armatūros kiekio, esant 147,6 kN apkrovai. Iki suirimo likus 20 kN, bandinys įtrūko ir įstrižame pjūvyje. Suirimo tipas ir plyšių kitimas pateikti 4.12 pav. Remiantis gautais bandymo rezultatais galima teigti, kad esant mažam armavimui normalinis plyšys sparčiai vystosi ir elementas suyra plyšiui suardžius gniuždomą zoną.

Sijos SS1-2 suirimas ir pleišėjimas pateikti 4.13 pav.



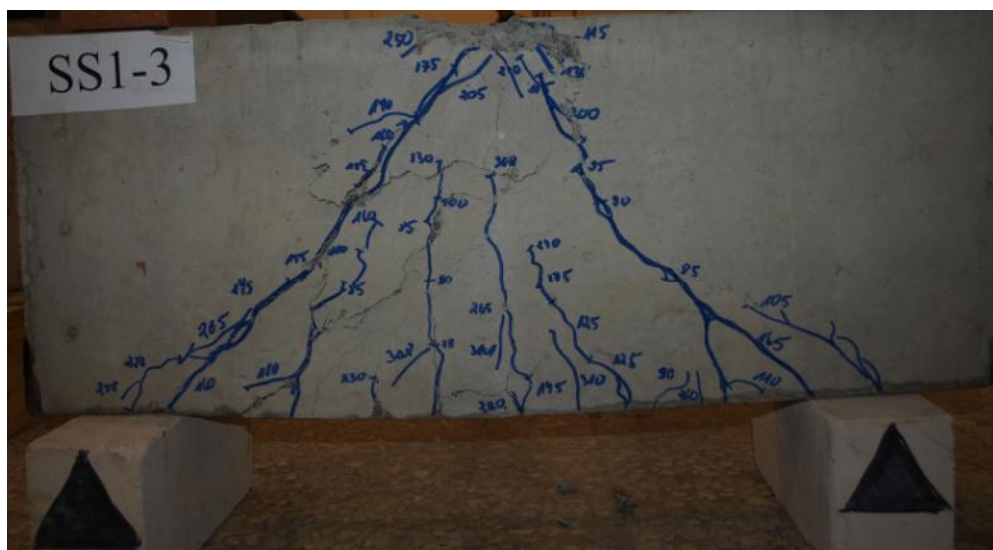
4.13 pav. Sijos SS1-2 plyšių plitimas, kai $a/h=1$, $\rho = 0,75 \%$

Prasidėjus bandymui pirmas plyšys susiformavo šalia atramos pasiekus 58 kN (0,22 F_u) apkrovą.

Lyginant su SS1-1 bandiniu nustatyta, kad tempiamos armatūros kiekiui padidėjus 2,24 karto, pirmo plyšio atsivėrimo momentas padidėjo tik 1,06 karto. Tai parodo, kad armatūros kiekio padidėjimas neturi didelės reikšmės pirmo plyšio atsivėrimo momentui.

Esant 58 kN apkrovai plyšiai susidarė ir normaliniame pjūvyje. Jie nustojo didėti, kai apkrova pasiekė 100 kN. Plyšių išsidėstymas pateiktas 4.13 pav. Toliau didinant apkrova, pirmasis įstrižas plyšys kilo aukščiau ir tapo pagrindiniu plyšiu, ties kuriuo esant 267 kN apkrovai bandinys suiro.

Sijos SS1-3 suirimas ir pleišėjimas pavaizduoti 4.14 pav.



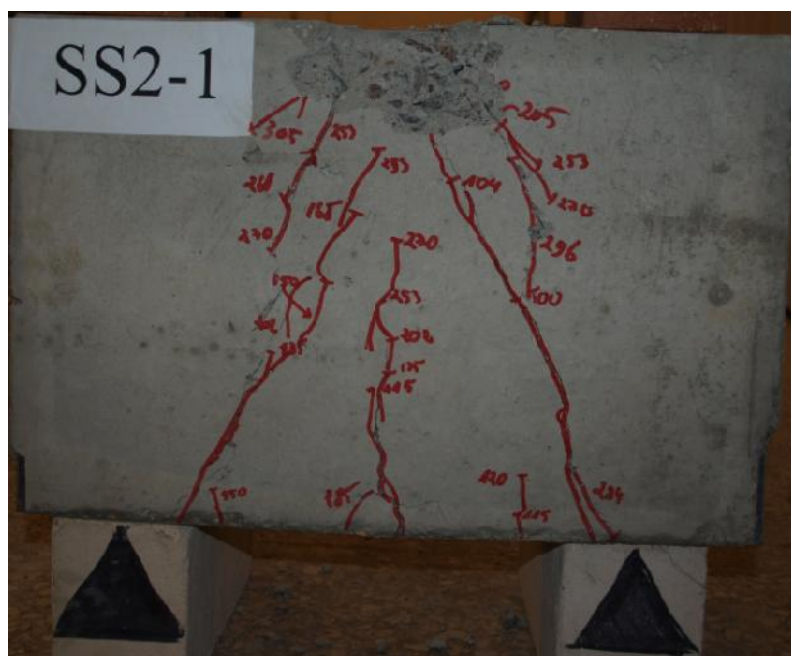
4.14 pav. Bandinio SS1-3 pleišėjimas, kai $a/h=1$, $\rho_1=1,03\%$

Prasidėjus bandymui pirmas plyšys susiformavo normaliniame pjūvyje apkrovai pasiekus 73 kN ($0,23 F_u$). Plyšių kitimas pateiktas 4.14 paveiksle. Palyginus su sija SS1-1 nustatyta, kad tempiamos armatūros kiekiui padidėjus 3,05 karto pirmo plyšio atsivėrimo momentas padidėjo 1,35 karto. Momentų reikšmės pateiktos 4.4 lentelėje. Tai parodo, kad armatūros kiekio padidėjimas neturi didelės reikšmės pirmo plyšio atsivėrimo momentui.

Pirmi aiškiai pastebimi įstriži plyšiai susidarė sijos apatinio aukščio trečdalyje viduryje, esant 85-90 kN jėgai. Normaliniai plyšiai, apkrovai pasiekus 130 kN, nustojo kilti. Bandymo pabaigoje normaliniai plyšiai dar nežymiai pakilo iki sijos skerspjūvio aukščio vidurio. Pagrindinis magistralinis plyšys atsirado sijos įstrižame pjūvyje ir gniuždomoje zonoje susidarius plastiniam šarnyrai bandinys suiro įstrižame pjūvyje esant 315 kN apkrovai.

4.3.3. Antros serijos sijų pleišėjimas ir suirimo tipas

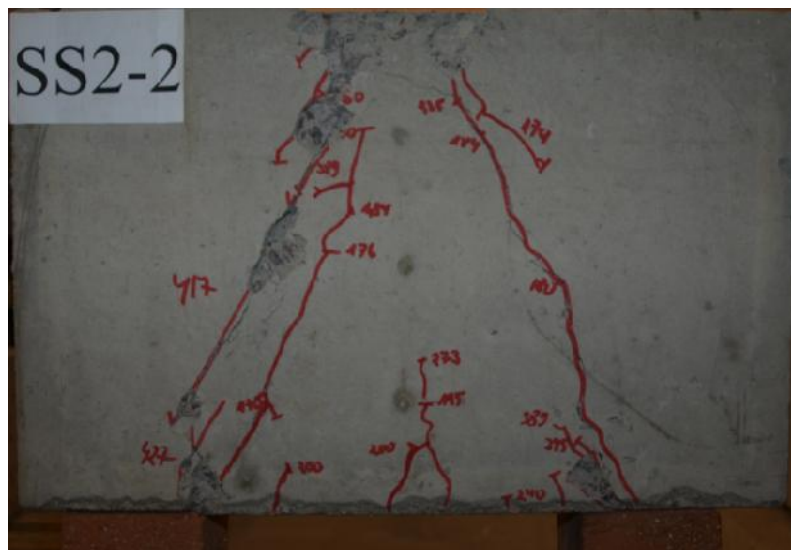
Sijoje SS2-1 pirmas plyšys atsirado įstrižame pjūvyje, kai apkrova pasiekė 104 kN ($0,34 F_u$). Apkrovai esant 108 kN įstrižas plyšys išplito per visą skerspjūvio aukštį. Apkrovai pasiekus 115 kN plyšys susiformavo normaliniame pjūvyje. Tolesnio bandymo metu abiejų plyšių pločiai kito nežymiai. Plyšių kitimas pateiktas 4.15 pav. Pasiekus 307 kN apkrovą ties apkrovos perdavimo plokšte įtempiai viršijo betono stiprį ir bandinys suiro dėl betono glemžimo.



4.15 pav. Sijos SS2-1 pleišėjimas, kai $a/h=0,5$, $\rho_l = 0,34\%$

Lyginant su pirmos serijos sijomis, galima teigti, kad esant dvigubai mažesniai jėgos pečiui ir tam pačiam armavimo procentui plyšių vystymasis ženkliai skiriasi. SS1-1 sijoje pirmas plyšys susiformavo normaliniame pjūvyje ir greitai didėjo iki suirimo. Tai rodo, kad sijoje esant tam pačiam armavimui, bet dvigubai mažesniai jėgos peties ir aukščio santykiui, įtempių ir deformacijų pasiskirstymas pasikeičia. Svarbiausių įtempių krypties kampas, skaičiuojant nuo sijos ašies) mažėja. Normalinis plyšys SS2-1 sijoje pakyla tik iki sijos skerspjūvio aukščio vidurio ir toliau nedidėja (4.15 pav). Palyginus SS1-1 (4.12 pav.) ir SS2-1 (4.15 pav) sijas, matoma, kad sijos su mažesniu a/h santykiu pleišėja mažiau. Jėgos peties ir aukščio santykiui sumažėjus 2 kartus, pirmo plyšio atsivėrimo jėga padidėjo 1,93 karto, o sijos laikomoji galia padidėjo 2,08 karto.

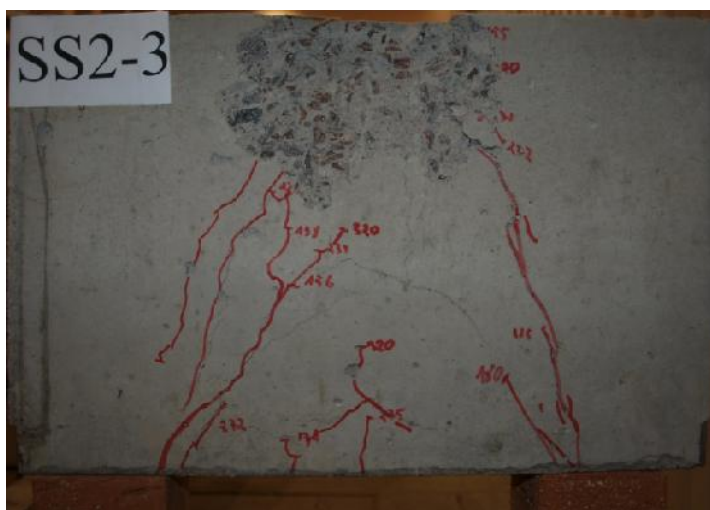
Sijos SS2-2 suirimas ir pleišėjimas pateikti 4.16 pav. Pirmas plyšys, betonui pasiekus tempimo stiprio ribą, atsivėrė įstrižame pjūvyje, kai apkrova pasiekė 146 kN (0,34 F_u). Apkrovai esant 180 kN, įstrižas plyšys išplito per visą sijos skerspjūvio aukštį. Apkrovai didėjant šalia pagrindinių plyšių vystėsi nauji maži įtrūkimai. Pirmas normalinis plyšys susiformavo apkrovai pasiekus 195 kN (0,45 F_u). Šis plyšys kilo iki 273 kN apkrovos. Tai parodo, kad tempiamoje zonoje yra didelis armatūros kiekis. Sija suiro dėl kirpimo ir glemžimo, kai apkrova pasiekė 429 kN jėgą.



4.16 pav. Sijos SS2-2 pleišėjimas, kai $a/h=0,5$, $\rho_l = 0,75 \%$

Lyginant su SS2-1 sija, tempiamos armatūros kiekiui padidėjus 2,34 karto, pirmo plyšio atsivėrimo jėga padidėjo 1,4 karto. Laikomoji galia taip pat padidėjo 1,4 karto. Lyginant su pirmos serijos sija SS1-2 ($a/h=1$), kuri armuota tokiu pačiu armatūros kiekiu ($\rho_l = 0,75 \%$), pirmo plyšio atsivėrimo jėga padidėjo 2,52 karto. Sijos laikomoji galia padidėjo 1,61 karto. Tai parodo, kad mažinant jėgos peties ir aukščio santykį, bet išlaikant tą patį armatūros kiekį, sijos perima didesnę skersinę jėgą dėl labiau pasireiškiančio arkos efekto.

Sijos SS2-3 plyšių plitimas pateiktas 4.17 pav. Pirmas plyšys, betonui pasiekus tempimo stiprio ribą, atsivėrė įstrižame pjūvyje esant 151 kN apkrovai (0,32 F_u). Apkrovai pasiekus 225 kN įstrižas plyšys išsitęsė per visą sijos aukštį. Kaip matoma 4.17 pav., sijos SS2-3 plyšių išsidėstymas skiriasi nuo kitų serijos sijų. Dėl mažo atstumo tarp atramos ir apkrovos pridėjimo vietos ($a/h=0,5$) sijoje apkrova perduodama tiesiai į atramas per įstrižas betono juostas. Sija suiro dėl betono gniuždymo esant 469,9 kN apkrovai.



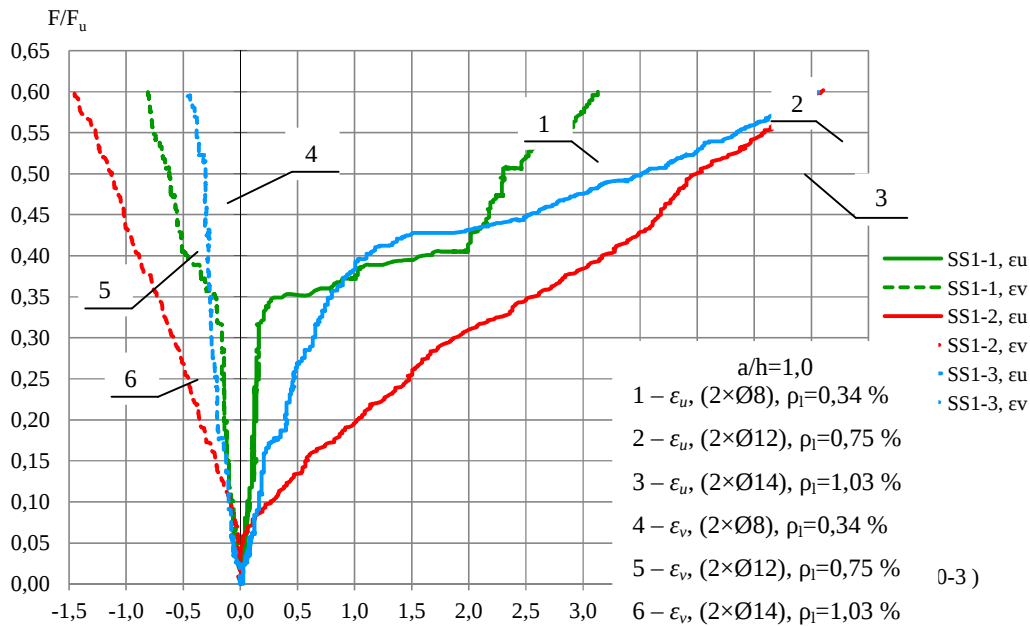
4.17 pav. Sijos SS2-3 pleišėjimas, kai $a/h=0,5$, $\rho_l = 1,03 \%$

Lyginant su SS2-2 sija, tempiamos armatūros kiekiui padidėjus 2,34 karto, pirmo plyšio atsivėrimo jėga padidėjo 1,03 karto. Tai rodo, kad sija išilginės armatūros kiekį padidinus 1,36 karto, pirmo plyšio atsivėrimo jėga beveik nepasikeičia. Lyginant SS2-3 ir SS2-2 sijas, laikomoji galia padidėjo 1,1 karto. Lyginant SS2-3 ir SS2-1 sijas, laikomoji galia padidėjo 1,53 karto.

Lyginant siją SS2-1 ($a/h=0,5$) su pirmos serijos sija SS1-3 ($a/h=1$), kuri armuota tokiu pačiu armatūros kiekiu ($\rho_l = 1,03 \%$), pirmo plyšio atsivėrimo jėga padidėjo 2,07 karto. Sijos laikomoji galia padidėjo 1,5 karto. Tai rodo, kad tiek padidinus armatūros kiekį 3,05 karto laikomoji galia padidėja 1,5 karto, tiek sumažinus jėgos peties ir aukščio santykį 2 kartus, bet paliekant tą patį armatūros kiekį, laikomoji galia padidėjo 1,5 karto.

4.3.4. Eksperimento metu gautos trumpų sijų deformacijos

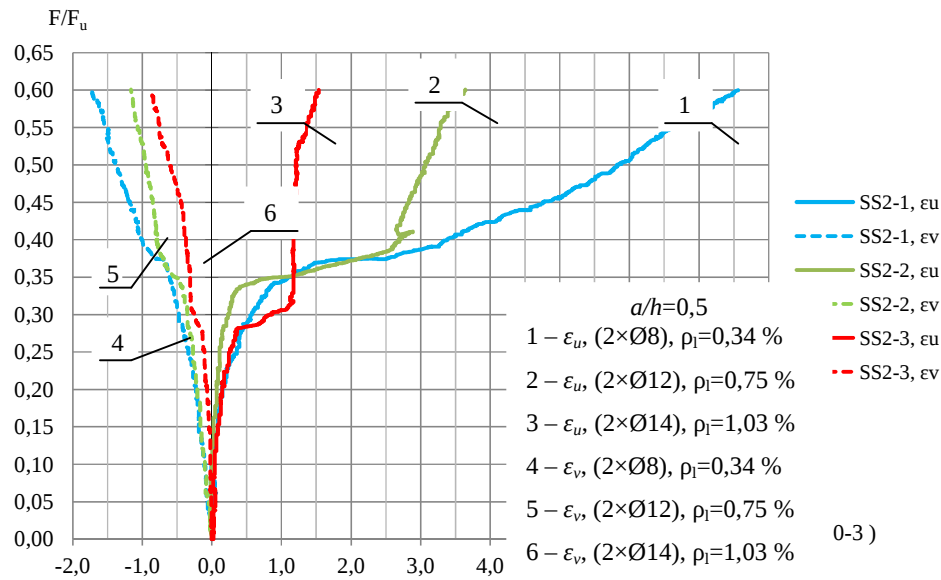
Atsižvelgiant į tai, kad deformacijos buvo matuojamos tik vienoje vietoje ir plyšių atsiradimas iškreipia duomenis, svarbiausios deformacijos analizuojamos tik iki $0,6 F_u$ apkrovos. Pirmos serijos sijų svarbiausių deformacijų pasiskirstymas, priklausomai nuo veikiančios ir suirimo apkrovos santykio, pateiktas 4.18 pav.



4.18 pav. Pirmos serijos sijų svarbiausiųjų deformacijų pasiskirstymas, kai $a/h = 1$

Iš 4.18 pav. pateiktų svarbiausiųjų deformacijų kitimo kreivių matoma, kad priklausomybės yra panašios. Sijoje SS1-1 iki $0,3 F_u$ deformacijos, didėjant apkrovai, kito proporcingai. Apkrovai pasiekus $0,35 F_u$ deformacijos pradeda greitai didėti, nes tuo metu sijoje atsivėrė pirmieji plyšiai. Sijos SS1-2 deformacijos, lyginant su SS1-1 sija, kai veikia vienoda apkrova yra didesnės, nes sija pradėjo pleišėti deformacijų matavimo zonoje ir matavimai nėra tikslūs. Esant $0,6 F_u$ apkrovai, sijos SS1-1 svarbiausioji teigiama deformacija nuo SS1-2 ir SS1-3 skiriasi 1,63 karto.

Iš 4.19 pav. pateiktų svarbiausiųjų deformacijų kreivių matoma, kad antros serijos sijų deformacijų kitimas, priklausomai nuo veikiančios ir laikomosios jėgos santykio, yra panašus. Nustatyta, kad visų antros serijos sijų, kai $a/h = 0,5$, iki $0,3 F_u$ deformacijos kito proporcingai. Sijose SS2-1 ir SS2-2, esant $0,34 F_u$ apkrovai, atsirado pirmi plyšiai, todėl pastebimas greitas deformacijų didėjimas. Trečioje serijos sijoje SS2-3 pirmi plyšiai pastebėti, kai apkrova pasiekė $0,32 F_u$.



4.19 pav. Antros serijos sijų svarbiausių deformacijų pasiskirstymas, kai $a/h = 0,5$

Lyginant su pirmos serijos sijomis ($a/h=1,0$), pastebima, kad antros serijos sijose ($a/h=0,5$), didinant armatūros kiekį, deformacijos mažėja.

Norint palyginti bandinių svarbiausias deformacijas ir jų krypties kampus, pasirenkamos apkrovos reikšmės ir atliekamas bandinių rezultatų palyginimas (4.5 lentelė).

4.5 lentelė. Pirmos serijos sijų svarbiausių deformacijų palyginimas, kai veikia skirtinga apkrova

Bandinio pavadinimas	a/h	$n \times \emptyset$	$\rho_l, \%$	Apkrova F, kN											
				25,00			45,00			65,00			85,00		
				$\varepsilon_u \times 10^{-3}$	$\varepsilon_v \times 10^{-3}$	β	$\varepsilon_u \times 10^{-3}$	$\varepsilon_v \times 10^{-3}$	β	$\varepsilon_u \times 10^{-3}$	$\varepsilon_v \times 10^{-3}$	β	$\varepsilon_u \times 10^{-3}$	$\varepsilon_v \times 10^{-3}$	β
1 serija															
SS1-1	1,00	2×Ø8	0,34	0,23	-0,21	-38,30	0,27	-0,21	-36,54	2,15	-0,55	-32,49	3,01	-0,79	-28,15
SS1-2	1,00	2×Ø12	0,75	0,212	-0,09	-33,40	0,74	-0,26	-28,55	1,43	-0,45	-27,23	2,17	-0,65	-26,79
SS1-3	1,00	2×Ø14	1,03	0,194	-0,074	-31,72	0,20	-0,12	-26,57	0,39	-0,20	25,23	0,52	-0,24	-24,51
Palyginimas				$\varepsilon_{u,1} / \varepsilon_{u,i}$	$\varepsilon_{v,1} / \varepsilon_{v,i}$	β_1 / β_i	$\varepsilon_{u,1} / \varepsilon_{u,i}$	$\varepsilon_{v,1} / \varepsilon_{v,i}$	β_1 / β_i	$\varepsilon_{u,1} / \varepsilon_{u,i}$	$\varepsilon_{v,1} / \varepsilon_{v,i}$	β_1 / β_i	$\varepsilon_{u,1} / \varepsilon_{u,i}$	$\varepsilon_{v,1} / \varepsilon_{v,i}$	β_1 / β_i
SS1-1	1,00	2×Ø8	0,34	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SS1-2	1,00	2×Ø12	0,75	0,94	0,45	0,87	2,74	1,24	0,78	0,67	0,82	0,84	0,72	0,82	0,95
SS1-3	1,00	2×Ø14	1,03	0,86	0,36	0,83	0,74	0,57	0,73	0,18	0,36	-0,78	0,17	0,30	0,87

Pastabos:

ε_u – svarbiausioji teigiama deformacija;

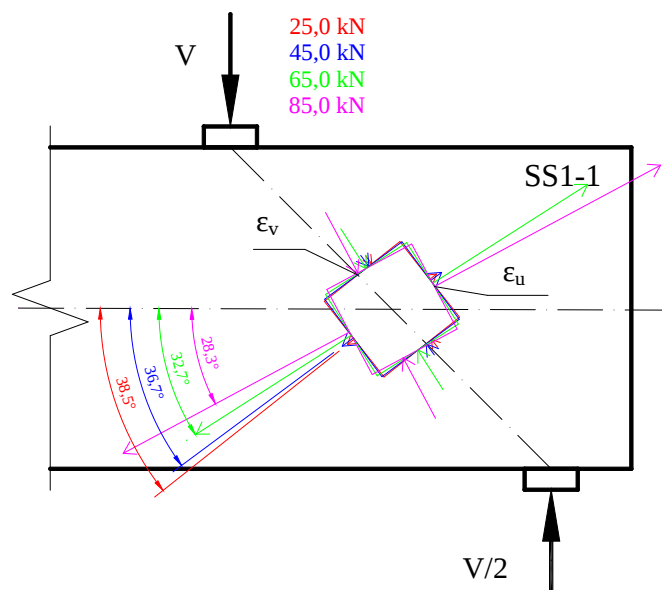
ε_v – svarbiausioji neigiama deformacija;

β – svarbiausių deformacijų ir svarbiausių įtempimų krypties kampas.

Atlikus eksperimento metu gautų duomenų analizę, pastebima, kad pirmos serijos sijose, didėjant apkrovai, deformacijos kinta skirtingai. Sijoje SS1-1, apkrovai pakilus iki 85 kN, svarbiausioji teigiama deformacija padidėjo 13,3 karto, o svarbiausioji neigiama deformacija padidėjo 3,8 karto. Svarbiausių deformacijų krypties kampas, skaičiuojant nuo sijos ašies, sumažėjo 1,36 karto (4.5 lentelė). Sijoje SS1-2, apkrovai pakilus iki 85 kN, svarbiausioji teigiama deformacija padidėjo 10,2 karto, o svarbiausioji neigiama deformacija padidėjo 7 kartus. Jų krypties kampas, skaičiuojant nuo sijos ašies, sumažėjo 1,25 karto (4.21 pav).

Sijoje SS1-3, kai veikia 85 kN apkrova, svarbiausioji teigiama deformacija padidėjo 2,7 karto, o neigiama padidėjo 3,2 karto. Jų krypties kampas sumažėjo 1,29 karto (4.22 pav). Tai parodo, kad sijose su didesniu armatūros kiekiu pastebimos mažesnės deformacijos.

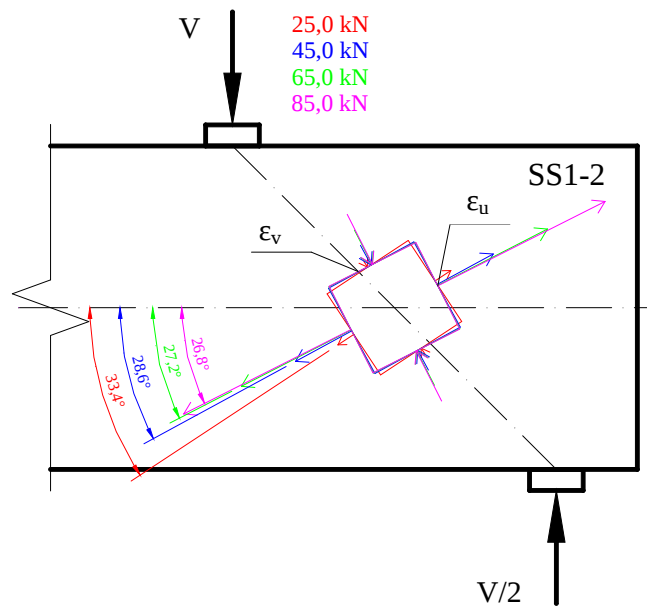
Grafinis sijos SS1-1 svarbiausių deformacijų krypties kampo kitimas, didėjant apkrovai, pavaizduotas 4.20 pav.



4.20 pav. Sijos SS1-1 svarbiausiosios deformacijos ir jų krypties kampai

Remiantis gautais rezultatais galima teigti, kad sijos SS1-1 svarbiausių deformacijų krypties kampas, didėjant apkrovai mažėja. Apkrovai padidėjus 3,4 karto, kampas sumažėja 1,36 karto.

Sijos SS1-2 svarbiausių deformacijų ir jų krypties kampo kitimo grafinis palyginimas, esant skirtingai apkrovai, pateiktas 4.21 pav.

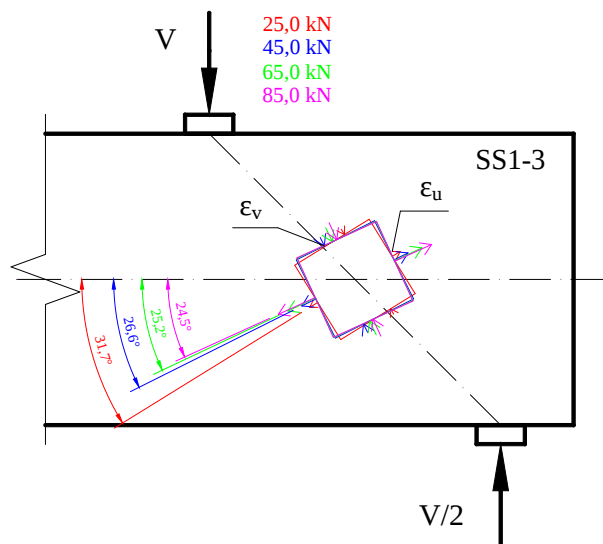


4.21 pav. Sijos SS1-2 svarbiausiosios deformacijos ir jų krypties kampai

Didėjant apkrovai svarbiausiųjų deformacijų krypties kampas mažėja. Apkrovai padidėjus 3,4 karto, kampas sumažėja 1,25 karto. Lyginant su sija SS1-1, kai veikia 85 kN apkrova, matoma, kad armatūros kiekiui padidėjus 2,21 karto, svarbiausiųjų deformacijų krypties kampas sumažėjo 1,05 karto. Remiantis bandymų rezultatais galima teigti, kad esant didesniam armatūros kiekiui, svarbiausiųjų įtempių krypties kampas, matuojant nuo sijos ašies, yra mažesnis. Tai parodo, kad svarbiausiųjų įtempių trajektorijos yra statesnės.

Lyginant pirmos serijos sijų SS1-1 ir SS1-2 deformacijas, kai veikia 25 kN apkrova, gaunama, kad armatūros kiekiui padidėjus 2,21 karto, svarbiausioji teigiama deformacija SS1-2 sijoje sumažėjo 1,06 karto, o neigiama 2,22 karto. Lyginant sijų SS1-1 ir SS1-2 deformacijas, kai veikia 85 kN apkrova, matoma, kad armatūros kiekiui padidėjus 2,21 karto, svarbiausioji gniuždymo deformacija sumažėjo 1,22 karto, o teigiama sumažėjo 1,39 karto. Atlikus sijų deformacijų analizę, nustatyta, kad veikiant vienodai apkrovai, bet naudojant skirtingą armatūros kiekį, sijose su didesniu armavimu pasireiškia mažesnės deformacijos. Taip pat nustatyta, kad sijoje SS1-2, esant 45 kN apkrovai, pastebimos didesnės deformacijos nei SS1-3 sijoje, nes bandymo metu įstrižas plyšys plito per deformacijų matavimo zoną ir iškreipė rezultatus.

Grafinis sijos SS1-3 svarbiausiųjų deformacijų krypties kampo kitimas pateiktas 4.22 pav.



4.22 pav. Sijos SS1-3 svarbiausios deformacijos ir jų krypties kampai

Sijos SS1-3 svarbiausių deformacijų krypties kampas, apkrovai padidėjus 3,4 karto, sumažėjo 1,29 karto (4.22 pav.)

Lyginant siją SS1-3 ($\rho_l=1,03\%$) su sija SS1-1 ($\rho_l=0,34\%$), kai veikia 85 kN apkrova, matoma, kad armatūros kiekiui padidėjus 3,03 karto, svarbiausių deformacijų krypties kampas sumažėjo 1,15 karto. Galima teigti, kad esant didesniai armatūros kiekiui, svarbiausių įtempių krypties kampas, matuojant nuo sijos ašies yra mažesnis (įtempių trajektorijos yra statesnės).

Lyginant sijų SS1-1 ir SS1-3 deformacijas, kai veikia 25 kN apkrova, matoma, kad armatūros kiekiui padidėjus 3,03 karto, svarbiausioji teigiama deformacija SS1-3 sijoje sumažėjo 1,18 karto, o neigiama deformacija sumažėjo 2,83 karto. Lyginant sijas SS1-1 ($\rho_l=0,34\%$) ir SS1-3 ($\rho_l=1,03\%$), kai veikia 85 kN apkrova, matoma, kad armatūros kiekiui padidėjus 3,03 karto, svarbiausioji gniuždymo deformacija sumažėjo 3,29 karto, o teigiama deformacija sumažėjo 5,8 karto. Analizuojant sijų deformacijas, kai veikia vienoda apkrova, bet panaudotas skirtingas armatūros kiekis, pastebima, kad sijose su didesniu armavimu pasireiškia mažesnės deformacijos.

Norint palyginti antros serijos sijų svarbiausių deformacijų ir jų krypties kampo kitimą, pasirenkamos apkrovos, kurios pateiktos 4.6 lentelėje. Apkrovos pasirinktos didesnės nei lyginant pirmos serijos sijas todėl, kad esant mažai apkrovai antros serijos sijose deformacijos yra nepastovios ir mažos.

4.6 lentelė. Pirmos serijos sijų svarbiausiųjų deformacijų palyginimas, kai veikia skirtinga apkrova

Bandinio pavadinimas	a/h	n×Ø	ρl, %	Apkrova F, kN											
				85,00			150,00			200,00			250,00		
				εu ×10 ⁻³	εv ×10 ⁻³	β	εu ×10 ⁻³	εv ×10 ⁻³	β	εu ×10 ⁻³	εv ×10 ⁻³	β	εu ×10 ⁻³	εv ×10 ⁻³	β
2 serija															
SS2-1	0,50	2×Ø8	0,34	0,40	-0,40	-36,24	5,73	-1,35	-22,39	8,44	-1,96	-22,97	12,78	-3,12	-23,26
SS2-2	0,50	2×Ø12	0,75	0,16	-0,21	-10,52	1,78	-0,68	-18,20	2,92	-0,88	-18,43	3,47	-1,13	-19,50
SS2-3	0,50	2×Ø14	1,03	0,12	-0,06	-9,22	1,16	-0,36	-17,68	1,17	-0,41	-17,85	1,30	-0,72	-18,49
Palyginimas				εu,1 / εu,i	εv,1 / εv,i	β1 / βi	εu,1 / εu,i	εv,1 / εv,i	β1 / βi	εu,1 / εu,i	εv,1 / εv,i	β1 / βi	εu,1 / εu,i	εv,1 / εv,i	β1 / βi
SS2-1	1,00	2×Ø8	0,34	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
SS2-2	1,00	2×Ø12	0,75	0,40	0,53	0,29	0,31	0,51	0,81	0,35	0,45	0,80	0,27	0,36	0,84
SS2-3	1,00	2×Ø14	1,03	0,31	0,16	0,25	0,20	0,27	0,79	0,14	0,21	0,78	0,10	0,23	0,79

Pastabos:

εu – svarbiausioji teigiama deformacija;

εv – svarbiausioji neigiama deformacija;

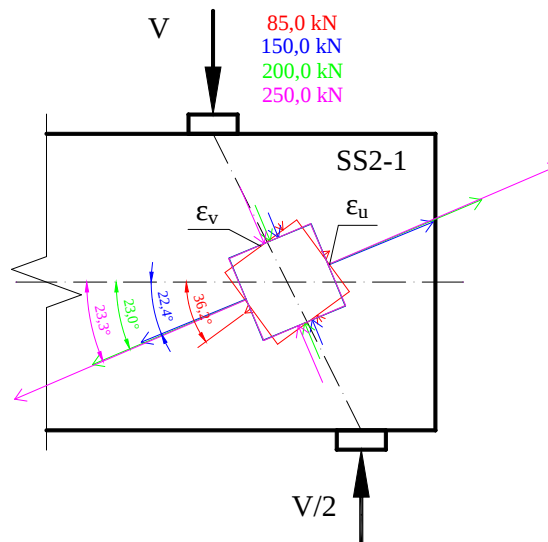
β – svarbiausiųjų deformacijų ir svarbiausiųjų įtempimų krypties kampas.

Atlikus eksperimento metu gautų duomenų analizę, pastebima, kad antros serijos sijose, didėjant apkrovai, deformacijos kinta skirtingai. Sijoje SS2-1, apkrovai padidėjus 2,94 karto, svarbiausioji teigiama deformacija padidėjo 31,3 karto, o neigiama 7,8 karto (4.5 lentelė).

Sijoje SS2-2, apkrovai pakilus iki 250 kN, svarbiausioji teigiama deformacija padidėjo 21,7 kartų, o neigiama 5,38 karto. Svarbiausiųjų deformacijų krypties kampas padidėjo 1,85 karto (4.23 pav).

Sijoje SS2-3, kai veikia 250 kN apkrova, svarbiausioji teigiama deformacija padidėjo 10,8 karto, o svarbiausioji neigiama deformacija padidėjo 12 kartų. Svarbiausiųjų deformacijų krypties kampas padidėjo 2 kartus (4.24 pav).

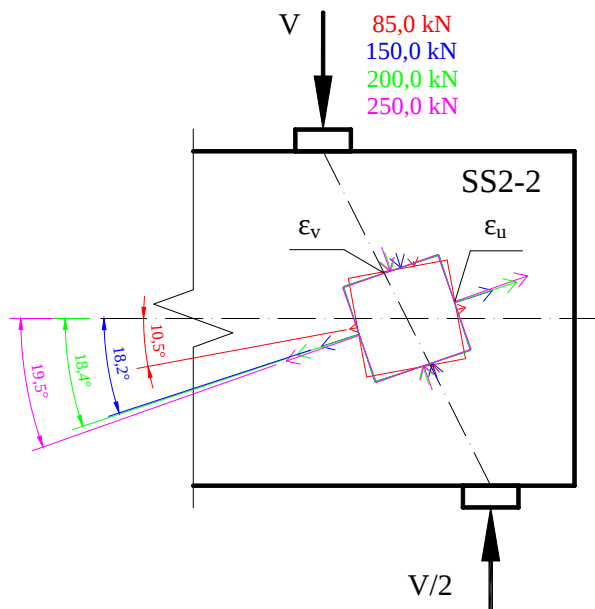
4.23 pav. pateiktas grafinis sijos SS2-1 svarbiausiųjų deformacijų krypties kampo palyginimas. Nuo 85 iki 150 kN apkrovos, svarbiausiųjų deformacijų krypties kampas sumažėja 1,62 karto. Apkrovai padidėjus nuo 150 iki 250 kN, svarbiausiųjų įtempimų krypties kampas padidėjo 1,04 karto. Nustatyta, kad sijos SS2-1 svarbiausiųjų deformacijų krypties kampas, apkrovai kylant, didėja.



4.23 pav. Sijos SS2-1 svarbiausiosios deformacijos ir jų krypties kampai

Lyginant SS2-1 ($a/h=0,5$, $\rho_l=0,34$ %) su sija SS1-1 ($a/h=1$, $\rho_l=0,34$ %), esant 85 kN apkrovai, kampo reikšmė gaunama 1,28 karto mažesnė. Tai rodo, kad įtempių trajektorijos trumpose sijos su skirtingu a/h santykiu, kai veikia vienoda apkrova pasiskirsto skirtingai.

4.24 pav. pateiktas sijos SS2-2 svarbiausiųjų deformacijų krypties kampo kitimas.



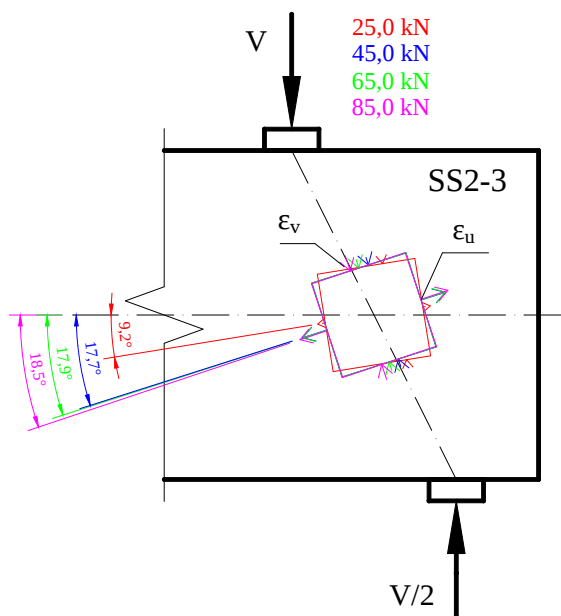
4.24 pav. Sijos SS2-2 svarbiausiosios deformacijos ir jų krypties kampai

Didėjant apkrovai svarbiausiųjų deformacijų krypties kampas, didėja. Apkrovai padidėjus 2,94 karto, kampas padidėja 1,85 karto.

Lyginant su sija SS2-1, kai veikia 250 kN apkrova, matoma, kad armatūros kiekiui padidėjus 2,21 karto (nuo $\rho_l=0,34$ iki $\rho_l=0,75$ %), svarbiausių deformacijų krypties kampas sumažėjo 1,19 karto. Lyginant sijų SS2-2 ir SS2-1 deformacijas, matoma, kad svarbiausioji tempimo deformacija sumažėjo 3,68 karto, o gniuždymo 2,76 karto (4.6 lentelė).

Lyginant sijų SS2-1 ir SS2-2 deformacijas, kai veikia 85 kN apkrova, gaunama, kad armatūros kiekiui padidėjus 2,21 karto, svarbiausioji teigiama deformacija SS2-2 sijoje sumažėjo 2,5 karto, o neigiama deformacija sumažėjo 1,9 karto.

Lyginant su sija SS1-2 ($a/h=1$), kai veikia 85 kN apkrova, gaunama, kad a/h santykiui sumažėjus du kartus, kampas sumažėja 3,2 karto, svarbiausioji tempimo deformacija sumažėja 13,6 karto, o gniuždymo deformacija sumažėja 3,1 karto.



4.25 pav. Sijos SS2-2 svarbiausiosios deformacijos ir jų krypties kampai

Apkrovai padidėjus 2,94 karto, kampas padidėja 2,01 karto. Lyginant su sija SS2-1, kai veikia 250 kN apkrova, matoma, kad armatūros kiekiui padidėjus 3,05 karto, svarbiausių deformacijų krypties kampas sumažėjo 1,26 karto, svarbiausioji tempimo deformacija sumažėjo 9,83 karto, o neigiama deformacija sumažėjo 4,33 karto.

Lyginant sijų SS2-3 ($\rho_l=1,03$ %) ir SS2-1 ($\rho_l=0,34$ %) deformacijas, kai veikia 85 kN apkrova, matoma, kad svarbiausioji tempimo deformacija sumažėjo 3,33 karto, o gniuždymo deformacija sumažėjo 6,67 karto (4.5 ir 4.6 lentelės)

Lyginant su pirmos serijos sija SS1-3 ($a/h=1$), kai veikia 85 kN apkrova, gaunama, kad a/h santykiui sumažėjus du kartus, o armatūros kiekiui nepakitus ($\rho_l=1,03$ %), kampas sumažėja 2,7 karto, svarbiausioji tempimo deformacija sumažėja 4,33 karto, o gniuždymo deformacija sumažėja 3,42 karto.

4.4. Ketvirtos skyriaus išvados

1. Atlikus eksperimentinių bandymų duomenų analizę nustatyta, kad mažėjant trumpų sijų a/h santykiui, armatūros kiekis turi mažesnę įtaką laikomajai galiai. Pirmos serijos sijų ($a/h=1$) laikomoji galia, armatūros kiekiui padidėjus 3,05 karto, padidėjo 2,13 karto. Antros serijos sijose ($a/h=0,5$) laikomoji galia, armatūros kiekiui padidėjus 3,05 karto, padidėjo tik 1,53 karto.
2. Palyginus pirmos serijos ($a/h=1$) ir antros serijos ($a/h=0,5$) bandinių rezultatus nustatyta, kad esant tam pačiam armatūros kiekiui ($\rho_l=0,34\%$), bet 2 kartus mažesniai a/h santykiui, galutinė bandinio laikomoji galia padidėjo 2,08 karto.
3. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad mažėjant trumpų sijų a/h santykiui, armatūros kiekis turi didesnę įtaką pirmo plyšio atsivėrimo jėgai. Pirmos serijos sijose ($a/h=1$), armatūros kiekiui padidėjus 3,05 karto (nuo 0,34 iki 1,03 %), pirmo plyšio atsivėrimo jėga padidėjo 1,35 karto. Antros serijos sijose ($a/h=0,5$), pirmo plyšio atsivėrimo jėga, armatūros kiekiui padidėjus 3,05 karto, padidėjo 1,45 karto.
4. Patvirtinta, kad išilginės armatūros kiekis lemia trumpų sijų suirimo tipą. Eksperimento metu, sija SS1-1 ($\rho_l=0,34\%$) suiro normaliniame pjūvyje, o sija SS1-2, armatūros kiekiui padidėjus 2,24 karto, suiro įstrižame pjūvyje.
5. Atlikus eksperimentinių bandymų duomenų analizę nustatyta, kad svarbiausieji įtempiai, esant skirtingam a/h santykiui ir armavimui, pasiskirsto skirtingai. Sijose, kai $a/h=1$, didėjant ρ_l (nuo 0,34 iki 1,03 %), svarbiausiųjų įtempių krypties kampas nuo sijos ašies, kintant apkrovai (nuo 25 iki 85 kN), sumažėja nuo 1,2 iki 1,15 karto, o, kai $a/h=0,5$, didėjant ρ_l (nuo 0,34 iki 1,03 %) ir kintant apkrovai (nuo 85 iki 250 kN), kampas atitinkamai sumažėja nuo 1,26 iki 3,93 kartų. Tai parodo, kad mažėjant sijų a/h santykiui svarbiausiųjų įtempių trajektorijų kampas yra didesnis (trajektorijos statesnės).
6. Atlikus trumpų sijų bandinių svarbiausiųjų deformacijų palyginimą, nustatyta, kad veikiant vienodai apkrovai (85 kN), bet didėjant ρ_l (nuo 0,34 iki 1,03 %), svarbiausioji gniuždymo deformacija sijose ($a/h=1$) sumažėja 3,33 karto, o teigiama deformacija sumažėja 5,88 karto. Kai $a/h=0,5$ svarbiausioji gniuždymo deformacija sijoje sumažėja 6,25 karto, o teigiama deformacija sumažėja 3,22 karto.

5. EKSPERIMENTINIŲ IR TEORINIŲ TRUMPŲ SIJŲ LAIKOMOSIOS GALIOS SKAIČIAVIMO REZULTATŲ PALYGINIMAS

Gelžbetonių trumpų sijų laikomosios galios teorines reikšmes, gautos naudojantis antrame skyriuje aprašytais modeliais. Eksperimentiniai duomenys gauti ketvirtame skyriuje aprašyto bandymo metu. Laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas pateiktas 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas

Bandinio pavadinimas	a/h	$n \times \emptyset$	$\rho_l, \%$	V_{test}, kN	V_{crs}, kN	Laikomoji galia $V_{cal}, (V_{test}/V_{cal}), kN$ (kartai)						
						Zhang ir Tan (2007)	Tang (2004)	Cheng ir Tan (2006)	Subedi (1988)	Pilai ir Nagarajan (2008)	STR (2005)	EC 2 (2005)
1 serija												
SS1-1	1,00	2×Ø8	0,34	147,60	54,00	63,10 (2,34)	133,94 (1,10)	59,9 (2,46)	143,58 (1,03)	150,03 (0,98)	145,95 (1,01)	144,16 (1,02)
SS1-2	1,00	2×Ø12	0,75	267,00	58,00	125,99 (2,12)	204,65 (1,30)	94,30 (2,83)	251,33 (1,06)	242,00 (1,10)	145,95 (1,83)	144,16 (1,85)
SS1-3	1,00	2×Ø14	1,03	315,00	73,00	164,97 (1,91)	254,19 (1,24)	116,62 (2,7)	314,30 (1,0)	301,01 (1,05)	145,95 (2,16)	144,16 (2,19)
2 serija												
SS2-1	0,50	2×Ø8	0,34	307,00	104,00	110,84 (2,77)	216,92 (1,42)	107,66 (2,85)	244,42 (1,26)	246,07 (1,25)	145,95 (2,10)	144,16 (2,13)
SS2-2	0,50	2×Ø12	0,75	429,00	146,00	215,42 (1,99)	352,74 (1,22)	155,5 (2,76)	409,91 (1,05)	427,60 (1,00)	145,95 (2,94)	144,16 (2,98)
SS2-3	0,50	2×Ø14	1,03	469,90	151,00	273,95 (1,72)	446,10 (1,05)	199,29 (2,36)	525,86 (0,89)	544,45 (0,86)	145,95 (3,22)	144,16 (3,26)

Pastabos:

V_{cal} – trumpų sijų laikomoji galia, apskaičiuota pagal antrame skyriuje aprašytas metodikas;

V_{test}/V_{cal} – eksperimentinės ir teorinės laikomosios galios santykis.

Iš 5.1 lentelėje pateiktų eksperimentinių rezultatų matyti, kad 3,05 karto didesnis armatūros kiekis trumpų sijų laikomąją galią padidina 2,13 karto, kai $a/h = 1,0$. Antros serijos sijose, kai $a/h = 0,5$, laikomoji galia padidėja 1,53 karto. Tai parodo, kad a/h santykiui mažėjant, armatūros kiekis turi mažesnę įtaką laikomajai galiai.

Trečiame skyriuje atlikta skaičiavimo modelių analizė rodo, kad mažėjant jėgos peties ir aukščio santykiui, didesnę reikšmę trumpų sijų laikomajai galiai turi skersinis armavimas.

Lyginant su visais bandiniais, gaunama, kad trumpų sijų laikomosios galios reikšmės tiksliausiai atitinka autoriaus N. K. Subedi (Subedi 1988) metodu gauti rezultatai. Apskaičiuotos laikomosios galios reikšmės nuo eksperimentinių vidutiniškai skiriasi 1,06 karto. ($\sigma=0,118$).

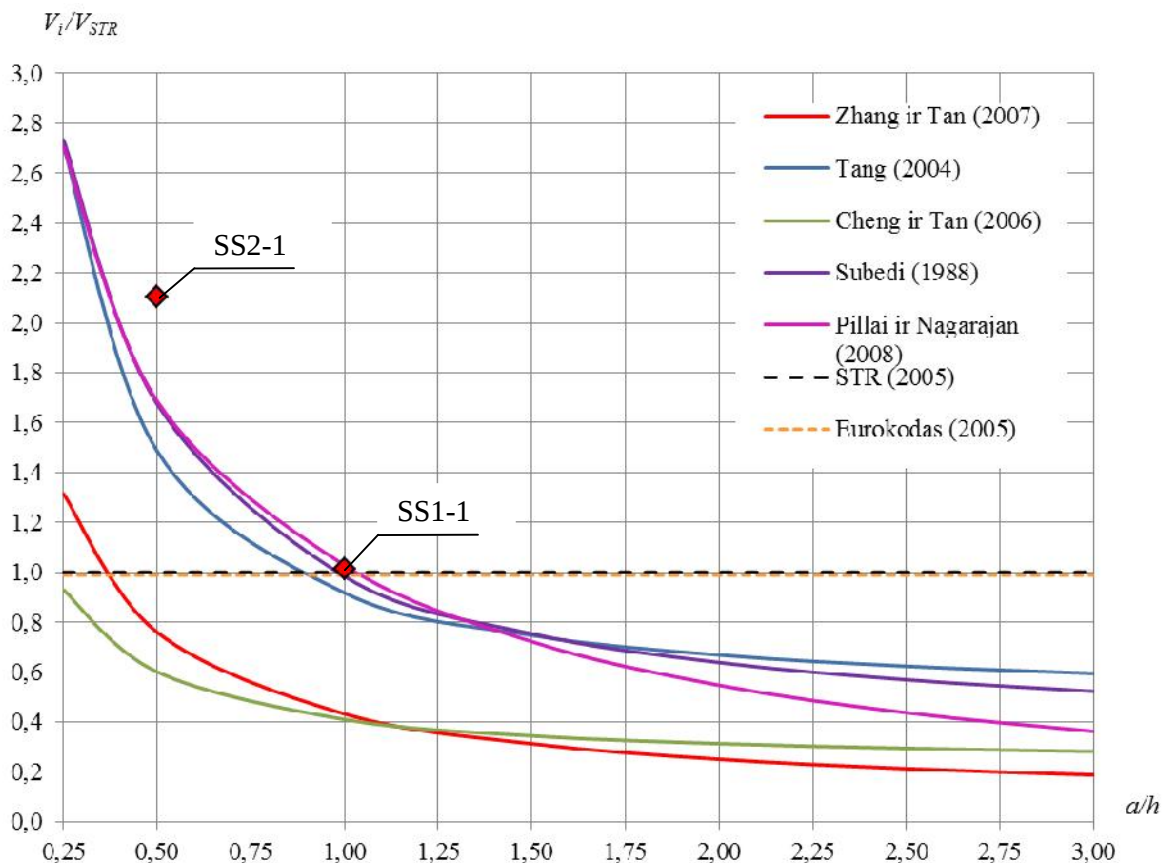
Remiantis 5.1 lentelės duomenimis galima teigti, kad autorių N. Zhango ir K. H. Tano (Zhang ir Tan 2007) bei G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) modeliai turi per didelę atsargą (nuo 41,70 iki 64,93 %), o T. M. Pillai ir P. Nagarajano (Pilai ir Nagarajan 2008) ir N. K. Subedi (Subedi 1988) modeliuose sijų laikomoji galia yra pervertinama iki 15 %.

Kaip matoma iš 5.1 lentelėje ir 5.1 pav. pateikto rezultatų palyginimo, laikomoji galia, skaičiuojant pagal STR (2005) ir Eurokodą (2005), išlieka pastovi. Taip yra todėl, kad STR (2005) ir Eurokode (2005) skaičiavimuose nevertinamas išilginis armavimas. Skaičiavimo metodai yra aptarti antrame skyriuje. Trečiame skyriuje atlikta skaičiavimo modelių parametrinė analizė parodė, kad pagal STR (2005) ir Eurokodą (2005) skaičiuojamų trumpų sijų laikomoji galia labiausiai priklauso nuo jėgos peties ir aukščio santykio bei skersinio armavimo. Eksperimentinėje programoje, siekiant ištirti įtempių ir deformacijų būvį, pasirinktos vienodo aukščio sijos, o a/h santykis buvo parenkamas keičiant jėgos pridėjimo atstumą. Dėl šios priežasties, atliekant teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimą, pagal STR (2005) ir Eurokodo (2005) apskaičiuotų sijų laikomosios galios priklausomybės nuo a/h yra tiesinės (5.1-5.3 pav.)

Trumpų sijų laikomosios galios pokyčio ir a/h santykio priklausomybės pateiktos 5.1-5.3. pav. Atskirai pažymėti taškai nurodo, eksperimento metu išbandytų sijų laikomosios galios reikšmes. Laikomųjų galių santykis V_i/V_{STR} yra apskaičiuotas lyginant su STR (2005) metodu.

Atlikus eksperimentų ir teorinių skaičiavimų rezultatų analizę nustatyta, kad pagal visas metodikas, išskyrus N. Zhango ir K. H. Tano (Zhang ir Tan 2007) bei G. H. Chengo ir K. H. Tano (Cheng ir Tan 2006) modelius, laikomosios galios gaunamos apytiksliai lygios sijos SS1-1 bandymo rezultatams (5.1 pav.).

5.1. Rezultatų palyginimas, kai $\rho_l = 0,34 \%$



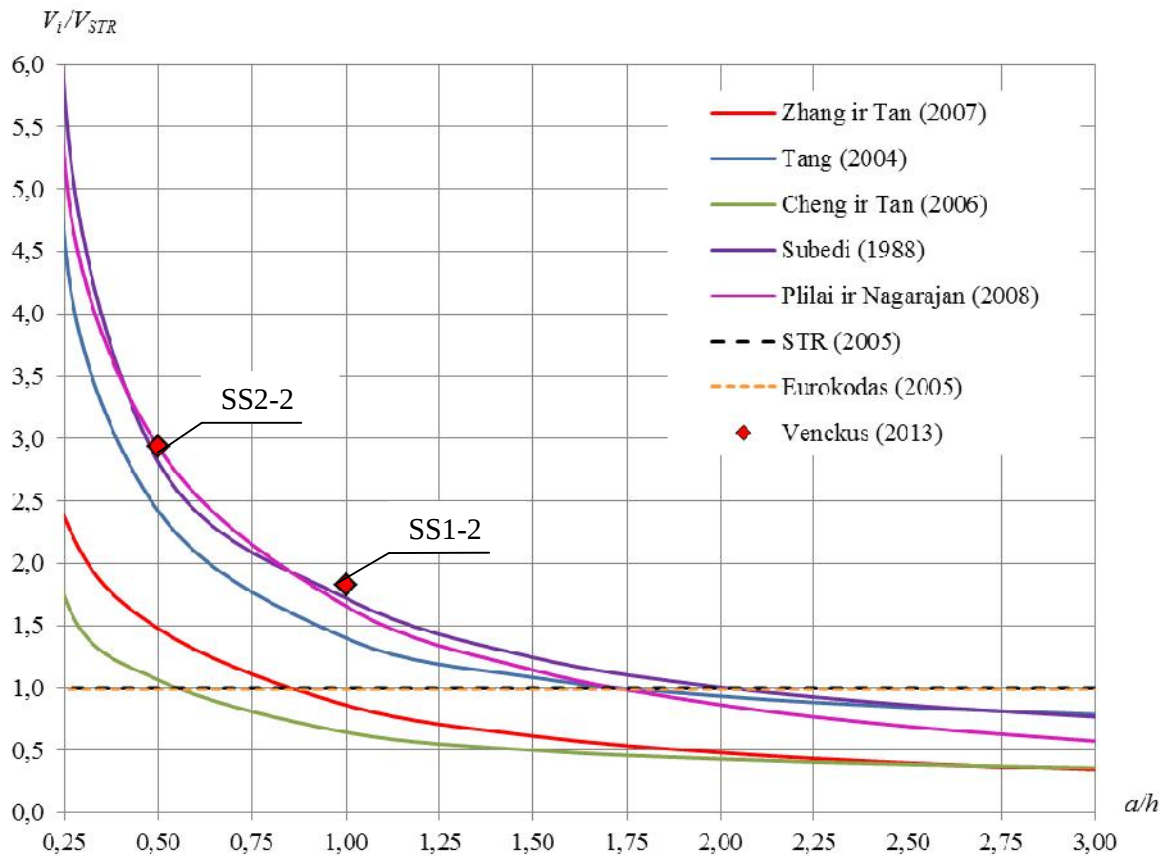
5.1 pav. Trumpų sijų laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas ($2 \times \emptyset 8$, $\rho_l = 0,34 \%$)

Tiksliausias rezultatas, kai $a/h=1$ (SS1-1), o $\rho_l = 0,34 \%$, gautas skaičiuojant pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) metodiką, pagal kurią apskaičiuota sijos laikomoji galia nuo eksperimento skiriasi 1,03 karto. Laikomosios galios atsarga yra 2,72 %. T. M. Pillai ir P. Nagarajan (Pillai ir Nagarajan 2008) modelyje sijos laikomoji galia pervertinama 1,65 % Skaičiuojant pagal kitų autorių modelius sijos laikomosios galios atsarga gaunama didesnė (9,26-59,42 %).

Lyginant su SS2-1 sijos bandymo rezultatais, gaunama, kad geriausiai atitinka T. M. Pillai ir P. Nagarajano (Pillai ir Nagarajan 2008) modeliu gauti rezultatai, pagal kurių apskaičiuota laikomoji galia nuo eksperimento skiriasi 1,25 karto. Sijos laikomosios galios atsarga yra 19,85 %. Pagal kitų autorių modelius atsarga kinta nuo 20,39 iki 64,93 %. Pillai ir Nagarajan 2008) modeliu apskaičiuotos sijų laikomosios galios reikšmės geriausiai atitinka visos antros serijos bandinių rezultatus, o reikšmės vidutiniškai skiriasi 1,04 karto (5.1 lentelė).

5.2. Rezultatų palyginimas, kai $\rho_l = 0,75 \%$

5.2 pav. pateiktas teorinių ir eksperimentinių rezultatų grafinis palyginimas, kai $\rho_l = 0,75 \%$.



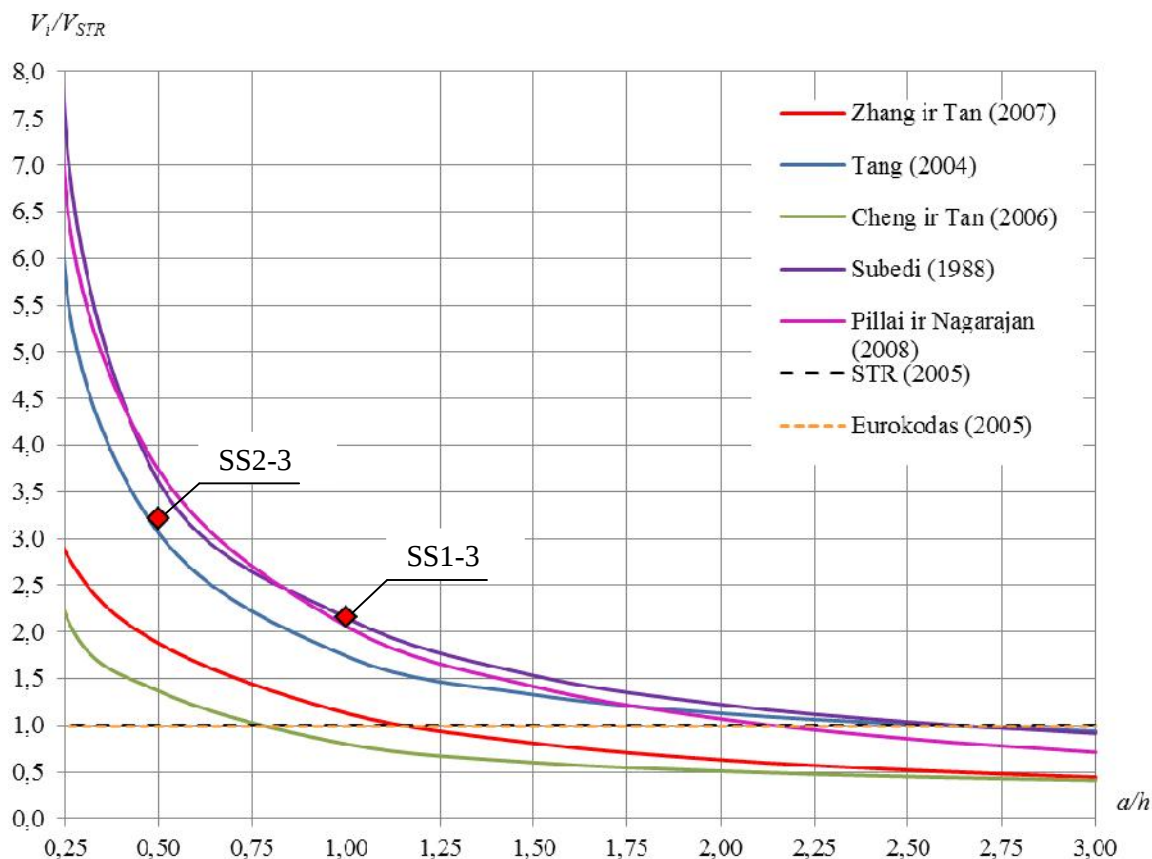
5.2 pav. Trumpų sijų laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas ($2 \times \emptyset 12$, $\rho_l = 0,75 \%$)

Sijos SS1-2 laikomoji galia tiksliausiai apskaičiuota pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) metodiką, pagal kurią laikomoji galia nuo eksperimento skiriasi 1,06 karto (5.1 lentelė). Laikomosios galios atsarga yra 5,87 %. Pagal kitų autorių modelius atsarga kinta nuo 9,36 iki 64,68 % 5.2 pav.

Lyginant su SS2-2 sijos bandymo rezultatais, matoma, kad ypač gerai atitinka T. M. Pillai ir P. Nagarajano (Pillai ir Nagarajan 2008) modeliu gauti rezultatai, pagal kurį apskaičiuota laikomoji galia nuo eksperimento skiriasi 1,003 karto. Laikomosios galios atsarga yra 0,33 %. Pagal kitų autorių modelius atsarga kinta nuo 4,45 iki 66,40 %.

5.3. Rezultatų palyginimas, kai $\rho_l = 1,03 \%$

5.3 pav. pateiktas teorinių ir eksperimentinių rezultatų grafinis palyginimas, kai $\rho_l = 1,03 \%$).



5.3 pav. Trumpų sijų laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas ($2 \times \varnothing 14$, $\rho_l = 1,03 \%$)

Sijos SS1-3 laikomoji galia tiksliausiai apskaičiuota pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) modelį, pagal kurį laikomoji galia nuo eksperimento rezultatų skiriasi 1,002 karto (5.1 lentelė). Laikomosios galios atsarga yra 0,22 %. Pagal kitų autorių modelius atsarga kinta nuo 4,44 iki 62,98 % 5.3 pav.

Lyginant su SS2-3 sijos bandymo rezultatais, gaunama, kad geriausiai atitinka C. Y. Tango (Tang 2004) modeliu gauti rezultatai, pagal kurį apskaičiuota laikomoji galia nuo eksperimento skiriasi 1,05 karto. Laikomosios galios atsarga yra 5,06 %. Skaičiuojant pagal kitų autorių modelius atsarga kinta nuo 41,70 iki 69,32 %. N. K. Subedi (Subedi 1988) ir T. M. Pillai ir P. Nagarajano (Pillai ir Nagarajan 2008) modeliuose, kai $a/h = 0,5$, armatūros kiekio įtaka sijos

laikomoji galia yra pervertinama 11,91 % ir 15,87 %. Tai parodo, kad jėgos peties ir aukščio santykiui mažėjant metodai pasidaro netikslūs.

5.4. Penkto skyriaus išvados

1. Atlikus analizę nustatyta, kad tiksliausi rezultatai, skaičiuojant trumpų sijų laikomąją galią, gaunami pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) modelį. Pagal šį modelį apskaičiuotos laikomosios galios reikšmės vidutiniškai skiriasi 1,03 karto ($\sigma=0,03$), kai $a/h = 1$, o kai $a/h=0,5$, reikšmės vidutiniškai skiriasi 1,07 karto ($\sigma=0,18$). Kitų autorių metodais apskaičiuoti rezultatai nuo eksperimentinių vidutiniškai skiriasi nuo 1,04 iki 2,67 karto, kai $a/h = 1$, o kai $a/h = 0,5$ skiriasi nuo 1,23 iki 2,79 karto. Nustatyta, kad mažėjant jėgos peties ir aukščio santykiui sijų laikomąją galią prognozuoti yra sunkiau ir metodų tikslumas mažėja.
2. Kaip parodė atlikta eksperimentinių ir teorinių trumpų sijų laikomosios galios skaičiavimo rezultatų analizė, skirtumai tarp eksperimentinių ir teorinių reikšmių kinta nuo 1,002 karto, pagal N. K. Subedi (Subedi 1988), iki 3,26 karto pagal Eurokodą (2005).
3. Projektavimo normose STR (2005) ir Eurokode (2005) išilginė armatūra, skaičiuojant trumpų sijų laikomąją galią, nevertinama, todėl gaunama didelė laikomosios galios atsarga (iki 69,32 %).
4. Nustatyta, kad jėgos peties ir aukščio santykiui esant 0,5 laikomoji galia, apskaičiuota pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) ir T. M. Pillai ir P. Nagarajano (Pillai ir Nagarajan 2008) modelius, pervertinama iki 15,87 %.

IŠVADOS

1. Trumpų sijų laikomosios galios skaičiavimo modelių apžvalga parodė, kad nėra bendros skaičiavimo metodikos. Visi apžvelgti modeliai yra empiriniai ar pusiau empiriniai, sukurti analizuojant atliktų eksperimentinių bandomų rezultatus ir remiantis ankstesnių autorių darbais.
2. Atlikta septynių trumpų sijų skaičiavimo modelių parametrinė analizė. Ištirta vyraujančių parametru (jėgos peties ir aukščio santykio a/h , išilginės armatūros kiekio ρ_l ir skersinės armatūros kiekio ρ_{sw} , betono stiprio f_c) įtaka trumpų sijų laikomosios galios skaičiavimo rezultatams. Nustatyta, kad didžiausią įtaką sijų laikomajai galiai turi jėgos peties ir aukščio santykis a/h . Santykį sumažinus 6 kartus (nuo 3 iki 0,5), laikomoji galia įvairiuose modeliuose padidėja nuo 2,07 iki 7,76 karto. Nustatyta, kad mažiausią įtaką trumpų sijų stiprumui turi betono stipris, kurį padidinus du kartus, laikomoji galia modeliuose padidėja nuo 1,004 iki 1,54 karto. Išilginės armatūros kiekį padidinus 5,4 karto (nuo 0,57 iki 3,08 cm²), laikomoji galia modeliuose kinta nuo 2,43 iki 4,14 karto. Skersinės armatūros kiekį padidinus 2,75 karto, esant tam pačiam atstumui tarp strypų, laikomoji galia atskiruose modeliuose kinta nuo 1,23 iki 2,13 karto.
3. Atlikti 6 sijų su dviem skirtingais a/h santykiais (1 ir 0,5), armuotų skirtingu išilginės armatūros kiekiu ($\rho_l=0,34, 0,75, 1,03$ %) eksperimentiniai tyrimai. Nustatyta, kad mažėjant trumpų sijų a/h santykiui (nuo 1 iki 0,5), armatūros kiekis turi mažesnę įtaką laikomajai galiai: sijų, kurių $a/h=1$, laikomoji galia, keičiant armatūros kiekį (nuo 0,34 iki 1,03 %), padidėja iki 2,13 karto, o, sijų, kurių $a/h=0,5$, laikomoji galia padidėja iki 1,53 karto atitinkamai.
4. Atlikus eksperimentinių bandomų duomenų analizę nustatyta, kad mažėjant a/h santykiui, armatūros kiekis ρ_l turi mažesnę įtaką trumpų sijų laikomajai galiai. Pirmos serijos sijų ($a/h=1$) laikomoji galia, armatūros kiekiui padidėjus 3,05 karto (nuo 0,34 iki 1,03 %), padidėjo 2,13 karto. Antros serijos sijose ($a/h=0,5$) laikomoji galia, armatūros kiekiui padidėjus 3,05 (nuo 0,34 iki 1,03 %) karto, padidėjo tik 1,53 karto.
5. Nustatyta, kad mažėjant trumpų sijų a/h santykiui, armatūros kiekis turi mažesnę įtaką pirmo plyšio atsivėrimo jėgai. Sijų, kurių $a/h=1$, pirmo plyšio atsivėrimo jėga, keičiant armatūros kiekį (nuo 0,34 iki 1,03 %), padidėja iki 1,35 karto (nuo 54 iki 73 kN). Sijų, kurių $a/h=0,5$, pirmo plyšio atsivėrimo jėga, keičiant armatūros kiekį (nuo 0,34 iki 1,03 %), padidėja iki 1,45 karto (nuo 104 iki 151 kN). Pirmo plyšio atsivėrimo jėga, lyginant pirmos ($a/h=1$) ir antros ($a/h=1$) serijos sijas, vidutiniškai skiriasi 2,17 karto.

6. Atlikus eksperimentinių bandymų duomenų analizę nustatyta, kad įtempiai, esant skirtingam a/h santykiui ir armavimui, pasiskirsto skirtingai. Sijose, kai $a/h=1$, didėjant ρ_l (nuo 0,34 iki 1,03 %), svarbiausiųjų įtempių krypties kampas, kintant apkrovai (nuo 25 iki 85 kN), sumažėja nuo 1,2 iki 1,15 karto, o, kai $a/h=0,5$, didėjant ρ_l (nuo 0,34 iki 1,03 %) ir kintant apkrovai (nuo 85 iki 250 kN), kampas atitinkamai sumažėja nuo 1,26 iki 3,93 kartų.
7. Atlikus trumpų sijų bandinių svarbiausiųjų deformacijų palyginimą, nustatyta, kad veikiant vienodai apkrovai (85 kN), bet didėjant ρ_l (nuo 0,34 iki 1,03 %), svarbiausioji gniuždymo deformacija sijose ($a/h=1$) sumažėja 3,33 karto, o teigiama deformacija sumažėja 5,88 karto. Kai $a/h=0,5$ svarbiausioji gniuždymo deformacija sijoje sumažėja 6,25 karto, o teigiama deformacija sumažėja 3,22 karto.
8. Atlikus eksperimentinių ir teorinių trumpų sijų laikomosios galios skaičiavimo rezultatų analizę nustatyta, kad tiksliausia trumpų sijų laikomoji galia gaunama skaičiuojant pagal N. K. Subedi (Subedi 1988) modelį. Pagal šį modelį apskaičiuotos laikomosios galios reikšmės vidutiniškai skiriasi 1,03 karto, kai $a/h = 1$, o kai $a/h = 0,5$, reikšmės vidutiniškai skiriasi 1,07 karto. Kitų autorių metodais apskaičiuoti rezultatai nuo eksperimentinių vidutiniškai skiriasi nuo 1,04 iki 2,67 karto, kai $a/h = 1$, o kai $a/h = 0,5$ skiriasi nuo 1,23 iki 2,79 karto. Nustatyta, kad mažėjant jėgos peties ir aukščio santykiui sijų laikomąją galią prognozuoti yra sunkiau ir metodų tikslumas mažėja.

LITERATŪRA

Birrcher, B. D. 2009. *Design of Reinforced Concrete Deep Beams for Strength and Serviceability. Dissertation.* 390 p.

Bracci, J. M.; Keating, P. B.; Hueste, M. B. D. 2000. Cracking in RC Bent Caps, Research Report 1851-1, Texas Transportation Institute, Texas, Oct. 2000, 257 pp.

Chemrouk, M.; Kong, F. K. 2004. Diagonal Cracking and Ultimate Shear Strength of Slender High Strength Concrete Deep Beams,” *Advances in Structural Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 217-228.

Collins, M. P.; Kuchma, D. 1999. How Safe Are Our Large, Lightly Reinforced Concrete Beams, Slabs, and Footings? *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 4, pp. 482-490.

Eurokodas 2. Gelžbetoniniu konstrukciju projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės. LST EN 1992-1-1:2005. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2007.

Foster, S. J.; Gilbert, R. I. 1998. Experimental studies on high strength concrete deep beams. *ACI Structural Journal*, 95(4) 382 – 390.

Frosch, R. J. 1999. Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 3, May-June, pp. 437-442.

Hassoun, M.; Manaser, A. 2008. *Structural concrete. Theory and Design.*

Hawkins, N. M. 1968. The Bearing Strength of Concrete Loaded through Rigid Plates. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 20, No. 62, Cement and Concrete Association, March.

Yang, K. H.; Chung, H. S. Lee, H. C. 2003. Shear characteristics of high strength concrete deep beams without shear reinforcement. *Eng Struct*; 25 (10): 1343-52.

Kong F. K.; Garcia, R. C.; Paine, J. M.; Tang, CWJ.; Chemrouk, M. 1986. Strength and stability of slender concrete deep beams. *The Structural Engineer*. 200 -210 p.

Kong, F. K. 2003. Reinforced concrete deep beams, 300 p.

Kong, F.; Tan, K.; Teng, S.; and Guan, L. 1995. High-Strength Concrete Deep Beams with Effective Span and Shear Span Variations. *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 4, pp. 1-11.

Lu, W.-Y. 2006. Shear strength prediction for steel reinforced concrete deep beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 932 – 942 p.

Marti, P. 1985. Basic tools of reinforced Concrete Deep Beams Design. *ACI Structural Journal*, 82(4) 46 – 56.

Mitchell, D.; Collins, M. P.; Bhide, S. B.; Rabbat B. G. 2004. AASHTO LRFD Strut-and-Tie Model Design Examples. Portland Cement Association, Skokie, IL, 60 pp.

Nagarian, P.; Pillai, T.M. 2008. Analysis and Design of Simply Supported Deep Beams Using Strut and Tie Method. *Advances in structural engineering*, May.

Oh, J. K.; Shin, S. W., 2001. Shear Strength of Reinforced High-Strength Concrete Deep Beams. *ACI Structural Journal*, V. 98, No. 2, pp. 164-173.

Rogowsky, D. M.; Macgregor, J. G. 1986. Test on reinforced concrete deep beams. *ACI Structural Journal*, Vol. 83, No. 4, pp.614 – 623.

Rigotti, M. 2002. Diagonal Cracking in Reinforced Concrete Deep Beam. Beam and Experimentas Investigation. *National library of Canada*. 234 p.

Shin, S.; Lee, K.; Moon, J.; Ghosh, S. K. 1999. Shear Strength of Reinforced High-Strength Concrete Beams with Shear Span-to-Depth Ratios between 1.5 and 2.5,” *ACI Structural Journal*, V. 96, No. 4, pp. 549-556.

Smith, K. N.; Vantsiotis, A. S. 1982. Shear Strength of Deep Beams. *ACI Journal*, V. 79, No. 3, 1982 pp. 201-213.

Statybos techninis reglamentas STR2.05.05:2005. Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas.

Su, R. K. L.; ir Chandler, A. M. 2001. Design criteria for unified strut and tie models. *Journal of Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol.3, No. 3, pp.288-298.

Subedi, N.K.; Vardy, E. 1996. Reinforced concrete deep beams – some test results. *Magazine of Concrete Research*. 206 - 219 p.

Suter, G. T.; Manuel, R. F. 1971. Diagonal Crack Width Control in Short Beams. *ACI Journal*, Title No. 68-41, pp. 451-455.

Šalna, R. 2008. *Dispersinio armavimo įtaka gelžbetoninių besijų perdangos plokščių praspaudimui*. Vilnius: Technika. 156 p.

Tan, K. H., Kong, F. K., Teng, S., and Weng, L. W. 1997. Effect of Web Reinforcement on High-Strength Concrete Deep Beams. *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 5, pp. 572-582.

Tang, K. H.; Cheng, G.H. 2006. Size Effect on Shear Strength of Deep Beams. Investigating with Strut-and-Tie Model. *Journal Structural Engineer*.

Teng, S.; Kong, F. 1997. Main Tension Steel in High-Strength Concrete Deep and Short Beams. *ACI Structural Journal*, V. 94, No. 6, pp.752-768.

Tong, K.; Tan, K. H.; Teng, C. Y. 2001. Direct strut and tie model for prestressed deep beams. *Journal Structural Engineer*, p. 1076 – 1084.

Tong, K. H.; Tang, C. Y. 2003. A direct method for deep beams with web reinforcement. *Mag. Concrete Res.*, 53 – 56.

Tsuchiya, S.; Mishima, T.; Maekawa, K. 2002. Shear failure and numerical performance evaluation for RC beam numbers made with high strength materials. *Concrete Library Internal*, 40: 52 – 227.

Tuchscherer, R. G. 2008. Strut-and-Tie Modeling of Reinforced Concrete Deep Beams: *Experiments and Design Provisions*, *Ph.D. Dissertation*, University of Texas at Austin, december, 299 pp.

Tuchscherer, R. B.; Birrcher, B. 2011. Strut and tie model design provision. *PCI Journal*, winter.

Zhang, N., ir Tan, K.-H. 2007. Size effect in RC deep beams: Experimental investigation and STM verification. *Engineering structures*, 3241-3254 p.

Zhang, N.; Tan, K.H. 2007. Direct strut and tie model for single and continuous deep beams. *Engineering structures*.