



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Artur Korkut

LABAI STIPRAUS ARMUOTO BETONO ELEMENTŲ

TEORINIAI IR EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON
REINFORCED ULTRA HIGH STRENGTH CONCRETE ELEMENTS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

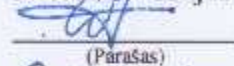
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas



(Parašas)

G. Kobilas

(Vardas, pavardė)

2016 06 10

(Data)

Artur Korkut

LABAI STIPRAUS ARMUOTO BETONO ELEMENTŲ

TEORINIAI IR EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON

REINFORCED ULTRA HIGH STRENGTH CONCRETE ELEMENTS

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

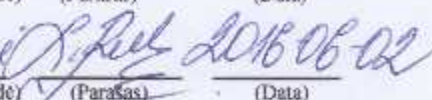
Dr. prof. Artūras Kobilas  2016 06 02

(Moksl. laipsnis/podag. vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

Prof. Lina Žilinskienė  2016 06 02

(Moksl. laipsnis/podag. vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2016

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Tiltų ir viadukų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Gintaris Kaklauskas

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

.....Nr.

Vilnius

Studentui (ei) **Artur Korkut**

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: **Labai stipraus armuoto betono elementų teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai**

patvirtinta 2016 m. kovo 15 d. dekanų potvarkiu Nr. 112st

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2016 m. birželio 6 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti labai stipraus betono taikymo, mechaninių ir fizikinių savybių, analizės ir skaičiavimo metodų literatūros apžvalgą. Atlikti labai stipraus armuoto plieno strypais ir plaušu betono eksperimentinius tyrimus. Apdoroti eksperimentinius rezultatus ir nustatyti medžiagų įtempių ir deformacijų priklausomybes. Rezultatus palyginti su jau pasiūlytais įtempių ir deformacijų modeliais. Atlikti eksperimentinių armuoto ir nearmuoto labai stipraus betono elementų įtempių ir deformacijų analizę, taikant analitinius ir skaitinius metodus. Palyginti gautus rezultatus. Suformuluoti išvadas ir rekomendacijas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

Lietuvių kalbos lektorė Lina Rutkienė

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

Vadovas

(Parašas)

prof. dr. Darius Bačinskas

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

Užduotį gavau

(Parašas)

Artur Korkut

(Vardas, pavardė)

2014-09-19

(Data)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Artur Korkut, 20101853

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, TILfm-14

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽINGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės 25 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Labai stipraus armuoto betono elementų teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai“ patvirtintas 2016 m. kovo 15 d. dekanų potvarkiu Nr. 112st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Lina Rutkienė. Mano darbo vadovas doc. dr. Darius Bačinskas.

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

(Parašas)

Artur Korkut
(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Tiltų ir specialiųjų statinių katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Labai stipraus armuoto betono elementų teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai
Autorius	Artur Korkut
Vadovas	Darius Bačinskas
Kalba: lietuvių	
Anotacija Baigiamajame magistro darbe atlikti labai stipraus armuoto betono elementų eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai. Darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados ir literatūros sąrašas. Pirmame skyriuje apžvelgiamos bendros labai stipraus betono mechaninės ir fizikinės savybės, panaudojimo sritys, ypač stipraus betono istorinė apžvalga, privalumai, ir trūkumai, elementų analizės ir projektavimo ypatumai. Antrame skyriuje aprašyti labai stipraus betono ir armuoto betono elementų eksperimentiniai tyrimai. Tyrimų metu pagamintos ir trumpalaikiai apkrova išbandytos: armuotos sijos (4 vnt.), armuoti tempiami elementai (6 vnt.) ir betoninės sijos (pagal Rilem metodiką) apkrovos ir plyšio pločio bei apkrovos ir įlinkio sąryšių gavimui (5 vnt.). Šiame skyriuje pateikiami eksperimentų rezultatai. Trečiame skyriuje atliktas tempiamo labai stipraus betono įtempių ir deformacijų priklausomybių radimas taikant Rilem metodiką bei kitų autorių pasiūlytus modelius. Ketvirtame skyriuje atliktas eksperimentinių bandinių įtempių ir deformacijų analizė, taikant analitinius ir skaitinius metodus. Darbo pabaigoje pateikiamos bendrosios išvados ir cituojamos literatūros sąrašas. Darbą sudaro 84 puslapiai, 79 paveikslai ir 21 lentelė.	
Prasminiai žodžiai: labai stiprus betonas, ypač stiprus betonas, eksperimentiniai tyrimai, plaušas, Rilem, atvirkštinis uždavinys.	

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

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

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

Title **Theoretical and experimental investigations on reinforced ultra-high strength concrete elements**

Author **Artur Korkut**

Academic supervisor **Darius Bačinskas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

During the final master's work, experimental and theoretical research has been performed on ultra high strength reinforced concrete components. The work comprises an introduction, four chapters, general conclusions and a list of references. The first chapter reviews the general mechanical and physical characteristics of ultra high strength concrete, fields of its application, a historical review of ultra high strength concrete, as well as its pros and cons, component analysis, and design specifics. The second chapter describes experimental research on ultra high strength concrete and reinforced concrete components. During the research, the following has been manufactured and tested under short-term load: reinforced beams (4 units), reinforced tensile components (6 units), and concrete beams (based on RILEM methodology) for determining the relationship between load and width of tear, and between load and deflection (5 units). This chapter also provides the experiment results. The third chapter includes determining relations of strain and deformations by applying the RILEM methodology and models suggested by other authors. The fourth chapter includes an analysis of deformations in experimental samples, performed by applying analytical and numerical methods. The end part provides general conclusions and a list of referenced literature. The work comprises 84 pages, 79 illustrations and 21 tables.

Keywords: UHPC, UHPFRC, fibre, experimental investigation, theoretical investigation, Rilem.

TURINYS

IVADAS	14
1. LABAI STIPRAUS BETONO ISTORINĖ VYSTYMOSI APŽVALGA, SUDĖTIS, MECHANINĖS IR FIZIKINĖS SAVYBĖS	17
1.1. Bendrosios žinios.....	17
1.2. Poreikio pagrindimas	17
1.3. Labai stipraus betono apibrėžtis	18
1.4. Labai stipraus betono privalumai ir trūkumai.....	19
1.5. Labai stipraus betono istorinė apžvalga ir panaudojimas.....	19
1.6. Labai stipraus betono sudėtis.....	24
1.7. Mechaninės, fizikinės ir technologinės labai stipraus betono savybės.....	25
1.7.1. Tankis.....	25
1.7.2. Gniuždomasis stipris	26
1.7.3. Kietėjimo greitis	27
1.7.4. Tempiamasis stipris	27
1.7.5. Ilgaamžiškumas	29
1.7.6. Atsparumas gaisrui	29
1.8. Projektavimo ypatumai.....	29
1.9. Skyriaus apibendrinimas	35
2. LABAI STIPRAUS BETONO IR ARMUOTO BETONO ELEMENTŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	37
2.1. Bandinių sudedamosios medžiagos	37
2.1.1. Mišinio proporcija.....	37
2.1.2. Plieno plaušas	38
2.2. Mechaninės savybės	38
2.3. <i>Rilem</i> sijelių bandymai	40
2.4. Armuotų sijų bandymai	46
2.5. Tempiamų armuoto betono elementų bandymai	50
2.6. Antro skyriaus apibendrinimas.....	53
3. SUPLEIŠĖJUSIO TEMPIAMOJO BETONO ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ DIAGRAMOS	54
3.1. Atvirkštinio uždavinio pritaikymas	54
3.2. Supaprastintas Naamano modelis.....	59
3.3. Įtempių ir deformacijų diagramos radimas pagal <i>Rilem</i> metodą.....	61
3.4. Trečio skyriaus apibendrinimas.....	63
4. EKSPERIMENTINIŲ ELEMENTŲ ANALIZĖ, TAIKANT SKAITINIUS IR ANALITINIUS METODUS	65
4.1. <i>Rilem</i> sijų modeliavimas.....	65
4.2. Lenkiamų sijų analitiniai skaičiavimai	67

4.3. Lenkiamų armuotų sijų su plaušu modeliavimas	71
4.4. Lenkiamų armuotų sijų be plaušo modeliavimas	74
4.5. Tempiamųjų elementų analizė.....	76
4.6. Ketvirtąjo skyriaus apibendrinimas.....	80
BENDROSIOS IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS.....	81
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	83

LENTELIŲ IR PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Labai stipraus betono, kuris buvo panaudotas Bourg-Les-Valence automobilių tilto statybai mechaninės savybės ir sudėtis (Office of... 2014)	22
1.2 lentelė. Labai stipraus betono mišinio sudėtis (Šerelis 2016).....	25
1.3 lentelė. Siūlomos koeficiento n reikšmės (4) formulei	34
2.1 lentelė. Labai stipraus betono mišinio sudėtis (Šerelis 2016)	37
2.2 lentelė. Cilindrų iš labai stipraus betono be plaušo bandymo rezultatai	38
2.3 lentelė. Cilindrų iš labai stipraus betono su plaušu bandymo rezultatai	38
2.4 lentelė. Kubelių iš labai stipraus betono be plaušo bandymo rezultatai	38
2.5 lentelė. Kubelių iš labai stipraus betono su plaušu bandymo rezultatai	38
2.6 lentelė. Cilindrų iš labai stipraus betono be plaušo bandymo rezultatai	39
2.7 lentelė. Cilindrų iš labai stipraus betono su plaušu bandymo rezultatai	39
2.8 lentelė. Prizmių iš labai stipraus betono su plaušu bandymo rezultatai lenkiamo stiprio nustatymui	39
2.9 lentelė. Prizmių iš labai stipraus betono be plaušo bandymo rezultatai lenkiamo stiprio nustatymui	39
2.10 lentelė. Kubelių iš labai stipraus betono be plaušo bandymo rezultatai	39
2.11 lentelė. Kubelių iš labai stipraus betono su plaušu bandymo rezultatai	39
2.12 lentelė. Labai stipraus betono charakteristiniai dydžiai po 28 dienų	40
2.13 lentelė. <i>Rilem</i> bandinių laikomosios galios	45
2.14 lentelė. Sijų matmenys ir kitos pagrindinės charakteristikos	47
3.1 lentelė. Labai stipraus betono charakteristiniai dydžiai po 84 dienų	55
3.2 lentelė. Eksperimento duomenys reikalingi liekamiesiems įtempiams apskaičiuoti	59
3.3 lentelė. Liekamųjų stiprių skaičiavimo rezultatai	59
4.1 lentelė. Susitraukimo įtakos skaičiavimo rezultatai	76
1.1 pav. Šerbruko pėsčiųjų tiltas (1997 m, Kanada): a) bendras tilto vaizdas; b) bendras skerspjūvio vaizdas; c) skerspjūvio matmenys (mm) (International... 2015; Karmout 2009)	20
1.2 pav. Taikos pėsčiųjų tilto Seule statyba (2002 m, Pietų korėja) (Toutlemonde; Resplendino 2009)	21
1.3 pav. Taikos pėsčiųjų tilto Seule skerspjūvio tipas ir matmenys (Karmout 2009; Toutlemonde, Resplendino 2009)	21
1.4 pav. Taikos pėsčiųjų tilto Seule bendras vaizdas (Ductal 2014)	21

1.5 pav. Bourg-Les-Valence automobilių tilto išilginis vaizdas (2001 m, Prancūzija) (Karmout 2009)	22
1.6 pav. Bourg-Les-Valence automobilių tilto skersinis profilis (2001 m, Prancūzija) (Karmout 2009)	22
1.7 pav. Sakata Mirai pėsčiųjų tiltas (2002 m, Japonija); a) bendras tilto vaizdas; b) skerspjūvio forma (Infrastructure... 2012; Ductal 2014)	23
1.8 pav. Pirmosios preliminaros labai stipraus betono rekomendacijos	23
1.9 pav. Gniuždomojo stiprio ir porėtumo priklausomybė (Мещерин 2008)	23
1.10 pav. Gniuždomojo stiprio ir tankio priklausomybė (Karmout 2009)	26
1.11 pav. Labai stipraus betono tankio priklausomybė nuo laiko (Karmout 2009)	26
1.12 pav. Įtempių ir deformacijų grafikas (Spasojevic 2008)	27
1.13 pav. Labai stipraus betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo laiko (Karmout 2009)	27
1.14 pav. Tempiamo elemento bandymo schema (mm) (Rokugo 2008).....	28
1.15 pav. Tempiamo elemento iš labai stipraus betono be plaušo tempimo jėgos ir deformacijos priklausomybė (Rokugo 2008)	29
1.16 pav. Tempiamo elemento iš labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų būvis	30
1.17 pav. Tariama betono elgsena, įtempių ir deformacijų būvis labai stipraus betono (SETRA-AFGC 2002)	31
1.18 pav. Supaprastinta įtempių ir deformacijų priklausomybė labai stipraus betono	31
1.19 pav. Standartinė plaušu armuota prizmė lenkimo bandymams atlikti pagal DafStb direktyvą	32
1.20 pav. Lenkiamo elemento tempiamo stiprio ir plyšio pločio priklausomybės eksperimentiniai rezultatai pagal 1.19 paveikslėlio bandinio formas ir matmenys	32
1.21 pav. Supaprastinta įtempių ir deformacijų priklausomybė apibūdinanti tempimo zoną	33
1.22 pav. Koeficiento β nustatymo grafikas	33
1.23 pav. Įtempių ir deformacijų priklausomybė projektuojant pagal saugos ribinį būvį	34
2.1 pav. Plieno plaušo forma	37
2.2 pav. <i>Rilem</i> (2002) lenkimo bandymo schema ir bandinio matmenys	40
2.3 pav. Metalinis rėmas LVDT jutikliams pritvirtinti	40
2.4 pav. Bandymo prietaisai a) metalinė plokštelė, kuri bandymo metu dirba kaip atrama su 500mm tarpatriamių, b) metalinis cilindras, kuris bandymo metu atlieka koncentruotos jėgos pridėjimą	41
2.5 pav. Bandymo įranga, a) LVDT jutikliai, b) duomenų kaupiklis	41

2.6 pav. Bandymo stendas	42
2.7 pav. Visų bandinių apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės	43
2.8 pav. Visų bandinių apkrovos ir įlinkio priklausomybės	43
2.9 pav. Visų bandinių plyšio formos	44
2.10 pav. Lenkiamų sijų bandymo schema ir jutiklių išdėstymas	46
2.11 pav. Sijų armavimo schema (matmenys pateiktos milimetrais)	47
2.12 pav. Sijų armatūros karkasas	47
2.13 pav. Sijų su plaušu lenkimo momento ir kreivio priklausomybių palyginimas	48
2.14 pav. Eksperimentinės lenkimo momento ir kreivio priklausomybės	49
2.15 pav. Sijų be plaušo lenkimo momento ir kreivio priklausomybių palyginimas	50
2.16 pav. Visų bandytų sijų lenkimo momento ir kreivio priklausomybių palyginimas	50
2.17 pav. Tempiamųjų elementų bandymo stendas ir LVDT jutiklių išdėstymas	51
2.18 pav. Tempiamųjų elementų su plaušu bandymo rezultatai	52
2.19 pav. Tempiamųjų elementų be plaušo bandymo rezultatai	52
2.20 pav. Visų tempiamųjų elementų bandymo rezultatai	52
3.1 pav. Sluoksnių modelis ir medžiagų modeliai a) – e) sluoksnių modelis; f) plieno įtempių ir deformacijų diagrama; g) gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų diagrama; f) tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagrama (Ulbinas 2012).....	54
3.2 pav. Tempiamojo labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų diagrama gauta skaičiuojant atvirkštinį uždavinį	56
3.3 pav. Tempiamojo labai stipraus betono be plaušo įtempių ir deformacijų diagrama gauta skaičiuojant atvirkštinį uždavinį	56
3.4 pav. Tempiamojo labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų diagramos gautos skaičiuojant atvirkštinį uždavinį palyginimas su Kaklauskio (2000) pasiūlytu modeliu	56
3.5 pav. Tempiamojo labai stipraus betono be plaušo įtempių ir deformacijų diagramos gautos skaičiuojant atvirkštinį uždavinį palyginimas su Kaklauskio (2000) pasiūlytu modeliu.....	57
3.6 pav. Tiesioginio uždavinio sprendimo rezultatai	57
3.7 pav. Labai stipraus betono be plaušo įtempių ir deformacijų priklausomybė	58
3.8 pav. Tempiamojo labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų diagrama gauta pagal supaprastinta Naamano modelį	59
3.9 pav. Tempiamojo labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų diagrama gauta pagal supaprastinta Naaman modelį	59
3.10 pav. Tempiamojo labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų priklausomybės aproksimacija	60

3.11 pav. <i>Rilem</i> įtempių ir deformacijų grafikas (Rilem 2002)	60
3.12 pav. <i>Rilem</i> bandinių įtempių ir deformacijų diagramų palyginimas	62
4.1 pav. Eksperimentinės sijos sudalinimas į baigtinius elementus	64
4.2 pav. Sijos Nr. 1 eksperimentinių ir teorinių apkrovos ir įlinkių priklausomybių palyginimas	65
4.3 pav. Sijos Nr. 3 eksperimentinių ir teorinių apkrovos ir įlinkių priklausomybių palyginimas	65
4.4 pav. Sijos Nr. 4 eksperimentinių ir teorinių apkrovos ir įlinkių priklausomybių palyginimas	65
4.5 pav. Sijos Nr. 5 eksperimentinių ir teorinių apkrovos ir įlinkių priklausomybių palyginimas	66
4.6 pav. Supaprastintas plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų kreivių (įlinkių) apskaičiavimo metodas (Ulbinas 2012, Kaklauskas <i>et al.</i> 2012)	67
4.7 pav. Supaprastinto metodo skaičiavimo metu gauta lenkiamo elemento iš labai stipraus betono su plaušu momentų ir kreivių diagrama	69
4.8 pav. Eksperimentinių ir analitinių rezultatų sugretinimas	70
4.9 pav. Baigtinių elementų modelis sudarytas su baigtinių elementų programa <i>Atena</i>	71
4.10 pav. Supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono diagrama	71
4.11 pav. Sijos plyšių atsivėrimo vietos iš baigtinių elementų programos <i>Atena</i>	71
4.12 pav. Momentų ir kreivių diagramų gautų iš <i>Atena</i> palyginimas	72
4.13 pav. Eksperimentinės ir skaitinės (aproksimuota) momentų ir kreivių diagramos palyginimas	72
4.14 pav. Eksperimentinės ir skaitinės (Naaman) momentų ir kreivių diagramos palyginimas	73
4.15 pav. Visų gautų labai stipraus armuoto betono su plaušu momentų ir kreivių palyginimas	73
4.16 pav. Tempiamojo betono krentančiosios dalies aprašymas	74
4.17 pav. Momentų ir kreivių diagrama gauta su baigtiniu elementu programa	74
4.18 pav. Momentų ir kreivių diagramų palyginimas	75
4.19 pav. Tempiamų elementų su plaušu apkrovos ir deformacijos priklausomybės įvertinus susitraukimą	77
4.20 pav. Tempiamų elementų be plaušo apkrovos ir deformacijos priklausomybės įvertinus susitraukimą	77
4.21 pav. Betono ir armatūros įtaka tempiamajam elementui be plaušo.....	78
4.22 pav. Betono ir armatūros įtaka tempiamajam elementui su plaušu	78

4.23 pav. Labai stipraus betono su plaušu apkrovos ir deformacijos priklausomybių palyginimas su euro normos supaprastintu metodu.....	79
4.24 pav. Labai stipraus betono be plaušo apkrovos ir deformacijos priklausomybių palyginimas su Euro normų supaprastintu metodu.....	79

IVADAS

Problemos formulavimas

Betonas ir armuotas betonas nuo pat jo atsiradimo XIX a. antroje pusėje jau daugelį metų yra pati populiariausia statybinė medžiaga. Tai lemia sąlyginai maža kaina, sąlyginai ilgas eksploataavimo laikas ir mažos eksploatacinės išlaidos, esant tinkamai įrengimo kokybei. Vis dėl to, betonas turi ir nemažai trūkumų. Visų pirma, jis yra tampriai plastinė medžiaga turinti mažą tempiamąjį stiprį. Kitas esminis trūkumas – didelis tankis ribojantis betono taikymą didelių gabaritų konstrukciniams elementams ir statiniams. Intensyvus įvairių pramonės šakų vystymasis bei socialiniai ir ekonominiai aspektai per pastaruosius dešimtmečius lėmė ženklų tokių statinių (pvz., tiltų, daugiaaukščių statinių ir kt.) poreikį visame pasaulyje. Ši tendencija visame pasaulyje paskatino inovatyvių armuoto betono konstrukcinių sprendinių paiešką. Šalia įprastų normalaus stiprio betonų buvo sukurti stiprieji ir ypač stiprieji betonai, kurių stipris gali siekti 200 MPa (įprastojo betono stipris yra iki 60 MPa). Pažangių cementinių medžiagų, tokių kaip ypač stipraus betono taikymas yra įvardijamas kaip vienas iš perspektyviausių būdų kurti naujas tiltų konstrukcijas. Daugelyje šalių tokį betoną plačiai naudoti pradėjo XXI amžiaus paskutiniais dešimtmečiais. Labai stipraus betono panaudojimas yra labai platus, bet dažniausiai naudojamas tiltų statybai, aukštybinių pastatų statybai, grindų dangos klojimui gamybinuose pastatuose, rezervuaruose ir kituose tūriniuose elementuose, kuriuose saugojami pavojingi skysčiai.

Darbo aktualumas

Tobulėjančios gamybos, mišinio sudėties ir jo paruošimo technologijos stipriai pakeitė stipriojo betono mechanines ir fizines savybes. Visame pasaulyje atlikta daug eksperimentinių tyrimų optimizuojant bei tobulinant stipriojo betono mišinių sudėtį, dėl to stipriojo betono mechaninės savybės yra 4-5 kartus geresnės lyginant su įprastuoju betonu. Vis dėlto, platesnį stipriojo betono panaudojimą armuotoms konstrukcijoms dažniausiai riboja didelė kaina ir patikimų fizikinių modelių bei skaičiavimo metodų stoka.

Šiame darbe atlikti eksperimentiniai labai stipraus betono ir armuoto betono tyrimai. Tyrimuose gauti rezultatai buvo pritaikyti jau pasiūlytiems įprastojo betono ir betono su plaušu fizikinių modelių bei įtempių ir deformacijų analizės metodų gavimo algoritmams. Tyrimuose buvo tikrinami minėtų modelių ir metodų tinkamumas labai stipraus betono taikymo atvejui.

Darbe aprašyti tyrimai Lietuvoje atlikti pirmą kartą. Jie padės pagrindus šiuolaikinių inovatyvių medžiagų plėtrai bei diegimui Lietuvoje. Tyrimų rezultatai yra svarbūs Statybos sektoriui, siekiant išlikti konkurencingiems pasaulio rinkose bei kurti produktus atitinkančius pastarojo laikotarpio technologijų vystymosi tendencijas.

Tyrimo objektas

Darbe nagrinėjamas labai stiprus armuotas ir nearmuotas betonas kaip statybinė konstrukcinė medžiaga. Nagrinėjamos lenkiamų ir tempiamų armuotų labai stipraus betono elementų įtempių ir deformacijų priklausomybės. Taip pat nagrinėjama plaušo įtaka labai stipriam betonui bei nustatoma liekamojo stiprio reikšmė.

Darbo tikslas

Pagrindinis darbo tikslas – atlikti trumpalaikę apkrova veikiamų armuoto labai stipraus betono elementų eksperimentinius ir teorinius tyrimus siekiant įvertinti tradiciniams betonams taikomų inžinerinių bei skaitinių algoritmų tinkamumą labai stipraus betono elementams.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti buvo suformuluoti tokie uždaviniai:

- 1) Atlikti labai stipraus betono taikymo pagrindimo, medžiagų savybių bei analizės ir projektavimo metodų bendrą apžvalgą.
- 2) Atlikti labai stipraus betono ir armuoto betono eksperimentinius tyrimus bei apdoroti gautus rezultatus.
- 3) Taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą iš eksperimentinių rezultatų gauti labai stipraus betono (su plaušu ir be plaušo) tempiamosios zonos įtempimų ir deformacijų priklausomybes ir palyginti su pasiūlytais modeliais tradiciniam betonui.
- 4) Įvertinti plaušo įtaką labai stipraus betono elgseną, taikant skirtingus liekamojo stiprio apskaičiavimo metodus.
- 5) Gautus modelius panaudoti eksperimentinių elementų skaitinėje analizėje taikant baigtinių elementų metodą bei atlikti gautų rezultatų adekvatumo vertinimą.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti eksperimentiniai, analitiniai ir skaitiniai metodai. Darbe nenagrinėjama elementų elgsena irimo stadijoje.

Darbo naujumas

Daugelyje pasaulio šalių (Kanadoje, JAV, Vokietijoje, Prancūzijoje, Japonijoje ir kt.) labai stiprus armuotas betonas jau daugelį metų naudojamas tiltų laikančiosioms konstrukcijoms. Lietuvoje labai stipraus betono naudojimas laikančiosioms armuotoms konstrukcijoms nebuvo plačiai nagrinėtas. Pastaraisiais metais KTU Statybos ir architektūros fakultetų ekspertai pasiūlė konstrukciniam taikymui tinkamą betono sudėtį, kuri panaudota šiame darbe.

Darbe gauti trumpalaikė apkrova veikiamų armuoto labai stipraus betono sijų ir tempiamųjų elementų eksperimentinių bandymų rezultatai. Taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą, pirmą kartą pagal eksperimentinių lenkiamų armuoto labai stipraus betono elementų momentų ir kreivių diagramas gautos labai stipraus betono tempiamosios zonos įtempių ir deformacijų diagramos, kurios pritaikytos skaitinėje analizėje. Taip pat gautos įtempių ir deformacijų priklausomybės tempiamojo labai stipraus betono su plaušu ir palygintos su pasiūlytais liekamojo stiprio nustatymo modeliais.

Darbo struktūra

Magistrinį darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados ir literatūros šaltiniai.

Darbo apimtis yra 84 puslapiai, tekste panaudota 32 numeruotos formulės, 79 paveikslai ir 21 lentelė.

Padėka

Magistrinio darbo autorius nuoširdžiai dėkoja savo vadovui, Tiltų ir specialiųjų statinių katedros profesoriui Dariui Bačinskui už pagalbą ir rekomendacijas rengiant magistrinį darbą. Autorius išreiškia didelę padėką KTU Statybinių medžiagų katedros vedėjui prof. dr. Vitoldui Vaitkevičiui bei dr. Evaldui Šereliui už techninę pagalbą ruošiant labai stipraus betono mišinius. Už techninę pagalbą vykdant tyrimus darbo autorius išreiškia didelę padėką VGTU LinkMenų fabriko direktoriui Adui Meškėnui bei Tiltų ir specialiųjų statinių katedros doktorantui Deividui Rumšiui, o taip pat mokslo darbuotojui Aleksandr Sokolov.

1. LABAI STIPRAUS BETONO ISTORINĖ VYSTYMO SI APŽVALGA, SUDĖTIS, MECHANINĖS IR FIZIKINĖS SAVYBĖS

1.1. Bendrosios žinios

Betonas visame pasaulyje yra plačiausiai naudojama medžiaga statybos sektoriuje. Pirmieji rišamųjų medžiagų panaudojimo pėdsakai veda į prieš tūkstantį metų Italijoje, Graikijoje, Senoviniame Egipte ir Artimuosiuose Rytuose pastatytus statinius. Viena iš svarbiausių šiuolaikinio betono sudedamųjų dalių – portlandcementis - pirmą kartą buvo panaudotas Anglijoje 1824 metais Josepha Aspdino, o masyvesnė portlandcemenčio gamyba prasidėjo dar po dvidešimties metų (Karmout 2009).

Nuo senovės žmonės ieškojo statybinių medžiagų, kurios būtų atsparios didelėms apkrovoms ir ilgaamžės, todėl daugelyje šalių transporto tinklų infrastruktūroje įprasto gelžbetonio konstrukcijų statiniai sudaro didžiąją visų statinių dalį. Platų šių konstrukcijų panaudojimą lėmė mažos eksploatacinės išlaidos, sąlyginai ilgas eksploatavimo laikas ir nedidelė kaina. Tačiau laikui bėgant atsirado poreikis dengti didesnius tarpatramius, statyti aukštesnius pastatus, mažinti laikančiųjų konstrukcijų elementų skerspjūvius. Ši tendencija visame pasaulyje paskatino inovatyvių armuoto betono konstrukcinių sprendinių paiešką. Šalia įprastų normalaus stiprio betonų buvo sukurti stiprieji ir ypač stiprieji betonai, kurių stipris gali siekti net iki 200 MPa (įprastą betono stipris yra iki 60 MPa). Pažangių cementinių medžiagų, tokių kaip labai stiprus betonas, taikymas yra įvardijamas kaip vienas iš perspektyviausių būdų kurti naujas tilto konstrukcijas (Karmout 2009; Дерев 2015).

Labai stiprus betonas (ang. Ultra high performance concrete, sutrumpintai UHPC) yra žinomas dar kaip labai stiprus plaušu armuotas betonas (ang. Ultra high performance fibre reinforced concrete, sutrumpintai UHPFRC). Kaip žinome, kuo stipresnis betonas tuo jis yra trapesnis. Plieno plaušas labai stipriam betonui reikalingas tam, kad būtų galima pasiekti plastiškesnį suirimą. Kai tempiamasis betonas pasiekia kritinius įtempius ir suyra, darbą pradeda plaušas, kuris varžo tolesnį plyšio vėrimąsi ir perduoda tempimo įtempius (Kaklauskas *et al.* 2012). Plaušas gniuždomajam betono stipriui ir tamprumo moduliui didelės įtakos neturi, tačiau tempiamajam yra labai veiksmingas.

1.2. Poreikio pagrindimas

Labai stiprus betonas, kurio gniuždomasis stipris viršija 120 MPa, vis dažniau naudojamas. Lietuvoje plačiausiai naudojami betonai, kurių gniuždymo stipris svyruoja nuo 30 iki 60 MPa, o labai stiprus betonas dar yra mažai žinomas statytojams ir projektuotojams. Taip

yra todėl, kad medžiaga yra nepakankamai ištirta ir nėra patikimo skaičiavimo modelio ir atitinkamų normų.

Tokio betono gamybai nereikia ypatingos įrangos ir visos reikiamos žaliavos lengvai prieinamos, todėl tokia medžiaga turėtų būti labai paklausi.

Labai stipraus betono poreikis kyla kai (Мещерин 2008):

- 1) statomi aukštybiniai pastatai ir reikalingas didelis laikančiųjų konstrukcijų gniuždomasis stipris;
- 2) dengiami dideli tarpatramiai arba plotai;
- 3) yra riboti laikančiųjų elementų skerspjūvio plotai;
- 4) konstrukcinius elementus veikia chemiškai agresyvios ar didelio drėgnumo aplinkos;
- 5) norima pagaminti neįprastų lenktų formų konstrukciją;
- 6) gaminamos itin mažo storio plokštės.

1.3. Labai stipraus betono apibrėžtis

Labai stiprus betonas yra žinomas kaip labai tanki, stipri medžiaga ir savaime susitankinanti medžiaga. Tokie rodikliai pasiekiami todėl, kad sudėtyje nėra stambių užpildų, vandens ir cemento santykis sumažintas iki 0.2, todėl betonas savaime susitankina ir struktūroje yra mažai porų, dėl kurių betonas yra atsparesnis agresyviajai aplinkai ir vandens patekimui į elemento vidų. Naudojant tokį betoną praktiškai eliminuojama darbinės armatūros korozijos galimybė (Karmout 2009; Мещерин 2008).

Visi betonai yra klasifikuojami pagal gniuždomąjį stiprį. Tam, kad būtų galima tinkamai suprasti kokio stiprio betonai priskiriami prie paprastų, o kokie prie stiprių, betonai pasaulyje yra suskirstyti į pagrindines 5 grupes (Karmout 2009).

- 1) Įprastieji betonai (ang. Normal strength concrete, sutrumpintai NSC) jų stipris - iki 40 MPa;
- 2) Didesnio stiprumo betonai (ang. high strength concrete, sutrumpintai HSC), stipris - iki 60 MPa;
- 3) Stiprus betonai (ang. Very high strength concrete, sutrumpintai VHSC), stipris - iki 120 MPa;
- 4) Labai stiprus betonai (ang. Ultra high performance concrete, sutrumpintai UHPC), stipris - iki 180 MPa;
- 5) Superstiprus betonai (ang. Super high strength concrete), stipris daugiau, kaip 180 MPa.

Darbe tiriamas betonas, kurio stipris viršija 120 MPa. Angliškas terminas šio betono yra *ultra high performance concrete* (UHPC), tačiau Lietuvoje kol kas nėra tikslaus pavadinimo

šiam betonui. Dažniausiai jis vadinamas labai stipriu betonu arba ypač stipriu betonu (Šerelis 2016). Šitos sąvokos nėra apibrėžtos techniniuose, teisiniuose dokumentuose, reglamentuose bei projektavimo normose, todėl šie pavadinimai gali būti ne iki galo tikslūs. Darbe bus vartojamas labai stipraus betono terminas.

1.4. Labai stipraus betono privalumai ir trūkumai

Pagrindiniai labai stipraus betono **privalumai** yra šie (Мещерин 2008):

- 1) Paprastas betonas turi savybę išsisluoksniuoti, todėl vežamas betonvežyje, o labai stiprus betonas gali būti vežamas ir su paprastu savivarčiu.
- 2) Klojant labai stiprų betoną į klojinius nereikalingas betono tankinimas ir mišinys lengvai atkartoja klojinių formą, to padaryti įprastas betonas negali.
- 3) Daug geresnės mechaninės ir fizikinės savybės nei paprasto betono (gniuždomasis stipris nuo 120 MPa, tamprumo modulis 50-70 MPa).
- 4) Didelis atsparumas chemiškai aktyvioms medžiagoms ir aplinkai.
- 5) Mažas vandens ir cemento santykis.
- 6) Dėl smulkių užpildų betonas yra labai tankus ir nepralaidus vandeniui ir dujom.
- 7) Daug ilgaamžiškesnis nei įprastas betonas.
- 8) Patikimesnė armatūros apsauga nuo korozijos.
- 9) Mažas struktūros defektų skaičius

Pagrindiniai labai stipraus betono **trūkumai**, lyginant su įprastu betonu, yra šie (Мещерин 2008):

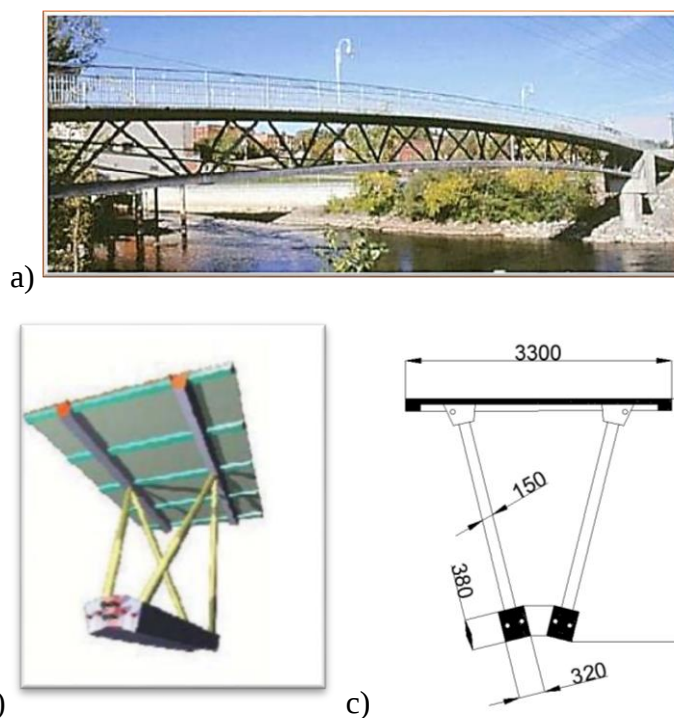
- 1) Brangesnė gamyba.
- 2) Didesnis trapumas.
- 3) Pasireiškia didesnės valkšnumo ir susitraukimo deformacijos.
- 4) Mišinio paruošimo laikas yra ilgesnis už paprasto betono, norint užtikrinti reikiamas mišinio savybes.

1.5. Labai stipraus betono istorinė apžvalga ir panaudojimas

Labai stiprus betonas yra pakankamai nauja medžiaga. Savo dabartine forma komerciškai prieinamas tapo Jungtinėse Amerikos Valstijose apie 2000 metus. Vieni iš pirmųjų, kurie pradėjo tirti stiprų betoną, buvo Federalinės greitkelių administracijos (ang. Federal Highway administration, sutrumpintai FHWA) mokslininkai. Taip pat jie vieni iš pirmųjų panaudojo labai stiprų betoną 2001 metais plečiant greitkelių infrastruktūrą. Federalinės greitkelių administracijos tyrimai leido labai stiprų betoną panaudoti kelių tiltų statybai. Tuo pačiu metu tiriamieji darbai vyko keliuose universitetuose Jungtinėse Valstijose (FWHA 2006; FWHA 2013).

Šerbruko pėsčiųjų tiltas

Kanadoje pirmasis tiltas, kuriame buvo panaudotas labai stiprus betonas, pastatytas 1997 metais.



1.1 pav. Šerbruko pėsčiųjų tiltas (1997 m, Kanada): a) bendras tilto vaizdas; b) bendras skerspjūvio vaizdas; c) skerspjūvio matmenys (mm) (International... 2015; Karmout 2009)

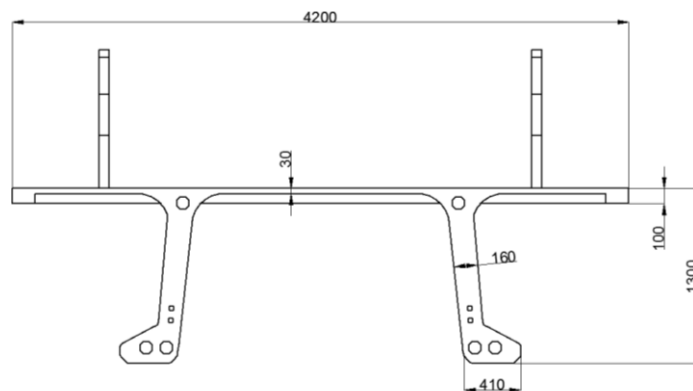
Šis pėsčiųjų tiltas yra sukonstruotas iš anksto įtemptų erdvinių santvarų pagamintu iš labai stipraus betono. Tiltro tarpatramis yra 60 metrų, plotis 3,5 metrų, o plokštės storis tik 30 milimetrų. Šiuo metu Kanadoje yra pastatyta daugiau kaip 26 tiltų, kuriuose buvo panaudotas labai stiprus betonas (International... 2015).

Taikos pėsčiųjų tiltas Seule

2002 metais Pietų Korėjoje per Han upę Seulo mieste buvo pastatytas pėsčiųjų tiltas, kuris jungia miestą su Sunyodo sala. Tiltas buvo suprojektuotas prancūzų architekto Rudy Ricciotti ir pavadintas Taikos pėsčiųjų tiltu. Tiltas yra 120 metrų tarpatramio, sudarytas iš šešių dalių, kurių storiai tesiekia 3 cm. Tokį rezultatą galima pasiekti tik naudojant labai stiprų betoną (Toutlemonde, Resplendino 2009).



1.2 pav. Taikos pėsčiųjų tilto Seule statyba (2002 m, Pietų Korėja) (Toutlemonde, Resplendino 2009)



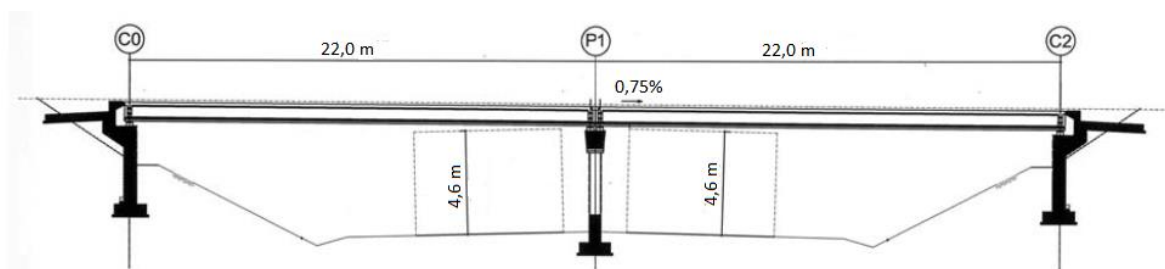
1.3 pav. Taikos pėsčiųjų tilto Seule skerspjūvio tipas ir matmenys (Karnout 2009; Toutlemonde, Resplendino 2009)



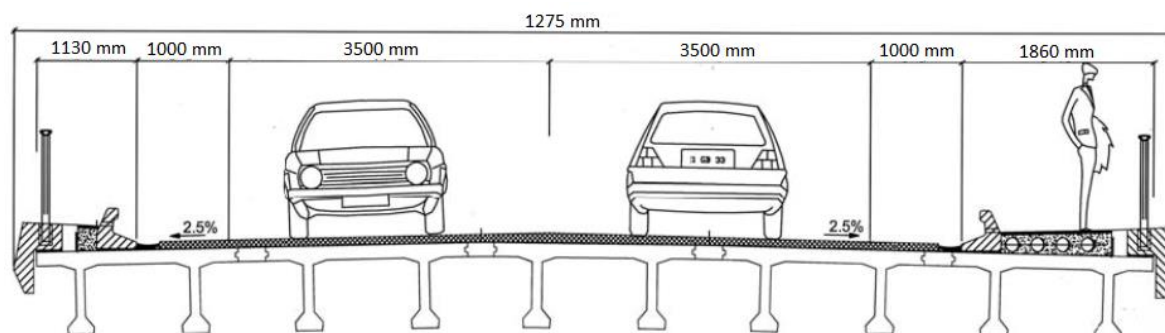
1.4 pav. Taikos pėsčiųjų tiltas Seule bendras vaizdas (Ductal 2014)

Bourg-Les-Valence automobilių tiltas Prancūzijoje

Prancūzijoje pirmasis tiltas, kuriame buvo panaudotas labai stiprus betonas, buvo pastatytas 2000-2001 metais Bourg-Les-Valence vietovėje. Tiltas susideda iš dviejų tarpatramių, kurių ilgiai yra po 22 metrus. Laikančiosios tilto konstrukcijos yra surenkamos ir iš anksto įtemptosios. Labai stiprus betonas buvo panaudotas tilto paklotui. Dar prieš tilto konstravimo darbus laboratorijoje buvo išbetonuoti bandiniai iš labai stipraus betono ir bandomi lenkimu. Taip buvo rasta optimali užpildų sudėtis. Labai stipraus betono, kuris buvo panaudotas Bourg-Les-Valence tilto statybai, mechaninės savybės ir sudėtis yra nurodyta 1.1 lentelėje (Office of... 2014).



1.5 pav. Bourg-Les-Valence automobilių tilto išilginis vaizdas (2001 m, Prancūzija) (Karmout 2009)



1.6 Bourg-Les-Valence automobilių tilto skersinis profilis (2001 m, Prancūzija) (Karmout 2009)

1.1 lentelė. Labai stipraus betono, kuris buvo panaudotas Bourg-Les-Valence automobilių tilto statybai, mechaninės savybės ir sudėtis (Office of... 2014)

Medžiagos	kg/m^2
Cementas	1,114
Silicio dulkės	169
Užpildai iki 6 mm	1,072
Plieno plaušas	234
Aukštos klasės vandens reduktorius	40
Vanduo	209
V/C	0,19
Savybės	
Gniuždomasis stipris po 28 dienų	175 MPa
Tempiamasis stipris po 28 dienų	8 MPa
Tamprumo modulis	64 MPa
Tankis	$2,800 kg/m^3$

Sakata-Mirai pėsčiųjų tiltas Japonijoje

2002 metais buvo pastatytas pirmas UHPC tiltas Japonijoje ir tai yra Sakata-Mirai pėsčiųjų tiltas. Tiltas yra 49,35 metro tarpatramio ir susideda iš anksto įtemptų konstrukcijų. Šis pėsčiųjų tiltas yra unikalus tuo, kad jame nebuvo panaudota plieno strypų ar bet kokios kitos armatūros, o tik plieno plaušas. Todėl tiltas išėjo labai lengvas ir jo svoris buvo tik 56 tonos ir tai yra penktadalis įprasto panašios konfigūracijos tilto svorio (Tanaka *et al.* 2010, Infrastructure... 2012).



a)

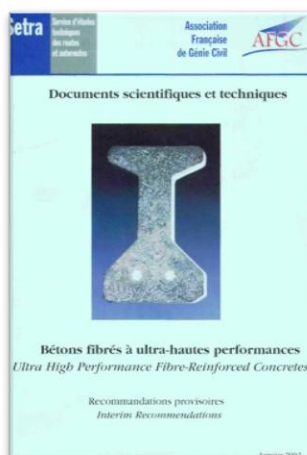


b)

1.7 pav. Sakata Mirai pėsčiųjų tiltas (2002 m., Japonija); a) bendras tilto vaizdas; b) skerspjūvio forma (Infrastructure... 2012; Ductal 2014)

Pirmosios labai stipraus betono rekomendacijos

2002 metais buvo pastatyta keletas tiltų, kuriuose buvo panaudotas labai stiprus betonas, todėl tais pačiais metais Prancūzijoje buvo išleistos pirmosios rekomendacijos dėl labai stipraus betono naudojimo statybinėse konstrukcijose. Šiame rekomendaciniame dokumente buvo aprašytos medžiagos mechaninės savybės ir patvarumas (AFGC 2002). Tuo pačiu laikotarpiu panašios rekomendacijos buvo sukurtos Japonijoje, o 2003 metais - Vokietijoje (DafStb 2003).



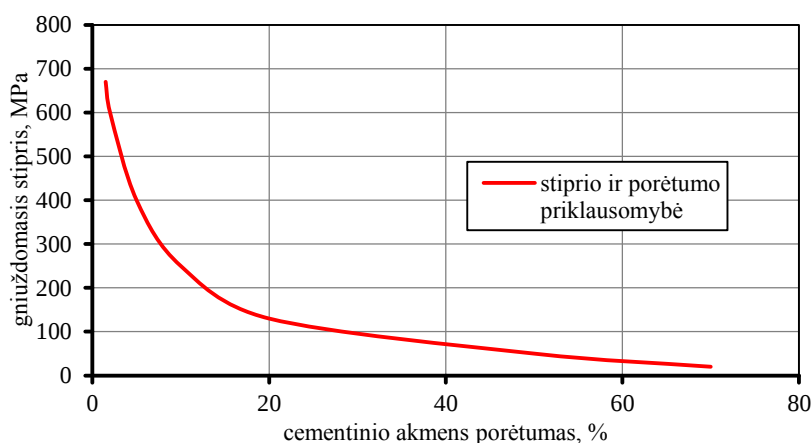
1.8 pav. Pirmosios preliminarios labai stipraus betono rekomendacijos

1.6. Labai stipraus betono sudėtis

Betono galutinis stipris priklauso nuo užpildų stiprio, užpildų dydžio, rišamosios medžiagos tipo, vandens ir cemento santykio, cheminių priedų ir porėtumo. Porėtumas yra vienas iš svarbiausių dalykų nulemiantis galutinį betono stiprį. Kuo mažiau tuščių vietų turės betonas tuo didesnį stiprį galima išgauti. Todėl norint gauti betoną, kurio gniuždomasis stipris bus daugiau kaip 100 MPa, reikia atsisakyti stambių užpildų, dėl kurių ir atsiranda tuštumos betono matricoje ir kurie būdingi įprastam betonui. Tam, kad visos tuštumos būtų užpildytos, į labai stipraus betono mišinį įdedama silicio mikro-dulkių. Taip pat didelę įtaką stipriui turi vandens ir cemento santykis: kuo jis mažesnis, tuo stipresnis betonas. Todėl labai stipriame betone vandens ir cemento santykis ribojamas iki 0,2. Tai yra vandens mišinyje turi būti 5 kartus mažiau nei cemento. Kaip rišamąją medžiagą galima naudoti bet kokio tipo standartinį cementą. Pasirenkant cementą reikia atkreipti dėmesį į keletą aspektų (Мещерин 2008; Дергев 2015):

- Cemento ir plastifikatorių suderinamumą.
- Cemento vandens poreikį ir jo smulkumą;
- Norimą galutinę betono stiprumą.
- Šilumos išskyrimo pobūdį hidratacijos metu atsižvelgiant į konstrukcijos matmenis.

Tam, kad būtų galima gauti labai didelį betono stiprį geriausia naudoti portlandcementį (CEM I). Praktikoje geri rezultatai gauti CEM I 52,5R klasės cementų, ypač tų, kurie turi mažai trikalcio aluminato. Tuo atveju, kai gaminamas didelių gabaritų konstrukcinis elementas arba betono gamyba vyksta statybvietėje esant aukštoms lauko temperatūroms, rekomenduojama kombinuoti portlandcementį su šlako cementu (Мещерин 2008, Дергев 2015).



1.9 pav. Gniuždomojo stiprio ir porėtumo priklausomybė (Мещерин 2008)

Kaip parodyta 1.9 paveiksle, galutinis betono gniuždomasis stipris tiesiogiai priklauso nuo cemento akmens porėtumo.

Į labai stipraus betono sudėtį įeina (Мещерин 2008; FWHA 2006; FWHA 2013):

- vanduo;
- cementas;
- silicio mikro-dulkės;
- maltas kvarcinis smėlis;
- kvarcinis smėlis;
- superplastikliai.

Minėta labai stipraus betono sudėtis yra populiariausia, tačiau ne vienintelė. Dažnai dar pridėdama bazalto, vandens rišiklių ar kitų cheminių medžiagų. Kvarcinis smėlis gali būti pakeistas paprastu smėliu arba stiklo milteliais ir, be abejo, labai racionalu į labai stipraus betono mišinį pridėti plaušo (1-2 % nuo mišinio tūrio), kuris varžo plyšių vėrimąsi ir padidina tempiamąjį stiprį (Мещерин 2008; Kaklauskas *et al.* 2012).

1.2 lentelė. Labai stipraus betono mišinio sudėtis (Šerelis 2016)

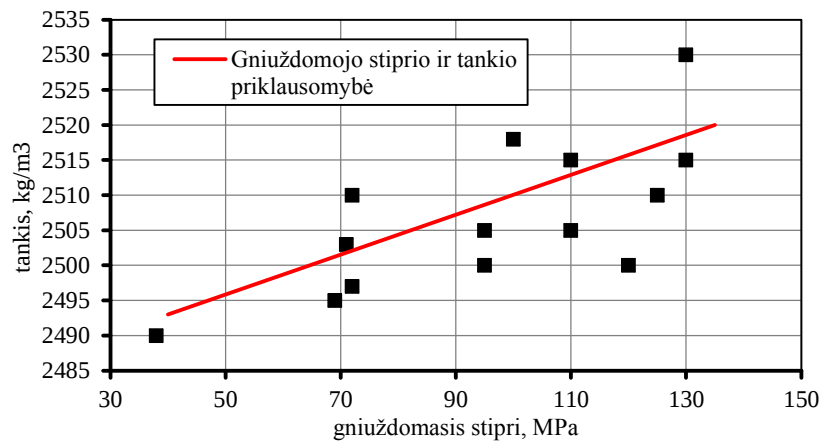
Komponentai	kg/m³
Vanduo	199
Cementas	735
Silicio mikro dulkės	99
Maltas kvarcinis smėlis	412
Kvarcinis smėlis	962
Superplastiklis	36,76
V/C	0,27
Santykinis mišinio tankis	0,758

Vien parinkti užpildus labai stipriam betonui nepakanka, reikia tinkamai parinkti ir jų kiekius mišinyje. Daug viso pasaulio mokslininkų bando rasti optimalius komponentus ir jų proporcijas. Yra įvairiausių sudedamųjų medžiagų kombinacijų ir jų proporcijų mišinyje. 1.2 lentelėje pateikiama labai stipraus betono sudėtis ir proporcija, kurią išrado Kauno technologijos universiteto Statybos ir architektūros fakulteto doktorantas Evaldas Šerelis (2016).

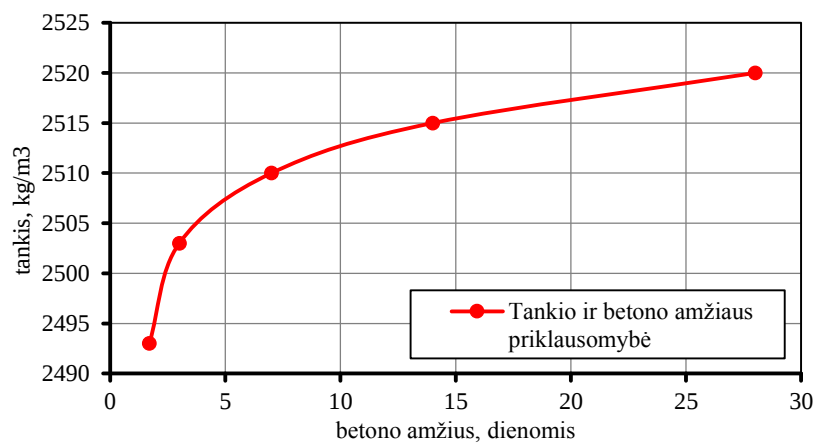
1.7. Mechaninės, fizikinės ir technologinės labai stipraus betono savybės

1.7.1. Tankis

Viena iš svarbiausių fizikinių medžiagos savybių yra tankis. Tankis rodo medžiagos masę tūrio vienetu. Kuriant labai stiprų betoną pagrindinė užduotis mažinti medžiagos porėtumą, naudoti kuo mažesnės frakcijos užpildus, kad matricoje nebūtų oro ir visos tuščios vietos būtų užpildytos. Savaime aišku, tokios medžiagos tankis gaunamas didesnis už įprasto betono, o ir didėjant tankiui medžiagoje mažėja vidinių matricos defektų, dėl kurių didėja gniuždomasis medžiagos stipris ir ilgaamžiškumas.



1.10 pav. Gniuždomojo stiprio ir tankio priklausomybė (Karmout 2009)

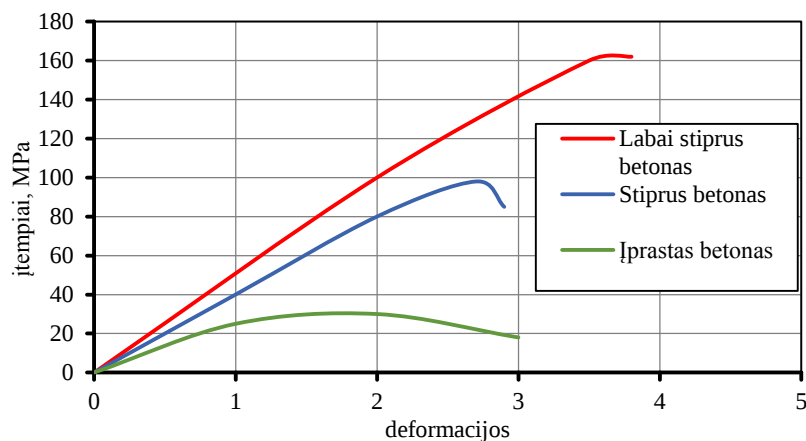


1.11 pav. Labai stipraus betono tankio priklausomybė nuo laiko (Karmout 2009)

Gniuždomasis stipris tiesiogiai priklauso nuo medžiagos tankio. Kaip matome 1.10 paveiksle minimalus labai stipraus betono tankis yra 2510 kg/m^3 . Bendruoju atveju labai stipraus betono tankis svyruoja nuo 2510 kg/m^3 iki 2800 kg/m^3 . Taip pat iš jau atliktų eksperimentų pastebėta, kad labai stipraus betono tankis priklauso nuo betono amžiaus. Kaip parodyta 1.11 paveiksle didėjant betono amžiui didėja ir betono tankis (Karmout 2009).

1.7.2. Gniuždomasis stipris

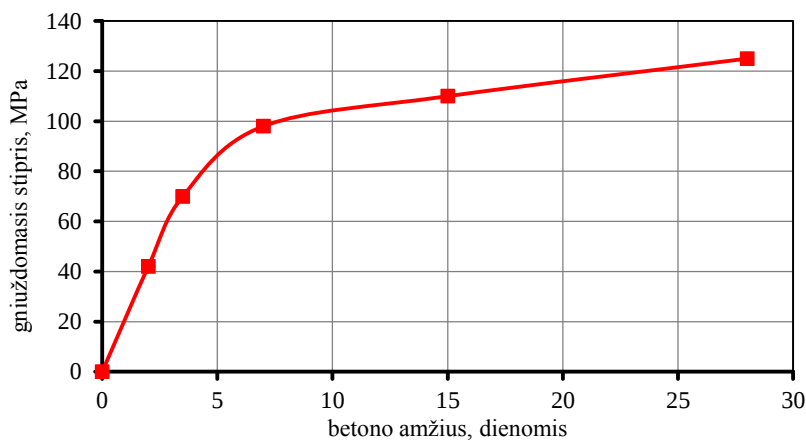
Labai stipraus betono projektinis gniuždomasis stipris po 28 parų yra nuo 120 iki 200 MPa. Betono galutinis gniuždomasis stipris priklauso nuo naudojamų užpildų, proporcijos ir teisingo maišymo technologijos parinkimo ir nustatomas kaip ir įprastam betonui, gniuždant standartinius $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ kubus ir $\emptyset 150 \times 300 \text{ mm}$ cilindrus. 1.11 pav. yra pavaizduota labai stipraus betono įtempių ir deformacijų priklausomybė ir paliginta su stipriu betonui ir su įprastu betonui.



1.12 pav. Įtempių ir deformacijų grafikas (Spasojevic 2008)

1.7.3. Kietėjimo greitis

Projektuotojus domina ne tik projektinis stipris, bet ir cementinių medžiagų kietėjimo greitis. Šita betono savybė yra svarbi, kai statinio konstrukcijos yra monolitinės ir tai reiškia, kad konstrukcijos yra betonuojamos statybos aikštelėje naudojant klojinius. Žinant betono medžiagos stiprį po tam tikro užbetonavimo laiko, galima paskaičiuoti, po kurio laiko galima saugiai nuimti klojinius ir betonas jau bus įgijęs pakankamą stiprį, kad konstrukcija nesuirėtų. 1.12 paveiksle yra pavaizduota gniuždomojo stiprio ir betono amžiaus priklausomybė.



1.13 pav. Labai stipraus betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo laiko (Karmout 2009)

Kaip matome iš grafiko 1.13 paveiksle, labai stipraus betono bandiniai buvo bandomi po 40 val., 3 dienų, 7 dienų, 14 dienų ir po 28 dienų. Galutinis gniuždomasis stipris siekia 128 MPa, tačiau jau po trijų dienų turėjome 71 MPa gniuždomąjį stiprį, tai sudaro 55% projekcinio stiprio.

1.7.4. Tempiamasis stipris

Kaip ir įprasto betono, labai stipraus betono tempiamasis stipris yra daug mažesnis už gniuždomąjį.

1.7.5. Ilgaamžiškumas

Dėl mažo kiekio kapiliarinių porų skystų ir dujinių medžiagų prasiskverbimo į betoną laikas yra kur kas ilgesnis, nei paprastų betonų. Iš to išplaukia, kad konstrukcijos iš labai stipraus betono daug ilgiau lieka nepaveiktos agresyvios aplinkos, o tai yra labai didelis privalumas sprendžiant darbinės armatūros korozijos problemas (Мещерин 2008).

1.7.6. Atsparumas gaisrui

Gaisro metu, jau esant 300 °C temperatūrai labai stiprus betonas daug greičiau nei įprasti betonai praranda savo stiprį. Šiuo atveju įprasti betonai yra pranašesni todėl, kad UHPC yra labai tanki medžiaga. Gaisro metu medžiagoje atsiranda vandens garai, kurie nori pasišalinti iš medžiagos per kapiliarus ar poras. Kadangi betonas yra labai tankus, todėl vandens garų pasišalinimas iš medžiagos tampa problematiškas. Dėl šios priežasties medžiagos viduje atsiranda didelis vidinis slėgis, kuris sukelia medžiagos skilimą. Šią problemą dalinai galima išspręsti įdedant į betono mišinį plaušo iš polipropileno, kuris esant 150-170 °C temperatūrai išsilydo ir tokiu būdu atsiranda papildomi kanalai medžiagoje, garai laisviau pasišalina iš medžiagos vidaus, mažindami garų slėgį esanti medžiagos viduje (Мещерин 2008).

Kai konstrukcijos iš labai stipraus betono yra sustiprintos plieno armatūra, gaisro metu konstrukcija laikoma saugia iki to momento, kai pradeda atskilinėti apsauginis betono sluoksnis ties armatūra (Мещерин 2008).

1.8. Projektavimo ypatumai

Dažniausiai betoninių konstrukcijų projektavimas turi remtis supaprastintomis, tačiau patikimomis etaloninėmis medžiagos reikšmėmis, tokiomis kaip įtempių ir deformacijų priklausomybė. Įprastam betonui tokie metodai seniai sukurti ir aprašyti atitinkamuose norminiuose projektavimo dokumentuose. Kadangi Europoje galiojančios normos leidžia projektuoti betonines konstrukcijas, kurių gniuždomasis stipris neviršija 90 MPa, labai stipriam betonui beveik vienu metu buvo išleistos rekomendacijos ir pasiūlyti skaičiavimo metodai. Pirmas metodas buvo sukurtas 2002 metais Prancūzijoje (AFGC – SETRA 2002), o antras - 2003 metais Vokietijoje (DafStb 2003). Abu šie metodai įvertina tą faktą, kad labai stipriame betone sunku sukontroliuoti plaušų išdėstymą matricoje, dėl to medžiaga demonstruoja didesnius nukrypimus.

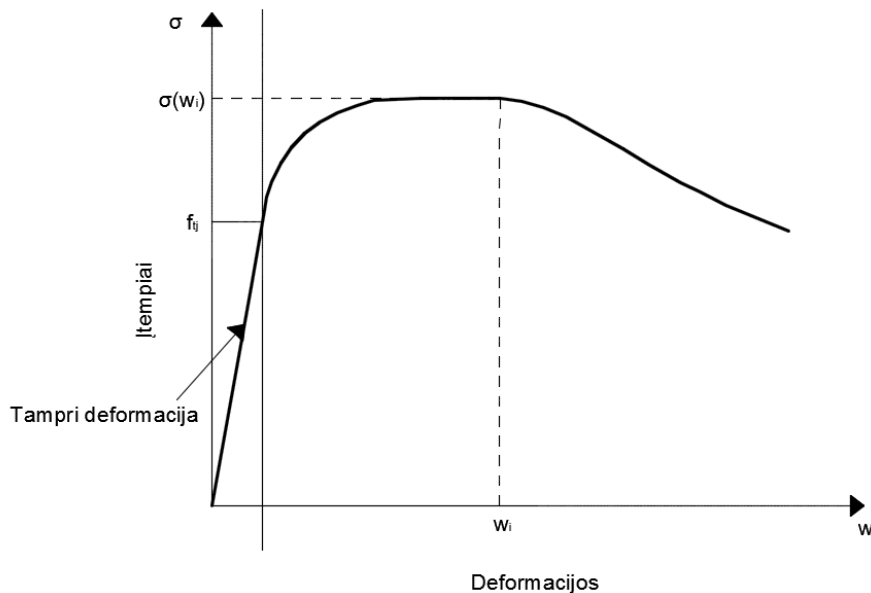
Prancūzijos rekomendacijos susideda iš trijų dalių:

- Pirmoje dalyje aprašomos mechaninės betono charakteristikos, taip pat pagaminimo rekomendacijos ir pagamintų elementų patikrinimo procedūrą.

- Antroje dalyje nagrinėjamas projektavimas ir analizė nearmuotų konstrukcijų ir konstrukcijų, kurios armuotos plaušais.
- Trečioje dalyje aprašomas medžiagos ilgaamžiškumas.

Labai svarbų vaidmenį, veikiant tempimo jėgai, atlieka plieno plaušas. Kaip matome 1.16 pav. (Resplendino 2004; SETRA-AFCG 2002) grafike įtempių ir deformacijų būvis charakterizuojamas tampria stadija, kurią riboja cemento matricos tempiamasis stipris f_{tj} ir plyšių atsivėrimo stadija, kurią riboja bendras kompozitinės medžiagos tempiamasis stipris.

Rekomendacijose yra pateikti pereinamieji koeficientai, kurie redukuoja bandymo rezultatus ir priartina prie etaloninės įtempių ir deformacijų priklausomybės. Koeficientai priklauso nuo bandomųjų elementų (plonos arba storos plokštės, sijos, kevalai) ir nuo apkrovos tipo (tiesioginis tempimas arba tempimas gaunamas lenkiant elementą).

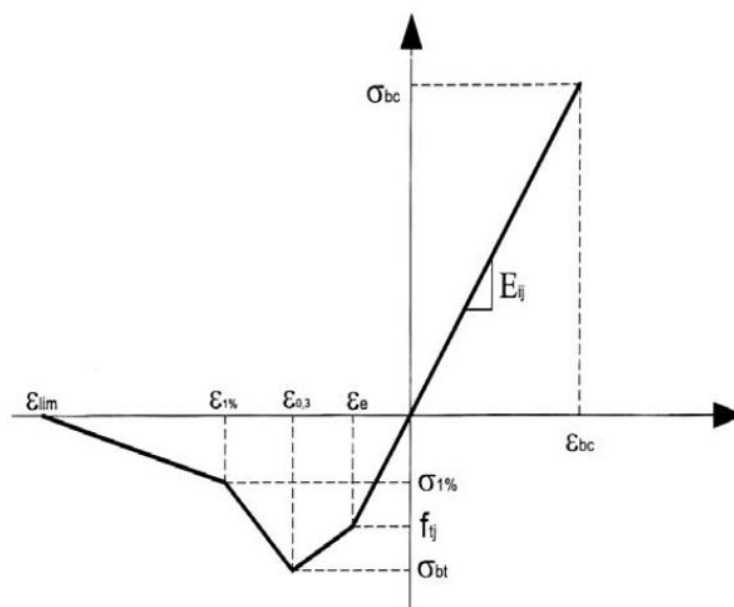


1.16 pav. Tempiamo elemento iš labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų būvis

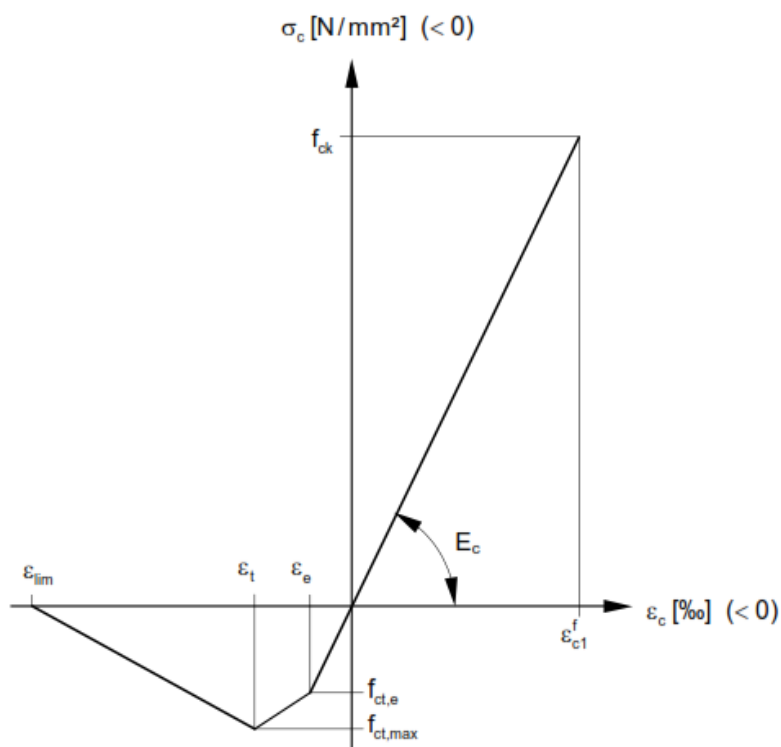
Tam, kad būtų galima tinkamai nustatyti įtempius, prancūzų rekomendacijos taiko AFREM-BFM metodą, kuris susijęs su betonais, kuriuose naudojamas plaušas ir įtempių ir plyšio pločio priklausomybė $\sigma = f(w)$. Taip pat charakteristinis ilgi I_c įvedamas tam, kad būtų galima tinkamai pereiti iš plyšio pločio w prie deformacijų ε .

$$\varepsilon = \frac{f_{tj}}{E_{ij}} + w/I_c; \quad (1.1)$$

I_c vertė priklauso nuo skerspjūvio ploto. Analizė standartinių skerspjūvių remiasi plokščiųjų pjūvių hipoteze ir betono elgsena, parodyta 1.17 paveiksle. Ribiniai įtempiai tinkamumo ribiniam būviui yra tokie patys kaip gelžbetoninėms ar iš anksto įtemptoms konstrukcijoms.



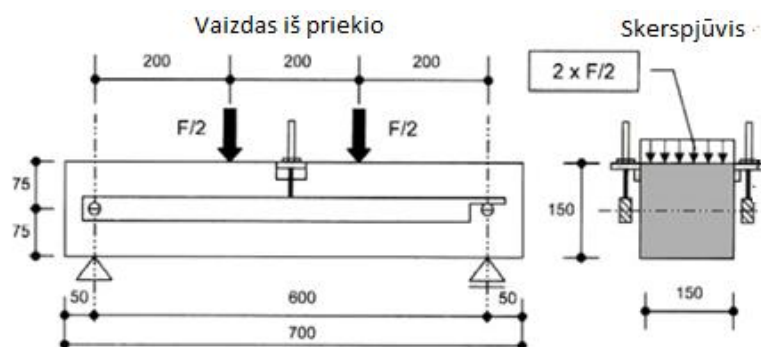
1.17 pav. Tariama betono elgsena, labai stipraus betono įtempių ir deformacijų būvis (SETRA-AFGC 2002)



1.18 pav. Supaprastinta labai stipraus betono įtempių ir deformacijų priklausomybė

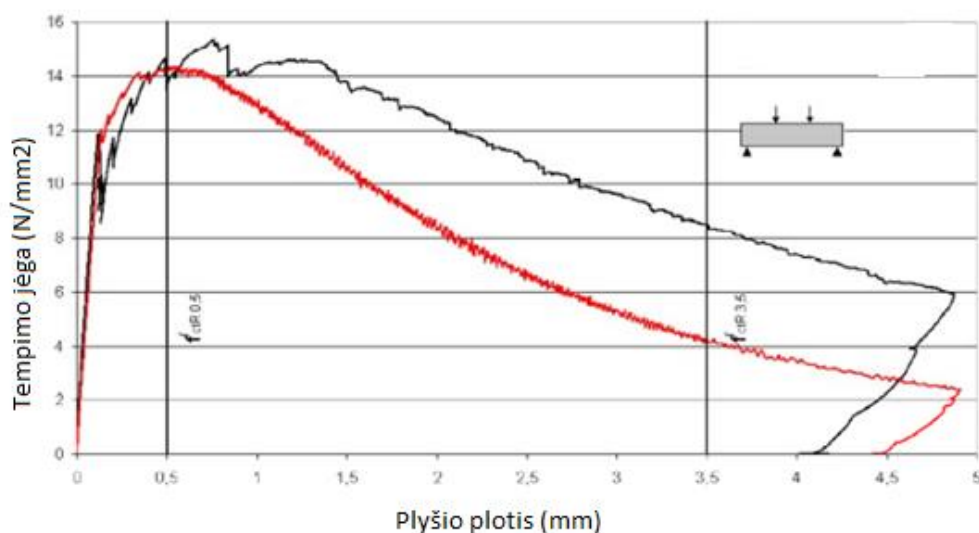
Skaičiuojant tinkamumo ribinį būvį, įtempių ir deformacijų būvio priklausomybė yra labiau supaprastinta, kaip parodyta 1.18 paveiksle (DafStb UHPC 2003).

Vokietijos ataskaitoje yra aprašyta standartinė bandymo procedūra, kaip parodyta 1.19 paveiksle, kaip tinkamai įvertinama lenkimo apkrovos ir deformacijos priklausomybė, siekiant nustatyti įtempių ir deformacijų būvį.



1.19 pav. Standartinė plaušu armuota prizmė lenkimo bandymams atlikti pagal DafStb direktyvą

Tokio pobūdžio bandymų rezultatai parodyti 1.20 paveiksle. Norėdami iš to išgauti įtempių ir deformacijų priklausomybę turime apžvelgti įtempius ties 0,5 mm ir prie 3,5 mm plyšio pločio.

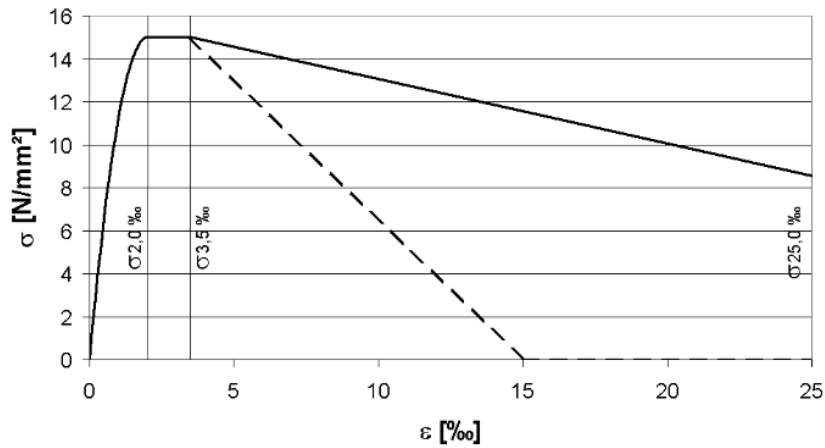


1.20 pav. Lenkiamo elemento tempiamo stiprio ir plyšio pločio priklausomybės eksperimentiniai rezultatai pagal 1.19 paveikslėlio bandinio formas ir matmenys

1.21 paveiksle pateikta įtempių ir deformacijų kreivė, apskaičiuota pagal duotąjį pasiūlymą. Įtempiai prie mums dominančių taškų apskaičiuojamos pagal (1.2) ir (1.3) formules.

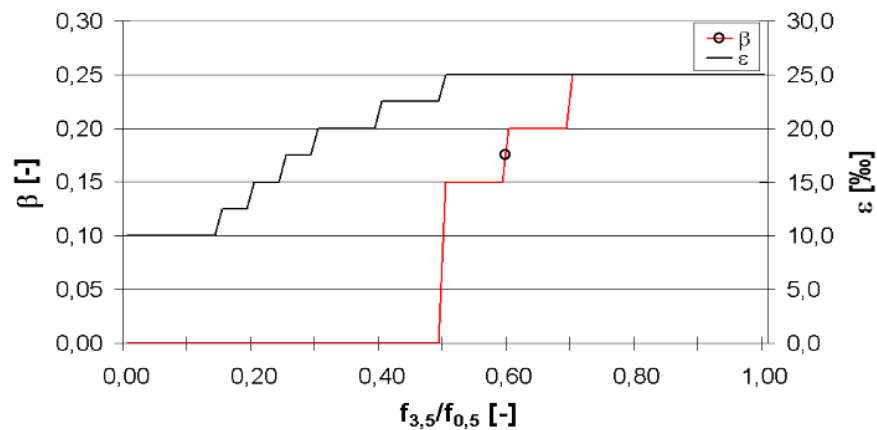
$$\sigma_{2.0-3.5\%} = f_{ctk0.5} \cdot 0,37; \quad (1.2)$$

$$\sigma_{25\%} = \beta \cdot f_{ctk3.5}. \quad (1.3)$$



1.21 pav. Supaprastinta įtempių ir deformacijų priklausomybė, apibūdinanti tempimo zoną

Koeficientas β , kaip ir koeficientas 0,37, buvo nustatytas perskaičiuojant bandymo rezultatus. Kaip ir įprastam betonui, koeficientas β priklauso nuo santykio $f_{ctk,3,5}/f_{ctk,0,5}$. Taip pat gali būti imamas iš 1.22 paveikslo.



1.22 pav. Koeficiento β nustatymo grafikas

Paprastai deformacijos riba 25 ‰ yra pakankama. Tačiau pakartotiniai bandymo rezultatų skaičiavimai parodė, kad projektavimo atveju, kai santykis $f_{3,5}/f_{0,5} < 0,5$ gali būti nepakankama reikiama medžiagos atsarga. 1.22 paveiksle raudona linija yra pažymėta redukuota $f_{3,5}/f_{0,5} < 0,5$ deformacija.

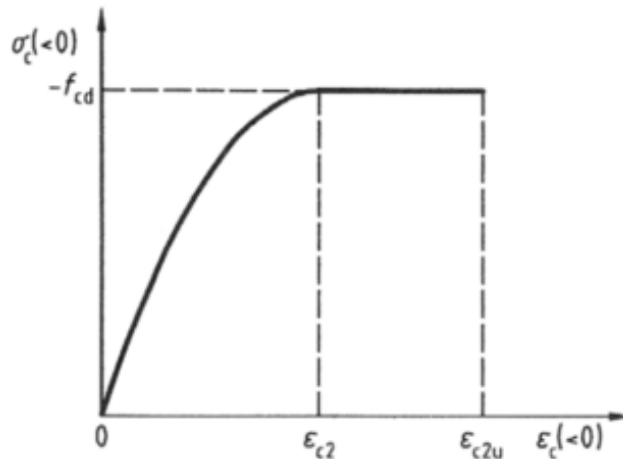
Projektuojant pagal saugos ribinį būvį įtempių ir deformacijų priklausomybę siūloma imti pagal DIN 1045-1, kuri yra apibrėžta pagal šias formules:

$$\sigma_c = -f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right]; \quad (1.4)$$

čia

ε_{c2} – deformacija esant maksimaliam įtempiui,

ε_{c2u} – ribinė deformacija.



1.23 pav. Įtempių ir deformacijų priklausomybė projektuojant pagal saugos ribinį būvį

Narys n iš (1.4) formulės gali būti imamas iš 1.3 lentelės.

1.3 lentelė. Siūlomos koeficiento n reikšmės (1.4) formulei

$f_{ck} [N/mm^2]$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
n	1,50	1,45	1,40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05	1,00

Skaiciuotinė gniuždomojo stiprio vertė apskaičiuojama pagal (1.5) formulę.

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c \cdot \gamma'_c}; \quad (1.5)$$

čia

γ_c - dalinis patikimumo koeficientas, kuris imama iš 2 lentelės DIN 1045-1 dokumento;

γ'_c - papildomas patikimumo koeficientas, kuris atsižvelgia į labai stipraus betono nukrypimus gamybos metu ir į trapumą;

γ'_c apskaičiuojamas pagal (1.6) formulę:

$$1,00 \leq \gamma'_c = \frac{1}{1,1 - \frac{f_{ck}}{500}} \leq 1,25. \quad (1.6)$$

Siekiant nustatyti elemento iš labai stipraus betono atsparumą šlyčiai, pagal SETRA-AFGC rekomendacijas galime tiesiog susumuoti betono atsparumą šlyčiai, skersinės armatūros atsparumą šlyčiai ir plaušo atsparumą šlyčiai:

$$V_u = V_{Rb} + V_a + V_f; \quad (1.7)$$

čia

V_{Rb} - betono atsparumas šlyčiai;

V_a - skersinės armatūros atsparumas šlyčiai;

V_f - plaušo atsparumas šlyčiai.

Plaušo atsparumas šlyčiai apskaičiuojamas pagal 1.8 formulę.

$$V_f = \frac{S \cdot \sigma_p}{\gamma_{bf} \cdot \tan \beta_u}; \quad (1.8)$$

čia

σ_p - liekamasis stipris: $\sigma_p = \frac{1}{K \cdot w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \sigma(w) dw$;

K - koeficientas įvertinantis plaušų orientaciją;

w_{lim} - didesnė vertė iš $(w_u; 0,3 \text{ mm})$, kur $w_u = l_c \cdot \varepsilon_u$ ir l_c yra charakteristinis ilgis;

$\sigma(w)$ - charakteringi supleišėjusio elemento tempimo įtempiai esant atitinkamam plyšio pločiui;

S - pluošto veikimo plotas:

$S = 0,9 \cdot b_0 \cdot d \cdot b_0 \cdot z$ T formos ir kvadratiniais skerspjūviams

$S = 0,8 \cdot (0,9 \cdot d)^2 \cdot 0,8 \cdot z^2$ apskritiems skerspjūviams

γ_{bf} - tempimo jėgos veikiamų plaušu armuotų betoninių elementų patikimumo koeficientas;

β_u - skersinės armatūros posvyris išilginės armatūros atžvilgiu.

Panaši koncepcija buvo pasiūlyta Vokietijos rekomendacijose betonams su plaušu (DafStb 2003). Eksperimentiniai rezultatai gauti Vokietijoje (Fehling and Bunje 2003) buvo labai artimi prancūzų (SETRA-AFCG 2002) rezultatams.

1.9. Skyriaus apibendrinimas

Betonas ir armuotas betonas nuo pat jo atsiradimo XIX a. antroje pusėje jau daugelį metų yra pati populiariausia statybinė medžiaga. Tai lemia sąlyginai maža kaina, sąlyginai ilgas eksploataavimo laikas ir mažos eksploatacinės išlaidos, esant tinkamai įrengimo kokybei. Intensyvus įvairių pramonės šakų vystymasis bei socialiniai ir ekonominiai aspektai per pastaruosius dešimtmečius lėmė ženklų didelių gabaritų statinių (pvz., tiltų, daugiaaukščių statinių ir kt.) poreikį visame pasaulyje. Ši tendencija visame pasaulyje paskatino inovatyvių armuoto betono konstrukcinių sprendinių paiešką. Šalia įprastų normalaus stiprio betonų buvo sukurti stiprieji ir ypač stiprieji betonai, kurių stipris gali siekti 200 MPa. Visame pasaulyje atlikta daug eksperimentinių tyrimų optimizuojant bei tobulinant stipriojo betono mišinių sudėtį, dėl ko stipriojo betono mechaninės savybės yra 4-5 kartus geresnės lyginant su įprastuoju betonu. Vis dėlto, platesnį stipriojo betono panaudojimą armuotoms konstrukcijoms dažniausiai riboja didelė kaina ir patikimų fizikinių modelių bei skaičiavimo metodų stoka.

Darbe aprašyti tyrimai Lietuvoje atlikti pirmą kartą. Jie padės pagrindus šiuolaikinių inovatyvių medžiagų plėtrai bei diegimui Lietuvoje. Tyrimų rezultatai yra svarbūs Statybos sektoriui, siekiant išlikti konkurencingiems pasaulio rinkose bei kurti produktus atitinkančius pastarojo laikotarpio technologijų vystymosi tendencijas.

Apibendrinant skyriuje atliktą literatūros apžvalgą suformuluotas toks pagrindinis šio darbo tikslas: ***atlikti trumpalaikę apkrova veikiamų armuoto labai stipraus betono elementų eksperimentinius ir teorinius tyrimus siekiant įvertinti tradiciniams betonams taikomų inžinerinių bei skaitinių algoritmų tinkamumą labai stipraus betono elementams.***

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti tokie uždaviniai:

- 1) atlikti labai stipraus betono taikymo pagrindimo, medžiagų savybių bei analizės ir projektavimo metodų bendrą apžvalgą;
- 2) atlikti labai stipraus betono ir armuoto betono eksperimentinius tyrimus bei apdoroti gautus rezultatus;
- 3) taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą iš eksperimentinių rezultatų gauti labai stipraus betono (su plaušu ir be plaušo) tempiamosios zonos įtempimų ir deformacijų priklausomybes ir palyginti su pasiūlytais modeliais tradiciniam betonui;
- 4) įvertinti plaušo įtaką labai stipraus betono elgseną, taikant skirtingus liekamojo stiprio apskaičiavimo metodus;
- 5) gautus modelius panaudoti eksperimentinių elementų skaitinėje analizėje taikant baigtinių elementų metodą bei atlikti gautų rezultatų adekvatumo vertinimą.

2. LABAI STIPRAUS BETONO IR ARMUOTO BETONO ELEMENTŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Šiame skyriuje pateikiama testavimo programa, testuojami bandiniai, naudojami prietaisai ir bandymo rezultatai. Siekiant išaiškinti labai stipraus betono su plaušu ir be plaušo elgseną, nustatyti įtempimų ir deformacijų priklausomybę, gniuždomąjį ir tempiamąjį stiprį 2015 metais vasario mėnesio pabaigoje buvo sudaryti bandiniai ir išbandyti. Mechaninėms savybėms nustatyti buvo išbetonuoti kubeliai 150x150x150 mm (ilgis x plotis x aukštis) ir cilindrai 150 mm skersmens ir 300 mm aukščio. Taip pat buvo išbetonuoti bandiniai tempimo bandymams, didelės sijos lenkimo bandymams ir *Rilem* (2002) pasiūlytos formos bandiniai.

2.1. Bandinių sudedamosios medžiagos

Prieš betonavimą buvo sprendžiama labai stipraus betono sudėtis. Pagrindinis klausimas buvo susijęs su užpildų parinkimu, nes labai stipraus betono gamybai galima naudoti skirtingus lygiaverčius užpildus, kaip jau buvo minėta 1.6 poskyryje, todėl į pagalbą buvo pasitelkti Kauno technologijos universiteto Statybos ir architektūros fakulteto darbuotojai. Galiausiai buvo nuspręsta, kad į labai stipraus betono mišinį įeis: portlandcementis, kvarcinis smėlis, maltas kvarcinis smėlis, silicio dulkės, superplastikliai ir vanduo.

Bandymams atlikti buvo suorganizuoti du maišymai. Abiejų maišymų sudedamosios medžiagos ir proporcijos buvo vienodos, tik antram maišymui buvo pridėta 1% nuo bendro tūrio masės plieno plaušo.

2.1.1. Mišinio proporcija

Mišinio sudėtis, sudedamųjų medžiagų proporcija ir maišymo technologija buvo sukurta Evaldo Šerelio (2016).

2.1 lentelė. Labai stipraus betono mišinio sudėtis (Šerelis 2016)

Komponentai	kg/m ³
Vanduo	199
Cementas	735
Silicio mikro dulkės	99
Maltas kvarcinis smėlis	412
Kvarcinis smėlis	962
Superplastiklis	36,76
V/C	0,27
Santykinis mišinio tankis	0,758

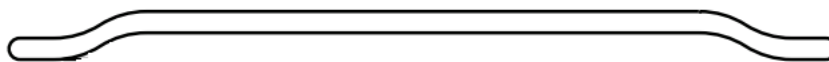
Suminis maišymo laikas paprastai būna ne mažesnis kaip 10 min. Išmaišius betoną ir supylus į klojinius, darbas buvo sustabdytas 24 val., kad betonas sustingtų ir galima būtų bandinius išimti iš klojinių. Praėjus 24 val. klojiniai buvo išrinkti, o bandiniai aplaistyti vandeniu ir susandėliuoti džiovinimui ir stiprėjimui 28 paroms (Šerelis 2016).

2.1.2. Plieno plaušas

Plieno plaušas yra ypač efektyvus tempiamojo betono zonoje, nes suirus betonui, plieno plaušas toliau perduoda tempimo įtempius taip darydamas suirimą plastiškesniu.

Tam, kad būtų galima įvertinti plieno plaušo įtaką labai stipriam betonui, pusė suformuotų elementų buvo išbetonuota pridedant 1 % plieno plaušo, nuo bendros mišinio masės. Knygos „Kompozitų armuotos betoninės konstrukcijos“ autoriai (Kaklauskas *et al.* 2012) teigia, kad plieno plaušas su užlenktais galais geriausiai užsinkaruoja betone ir ypač veiksmingas didelio stiprio betone. Taip pat autoriai teigia, kad plaušas padidina mechanines betono savybes tik tada, kai plaušo mišinyje yra 0,5-1,5 %. Viršijus 1,5 % ribą betono maišymo procedūra sunkėja, o juntamos naudos iš didesnio kiekio plaušo nėra.

Atsižvelgus į ankstesnius mokslininkų tyrimus ir autorių pastabas, labai stipriam betonui buvo parinktas 3 mm ilgio ir 0,3 mm skersmens plieno plaušas su užlenktais galais (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Plieno plaušo forma

2.2. Mechaninės savybės

Mechaninėms savybėms nustatyti buvo išbetonuoti cilindrai 150 mm skersmens ir 300 mm aukščio, kubeliai 150 x 150 x 150 mm ir prizmės 100 x 100 mm skerspjuvio ir 400 mm ilgio. Cilindrų buvo išbetonuota 12 vnt., iš kurių 6 be plaušo ir 6 cilindrai su plaušu. Kubelių buvo 16 vnt., iš kurių 8 vnt. su plaušu ir 8 vnt. be plaušo. Prizmių buvo 4 vnt., atitinkamai 2 vnt. su plaušu ir 2 prizmės be plaušo.

Praėjus 28 dienoms nuo betonavimo dienos buvo išbandyti pirmi bandiniai: 6 cilindrai, iš kurių 3 buvo su plaušu ir 3 be plaušo. Rezultatai pateikti 2.2 ir 2.3 lentelėse.

2.2 lentelė. Cilindrų iš labai stipraus betono be plaušo bandymo rezultatai

	I cilindras	II cilindras	III cilindras
Matmenys, mm	150x300	150x300	150x300
Tamprumo modulis E_c , GPa	-	-	-
Gniuždomasis stipris f_{cyl} , MPa	100,27	105,08	114,71
Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{m,cyl}$, MPa			106,69

2.3 lentelė. Cilindrų iš labai stipraus betono su plaušu bandymo rezultatai

	I cilindras	II cilindras	III cilindras
Matmenys, mm	150x300	150x300	150x300
Tamprumo modulis E_c , GPa	47,89	44,85	42,97
Gniuždomasis stipris f_{cyl} , MPa	118,39	115,17	107,16
Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{m,cyl}$, MPa			113,57

Sekantis bandymai buvo atliekami 84 diena po betonavimo ir buvo bandyti 6 kubeliai iš kurių 3 buvo su plaušu ir 3 be plaušo. Bandymo rezultatai pateikti 2.4 ir 2.5 lentelėse.

2.4 lentelė. Kubelių iš labai stipraus betono be plaušo bandymo rezultatai

	I kubelis	II kubelis	III kubelis
Matmenys, mm	150x150x150	150x150x150	150x150x150
Tamprumo modulis E_c , GPa	-	-	-
Gniuždomasis stipris f_{15x15} , MPa	98,20	71,73	98,64
Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{m,15x15}$, MPa			89,53

2.5 lentelė. Kubelių iš labai stipraus betono su plaušu bandymo rezultatai

	I kubelis	II kubelis	III kubelis
Matmenys, mm	150x150x150	150x150x150	150x150x150
Tamprumo modulis E_c , GPa	-	-	-
Gniuždomasis stipris f_{15x15} , MPa	108,66	141,23	119,37
Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{m,15x15}$, MPa			123,09

Kiti bandiniai buvo išbandyti praėjus 91 dienoms nuo betonavimo dienos. Į išbandytų bandinių sąrašą įėjo 5 kubeliai su plaušu, 5 kubeliai be plaušo, 3 cilindrai su plaušu, 3 cilindrai be plaušo, 2 prizmės su plaušu ir 2 prizmės be plaušo. Bandymo rezultatai pateikti 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 lentelėse.

2.6 lentelė. Cilindrų iš labai stipraus betono su plaušu bandymo rezultatai

	I cilindras	II cilindras	III cilindras
Matmenys, mm	150x300	150x300	150x300
Tamprumo modulis E_c , GPa	-	-	-
Gniuždomasis stipris f_{cyl} , MPa	119,90	117,08	119,18
Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{m,cyl}$, MPa			118,72

2.7 lentelė. Cilindrų iš labai stipraus betono be plaušo bandymo rezultatai

	I cilindras	II cilindras	III cilindras
Matmenys, mm	150x300	150x300	150x300
Tamprumo modulis E_c , GPa	-	-	-
Gniuždomasis stipris f_{cyl} , MPa	124,15	105,79	103,64
Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{m,cyl}$, MPa			111,19

2.8 lentelė. Prizmių iš labai stipraus betono su plaušu bandymo rezultatai lenkiamo stiprio nustatymui

	I prizmė	II prizmė
Matmenys, mm	100x100x400	100x100x400
Lenkiamasis stipris $f_{lenkimo}$, MPa	12,41	17,44
Vidutinis lenkiamasis stipris $f_{m,lenkimo}$, MPa		14,92

2.9 lentelė. Prizmių iš labai stipraus betono be plaušo bandymo rezultatai lenkiamo stiprio nustatymui

	I prizmė	II prizmė
Matmenys, mm	100x100x400	100x100x400
Lenkiamasis stipris $f_{lenkimo}$, MPa	12,16	12,23
Vidutinis lenkiamasis stipris $f_{m,lenkimo}$, MPa		12,19

2.10 lentelė. Kubelių iš labai stipraus betono be plaušo bandymo rezultatai

	I kubelis	II kubelis	III kubelis	IV kubelis	V kubelis
Matmenys, mm	150x150x150	150x150x150	150x150x150	150x150x150	150x150x150
Gniuždomasis stipris f_{15x15} , MPa	88,87	98,04	105,11	116,41	108,10
Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{m,15x15}$, MPa					103,31

2.11 lentelė. Kubelių iš labai stipraus betono su plaušu bandymo rezultatai

	I kubelis	II kubelis	III kubelis	IV kubelis	V kubelis
Matmenys, mm	150x150x150	150x150x150	150x150x150	150x150x150	150x150x150
Gniuždomasis stipris f_{15x15} , MPa	118,28	98,96	124,67	113,76	125,17
Vidutinis gniuždomasis stipris $f_{m,15x15}$, MPa					116,17

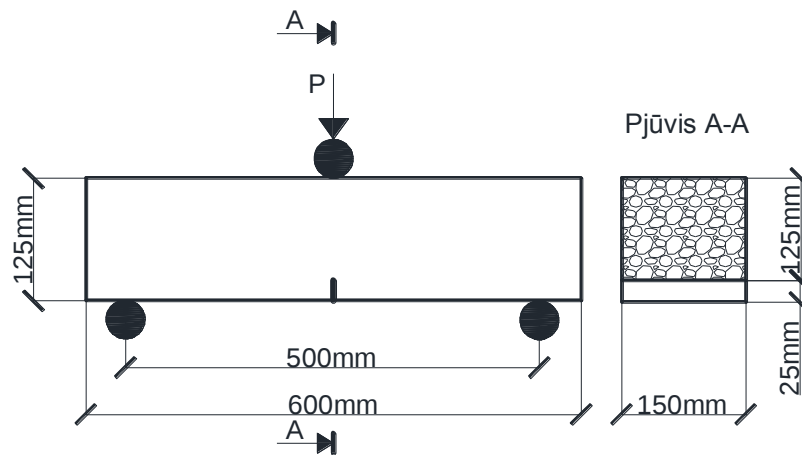
Pagal gautus rezultatus remiantis LST EN 1992-1-1 (2007) buvo apskaičiuoti labai stipraus betono su plaušu ir be plaušo tamprumo moduliai ir tempiamieji stipriai. Apskaičiuotos betono charakteristikos pateiktos 2.12 lentelėje.

2.12 lentelė. Labai stipraus betono charakteristiniai dydžiai po 28 dienų

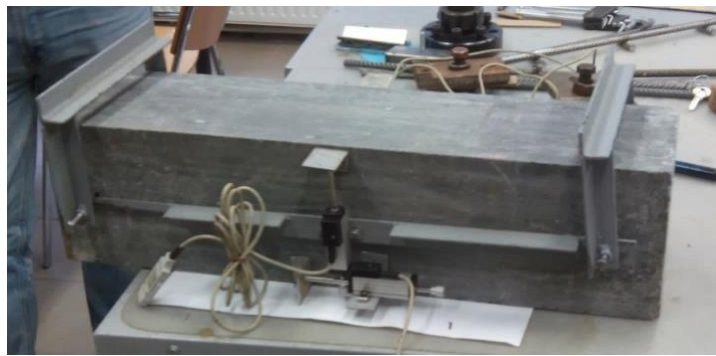
	f_{cm}	f_{ck}	f_{ctm}	E_c	E_{cm}
Mato vienetai	MPa			GPa	
Labai stiprus betonas su plaušu	113,57	105,6	4,63	47,88	45,60
Labai stiprus betonas be plaušo	106,69	98,69	4,58	47,00	44,76

2.3. Rilem sijelių bandymai

Labai stipraus betono su plaušu tyrimams buvo išbetonuotos 5 sijos 600 mm ilgio, 150 x 150 mm skerspjūvio ir 25 mm įpjova sijos viduryje pagal *Rilem* TC162-TDF (2002) grupės pasiūlytą metodą, iš kurių buvo nustatoma apkrovos ir plyšio pločio priklausomybė ir apkrovos ir įlinkio priklausomybė. Lenkimo bandymas atliekamas viena centruota apkrova veikiant laisvai atremtą, plieno plaušu armuotą betoninę siją. Apatinės bandinio dalies viduryje padaroma 25 mm ilgio įpjova (žr. 2.2 pav.). Taip lokalizuojamas elemento pleišėjimas ir užtikrinama, kad elementas suirs būtent susilpnintame skerspjūvyje. Apkrovos pridėjimas vyko hidrauliniu presu, o sija apkraunama 0,2 mm/min greičiu.



2.2 pav. Rilem (2002) lenkimo bandymo schema ir bandinio matmenys



2.3 pav. Metalinis rėmas LVDT jutikliams pritvirtinti



a)



b)

2.4 pav. Bandymo prietaisai: a) metalinė plokštelė, kuri bandymo metu dirba kaip atrama su 500mm tarpatramių, b) metalinis cilindras, kuris bandymo metu atlieka koncentruotos jėgos pridėjimą



a)



b)

2.5 pav. Bandymo įranga, a) LVDT jutikliai, b) duomenų kaupiklis

Tam, kad būtų galima tiksliai nustatyti *Rilem* sijelės įlinkius ir plyšio pločius, prie sijos buvo pritvirtintas specialus aliumininis rėmas (žr. 2.3 pav.), ant kurio laikėsi du LVDT jutikliai (angl. *Linear variable differential transformer*) įlinkiams matuoti. Taip pat vienas LVDT jutiklis buvo priklijuotas prie paties bandomo elemento ties įpjovą, kuris matavo plyšio plotį. *Rilem* sijelės apačia buvo atremta ant metalinės platformos 500 mm tarpatramio (žr. 2.4 pav. a), o viršuje buvo spaudžiama su metaliniu cilindru (žr. 2.4 pav. b).

LVDT jutikliai (žr. 2.5 pav. a) buvo prijungti prie specialaus kaupiklio (žr. 2.5 pav. b), o kaupiklis prijungtas prie kompiuterio, kuriame buvo atvaizduojami jutiklių duomenys.



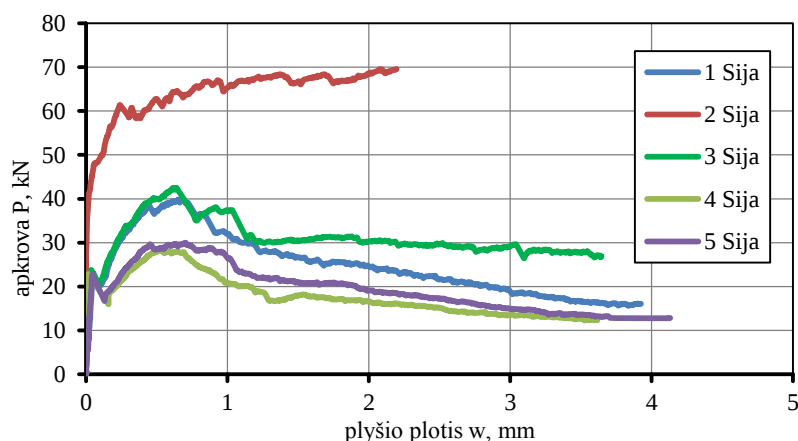
2.6 pav. Bandymo stendas

Rilem sijelės buvo bandomos 2015 metais balandžio 29 dieną. Iš viso buvo išbandytos 5 sijelės taikant *Rilem* TC162-TDF (2002) metodiką.

2.7 pav. yra pavaizduotos bandytų sijų apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės, 2.8 pav. apkrovos ir įlinkio priklausomybės ir atsivėrusių plyšių formos. Antro bandinio bandymo metu nebuvo pasiekta ribinė apkrovos reikšmė dėl to, kad bandymo stendas buvo užprogramuotas nutraukti bandymą pasiekus maksimaliai saugią bandymo stendui pridėjimo apkrovą 70 kN. Trečio bandinio bandymo metu atsiklijavo LVDT jutiklis, kuris matavo plyšio plotį, todėl rezultatai buvo prarasti. Bandymai buvo atliekami iki tol, kol nebuvo pasiektas 3,5 mm įlinkis arba 3 mm plyšio plotis.

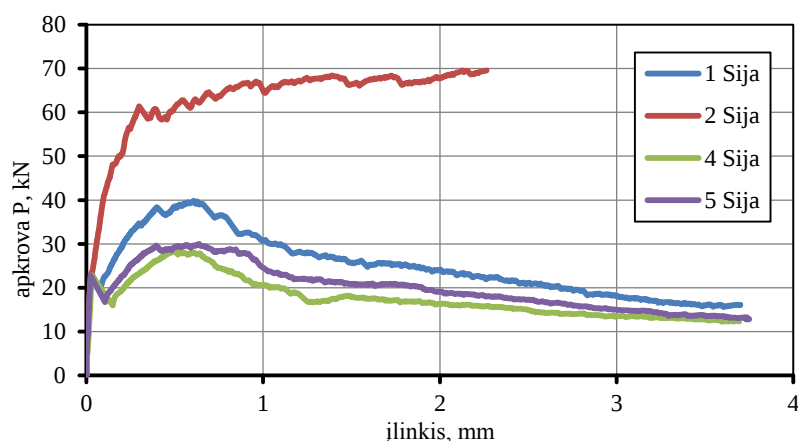
Vienas iš eksperimento tikslų buvo nustatyti plaušo įtaka labai stipriam betonui. Kadangi tiriamas betonas yra didelio stiprio, tai jo suirimas yra trapus, todėl apkrovos ir deformacijos priklausomybės grafike būtų matyti kaip grafikas nutrūksta pasiekus maksimalią atlaikomąją apkrovą arba augant deformacijoms staigiai leidžiasi žemyn. Kadangi bandytas betonas buvo su plaušu 2.7, 2.8 paveikslų diagramose matome, kad apkrovai pasiekus betono atlaikomosios galios ribinę reikšmę bandinys nesulūžta, o tiesiog atsiradus plyšiams betone į darbą įsijungia plieno plaušas, kuris perduoda įtempius nesupleišėjusiam betonui ir nėra

staigaus apkrovos nukritimo. Tai įrodo plaušo efektyvumą ir jo reikšmę tempiamo betono sluoksniui. Taip pat dėl plaušo gaunamas plastiškas konstrukcijos suirimas.



2.7 pav. Visų bandinių apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės

Didžiausias stipris buvo gautas antro bandinio bandymo metu - 70 MPa. Bandymas nebuvo iki galo atliktas, nes bandymo stendas negalėjo daugiau didinti apkrovą. Tokį rezultatą galima paaiškinti tik tuo, kad galimai didelė koncentracija plaušo buvo elemento viduryje ir ties įpjova, kas varžė deformacijas ir didesnių plyšių atsivėrimą. Tą faktą patvirtina antro bandinio plyšių formą, kuri pavaizduota 2.9 paveiksle. Būtent antrojoje sijoje matyti daug mažų plyšių ir akivaizdžiai plyšių kiekis ir išdėstymas skiriasi nuo kitų keturių išbandytų sijų. Taip pat pastebėtas kitoks antro bandinio apkrovos ir įlinkio priklausomybės charakteris, nei kitų keturių bandinių. Antro bandinio grafike nematome apkrovos nukritimo, apkrova palaipsniui kilo be didesnių nukritimų ar praslydimų, todėl ir neatsivėrė didelių plyšių.



2.8 pav. Visų bandinių apkrovos ir įlinkio priklausomybės

Likusių keturių bandinių eksperimento rezultatai yra panašūs. Kaip pavaizduota 2.7 paveiksle, apkrovos ir plyšio pločio priklausomybių grafike ir 2.8 paveiksle, apkrovos ir įlinkio priklausomybių grafike visų bandinių priklausomybės yra panašaus charakterio. Visuose grafikuose matomas momentas, kai apkrova nukrenta, o deformacijos išauga. Tuo momentu

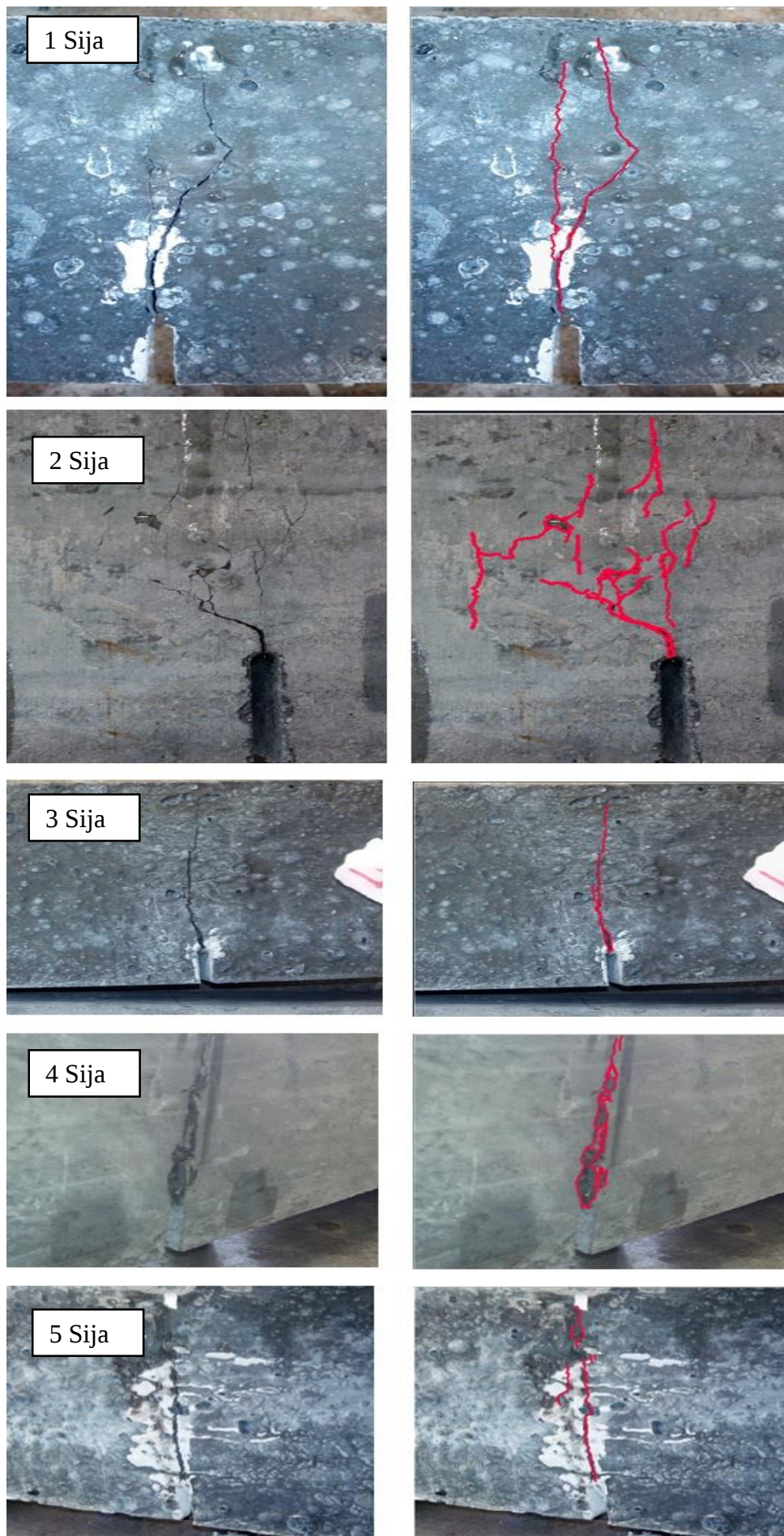
įvyksta praslydimas ir išryškėja plyšys. Kaip parodyta 2.9 paveiksle, pirmo, trečio, ketvirto ir penkto bandinio plyšių išsivystymas ir forma yra labai panaši. Matomas vienas didelis plyšis, kuris tęsiasi beveik per visą skerspjūvį ir kai kur yra antras nedidelis plyšys. Tai kardinaliai skiriasi nuo antro bandinio plyšių formos, kai nėra vieno didelio plyšio per visą skerspjūvį, o yra daug mažų plyšių.

Sugretinus visus grafikus (žr. 2.7 ir 2.8 pav.) matyti, kad nors priklausomybių forma ir yra panaši, skaitinės reikšmės skiriasi. Galima pastebėti, kad pirmo ir trečio bandinio rezultatai yra labai panašūs iki 0,75 mm įlinkio. Toliau rezultatų skirtumas pradeda didėti augant įlinkiui. Panašų reiškinį galima matyti ir tarp ketvirto ir penkto bandinio rezultatų. Šiuo atveju skirtumas tarp rezultatų yra mažas ir vienodas iki pat bandymo pabaigos. Tas skirtumas tiesiogiai priklauso nuo plaušo kiekio ir išdėstymo elemento vidurinėje dalyje.

Visų bandinių laikomosios galios rezultatai pateikti 2.13 lentelėje.

2.13 lentelė. *Rilem* bandinių laikomosios galios

	1 bandinys	2 bandinys	3 bandinys	4 bandinys	5 bandinys
Laikomoji galia, kN	39,7	70,0	42,52	28,32	29,99

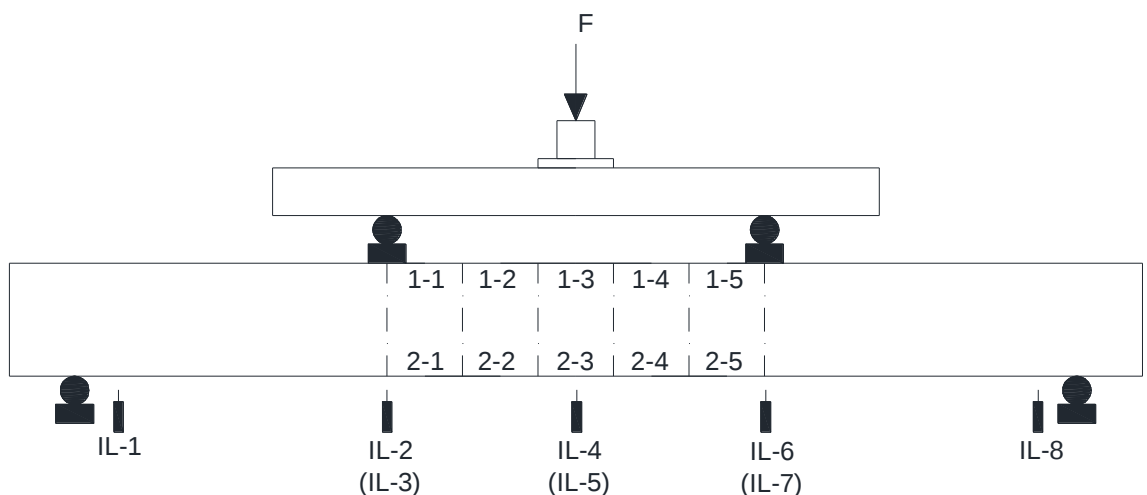


2.9 pav. Visų bandinių plyšio formos

2.4. Armuotų sijų bandymai

Pagamintos buvo trumpalaikės apkrovos bandymams 4 armuotos labai stipraus betono sijos. Projektinis sijų dydis 150 x 300 x 3000 mm (plotis x aukštis x ilgis), tarpatramio ilgis 2800 mm. Sijos suskirstytos į dvi grupes (po dvi sijos į kiekvieną grupę). Pirmoje grupėje buvo sijos su plaušu, o antroje grupėje sijos be plaušo. Į pirmąją grupę įeina: sija 1F ir sija 2F („F“ raidė reiškia, kad bandinys yra su plieno plaušu). Į antrąją grupę įeina: sija 3 ir sija 4. Visos sijos buvo armuotos vienodu armatūros karkasu (žr. 2.12 pav.), kuris susideda iš dviejų armatūrų 12 mm skersmens AT800 tempiamojoje zonoje, dviejų 8 mm skersmens armatūros S500 gniuždomojoje zonoje ir 26 vnt. apkabų iš 8 mm skersmens S500 armatūros. Sijų armavimo schema pateikta 2.11 pav. Sijų matmenys ir kitos pagrindinės charakteristikos pateiktos 2.14 lentelėje.

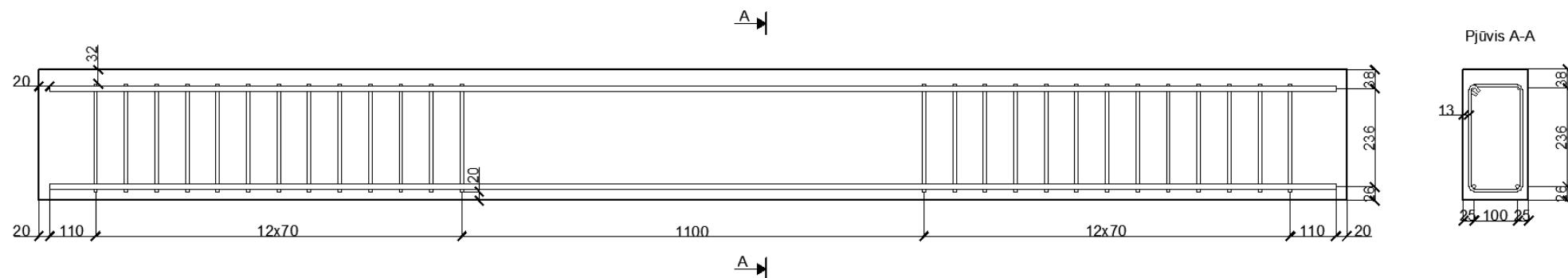
Sijos išbandytos taikant keturių taškų lenkimo schemą ir esant 1000 mm grynojo lenkimo zonai (žr. 2.10 pav.). Tarpatramio ilgis sudarė 2800 mm. Apkrova keliama pakopomis po 2 kN. Apkrovos dydis fiksuotas skaitmeniniu 500 kN dinamometru. Įlinkiai ir deformacijos matuoti indukciniais tiesinių poslinkių jutikliais (LVDT), kurių iš viso buvo 18 vnt. 10 jutiklių buvo pritvirtinti prie bandomo elemento gryno lenkimo zonoje. 5 jutikliai prie tempiamos ir 5 jutikliai prie gniuždomos armatūros. Įlinkiams matuoti buvo panaudoti 8 jutikliai. Jutiklių išdėstymo schema ir bendra bandymo schema parodyta 2.10 paveiksle. Indukciniai jutikliai ir dinamometras buvo sujungti su kompiuteriu ir jų rodmenis buvo nuskaitomi kas 1 s.



2.10 pav. Lenkiamų sijų bandymo schema ir jutiklių išdėstymas

2.14 lentelė. Sijų matmenys ir kitos pagrindinės charakteristikos

Nr	Pavadinimas	h	d	b	d2	As1	As2	p	ρ
		m				m2		%	kg/m3
1	Sija 1F	0,300	0,273	0,149	0,036	2,262E-04	1,005E-04	0,556	2385,7
2	Sija 2F	0,300	0,273	0,148	0,041	2,262E-04	1,005E-04	0,559	2385,7
3	Sija 3	0,303	0,275	0,149	0,036	2,262E-04	1,005E-04	0,553	2385,7
4	Sija 4	0,300	0,271	0,147	0,038	2,262E-04	1,005E-04	0,567	2385,7



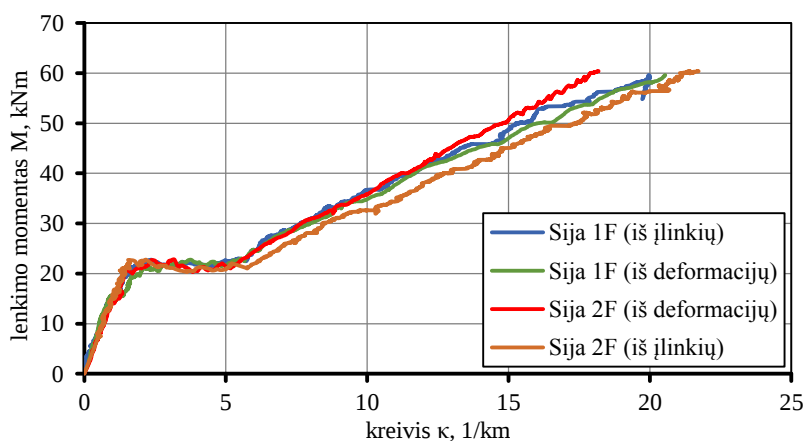
2.11 pav. Sijų armavimo schema (matmenys pateiktos milimetrais)



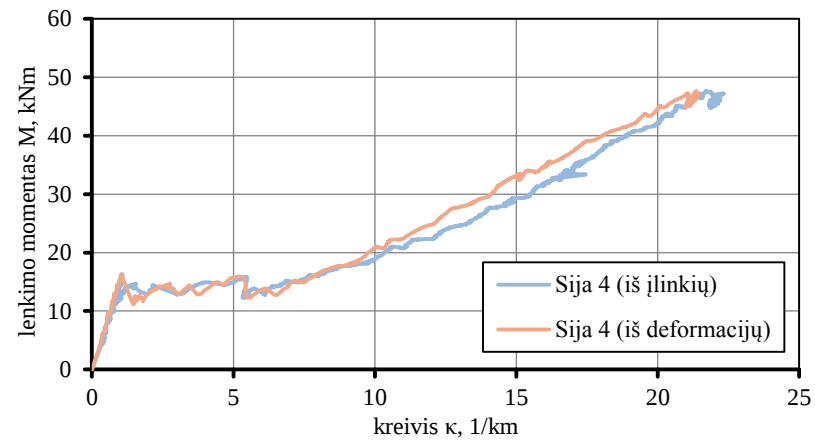
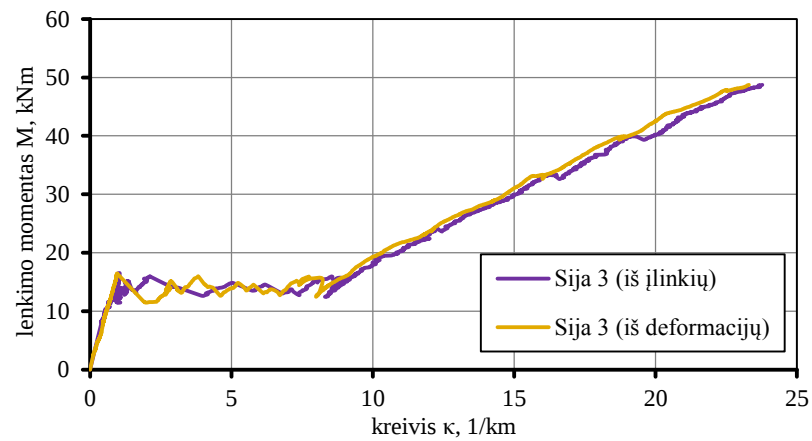
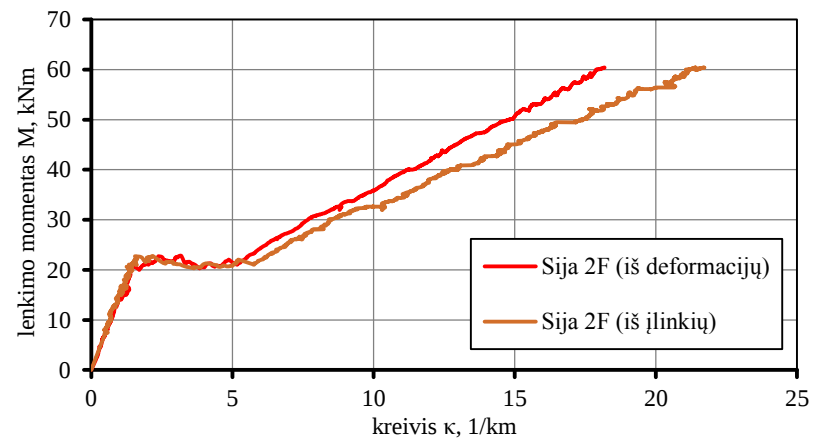
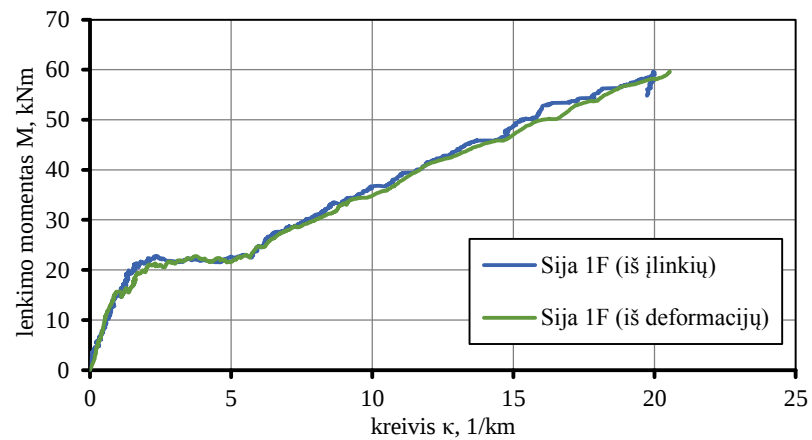
2.12 pav. Sijų armatūros karkasas

Atlikus eksperimentinius armuoto labai stipraus betono sijų bandymus buvo apdorojami rezultatai ir iš gautų rezultatų apskaičiuojamas lenkimo momento ir kreivio pasiskirstymas. Iš viso gautos aštuonios eksperimentinės kreivės, po dvi iš kiekvienos sijos, kurios susideda iš: 1) apskaičiuotų pagal sijos grynojo lenkimo zonos įlinkius (zonos, tarp bandymo metu veikiančių dviejų koncentruotų jėgų) (grafikuose žymima „iš įlinkių“), 2) apskaičiuotų pagal gryno lenkimo zonoje išmatuotas sijos deformacijas (grafikuose žymima „iš deformacijų“). Visų keturių išbandytų sijų momento ir kreivio priklausomybės yra pavaizduotos 2.14 paveiksle ir galime pastebėti, kad rezultatai iš deformacijų ir įlinkiu gerai sutampa o tai reiškia, kad buvo išvengta netikslumų ir klaidų bandymo metu.

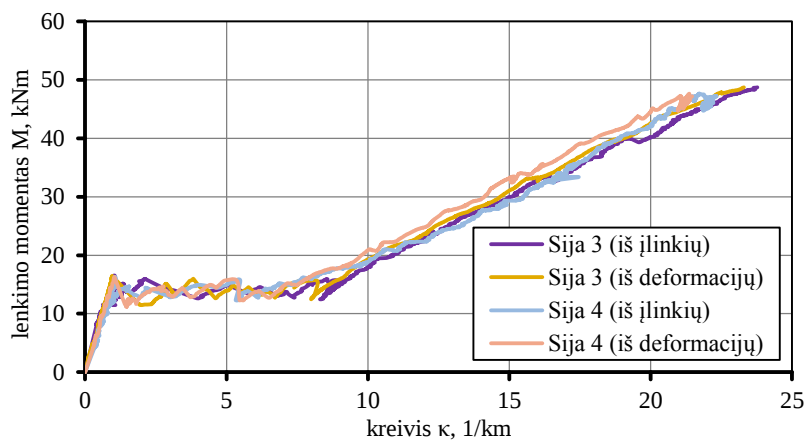
Viena iš eksperimento užduočių buvo nustatyti plieno plaušo veiksmingumą labai stipriam betonui. Kaip matyti iš *Rilem* sijelių, taip ir armuotų sijų bandymo rezultatuose yra pastebimas plaušo efektyvumas. 2.16 paveiksle yra palyginti bandymo rezultatai sijų su plaušu ir sijų be plaušo ir pastebimi akivaizdus, sijų su plaušu, didesni atlaikomosios galios rezultatai. Pirmieji elementų su plaušu plyšiai vertis pradeda esant 25 kNm lenkimo jėgai, o bandinių be plaušo - jau esant 17 kNm lenkimo jėgai. Taip pat, esant tai pačiai lenkimo apkrovai, elementai su plaušu pasiekia mažesnes deformacijas, nei elementai be plaušo.



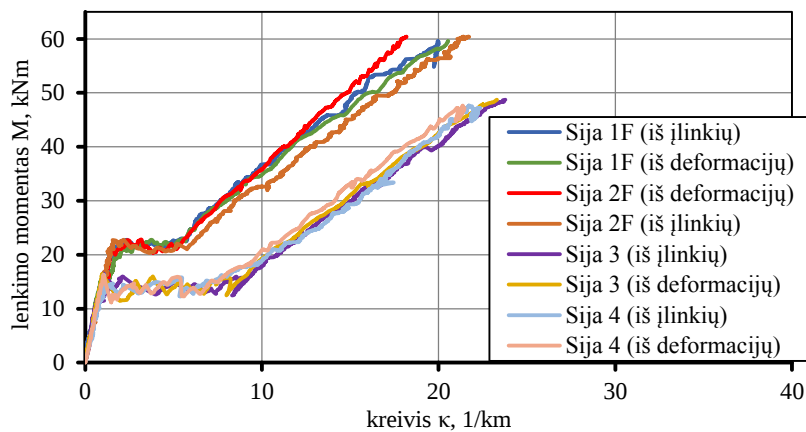
2.13 pav. Sijų su plaušu lenkimo momento ir kreivio priklausomybių palyginimas



2.14 pav. Eksperimentinės lenkimo momento ir kreivio priklausomybės



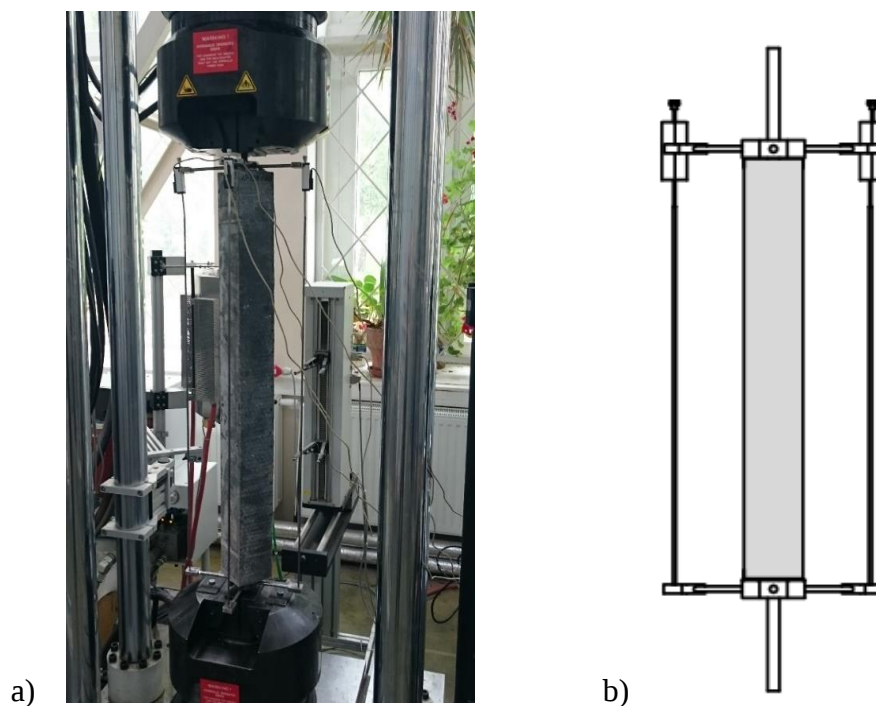
2.15 pav. Sijų be plaušo lenkimo momento ir kreivio priklausomybių palyginimas



2.16 pav. Visų bandytų sijų lenkimo momento ir kreivio priklausomybių palyginimas

2.5. Tempiamų armuoto betono elementų bandymai

Labai stipraus betono apkrovos ir deformacijų priklausomybės buvo nustatomos taip pat iš tempiamųjų elementų. Tam tikslui pasiekti buvo išbetonuoti šeši vieno metro ilgio elementai su 14 mm skersmens AT800 armatūra per vidurį. Bandiniai buvo sudalyti į dvi grupes. Pirmajai grupei buvo išbetonuoti trys bandiniai be plaušo, o antrajai grupei - trys bandiniai su plaušu. Deformacijoms nustatyti buvo naudojami indukciniai jutikliai (LVDT). Jutikliai buvo sumontuoti iš keturių elemento pusių, kaip parodyta 2.17 pav. Jutikliai buvo prijungti prie duomenų kaupiklio, kuris buvo sujungtas su kompiuteriu, kuriame buvo saugomi duomenys. Apkrovos dydis buvo fiksuotas skaitmeniniu 500 kN dinamometru. Elementas buvo bandomas įtvirtinus armatūros galus hidraulinio preso griebtuose (2.17 pav. a).



2.17 pav. Tempiamųjų elementų bandymo stendas ir LVDT jutiklių išdėstymas

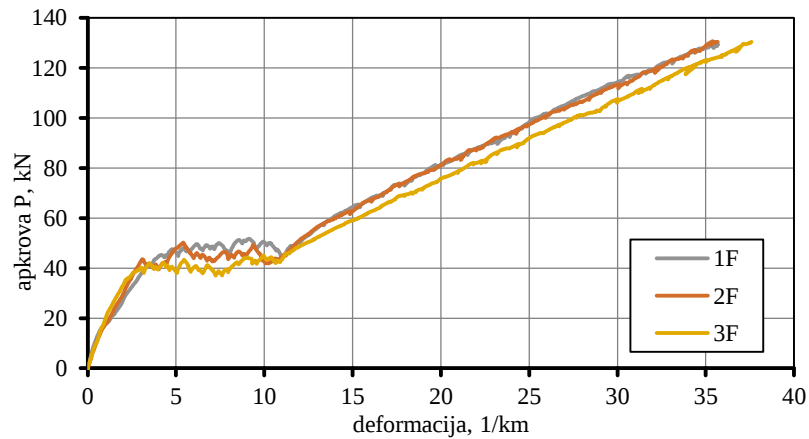
Bandymo duomenys buvo išsaugoti MS excel programoje. Iš viso buvo gauta informacija apie poslinkius iš 4 LVDT jutiklių ir apkrova iš bandymo stendo kompiuterio. Iš bandymo duomenų buvo nustatyta kiekvieno bandinio apkrovos ir deformacijos priklausomybė. Kadangi deformacijas matavo iš karto 4 jutikliai, tai iš jų buvo apskaičiuotas vidurkis ir panaudotas priklausomybės braižymui.

Kaip jau buvo minėta anksčiau, bandiniai buvo suskirstyti į dvi grupes, todėl diagramose pirmos grupės elementai (kurie buvo su plaušu) pavadinti 1F, 2F, 3F, o antros grupės elementai (be plaušo) atitinkamai 4, 5, 6.

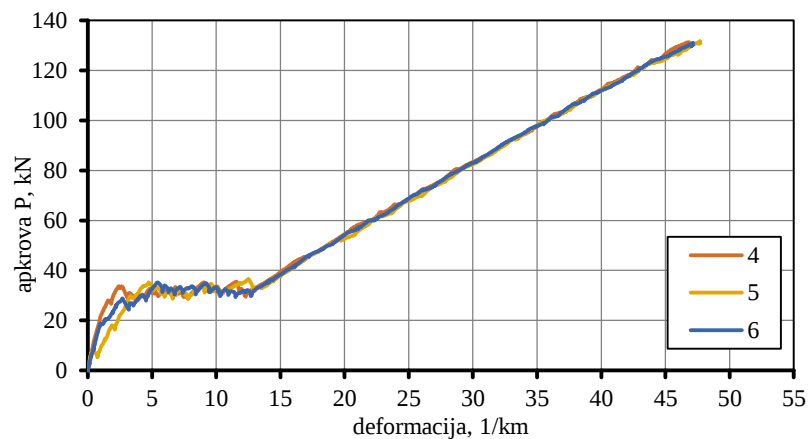
Kaip matyti 2.19 paveikslo diagramos visų bandinių be plaušo tempimo jėgos ir deformacijų priklausomybės yra vienodos, o tai reiškia, kad bandymai buvo atlikti tinkamai ir buvo išvengta klaidų. Taip pat iš 2.19 paveikslo matyti, kad priklausomybės susideda iš trijų dalių. Pirmoji dalis nuo bandymo pradžios iki pirmo atsivėrusio plyšio. Po to matoma plyšių vėrimosi atkarpa. Toliau, supleišėjus betonui, betono perimama jėga vis mažėja ir pagrindinę apkrovos dalį perima armatūra ir grafikas pasibaigia pasiekus armatūros ribinius įtempius.

Elementų su plaušu elgsena yra identiška elementams be plaušo (2.18 pav.), tačiau pastebimas skirtumas, kai visos priklausomybės yra atvaizduojamos ant vieno grafiko. Kaip matome 2.20 paveiksle, elementų su plaušu pirmieji plyšiai atsiveria prie kur kas didesnės apkrovos ir pastebimas kur kas mažesnis bendras deformativumas prie tos pačios atlaikomosios galios. Manoma, kad plyšių atsivėrimą elementuose su plaušu varžo plaušas. Plaušas, esantis

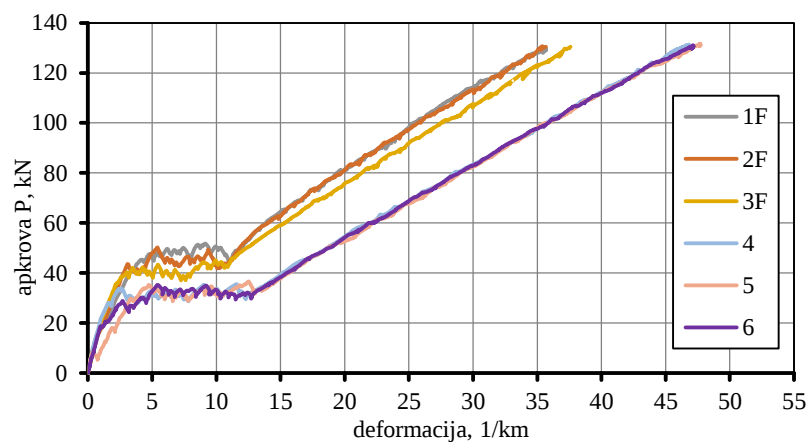
betone varžo, mikro-plyšių (nematomu akims) atsivėrimą ir atitolina didesnių plyšių vėrimąsi, taip padidindamas tempiamo betono atlaikomąją galią.



2.18 pav. Tempiamųjų elementų su plaušu bandymo rezultatai



2.19 pav. Tempiamųjų elementų be plaušo bandymo rezultatai



2.20 pav. Visų tempiamųjų elementų bandymo rezultatai

2.6. Antro skyriaus apibendrinimas

Bendradarbiaujant su KTU Statybos ir architektūros fakulteto ekspertais pirmą kartą Lietuvoje atlikti labai stipraus betono ir armuoto betono elementų eksperimentiniai tyrimai. Tyrimų metu nustatyti labai stipraus betono su plaušu ir be plaušo pagrindinės charakteristikos praėjus 28 dienoms po betonavimo. Atlikti nedidelių plaušų armuotų sijų lenkimo bandymai pagal *Rilem* (2002) metodą ir sudarytos apkrovos ir plyšio pločio bei apkrovos ir įlinkio diagramos. Pagamintos ir dviejų koncentruotų jėgų apkrova išbandytos keturios gelžbetoninės sijos. Šioms sijoms sudarytos lenkimo momentų ir kreivių diagramos. Papildomai pagaminti ir trumpalaikė apkrova išbandyti tempiami elementai iš labai stipraus betono su plaušu ir be plaušo. Šiems elementams sudarytos apkrovos ir deformacijos priklausomybės. Eksperimentiniai tyrimai atskleidė labai stipraus betono elgsenos ypatumus bei išryškino plaušo įtaką armuoto betono elementų įtempių ir deformacijų būviui. Atlikti eksperimentiniai tyrimai visų pirma yra svarbūs inovatyvių medžiagų diegimo Statybos sektoriuje prasme. Kituose skyriuose gauti eksperimentiniai rezultatai panaudoti vertinant tradiciniams betonams taikomų medžiagų modelių bei analizės metodų tinkamumą laibai stipraus betono elementams.

3. SUPLEIŠĖJUSIO TEMPIAMOJO BETONO ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ DIAGRAMOS

Šiame skyriuje pateikiamas tempiamojo labai stipraus betono įtempių ir deformacijų diagramų radimas. Labai stipraus armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė buvo randama atlikus atvirkštinį uždavinį ir palyginama su kitais teoriniais, supaprastintais įtempių ir deformacijų priklausomybių radimo būdais. Toliau pagal *Rilem* TC162-TDF (2002) grupės pasiūlytą metodą, iš eksperimento metu gautu apkrovų ir deformacijų (įlinkių) priklausomybių, buvo gaunamos tempiamo. plaušu armuoto labai stipraus betono įtempių ir deformacijų diagramos. Šios diagramos, kaip tempiamo betono fizikinis modelis, panaudotos kitame skyriuje modeliuojant eksperimentines sijas ir *Rilem* sijas su kompiuterine baigtinių elementų programa *Atena*.

3.1. Atvirkštinio uždavinio pritaikymas

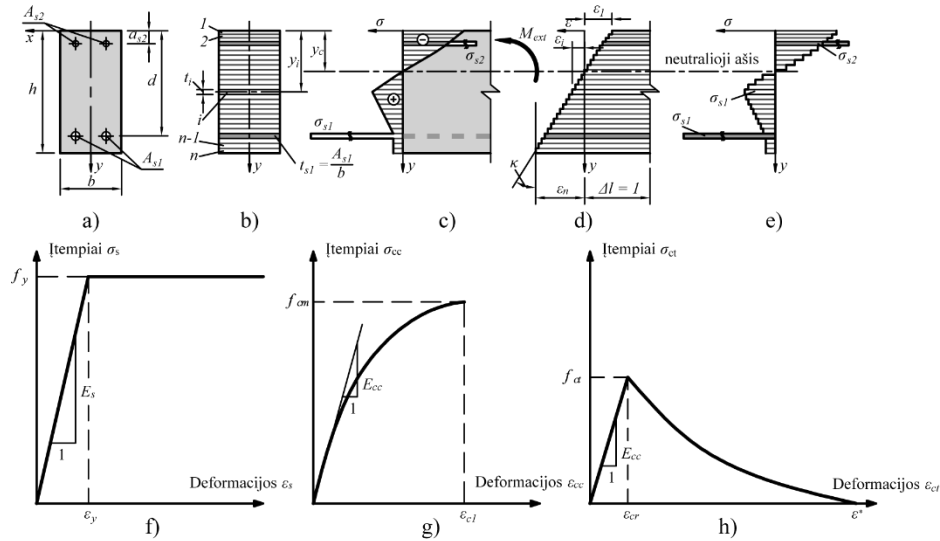
Vilniaus Gedimino technikos universiteto Tiltų ir specialiųjų statinių katedroje buvo pasiūlytas naujas fizikinio modeliavimo metodas, kuriuo remiantis iš lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramų galima gauti supleišėjusio tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas. Tai atliekama taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą, kuris paremtas tiesioginio uždavinio sprendimu, sluoksnių metodu (Kaklauskas 2004) bei šiomis prielaidomis (Ulbinas 2012):

1. Labai stiprus betonas laikomas vienalyte medžiaga.
2. Fizinis modelis pagrįstas vidutinių plyšių modeliu, t.y. skaičiavimuose taikomi vidutiniai įtempiai bei vidutinės deformacijos.
3. Deformacijų pasiskirstymas elemento skerspjūvyje yra tiesinis – galioja plokščiųjų pjūvių hipotezė.
4. Visiems tempiamojo betono sluoksniams galioja ta pati įtempių ir deformacijų diagrama.

Tiesioginis uždavinys yra įprastas statybinių konstrukcijų projektavimo praktikoje ir yra taikomas tuomet, kai turint medžiagų fizikinius modelius (pvz. įtempių ir deformacijų diagramas) gaunamas konstrukcijos atsakas (pvz., apkrovos ir deformacijų, apkrovos ir įlinkių ar pan. diagramos). Atvirkštinio uždavinio metu galima gauti medžiagų įtempių ir deformacijų diagramas, kurias vėliau galima pritaikyti projektuojant konstrukcijas (Ulbinas 2012).

Tiesioginio uždavinio metodas yra paremtas iteraciniu skaičiavimu bei armatūros (3.1 pav. f), gniuždomojo (3.1 pav. g) ir tempiamojo (3.1 pav. h) betono diagramų taikymu ir medžiagų atsparumo formulėmis. 3.1 paveiksle yra pavaizduotas skerspjūvis, kuris apkrautas išorės lenkimo momentu M_{ext} . Skerspjūvis sudalinamas į n horizontalių betono bei armatūros

sluoksnių (3.1 pav. b). Armatūros strypai pakeičiami ekvivalentinio skerspjūvio armatūros sluoksniu.



3.1 pav. Sluoksnių modelis ir medžiagų modeliai (Ulbinas 2012) a) – e) sluoksnių modelis; f) plieno įtempimų ir deformacijų diagrama; g) gniuždomojo betono įtempimų ir deformacijų diagrama; h) tempiamojo betono įtempimų ir deformacijų diagrama

Kai žinomos armatūros, gniuždomojo ir tempiamojo betono įtempimų ir deformacijų diagramos (3.1 pav. f, g, h), galime nustatyti kiekviename skerspjūvio sluoksnyje susidarančius įtempius: apskaičiuotos deformacijos reikšmę ε_i , atitinka įtempiai σ_i . Apskaičiuojamas kirstinis deformacijų modulis $E_{i,sec} = \sigma_i / \varepsilon_i$. ($i = 1, 2 \dots n$). Kiekvienam sluoksniui gauta kirstinio deformacijų modulio reikšmė palyginama su ankstesnėje iteracijoje imta arba apskaičiuota reikšme. Skaičiavimai atliekami tol, kol pasiekiamas pasirinktas tikslumas.

Skerspjūvio kreivis ir deformacijos kiekviename sluoksnyje i apskaičiuojami pagal klasikinės medžiagų mechanikos formules:

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{M_{ext}}{IE}; \quad \varepsilon_i = \kappa(y_i - y_c); \quad y_c = \frac{SE}{AE}; \\ AE &= b \sum_{i=1}^n t_i E_{i,sec}; \quad SE = b \sum_{i=1}^n t_i y_i E_{i,sec}; \\ IE &= b \sum_{i=1}^n [t_i^3/12 + t_i(y_i - y_c)^2] E_{i,sec}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Čia AE , SE ir IE yra atitinkamo ploto, inercijos momentų bei kirstinio modulio $E_{i,sec}$ sandaugos.

Šiame darbe eksperimento metu buvo gautos momentų ir kreivių diagramos, todėl buvo naudojamas atvirkštinis uždavinio metodas, kuris paremtas (Kaklauskas 2004; Gribniak 2009) sluoksnių modeliu (3.1 pav. a-e) ir įtempimų ir deformacijų diagramos nustatymu

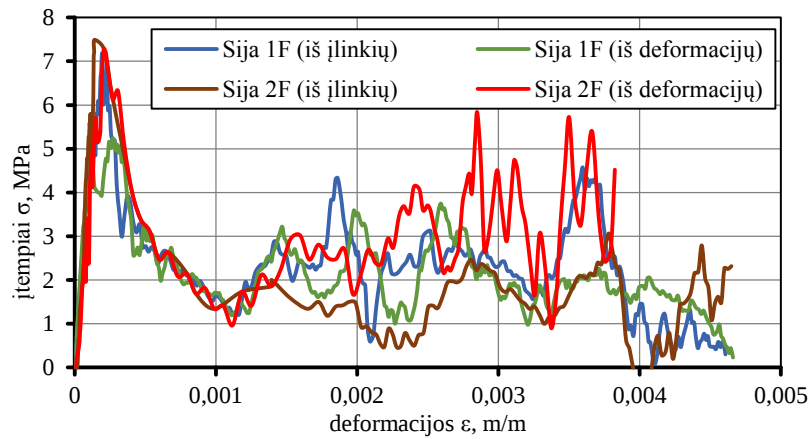
skerspjūvio kraštiniam tempiamojo betono sluoksniui. Gelžbetoninio elemento skerspjūvis pagal užduotus parametrus yra sudalinamas į horizontalius armatūros ir betono sluoksnius. Užsiduodamos armatūros ir gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės. Skaičiavimai atliekami iteracijomis, didėjant išoriniam lenkimo momentui. Kiekvienam lenkimo momento prieaugiui, ieškomos įtempių ir deformacijų diagramos pradinė kirstinio modulio reikšmė yra priimama lygi 0 ($E_{i,0} = 0$) ir sprendžiant tiesioginį uždavinį apskaičiuojamas kreivis $\kappa_{calc,i}$. Jeigu skirtumas tarp apskaičiuoto ir eksperimentinio kreivio $\kappa_{obs,i}$ viršija užduotą paklaidą Δ , skaičiavimai kartojami taikant kompleksinį Niutono – Raphsono ir bisekcijos metodą (Gribniak 2009) tol, kol paklaida neviršija užsiduotos reikšmės. Kiekvienoje iteracijoje apskaičiuojamas kirstinis deformacijų modulis $E_{i,k}$. Kai randamas sprendinys, gautoji $E_{i,k}$ reikšmė fiksuojama ir taikoma kitiems apkrovimo žingsniams. Pasiekus maksimalią momento reikšmę, skaičiavimai baigiami. Tokiu būdu randami visi tempiamojo labai stipraus betono suminių vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos taškai. Skaičiavimo metodika detaliau aprašyta Gribniak (2009) darbe.

Skaičiavimai buvo atliekami du kartus kiekvienai sijai, nes iš kiekvienos sijos eksperimento metu buvo gautos dvi momento ir kreivio priklausomybės (pagal duomenys iš deformacijų ir iš įlinkių). Kadangi bandymai buvo atliekami 84 diena po užbetonavimo, tai betono charakteristikos buvo perskaičiuotos pagal LST EN 1992-1-1 (2007). Betono charakteristikos pateiktos 3.1 lentelėje.

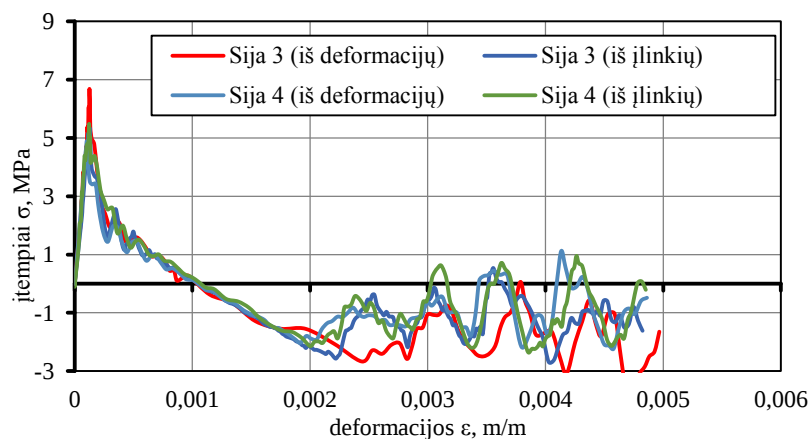
Atlikus atvirkštinio uždavinio skaičiavimus buvo gauta tempiamojo labai stipraus betono įtempių ir deformacijų priklausomybė ir tempiamojo plaušu armuoto labai stipraus betono įtempimų ir deformacijų priklausomybė (žr. 3.2 ir 3.3 pav.).

3.1 lentelė. Labai stipraus betono charakteristiniai dydžiai po 84 dienų

	f_{cm}	f_{ctm}	E_c	E_{cm}
Mato vienetai	MPa		GPa	
Labai stiprus betonas su plaušu	156,00	6,51	52,38	49,89
Labai stiprus betonas be plaušo	113,47	5,41	47,81	45,53

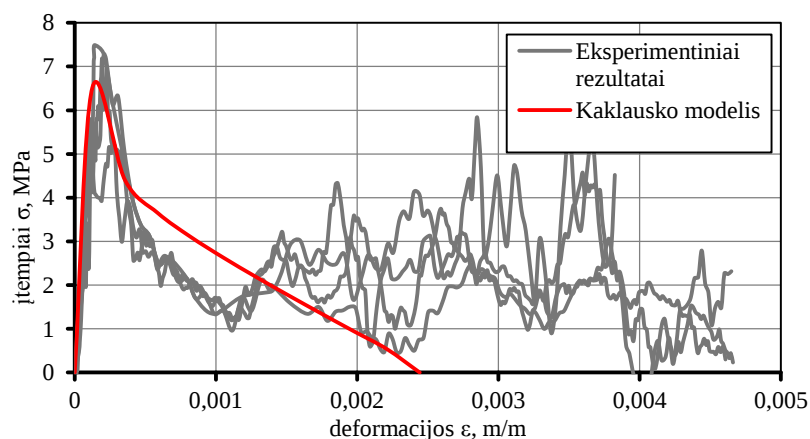


3.2 pav. Tempiamojo labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų diagrama, gauta skaičiuojant atvirkštinį uždavinį



3.3 pav. Tempiamojo labai stipraus betono be plaušo įtempių ir deformacijų diagrama, gauta skaičiuojant atvirkštinį uždavinį

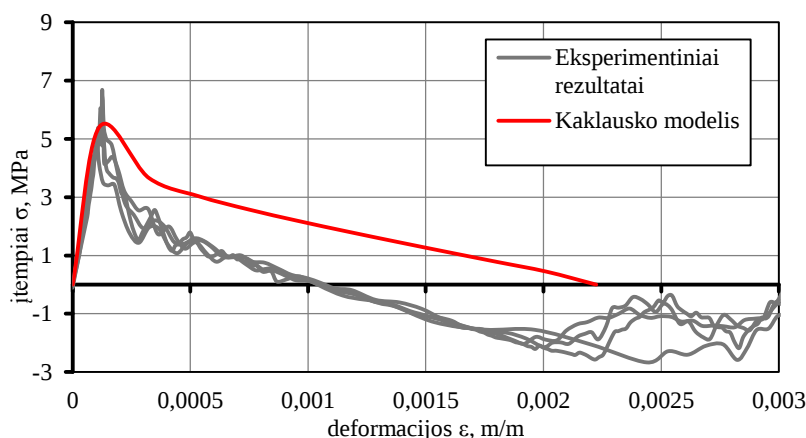
Taip pat, taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą gautos labai stipraus betono su plaušu ir be plaušo įtempių ir deformacijų diagramos palyginamos su Kaklauskos (2000) modeliu skirtu įprastam betonui (žr. 3.4 ir 3.5 pav.).



3.4 pav. Tempiamojo labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų diagramos, gautos skaičiuojant atvirkštinį uždavinį palyginimas su Kaklauskos (2000) pasiūlytu modeliu

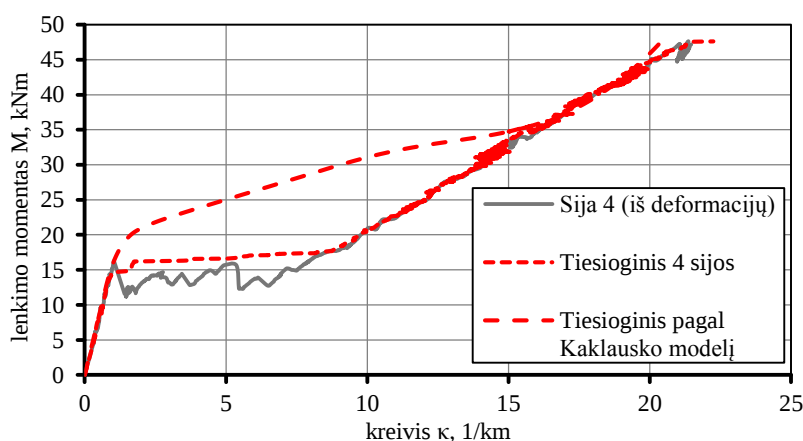
Iš diagramų matyti, kad G. Kaklauskos pasiūlytas modelis nevisiškai tinka labai stipriam betonui su plaušu, nes betonuose su plaušu pasireiškia liekamieji įtempiai ir įtempių

pasiskirstymas yra kitoks. Labai stipriam betonui be plaušo Kaklauskio (2000) pasiūlytas modelis irgi netinkamas, nors krentančios dalies charakteris yra panašus, tačiau skiriasi skaitine reikšme.



3.5 pav. Temperiamojo labai stipraus betono be plaušo įtempių ir deformacijų diagramos gautos skaičiuojant atvirkštinį uždavinį palyginimas su Kaklauskio (2000) pasiūlytu modeliu

Buvo suabejota dėl atvirkštinio uždavinio skaičiavimo rezultatų, kad gautos labai stipraus betono be plaušo įtempių ir deformacijų diagramos nesutampa su Kaklauskio (2000) pasiūlytu modeliu. Todėl įtempių ir deformacijų priklausomybė, gauta atlikus atvirkštinį uždavinį, buvo panaudota tiesioginio uždavinio skaičiavimams. Patikrinamajam skaičiavimui buvo pasirinkta 4 sijos įtempių ir deformacijų diagrama (eksperimentiniai duomenys iš deformacijų). Taip pat pagal Kaklauskio (2000) pasiūlytą modelį gauta įtempių ir deformacijų priklausomybė buvo panaudota tiesioginio uždavinio išsprendimui ir visų rezultatų palyginimui.

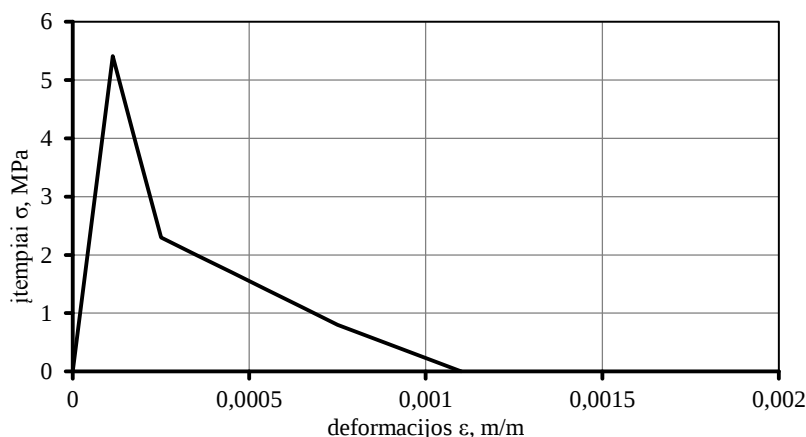


3.6 pav. Tiesioginio uždavinio sprendimo rezultatai

Kaip matyti 3.6 paveiksle, 4 sijos tiesioginio uždavinio rezultatai sutampa su eksperimentiniais sijos rezultatais, todėl galima teigti, kad visi atvirkštinio uždavinio skaičiavimai atlikti teisingai. Tiesioginio uždavinio skaičiavimai buvo atlikti taip pat ir įtempių ir deformacijų priklausomybei, gautai pagal Kaklauskio (2000) modelį ir kaip matyti 3.6 paveiksle, momentų ir kreivių diagrama skiriasi ir neatitinka eksperimento metu gautos

momentų ir kreivių diagramos. Todėl galime daryti išvadą, kad Kaklauskio (2000) pasiūlytas modelis netinkamas labai stipraus betono elgsenos aprašymui.

Kadangi rezultatai nesutapo su Kaklauskio (2000) pasiūlytu modeliu, tai iš diagramų gautų apskaičiuavus atvirkštinį uždavinį buvo aproksimuota vieną tempiamojo labai stipraus betono įtempių ir deformacijų priklausomybė (žr. 3.7 pav.).



3.7 pav. Labai stipraus betono be plaušo įtempių ir deformacijų priklausomybė

3.2. Supaprastintas Naamano modelis

Taikant Naamano (2003) pasiūlytą empirinį metodą, apskaičiuojamas plieno plaušu ir strypais armuotų gelžbetoninių sijų liekamasis stipris. Taikant šį metodą, atsargumo dėlei priimama pastovi liekamojo stiprio reikšmė $f_{fb,r}$, susiejama su plieno plaušo faktoriumi RI , plaušo ir betono vidutiniais sukibimo įtempiais τ , bei trimis papildomais koeficientais:

$$f_{fb,r} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot RI. \quad (3.2)$$

Šioje formulėje koeficientas λ_1 įvertina plaušo inkaravimo ilgį, λ_2 – plaušo orientaciją plyšyje, λ_3 – plaušo tarpusavio sąveiką. Siūlomos šių koeficientų reikšmės plaušui lenkais galais yra: $\lambda_1 = 0,25$; $\lambda_2 = 1,2$; $\lambda_3 = 1,0$. Priimama, kad vidutiniai sukibimo įtempiai yra du kartus didesni už betono tempiamąjį stiprį: $\tau = 2f_{ct}$.

Nustatoma plieno plaušo tūrio dalis betono mišinyje:

$$V_{fb} = \frac{D_{fb}}{q_{fb} + D_{fb}}; \quad (3.3)$$

čia D_{fb} – plieno plaušo kiekis elemente; ρ_{fb} – plieno plaušo tankis.

Apskaičiuojamas plieno plaušo faktorius, reikalingas liekamųjų įtempių skaičiavimui (Campione 2008).

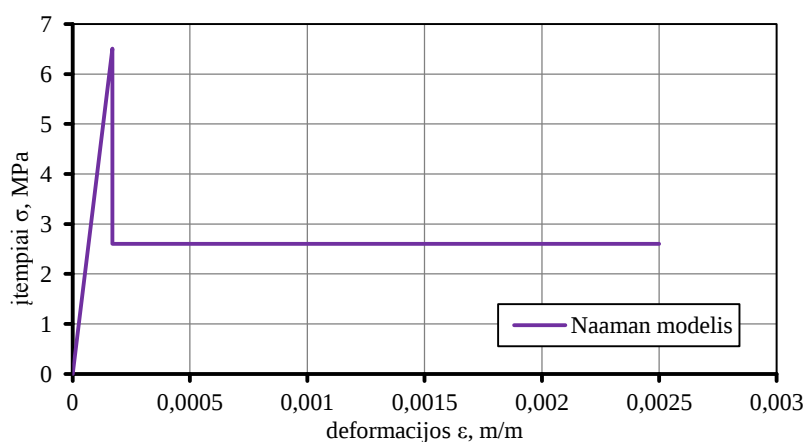
$$RI = V_{fb} \cdot \frac{l_{fb}}{d_{fb}} \cdot \beta. \quad (3.4)$$

Čia l_p – plieno plaušo ilgis; d_p – plieno plaušo skersmuo; β – plaušo ir betono sukibimą apibūdinantis koeficientas, imamas $\beta = 0,5$ tiesiam, $\beta = 0,75$ lankstytam, $\beta = 1,0$ plaušui užlenktais galais.

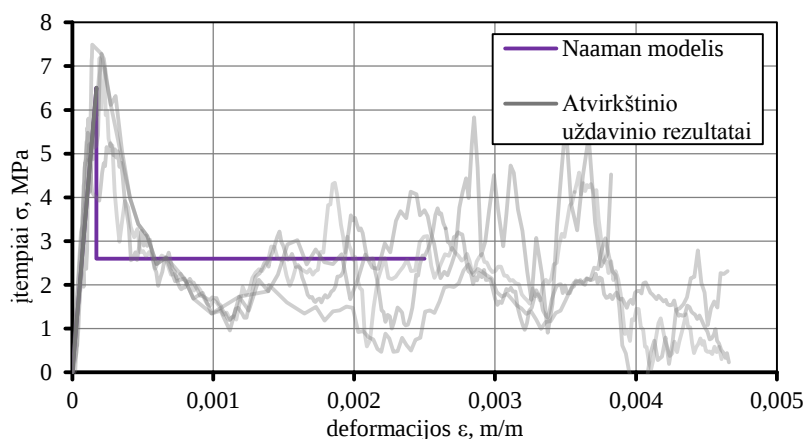
Plaušo kiekis mišinyje buvo 1%, plaušo ilgis 30 mm, o skersmuo 0,3 mm. Plaušas buvo su užlenktais galais.

Atlikus matematinius skaičiavimus buvo gautas liekamasis stipris $f_{fb,r} = 2,6$ MPa.

Nustačius dispersiškai armuoto tempiamojo labai stipraus betono liekamuosius įtempius (liekamąjį stiprį), pagal Naamano metodą, sudaroma trilininė tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagrama (žr. 3.8 pav.) ir palyginama su įtempių ir deformacijų diagrama (žr. 3.9 pav.) gauta apskaičiavus pagal atvirkštinį uždavinį.

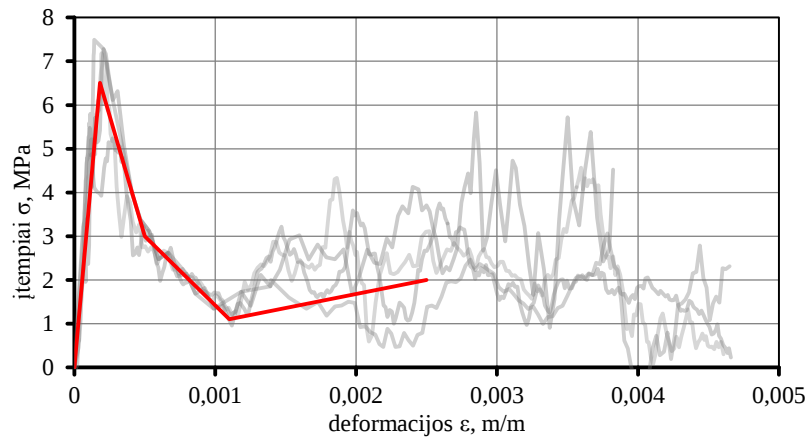


3.8 pav. Tempiamojo labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų diagrama gauta pagal supaprastintą Naamano modelį



3.9 pav. Tempiamojo labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų priklausomybių palyginimas

Šis metodas, elementui supleišėjus apsiriboja tik viena, pastovia liekamųjų įtempių reikšme. Dėl šios priežasties empirinis Naamano (2003) metodas yra labai apytikslis. Todėl buvo aproksimuota dar viena kreivė iš kreivių gautų atlikus atvirkštinį uždavinį (žr. 3.10 pav.).

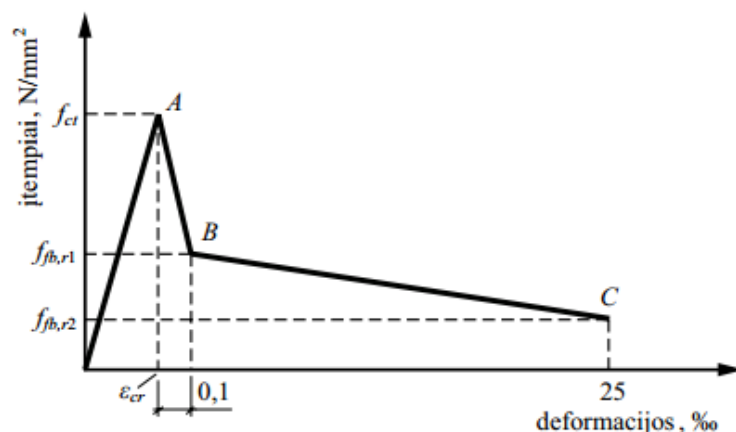


3.10pav. Tempiamojo labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų priklausomybės aproksimacija

3.3. Įtempių ir deformacijų diagramos radimas pagal *Rilem* metodą

Eksperimento metu buvo bandomos ne armuotos sijos iš labai stipraus betono su plaušu. Iš bandymo rezultatų pagal *Rilem* darbo grupės TC162-TDF (2002) pasiūlytą metodą galima nustatyti įtempių ir deformacijų priklausomybę.

Tarptautinės betono ir gelžbetonio mokslo asociacijos *Rilem* darbo grupė TC162-TDF (2002) atikus eksperimentinius tyrimus, pasiūlė vieną iš tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos sudarymo metodų, liekamajam supleišėjusio tempiamojo betono stipriui nustatyti. Taikant šį metodą naudojami eksperimentiniai duomenys, gauti bandant dispersiškai armuotas lenkiamas sijas. Atliekant lenkimo bandymą pagal *Rilem* TC162-TDF (2002) grupės pasiūlytą metodą, prie tam tikro sijos įlinkio arba plyšio pločio fiksuojama apkrova, kuri taikoma nustatant plieno plaušu armuoto tempiamojo betono liekamąjį stiprį.



3.11pav. *Rilem* įtempių ir deformacijų grafikas (Rilem 2002)

Metodo pritaikymui buvo naudojami keturių dispersiškai armuotų sijų iš labai stipraus betono, aprašytų 2.4 poskyryje, *Rilem* sijų bandymai.

Tašką A apibūdina tempiamasis betono stipris f_{ct} ir jį atitinkanti betono pleišėjimo deformacija ε_{cr} . Taškas B aprašomas liekamojo stiprio reikšme $f_{fb,r1}$ ir ją atitinkančia deformacija. Pagal eksperimentiškai gautas apkrovas ir plyšio pločio (arba įlinkio) diagramas, atitinkamai esant elemento įlinkiui $\delta_1 = 0,46$ mm arba plyšio plotiui $W_1 = 0,5$ mm nustatoma liekamojo stiprio reikšmė $f_{fb,r1}$.

$$f_{fb,r1} = 0,675 \times k \cdot \frac{P_1 \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2}; \quad (3.5)$$

čia

P_1 – apkrova, kai elemento įlinkis $\delta_1 = 0,46$ mm arba plyšio plotis $W_1 = 0,5$ mm;

L – bandinio tarpatramio ilgis;

b – elemento plotis;

h_{sp} – bandinio aukštis ties įpjova.

Taškas C aprašomas analogiškai kaip ir taškas B, tik liekamojo stiprio reikšmė $f_{fb,r2}$ nustatoma, kai elemento įlinkis $\delta_2 = 3,0$ mm arba plyšio plotis $W_2 = 3,5$ mm, taikant išraišką:

$$f_{fb,r2} = 0,555 \times k \cdot \frac{P_2 \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2}. \quad (3.6)$$

Liekamojo stiprio skaičiavimui iš eksperimento duomenų buvo atrinkti reikiami rezultatai, kurie surašyti 3.2 lentelėje.

3.2 Lentelė. Eksperimento duomenys reikalingi liekamiesiems stipriams apskaičiuoti

Sijų numeracija	Apkrova prie 0,46mm įlinkio, kN	Apkrova prie 3mm įlinkio
1	36,93	18,26
3	38,95	29,21
4	27,71	13,48
5	28,51	15,01

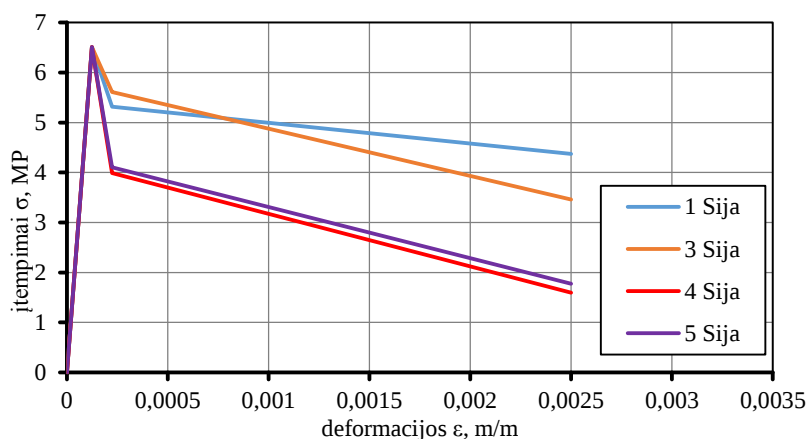
3.3 Lentelė. Liekamųjų stiprių skaičiavimo rezultatai

Sijų numeracija	Liekamųjų stiprių reikšmės. MPa	
1	$f_{fb,r1}$	5,318
	$f_{fb,r2}$	4,373
3	$f_{fb,r1}$	5,609
	$f_{fb,r2}$	3,458
4	$f_{fb,r1}$	3,99
	$f_{fb,r2}$	1,596
5	$f_{fb,r1}$	4,105
	$f_{fb,r2}$	1,77

Turint reikiamus duomenys apskaičiuojami kiekvienos sijos liekamieji stipriai pagal (3.4) ir (3.5) formules. Rezultatai surašomi 3.3 lentelėje.

Apskaičiavus liekamuosius įtempius buvo sudarytos lenkiamos nearmuotos sijos iš labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų diagramos.

Kaip matome iš 3.12 paveikslo, diagramos visų bandinių krentančioji dalis skiriasi savo skaitine reikšme, nors visi bandiniai buvo pagaminti iš to paties labai stipraus betono ir su tokiu pat plaušo kiekiu mišinyje. Manoma, kad maišant dispersiškai armuoto betono mišinį ir formuojant šiuos elementus, plaušas galėjo pasiskirstyti netolygiai arba sukristi į gniužulus, dėl to elementų liekamieji stipriai skiriasi.



3.12 pav. Rilem bandinių įtempių ir deformacijų diagramų palyginimas

Rilem darbo grupės TC162-TDF (2002) projektavimo metodas yra vienas iš dažniausiai taikomų plieno plaušu armuotiems elementams projektuoti. Tačiau būtina pabrėžti, kad šiame metode plieno plaušo įtaka pleišėjimo įvertinama remiantis mažų standartinių sijų bandymo rezultatais, todėl galima didelė eksperimentinių rezultatų sklaida mažina šio metodo tikslumą.

3.4. Trečio skyriaus apibendrinimas

Skyriuje, pritaikius atvirkštinio uždavinio algoritmą buvo nustatytos tempiamo labai stipraus betono su plaušu ir be plaušo įtempių ir deformacijų priklausomybės. Tempiamojo labai stipraus betono be plaušo įtempių ir deformacijų diagrama palyginta su Kaklauskio (2000) pasiūlytu modeliu įprastiems betonams. Nustatyta, kad G. Kaklauskio pasiūlytas modelis negali būti tiesiogiai taikomas labai stipraus tempiamo betono įtempių ir deformacijų būsenos nustatymui. Tai lemia skirtingas lyginant su tradiciniu betonu vidinių jėgų persiskirstymas po pleišėjimo bei plyšių vystymosi ypatumai.

Pagal Naamano (2003) pasiūlytą supaprastintą metodą liekamųjų įtempių nustatymui betoninėms sijoms su plaušu nustatyta tempiamojo armuoto labai stipraus betono su plaušu įtempių ir deformacijų priklausomybė ir palyginta su atvirkštinio uždavinio gautomis įtempių ir deformacijų priklausomybėmis. Kadangi pagal Naaman (2003) metodiką gaunami pastovūs

liekamieji įtempiai, nepriklausantys nuo deformacijos, pasiūlytas metodas yra apytikslis, diagramų krentančiosios dalys nesutampa.

Rilem darbo grupės TC162-TDF (2002) pasiūlytu metodu nustatytos labai stipraus nearmuoto betono su plaušu įtempių ir deformacijų priklausomybės. Analizuojant rezultatus nustatyta, kad skiriasi tos pačios serijos bandinių įtempių ir deformacijų kreivių krentančioji krentančiosios dalys. Tai gali būti paaiškinta tuo, kad maišymo metu sunku sukontroliuoti plaušo išsidėstymą ir plaušas pasiskirsto skirtingai kiekviename bandinyje. Tai lemia skirtingas liekamojo stiprio reikšmes.

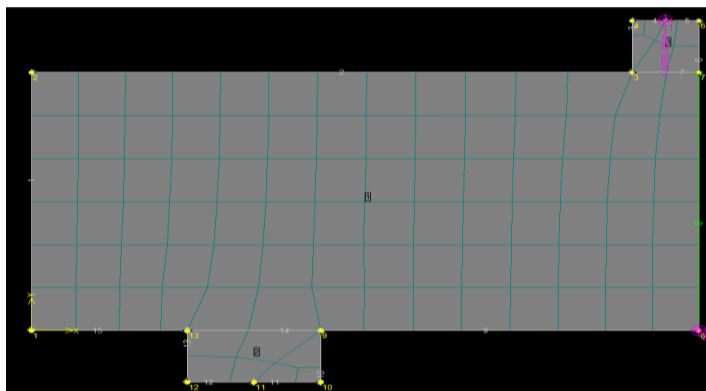
Atlikta medžiagų modelių tinkamumo labai stipraus armuoto betono elementams analizė atskleidė šias tendencijas. Plaušas turi didelę įtaką labai stipraus betono įtempių ir deformacijų būviui bei pleišėjimo fizikinių modelių sąryšių charakteriui. Tradiciniams betonams taikomi medžiagų modeliai negali būti tiesiogiai taikomi labai stipraus armuoto betono elementų deformacijų analizei ir ateityje turėtų būti tobulinami, atsižvelgiant į šių elementų pleišėjimo ypatumus, plaušo tipą, kiekį ir kt. parametrus.

4. EKSPERIMENTINIŲ ELEMENTŲ ANALIZĖ, TAIKANT SKAITINIUS IR ANALITINIUS METODUS

Šiame skyriuje yra atliekami eksperimentinių armuotų sijų analitiniai ir skaitiniai skaičiavimai. Skaitiniai skaičiavimai atliekami su baigtinių elementų programa *Atena* panaudojant 3 skyriuje gautas labai stipraus betono įtempių ir deformacijų priklausomybes. Modeliuojamos buvo mažos sijelės, kurios buvo išbandytos pagal *Rilem* TC162-TDF (2002) grupės pasiūlytą metodą ir didelės armuotos sijos iš labai stipraus betono su plaušu ir be plaušo. Visi gauti rezultatai buvo palyginti su eksperimento metu gautais rezultatais. Taip pat buvo atliekama tempiamųjų elementų analizė ir analitinių skaičiavimu pritaikymas.

4.1. *Rilem* sijų modeliavimas

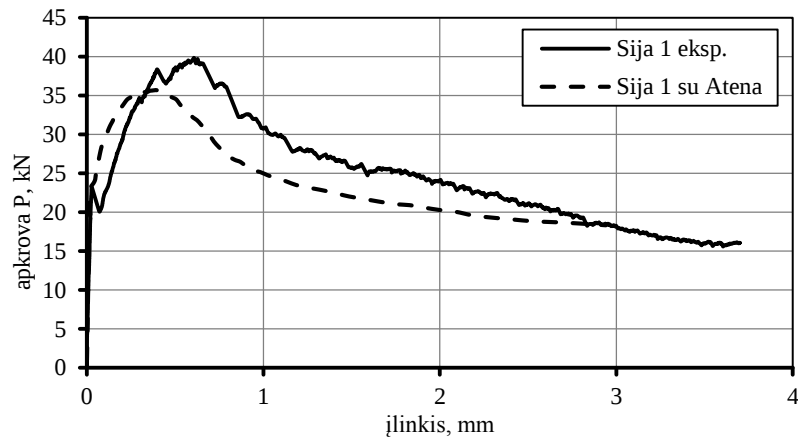
Pagal *Rilem* TC162-TDF (2002) grupės pasiūlytą metodą (žiūrėti 3.4 poskyryje) buvo gautos kiekvienos bandytos nearmuotos sijos tempiamo labai stipraus betono įtempių ir deformacijų priklausomybės (3.10 pav.). *Rilem* TC162-TDF (2002) grupės projektavimo metodas yra vienas iš dažniausiai taikomų plieno plaušu armuotiems elementams projektuoti. Tačiau būtina pabrėžti, kad šiame metode plieno plaušo įtaka pleišėjimui įvertinama remiantis mažų standartinių sijų bandymo rezultatais, t.y. netiesiogiai, todėl galima didelė eksperimentinių rezultatų sklaida mažina šio metodo tikslumą.



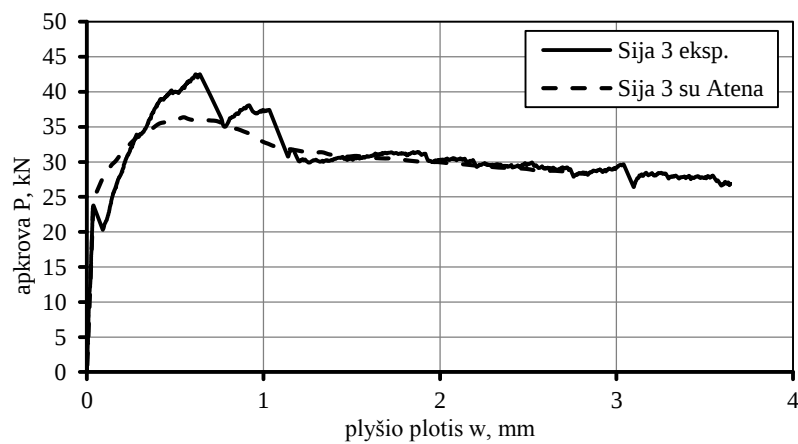
4.1 pav. Eksperimentinės sijos sudalinimas į baigtinius elementus

Gautos plieno plaušo armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybės, buvo panaudotos modeliuojant eksperimentines sijas su kompiuterine baigtinių elementų programa *Atena*. Kadangi sijos yra simetriškos tai programoje buvo sumodeliuota tik pusė elemento. Baigtinio elemento dydis buvo priimtas lygus 2,3 cm. Betono praspaudimo eliminavimui buvo sumodeliuotos metalinės plokštelės apkrovos pridėjimo ir atramos vietoje.

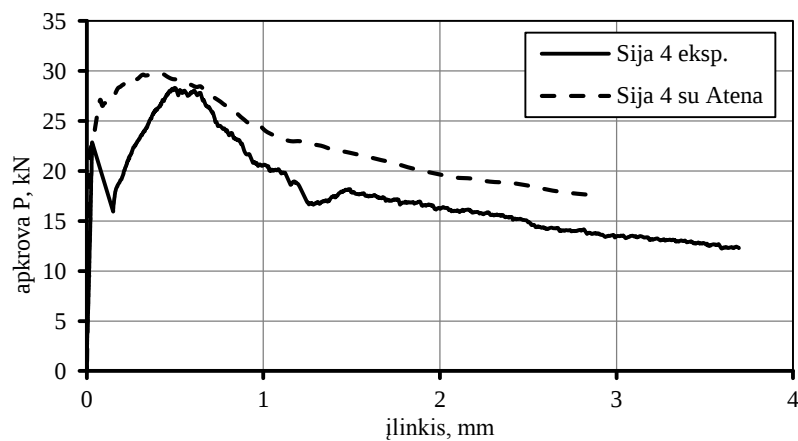
Eksperimentinės sijos sudalinimas į baigtinius elementus, taikant programą *Atena*, parodytas 4.1 paveiksle.



4.2 pav. Sijos Nr. 1 eksperimentinių ir teorinių apkrovos ir įlinkių priklausomybių palyginimas

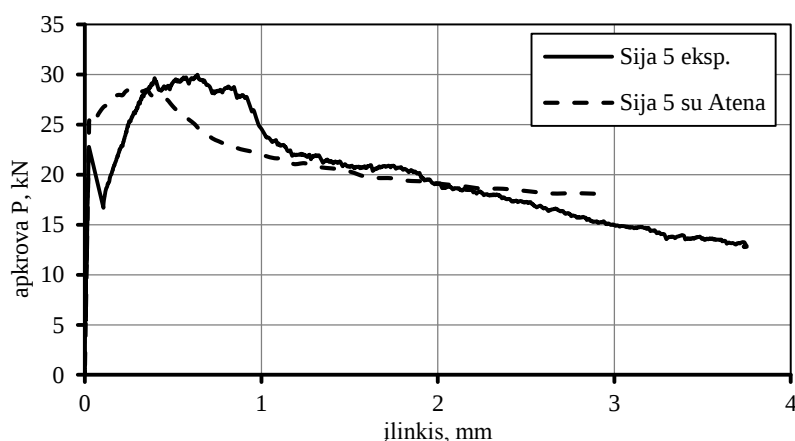


4.3 pav. Sijos Nr. 3 eksperimentinių ir teorinių apkrovos ir įlinkių priklausomybių palyginimas



4.4 pav. Sijos Nr. 4 eksperimentinių ir teorinių apkrovos ir įlinkių priklausomybių palyginimas

Atlikus skaičiavimus su baigtinių elementų programa *Atena* buvo gautos apkrovos ir įlinkio diagramos. 4.2 - 4.5 paveiksluose pateikti skaičiuotinių ir eksperimentinių apkrovos ir įlinkio reikšmių grafinis palyginimas. Kaip matyti iš 4.2 – 4.5 paveikslų, šios diagramos pakankamai gerai sutapo.



4.5 pav. Sijos Nr. 5 eksperimentinių ir teorinių apkrovos ir įlinkių priklausomybių palyginimas

4.2. Lenkiamų sijų analitiniai skaičiavimai

Šiame poskyryje yra atliekami analitiniai momentų ir kreivių priklausomybės skaičiavimai pagal supaprastintą (Campiono 2008; Kaklauskas *et al.* 2012; Ulbinas 2012) metodą, kuris skirtas plieno plaušu armuotam gelžbetoniui.

Skaičiavimai atliekami remiantis tokiomis prielaidomis:

- 1) Deformacijų pasiskirstymas elemento skerspjūvyje yra tiesinis – galioja plokščiųjų pjūvių hipotezė;
- 2) Plieno plaušu armuotas betonas laikomas vienalyte medžiaga;
- 3) Liekamieji įtempiai plyšyje atsiranda tempiamajam betonui pasiekus pleišėjimo deformaciją ε_{cr} ir jie yra pastovūs;
- 4) Plieno plaušu armuoto betono ribinė irimo deformacija ε_{cu} lygi įprastojo betono ribinei deformacijai.

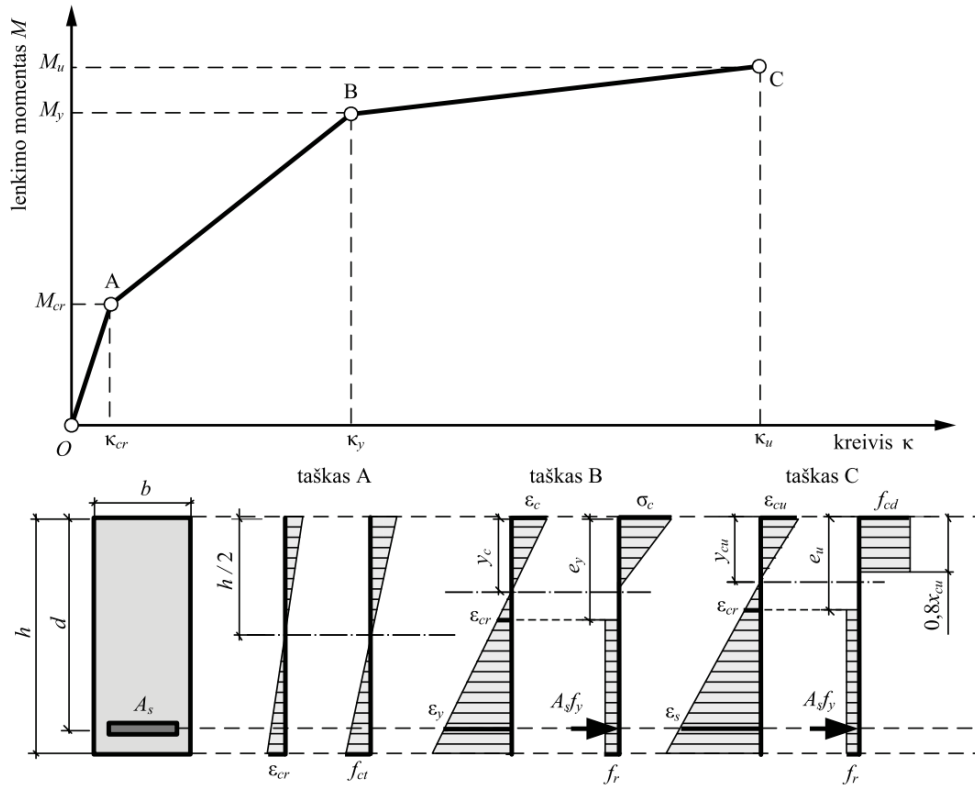
Supaprastintasis metodas pagrįstas deformacijų ir įtempių būvio nustatymu elemento skerspjūvyje (4.6 pav.). Taikant supaprastintąjį metodą, tarpinės momentų ir kreivių reikšmės gaunamos tiesiškai interpoliuojant tarp charakteringųjų momentų ir kreivių diagramos taškų (4.6 pav.). Nagrinėjami trys charakteringieji momentų ir kreivių diagramos taškai: plyšių atsivėrimo pradžia (taškas A), armatūros takumo pradžia (taškas B) ir elemento irimas (taškas C). Toliau pateikiamos išraiškos šiems taškams nustatyti.

Pirmasis taškas (4.6 pav. taškas A) nustatomas elementui pradėjus pleišėti. Šiuo atveju teigiama, kad iki plyšio atsivėrimo plieno plaušas betono tempiamajam stipriui įtakos neturės, todėl išilginės armatūros įtaka elemento standumui ir plieno plaušo įtaka betono tempiamajam stipriui nevertinami.

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal tokią išraišką (Kaklauskas *et al.* 2012, Ulbinas 2012):

$$M_{cr} = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot f_{ct}; \quad (4.1)$$

čia b – skerspjūvio plotis; h – elemento skerspjūvio aukštis; f_{ct} – betono tempiamasis stipris.



4.6 pav. Supaprastintas plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų kreivių (įlinkių) apskaičiavimo metodas (Ulbinas 2012, Kaklauskas *et al* 2012)

Elemento kreivis, veikiant pleišėjimo momentui, nustatomas pagal išraišką:

$$\kappa_{cr} = \frac{M_{cr}}{E_c \cdot I_c}; \quad (4.2)$$

čia E_c – betono tamprumo modulis; $I_c = bh^3/12$ skerspjūvio inercijos momentas.

Kai plieno plaušu armuotame elemente strypinė armatūra pradeda tekėti, joje tempimo įtempiai pasiekia plieno takumo ribą f_y , o dispersiškai armuotame betone pasiekiamas liekamasis tempiamasis stipris $f_{fb,r}$. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas supleišėjusiame skerspjūvyje, kai pasiekama armatūros takumo riba (4.6 pav. taškas B). Šioje stadijoje gniuždomas betonas dar nėra pasiekęs irimo deformacijos, todėl taikoma trikampė gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų diagramą. Remiantis trečiaja prielaida tariama, kad liekamieji tempimojo betono įtempiai plyšyje yra pastovūs.

Pagal priimtą schemą žinomais dydžiais laikomi armatūros deformacija ϵ_y , tempimojo betono pleišėjimo deformacija ϵ_{cr} ir liekamieji įtempimai plyšyje $\sigma_{fb,r}$. Nežinomaisiais laikomi betono gniuždomosios zonos aukštis y_c , atstumas nuo gniuždomosios

zonos viršaus iki plyšio viršūnės e_y ir betono įtempiai σ_c . Toliau eliminuojami du nežinomieji (e_y ir σ_c), juos išreiškiant gniuždomosios zonos aukščiu x_{cy} ir žinomaisiais dydžiais (ε_y ir ε_{cr}).

Remiantis prielaida apie tiesinį deformacijų pasiskirstymą skerspjuvyje ir iš to gaunamu trikampių panašumu, nežinomąjį e_y galima išreikšti taip:

$$\frac{\varepsilon_{cr}}{e_y - x_{cy}} = \frac{\varepsilon_y}{d - x_{cy}} \Rightarrow e_y = \frac{\varepsilon_{cr}(d - x_{cy}) + \varepsilon_y \cdot x_{cy}}{\varepsilon_y}; \quad (4.3)$$

čia ε_{cr} – betono pleišėjimo deformacija; ε_y – armatūros takumo deformacija; d – naudingasis skerspjuvio aukštis.

Įtempiai betone σ_c taip pat išreiškiami žinomu dydžiu ε_y ir gniuždomosios zonos aukščiu x_{cy} :

$$\frac{\varepsilon_c}{x_{cy}} = \frac{\varepsilon_y}{d - x_{cy}} \Rightarrow \varepsilon_c = \varepsilon_y \frac{x_{cy}}{d - x_{cy}}; \quad (4.4)$$

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c \Rightarrow \sigma_c = E_c \left(\varepsilon_y \frac{x_{cy}}{d - x_{cy}} \right). \quad (4.5)$$

Gautose (4.3), (4.4) ir (4.5) formulėse lieka vienas nežinomasis dydis - x_{cy} . Jis randamas išsprendus horizontaliųjų jėgų pusiausvyros lygtį:

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_{cy} \cdot \sigma_c - f_{fb,r} \cdot b(h - e_y) - A_s \cdot f_y = 0; \quad (4.6)$$

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_{cy} \cdot E_c \left(\varepsilon_y \frac{x_{cy}}{d - x_{cy}} \right) - f_{fb,r} \cdot b \left(h - \frac{\varepsilon_{cr}(d - x_{cy}) + \varepsilon_y \cdot x_{cy}}{\varepsilon_y} \right) - A_s \cdot f_y = 0. \quad (4.7)$$

Skerspjuvio veikiantis lenkimo momentas randamas gniuždomojo betono įtempimų atstojamosios atžvilgiu:

$$M_y = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{x_{cy}}{3} \right) + f_{fb,r} \cdot b(h - e_y) \left(\frac{h - e_y}{2} + \frac{2}{3} \cdot x_{cy} + e_y - x_{cy} \right); \quad (4.8)$$

čia x_{cy} – betono gniuždomosios zonos aukštis; d – naudingasis skerspjuvio aukštis; e_y – atstumas nuo gniuždomosios zonos viršaus iki plyšio viršūnės.

Žinant bet kurio sluoksnio deformacijas ir neutraliosios ašies padėtį, galima apskaičiuoti skerspjuvio kreivę:

$$\kappa_y = \frac{\varepsilon_y}{d - x_{cy}} = \frac{\varepsilon_c}{x_{cy}}. \quad (4.9)$$

Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas skerspjuvyje irimo stadijoje, parodytas 4.5 paveiksle (taškas C). Irimo metu betono deformacija ε_{cu} pasiekia ribinę reikšmę. Remiantis ketvirtąja prielaida laikoma, kad plieno plaušu armuoto betono ribinė irimo deformacija ε_{cu} tokia pati kaip ir įprastojo betono. Armatūros deformacija irimo stadijoje neribojama. Tariama, kad betono gniuždomojoje zonoje veikia pastovūs įtempiai f_{cd} (skaičiuotinis betono stipris). Įtempių diagrama imama stačiakampė, jos aukštis sudaro 80 % gniuždomosios zonos aukščio. Nežinomaisiais laikomi betono gniuždomosios zonos aukštis x_{cy} ir atstumas nuo

gniuždomosios zonos viršaus iki plyšio viršūnės e_u . Analogiškai kaip ir prieš tai, remiantis trikampių panašumu, galima eliminuoti nežinomąjį e_u :

$$\frac{\varepsilon_{cr}}{e_u - x_{cu}} = \frac{\varepsilon_u}{x_{cu}} \Rightarrow e_u = \frac{x_{cu}(\varepsilon_{cr} - \varepsilon_{cu})}{\varepsilon_{cu}}. \quad (4.10)$$

Nežinomas dydis x_{cu} randamas išsprendus horizontaliųjų jėgų pusiausvyros lygtį:

$$b \cdot 0,8x_{cu} \cdot f_{cd} - f_{fb,r} \cdot b(h - e_u) - A_s \cdot f_y = 0; \quad (4.11)$$

$$b \cdot 0,8x_{cu} \cdot f_{cd} - f_{fb,r} \cdot b \left(h - \frac{x_{cu}(\varepsilon_{cr} - \varepsilon_{cu})}{\varepsilon_{cu}} \right) - A_s \cdot f_y = 0. \quad (4.12)$$

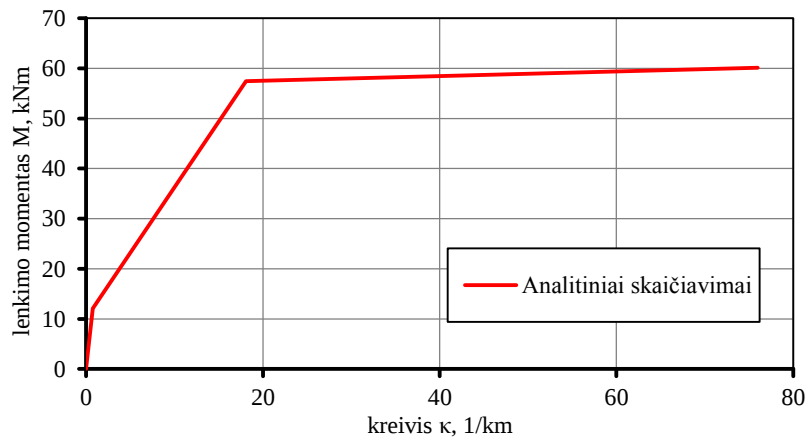
Skerspjuvyje veikiantis lenkimo momentas gali būti nustatytas gniuždomojo betono atžvilgiu:

$$M_u = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{0,8x_{cu}}{2} \right) + f_{fb,r} \cdot b(h - e_u) \left(\frac{h - e_u}{2} + \frac{0,8x_{cu}}{2} + e_u - x_{cu} \right) \quad (4.13)$$

Skerspjuvio kreivis apskaičiuojamas taip:

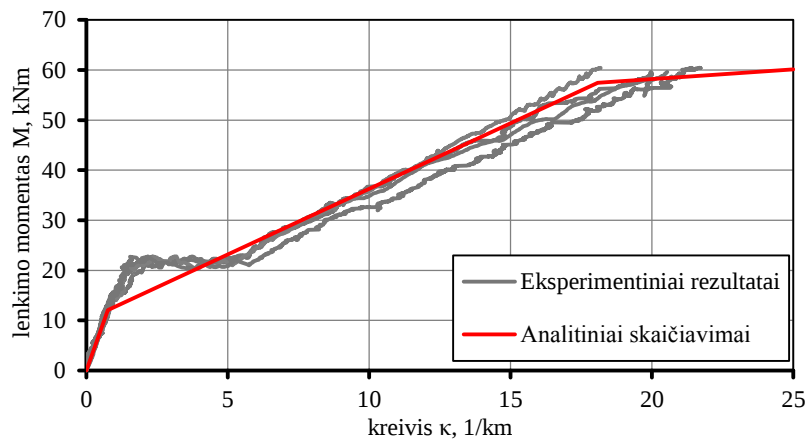
$$\kappa_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_{cu}}. \quad (4.14)$$

Taikant supaprastintą metodą ir skaičiavimams naudojant supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamųjų įtempių nustatymo (3.2) išraišką (Naaman 2003), nustatoma momentų ir kreivių diagrama, kuri pateikta 4.7 paveiksle.



4.7 pav. Supaprastinto metodo skaičiavimo metu gauta lenkiamo armuoto elemento iš labai stipraus betono su plaušu momentų ir kreivių diagrama

Analitinių skaičiavimo būdu gauta lenkimo momento ir kreivio priklausomybė palyginama su eksperimento metu gautą priklausomybę (žr. 4.8 pav.).



4.8 pav. Eksperimentinių ir analitinių rezultatų sugretinimas

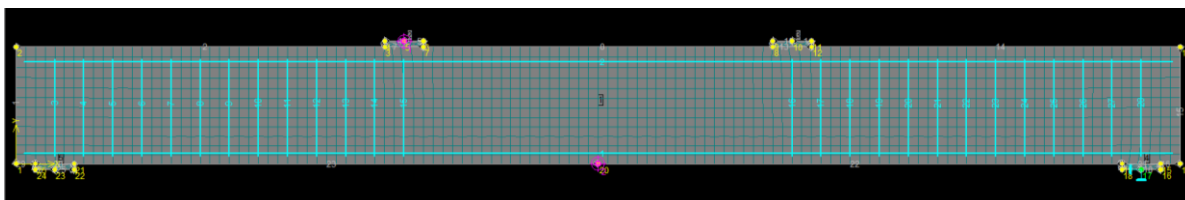
Kaip matome 4.8 paveiksle, iš pirmo žvilgsnio eksperimentiniai rezultatai pakankamai gerai sutampa su rezultatais gautais skaičiuojant pagal supaprastintą metodą. Tačiau nesutampa pirmo plyšio atsivėrimo vieta. Eksperimento metu pirmasis plyšis atsivėrė esant 22 kNm lenkimo momento, o pagal atliktus analitinius skaičiavimus pirmasis plyšis atsiveria prie 14,6 kNm lenkimo momento. Manoma, kad tai yra todėl, kad neįvertinama armatūros įtaka bendram elemento standumui. Taip pat supaprastintas skaičiavimas neįvertina plyšių formavimosi stadijos.

4.3. Lenkiamų armuotų sijų su plaušu modeliavimas

Gautos tempiamo labai stipraus betono įtempių ir deformacijų diagramos, kaip supleišėjusio betono (krintančioji diagramos dalis) medžiagos modelis, buvo pritaikytos kompiuterinėje baigtinių elementų programoje *Atena*.

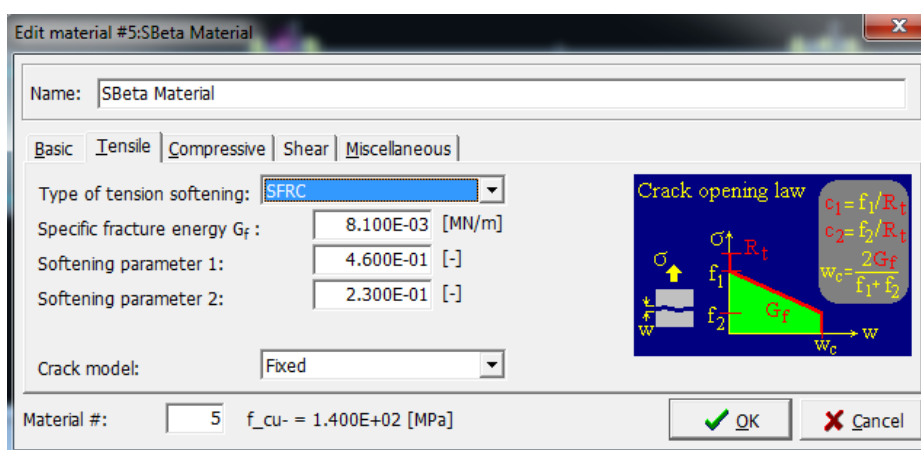
Įvedus medžiagų modelį, buvo teoriškai apskaičiuojama lenkimo momentų ir kreivių priklausomybė bei palyginama su eksperimento metu gautomis momentų ir kreivių diagramomis. Baigtinių elementų modelis pateikiamas 4.9 paveiksle. Pirmiausia buvo modeliuotos sijos iš labai stipraus betono su plaušu. Buvo modeliuojama du kartus. Pirmą kartą modeliuota pagal Naamano (2003) modelį (žr. 3.8 pav.), o vėliau pagal atvirkštinio uždavinio gautą įtempių ir deformacijų diagramą (žr. 3.10 pav.).

Sija buvo modeliuojama visa dvimatėje aplinkoje parenkant vieną paslankią atramą ir vieną standžią. Atramos ir apkrovos poveikis perduodamas per baigtiniais elementais sumodeliuotas metalines plokšteles (žr. 4.9 pav.).

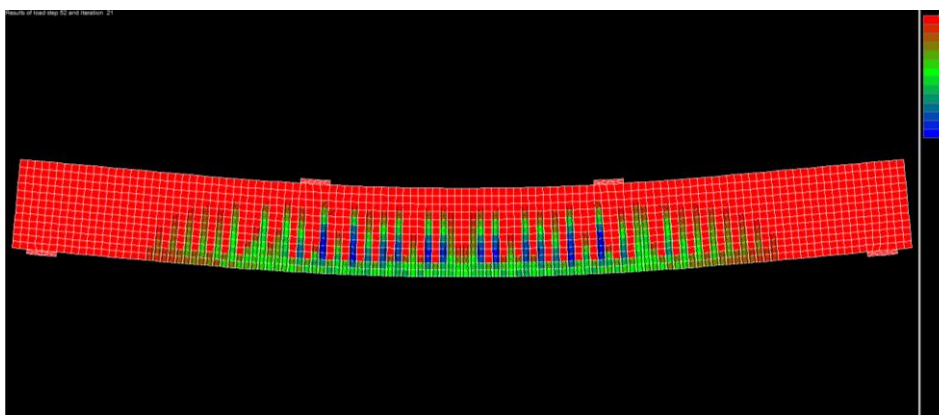


4.9 pav. Baigtinių elementų modelis sudarytas su baigtinių elementų programa *Atena*

Sukūrus sijos modelį – priskiriamos medžiagos. Šiame modelyje pasirenkamos dvi skirtingos medžiagos: plieno plaušu armuotas betonas ir armatūra. Armatūros buvo dvi rūšys: AT800 ir S500. Betonui modeliavimui priskiriami analizei reikalingi parametrai: tamprumo modulis, tempiamasis stipris ir gniuždomasis stipris. Dispersiškai armuotas betonas įvertinamas užduodant supleišėjusio tempiamojo betono įtempimų ir deformacijų diagramas. Kadangi kaip minėta, plieno plaušo efektyvumas pasireiškia tik atsivėrus plyšiams, todėl skaičiavimams užduodama 3.8 paveiksle pateiktą įtempimų ir deformacijų krentančioji diagramos dalis, o antram skaičiavimui 3.10 paveiksle esanti krentančioji diagramos dalis. Krentančiosios diagramos dalies apibrėžimo parametrai pateikiami 4.10 paveiksle.



4.10 pav. Supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono diagrama

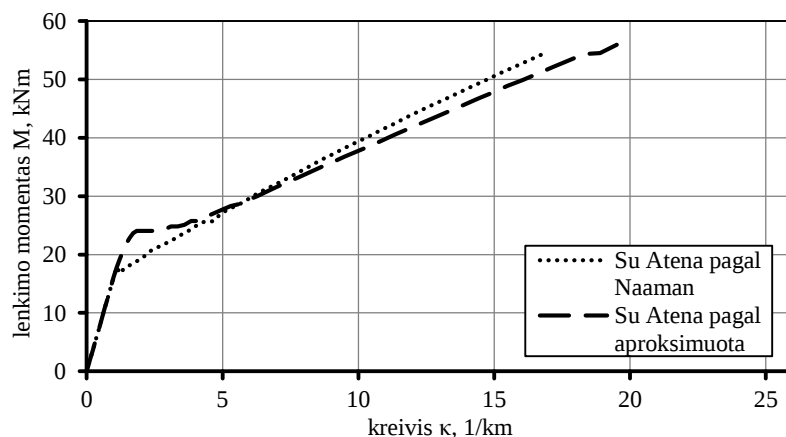


4.11 pav. Sijos plyšių atsivėrimo vietos iš baigtinių elementų programos *Atena*

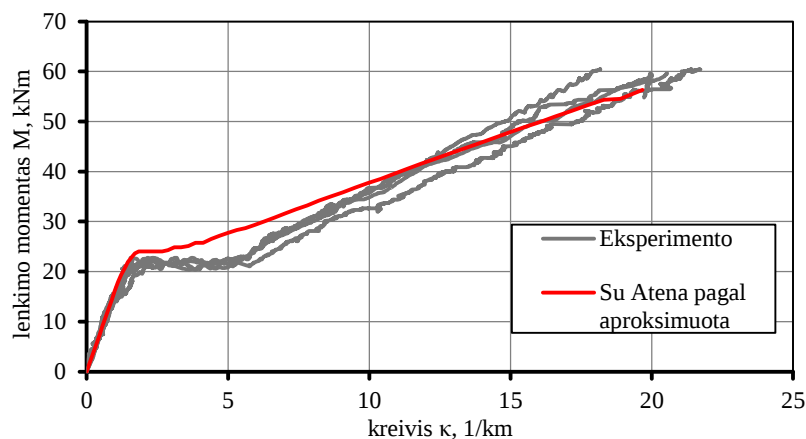
Paleidus skaičiavimus baigtinių elementų programa *Atena* po kiekvienos skaičiavimo iteracijos rodė deformuotą sijos vaizdą ir plyšių atsivėrimo vietas (žr. 4.11 pav.). Galiausiai

buvo gautos momentų ir kreivių diagramos pagal abu medžiagų modelius. Diagramose, esančiose 4.12, 4.13, 4.14 ir 4.15 paveiksluose, eksperimentinė momentų ir kreivių priklausomybė yra pažymėta „Eksperimento“. Analitiniu būdu apskaičiuota momentų ir kreivių priklausomybė apskaičiuota pagal supaprastintą metodą (Kaklauskas *et al.* 20012, Ulbinas 2012) pavadinta „Analitiniai skaičiavimai“. Skaitiniu būdu su baigtinių elementų programa *Atena* apskaičiuota momentų ir kreivių priklausomybė, pagal Naamano (2003) supaprastintą įtempių ir deformacijų gavimo metodą, diagramose pavadinta „Su *Atena* pagal Naaman“ ir skaitiniu būdu su baigtinių elementų programa *Atena* apskaičiuota momentų ir kreivių priklausomybė, pagal aproksimuota įtempių ir deformacijų diagramą gauta atlikus atvirkštinį uždavinį, diagramose pavadinta „Su *Atena* pagal aproksimuota“.

Kaip matyti iš 4.12 paveikslo, abiejų modelių momentų ir kreivių diagramos iš esmės yra vienodos ir skiriasi tik vietoje, kur betonas pasiekia ribinius tempimo įtempius ir plyšių atsivėrimo stadijoje. Aproksimuotas įtempių ir deformacijų modelis tiksliau aprašo tikrą lenkiamos gelžbetoninės sijos momentų ir kreivių priklausomybę, nes diagramoje taip pat kaip ir eksperimento diagramoje matome (žr. 4.13 pav.), tačiau idealiai nesutampa ir yra nedidelis nesutapimas.



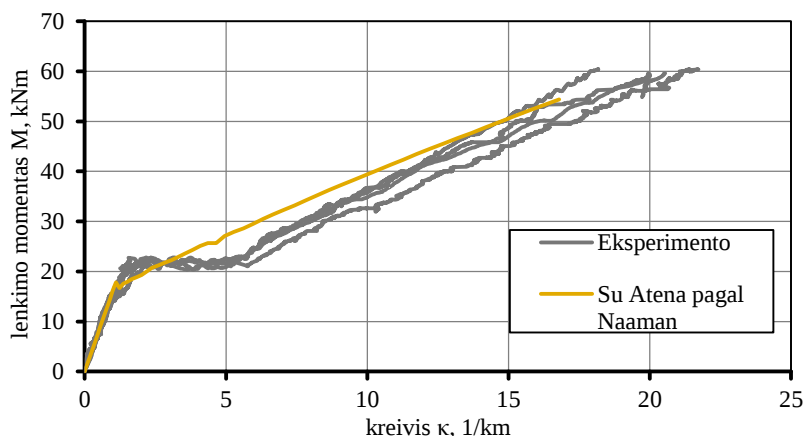
4.12pav. Momentų ir kreivių diagramų gautų iš *Atena* palyginimas



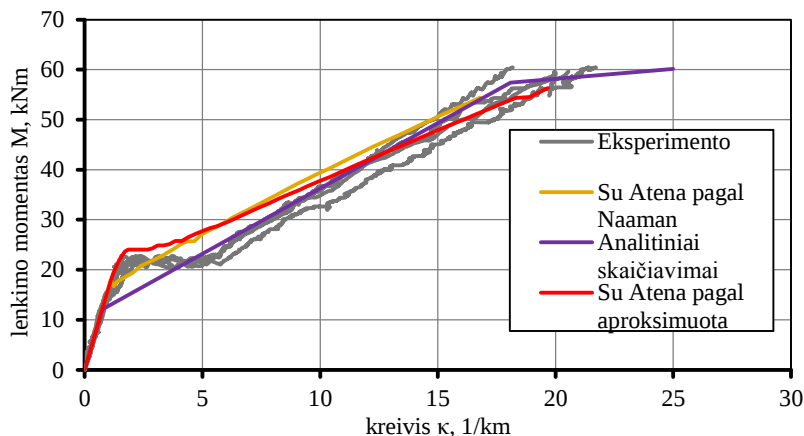
4.13 pav. Eksperimentinės ir skaitinės (aproksimuota) momentų ir kreivių diagramos palyginimas

Kaip matome 4.14 paveiksle momentų ir kreivių diagrama gauta pagal Naaman įtempių ir deformacijų medžiagos modelį turi didesnę ne sutapimą, nei aproksimuoto medžiagos modelio. Taip pat nematome jokios plyšių atsivėrimo stadijos.

Sugretinus eksperimentiniu, skaitiniu būdu ir analitiniu būdu gautas momentų ir kreivių diagramas (žr. 4.15 pav.) matome, kad nors visos diagramos iš esmės ir gerai sutampa, tačiau negalime teigti, kad apžvelgti modeliai ir skaičiavimai tinkami labai stipriam betonui. Galutinės išvadas galima bus pateikti tik atlikus papildomus tyrimus su skirtingu armavimo procentu ir skirtingais elemento skerspjūviais.



4.14 pav. Eksperimentinės ir skaitinės (Naaman) momentų ir kreivių diagramos palyginimas

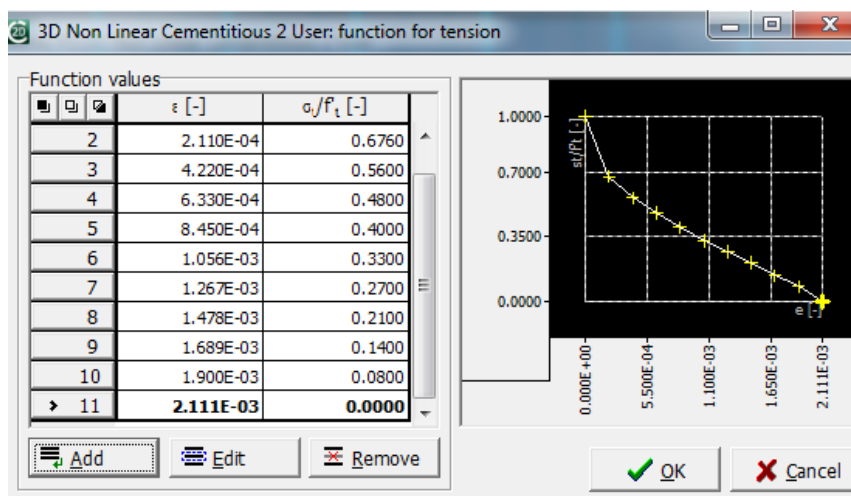


4.15 pav. Visų gautų labai stipraus armuoto betono su plaušu momentų ir kreivių palyginimas

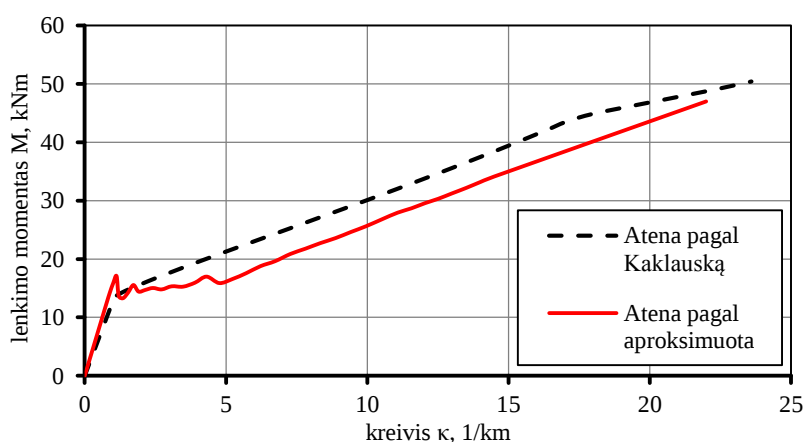
4.4. Lenkiamų armuotų sijų be plaušo modeliavimas

Su baigtinių elementų programa *Atena* buvo modeliujamos lenkiamos armuotos sijos iš labai stipraus betono be plaušo. Kadangi visos sijos ir su plaušu ir be plaušo yra vienodos geometrijos ir vienodo armatūros karkaso, tai 4.4 poskyryje aprašytame baigtinių elementų modelyje buvo pakeisti tik betono medžiagos modeliai. Vietoj SFRC modelio buvo pasirinktas netiesinės cementinės medžiagos modelis ir aprašytos betono charakteristikos ir krentančioji tempiamojo labai stipraus betono įtempių ir deformacijų dalis (žr. 4.16 pav.). Krentančioji dalis

buvo gauta atlikus atvirkštinį uždavinį ir pateikta 3.7 paveiksle. Modeliavimui taip pat buvo panaudotas medžiagos modelis apskaičiuotas pagal Kaklauskio (2000) pasiūlytą metodą.



4.16 pav. Tempiamojo betono krentančiosios dalies aprašymas



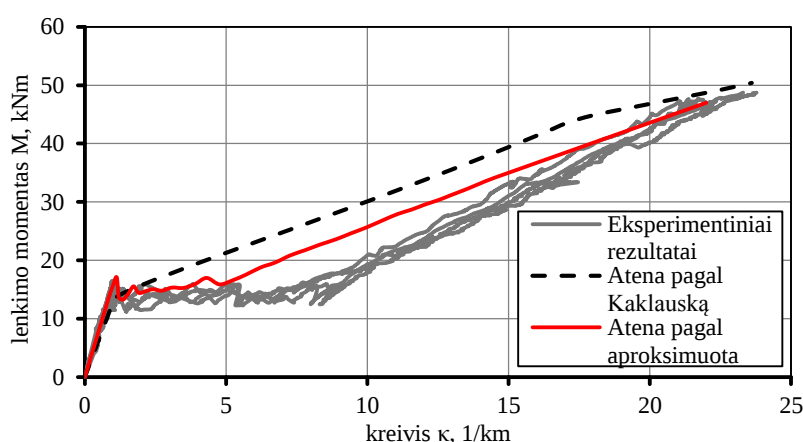
4.17 pav. Momentų ir kreivių diagrama gauta su baigtiniu elementu programa

Atlikus skaičiavimus buvo gautos momentų ir kreivio diagramos, kurios pateiktos 4.17 paveiksle. Diagramose eksperimento rezultatai yra pavadinti „Eksperimentiniai rezultatai“, momentų ir kreivių diagrama gauta skaitinių būdu pagal aproksimuota įtempių ir deformacijų priklausomybę diagramose yra pavadinta „Atena pagal aproksimuota“ ir momentų ir kreivių priklausomybė, gauta skaitiniu būdu, pagal Kaklauskio modelio įtempių ir deformacijų priklausomybę, diagramose pavadinta „Atena pagal Kaklauską“.

4.17 paveiksle aiškiai matyti, kad diagramos nesutampa. 4.18 paveiksle yra sugretinti skaitiniu būdu gauti momentų ir kreivių diagramos ir eksperimento metu gauta momentų ir kreivių diagrama. Galime pastebėti, kad momentų ir kreivių diagrama, pagal aproksimuota įtempių ir deformacijų priklausomybę turi daugiau panašumų su eksperimento metu gauta diagrama, nei su Kaklauskio modeliu gauta diagrama. Labai stipraus betono momentų ir kreivių eksperimentinėje diagramoje yra pastebima savotiška aikštelė, kuri atsiranda po pirmojo plyšio

atsivėrimo, tą patį matome ir skaitinėje diagramoje. Tik skaitiniu būdu gautoje diagramoje plyšių formavimosi aikštelė nėra tokia ilga, kaip eksperimentinėje diagramoje. Įprastieji betonai tokios akivaizdžios plyšių vystymosi aikštelės neturi, todėl manoma, kad tai yra dėl labai stipraus betono charakteristikų, o tiksliau dėl to, kad yra labai tanki ir trapi medžiaga. Dėl didelio betono stiprio iš pradžių beveik visus įtempius perima tik betonas ir todėl visi plyšiai vystosi ir atsiranda vienu metu, po ko įvyksta staigus įtempių persiskirstymas, kur toliau armatūra perima beveik visą apkrovą.

Elementuose su plaušu irgi yra pastebimas iškarto visų plyšių atsivėrimas vienu metu, tačiau neįvyksta staigus įtempių persiskirstymas, nes darbą atlieką plaušas, kuris perduoda įtempius nesupleišėjusio betono ruožams.



4.18pav. Momentų ir kreivių diagramų palyginimas

4.5. Tempiamųjų elementų analizė

Tempiamuosius elementus analizuoti pradedame nuo tuo, kad apskaičiuojama susitraukimo įtaką bandytiems elementams ir pakoreguojami apkrovos ir deformacijos priklausomybės. Susitraukimo įtaka apkrovai apskaičiuojama pagal (4.15) formulę.

$$P_{sh} = E_s \cdot A_s \cdot sh; \quad (4.15)$$

čia

P_{sh} - susitraukimo įtaka apkrovai;

E_s - armatūros tamprumo modulis;

A_s - armatūros plotas;

sh – susitraukimas.

Susitraukimo įtaka deformacijos rezultatams apskaičiuojama pagal (4.16) formulę.

$$\varepsilon_{sh} = \frac{P_{sh}}{(A_s \cdot E_s) + (A_c \cdot E_c)}; \quad (4.16)$$

čia

ε_{sh} - susitraukimo įtaka deformacijos rezultatams;

P_{sh} - susitraukimo įtaka apkrovai;

E_s - armatūros tamprumo modulis;

A_s - armatūros plotas;

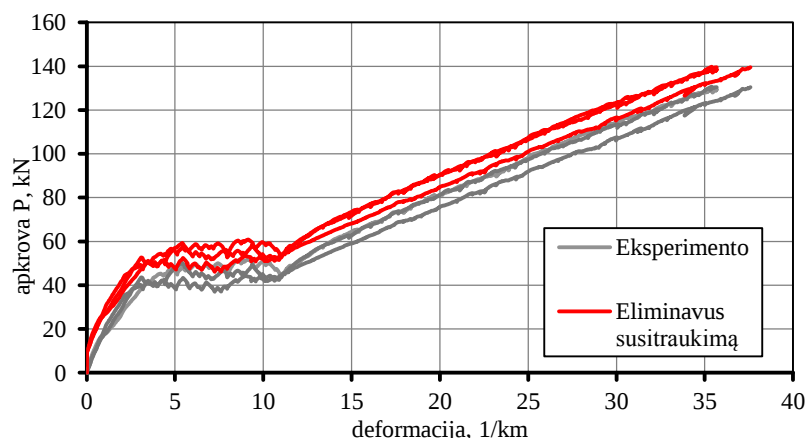
E_c - betono tamprumo modulis;

A_c - betoninio skerspjūvio plotas.

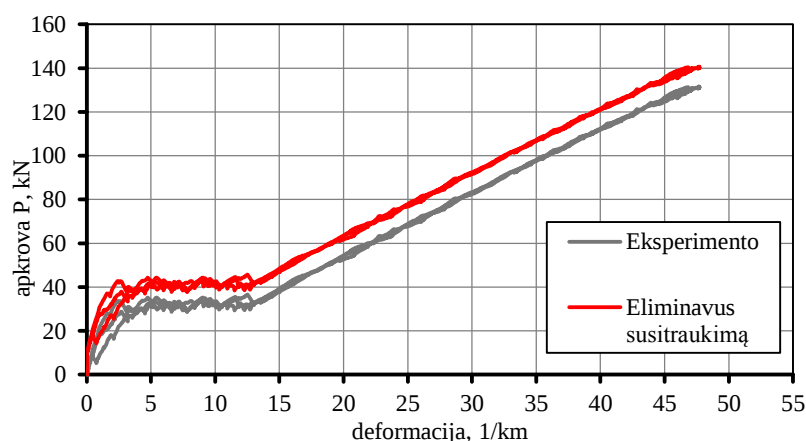
Pagal susitraukimo matavimo duomenys, bandymo dienai susitraukimas betonui su plaušu siekė $-2,36 \cdot 10^{-4}m$, o betonui be plaušo $-2,65 \cdot 10^{-4}$. Žinant susitraukimą apskaičiuojama jo įtaka bandymo rezultatams ir pateikiama 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Susitraukimo įtakos skaičiavimo rezultatai

	Betonas be plaušo	Betonas su plaušu
Susitraukimo įtaka apkrovos reikšmei P_{sh} , kN	6,9	7,75
Susitraukimo įtaka deformacijos reikšmei ε_{sh} , m	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$



4.19 pav. Tempiamų elementų su plaušu apkrovos ir deformacijos priklausomybės eliminavus susitraukimą



4.20 pav. Tempiamų elementų be plaušo apkrovos ir deformacijos priklausomybės eliminavus susitraukimą

Kaip matome 4.19 ir 4.20 paveiksluose, grafikai ženkliai pakilo. Kitu žingsniu buvo apskaičiuojama armatūros apkrovos ir deformacijos priklausomybė (pagal 4.17 ir 4.18

formules) ir nubraižoma kartu su betono priklausomybe. Taip įvertinama betono įtaka tempiamajam elementui.

$$P_y = f_y \cdot A_s; \quad (4.17)$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}; \quad (4.18)$$

čia

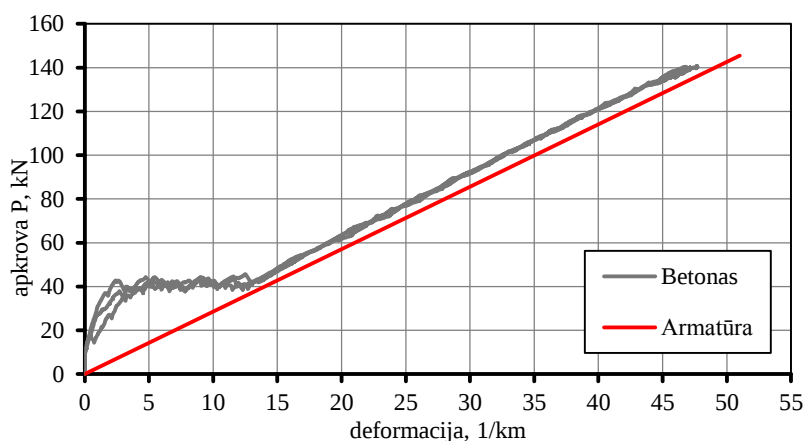
P_y – armatūros takumo riba;

f_y – armatūros stipris;

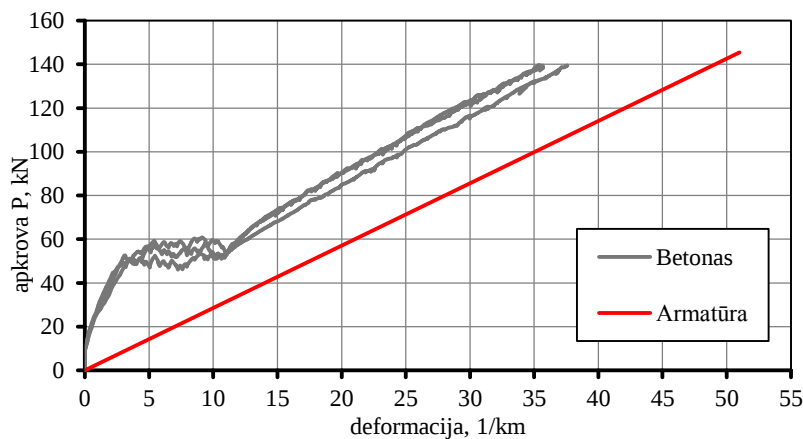
A_s – armatūros plotas;

ε_y – armatūros takumo ribos deformacija;

E_s – armatūros tamprumo modulis.



4.21 pav. Betono ir armatūros įtaka tempiamajam elementui be plaušo

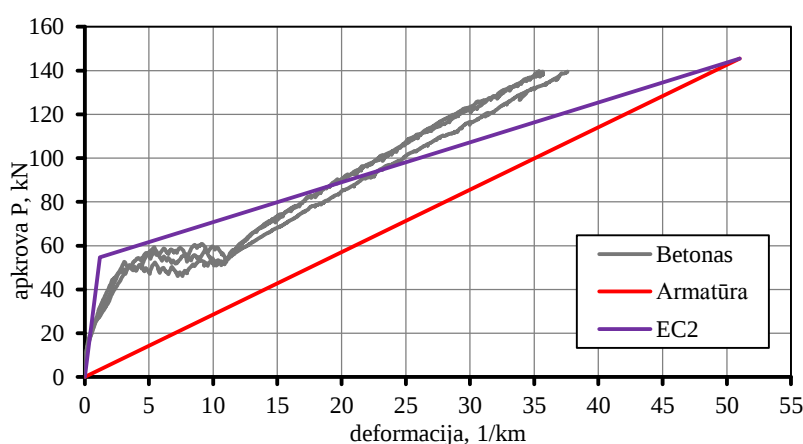


4.22 pav. Betono ir armatūros įtaka tempiamajam elementui su plaušu

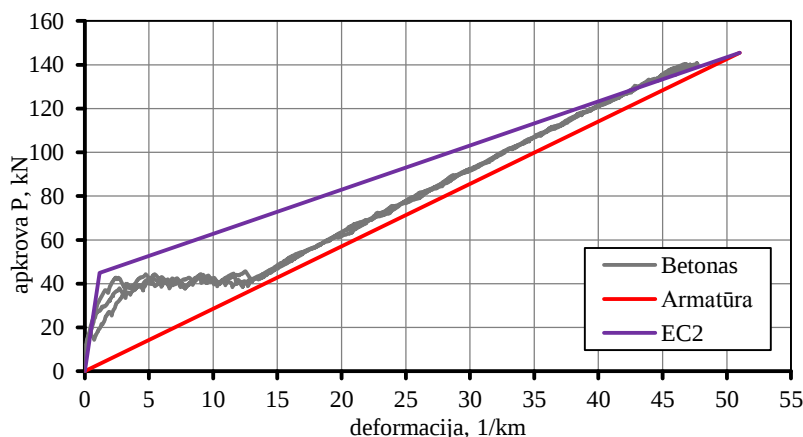
Kaip matyti iš 4.21 pav. diagramos, kol nėra pasiekiami ribiniai tempiamo betono įtempiai, armatūra ir betonas deformuojasi tampriai. Pasiekus ribinius betono įtempius įprastame betone atsiveria pirmas plyšys. Toliau net mažas apkrovos prieaugis sukelia naujų plyšių formavimąsi. Atsiveriant kiekvienam naujam plyšiui elementas staigiai pailgėja. Tai tęsiasi iki tam tikros apkrovos, kurią pasiekus elementas būna visiškais supleišėjęs ir nauji plyšiai susidaryti nebegali. Ši stadija vadinama stabilių plyšių stadija. Labai stipraus betono

apkrovos ir deformacijos elgsena šioje stadijoje yra kitokia. Pasiekus betono pleišėjimo apkrovą, atsiveria iš karto visi plyšiai ir elementas iš karto pailgėja per visą plyšių formavimosi stadijos deformaciją, nekylant apkrovai. Manoma, kad dėl didelio stiprio, jo gero susitankinimo ir mažo vandens ir cemento santykio betono suirimas yra trapus ir todėl visi plyšiai atsiveria vienu metu.

Toliau matome, kad betono įtaka tempiamajam elementui yra labai maža ir nekintama iki pat armatūros takumo įtempių pasiekimo. Ši stadija vadinama stabilių plyšių stadija. Šiuo atveju tai irgi vyksta dėl stipraus betono charakteristikų. Dėl didelio betono stiprio didžiąją dalį įtempių perima betono iki tol kol nepasiekiami betono ribiniai tempimo įtempiai. Betonui plyšus įvyksta staigus įtempių persiskirstymas, po kurio beveik visus įtempius perima armatūra.



4.23 pav. Labai stipraus betono su plaušu apkrovos ir deformacijos priklausomybių palyginimas su euro normos supaprastintu metodu



4.24 pav. Labai stipraus betono be plaušo apkrovos ir deformacijos priklausomybių palyginimas su euro normos supaprastintu metodu

Labai stipriame betone su plaušu yra panaši elgsena. Taip pat kaip ir betone be plaušo visi plyšiai vystosi ir atsiveria vienu metu, bet tolimesnį plyšių vystymąsi varžo plaušas (žr. 4.22 pav.), todėl pastebima mažesnė plyšių formavimosi stadijos aikštelė, kitaip mažesnės deformacijos. Didesnis skirtumas pastebimas stabiliu plyšiu stadijoje. Betonui su plaušu šioje stadijoje perima nemažą dalį įtempių, o to nėra betone be plaušo, kas patvirtina plaušo efektyvumą labai stipriam betonui.

Palyginę apkrovos ir deformacijos elgseną su EC2 pasiūlytu supaprastintu metodu (žr. 4.23 ir 4.24 pav.), matome, kad metodas nėra tinkamas labai stipriam betonui. Betono pleišėjimo apkrova ir tampri deformavimo stadija yra panaši, nebent eksperimentiniuose rezultatuose tamprioje stadijoje pasiekiamos didesnės deformacijos, nei turėtų būti teoriškai, bet tai yra dėl to, kad pailgėjimai yra matuojami armatūros atžvilgiu, dėl to atsiranda nedidelių netikslumų. Tačiau plyšių formavimosi stadija ir stabilių plyšių stadija visiškai neatitinka supaprastinto metodo (žr. 4.24 pav.) ir tai yra dėl to, kad labai stipriame betone visi plyšiai atsiveria vienu metu. Taip pat labai stipraus betono su plaušo elgsena neatitinka supaprastinto metodo priklausomybės (žr. 4.23 pav.). Todėl labai stipriam betonui turi būti kuriami nauji, supaprastinti apkrovos ir deformacijos nustatymo metodai.

4.6. Ketvirtojo skyriaus apibendrinimas

Skyriuje atlikti *Rilem* sijų skaitiniai skaičiavimai su baigtinių elementų programa Atena taikant 3.4 poskyryje gautas tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybes. Gauti skaitinės analizės rezultatai palyginti su eksperimento metu gautais rezultatais. Palyginimas parodė, kad teoriniai ir eksperimentiniai rezultatai gerai sutapo tik dviem atvejais iš keturių, o tai įrodo, kad *Rilem* pasiūlytas metodas ne visada adekvačiai atspindi realią labai stipraus betono su plaušu apkrovos ir deformacijos priklausomybę.

Skyriuje atlikti lenkiamų sijų įtempių ir deformacijų būvio analizė, taikant skaitinius ir analitinius metodus. Lenkiamoms sijoms sudarytos momentų ir kreivio diagramos supaprastintu analitiniu būdu ir skaitiniu būdu pagal 3 skyriuje gautą tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybę. Sugretinus rezultatus atskleista, kad tradiciniams betonams taikomi medžiagų modeliai (pvz., Naaman, G. Kaklauskas) nėra tinkami lenkiamųjų labai stipraus armuoto betono elementų analizei. Todėl ateityje, taikant didesnę labai stipraus betono elementų eksperimentinių duomenų kiekį, turi būti sukurtas naujas medžiagų modelis tempiamosios zonos betono ir armatūros sąveikos įvertinimui.

Skyriaus pabaigoje atliktas tempiamųjų elementų su plaušu ir be plaušo elgsenos įvertinimas taikant skirtingas metodikas. Apskaičiuota susitraukimo įtaka eksperimentiniams rezultatams. Eksperimentiniai rezultatai palyginti su LST EN 1992-1 normose reglamentuoto tempiamųjų gelžbetoninių elementų apkrovos ir deformacijų priklausomybės nustatymo metodu gautais rezultatais. Atskleista, kad LST EN 1992-1 metodika nėra tinkama labai stipraus armuoto betono tempiamųjų elementų analizei, todėl ateityje ji siūloma koreguoti įvertinant šių elementų pleišėjimo ypatumus.

BENDROSIOS IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Intensyvus įvairių pramonės šakų vystymasis bei socialiniai ir ekonominiai aspektai per pastaruosius dešimtmečius lėmė ženklų didelių gabaritų statinių (pvz., tiltų, daugiaaukščių statinių ir kt.) poreikį visame pasaulyje. Tai paskatino stipriųjų ir ypač stipriųjų betonų atsiradimą. Vis dėlto, platesnį stipriojo betono panaudojimą armuotoms konstrukcijoms dažniausiai riboja didelė kaina ir patikimų fizikinių modelių bei skaičiavimo metodų stoka.
2. Bendradarbiaujant su KTU Statybos ir architektūros fakulteto ekspertais pirmą kartą Lietuvoje atlikti labai stipraus betono ir armuoto betono elementų eksperimentiniai tyrimai.
3. Atlikti plaušu armuotų sijų lenkimo bandymai pagal *Rilem* metodą ir sudarytos apkrovos ir plyšio pločio bei apkrovos ir įlinkio diagramos.
4. Pagamintos ir dviejų koncentruotų jėgų apkrova išbandytos 4 gelžbetoninės sijos, kurioms sudarytos lenkimo momentų ir kreivių diagramos. Papildomai pagaminti ir trumpalaikė apkrova išbandyti tempiami elementai iš labai stipraus betono su plaušu ir be plaušo. Šiems elementams sudarytos apkrovos ir deformacijos priklausomybės.
5. Atlikus lenkiamųjų ir tempiamųjų armuoto betono elementų momentų ir kreivių bei ašinių jėgų ir deformacijų priklausomybes nustatyta, kad diagramų charakteris skiriasi nuo įprastojo betono elementų. Didžiausias skirtumas yra plyšių formavimosi stadijoje. Manoma, kad dėl vienalytės betono struktūros pasiekus betono tempimo įtempius atsiveria iš karto visi plyšiai. Todėl diagramoje plyšių formavimosi stadijoje susidaro savotiška aikštelė, kuri nėra būdinga įprastiems betonams.
6. Taikant VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedroje pasiūlytą atvirkštinio uždavinio algoritmą, iš eksperimentinių lenkiamųjų armuoto labai stipraus betono su plaušu ir be plaušo sijų momentų ir kreivių diagramų buvo gautos tempiamojo labai stipraus betono su plaušu ir be plaušo įtempių ir deformacijų diagramos. Šios diagramos panaudotos skaitinėje analizėje baigtinių elementų kompiuterine programa *Atena*. Atlikus skaičiavimus buvo gautos teorinės momentų ir kreivių diagramos, kurios palygintos su eksperimentinėmis. Palyginimas parodė, kad teorinių ir eksperimentinių rezultatų sutapimas nėra tobulas, o tai įrodo, kad gautos supleišėjusios tempiamosios zonos įtempių ir deformacijų diagramos netiksliai atspindi supleišėjusio betono elgseną.

7. Pagal Naamano pasiūlytą metodą gauta tempiamojo labai stipraus betono, armuoto plieno armatūra ir plaušu, įtempių ir deformacijų diagrama. Ši diagrama panaudota skaitinėje analizėje baigtinių elementų kompiuterine programa *Atena*. Atlikus skaičiavimus gauta teorinė momentų ir kreivių diagrama, kuri palyginta su eksperimentinėmis. Palyginimas parodė, kad teorinių ir eksperimentinių rezultatų sutapimas nėra tobulas. Labiausias skirtumas išryškėja stabilių plyšių stadijoje. Tai galėjo įvykti dėl to, kad šis metodas, elementui supleišėjus, apsiriboja tik viena, pastovia liekamųjų įtempių reikšme.
8. Taikant *Rilem* pasiūlytą metodą iš lenkiamų plaušu armuotų sijų gautos tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės. Šios priklausomybės panaudotos skaitinėje analizėje baigtinių elementų kompiuterine programa *Atena*. Atlikus skaičiavimus buvo gautos teorinės apkrovos ir įlinkio diagramos, kurios palygintos su eksperimentinėmis. Palyginimas parodė, kad teoriniai ir eksperimentiniai rezultatai gerai sutapo tik dviem atvejais iš keturių, o tai įrodo, kad *Rilem* pasiūlytas metodas ne visada adekvačiai atspindi realią labai stipraus betono su plaušu apkrovos ir deformacijos priklausomybę.
9. Atliktas tempiamųjų elementų su plaušu ir be plaušo elgsenos įvertinimas taikant skirtingas metodikas. Apskaičiuota susitraukimo įtaka eksperimentiniams rezultatams. Eksperimentiniai rezultatai palyginti su LST EN 1992-1 normose reglamentuoto tempiamųjų gelžbetoninių elementų apkrovos ir deformacijų priklausomybės nustatymo metodu gautais rezultatais. Atskleista, kad LST EN 1992-1 metodika nėra tinkama laibai stipraus armuoto betono tempiamųjų elementų analizei, todėl ateityje ją siūloma koreguoti įvertinant šių elementų pleišėjimo ypatumus.
10. Atlikti labai stipraus betono ir armuoto betono elementų eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai bus atspirties taškas šiuolaikinių inovatyvių medžiagų plėtrai bei diegimui Lietuvoje. Tyrimai atskleidė labai stipraus betono elgsenos ypatumus bei išryškino plaušo įtaką armuoto betono elementų įtempių ir deformacijų būviui. Tyrimų rezultatai yra svarbūs Statybos sektoriui, siekiant išlikti konkurencingiems pasaulio rinkose bei kurti produktus atitinkančius pastarojo laikotarpio technologijų vystymosi tendencijas. Ateityje, turint didesnę eksperimentinių duomenų bazę, būtina tobulinti laibai stipraus betono fizikinius medžiagų modelius bei skaičiavimo metodus.

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI

Abid, A.; Franzen, B. K. 2011. Design of Fibre Reinforced Concrete Beams and Slabs. Master's thesis. Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden. 128 p.

Bernier, G.; Behloul, M. 1996. Effet de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique. BPR2e colloque international francophone sur les bétons renforcés de fibres métalliques. Toulouse. 233-240 p.

Campione, G. 2008. Simplified flexural response of steel fiber reinforced concrete beams. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 20(4): 283–293.

DAfStB UHPC. 2003. State-of-the-art Report on Ultra-High-Performance Concrete – Concrete Technology and Design. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton/German Association for Reinforced Concrete. Berlin. draft 3:2003.

Ductal [interaktyvus]. 2014. Seonyu Footbridge, Seoul, Korea [žiūrėta 2015-10-12]. Sakata Mirai Footbridge [žiūrėta 2015-10-12]. Prieiga per internetą: <http://www.ductal.com/>

Fehling, E.; Bunje, K. 2003. Bemessung für Biegung und Querkraft bei Bauteilen aus UHPC in: Ultrahochfester Beton, ed. G. König; K. Holschemacher; F. Dehn, Leipzig. 183-198 p.

Federal highway Administration (FWHA), 2006. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete. PSI inc. McLean, VA. 176 p.

Federal highway Administration (FWHA), 2013. Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report For The Bridge Community. PSI inc. McLean, VA. 174 p.

Gowripalan, N.; Gilbert, I. R. 2000. Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams. Australia: VSL Pty Ltd. 54 p.

Gribniak, V. 2009. *Shrinkage influence on tension-stiffening of concrete structures*. Doctoral dissertation. Vilnius: Technika, 98 p. 191 p.

Infrastructure protection [interaktyvus]. 2012. Sakata Mirai Bridge [žiūrėta 2015-10-12]. Prieiga per internetą: <http://www.vsl-ip.com/index.php?CID=260>

International Database for Civil and Structural Engineering [interaktyvus]. 2014. Sherbrooke Footbridge [žiūrėta 2015-10-10]. Prieiga per internetą: <https://structurae.net/structures/sherbrooke-footbridge>

International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, System and Structures (RILEM). 2002. Bending test: Final Recommendations; RILEM TC-162-TDF. RILEM: Bagneux, France. 45-65p.

Kaklauskas, G.; Bačinskas, D.; Gribniak, V.; Jakubovskis, R.; Ulbinas, D.; Gudonis, E.; Meškėnas, A.; Timinskas, E.; Sokolov, A. 2012. *Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos*. Vadovėlis. Vilnius: Technika. 301 p.

Kaklauskas, G.; Ghaboussi, J. 2001. Stress-strain relations for cracked tensile concrete from RC beam tests. *Journal of Structural Engineering*, 127(1), 64-73.

Karmout, M. 2009. Mechanical Properties Of Ultra High Performance Concrete Produced in Gaza Strip. Requirements for the degree of master. Gaza. 122 p.

LST EN 1992-1-1. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius, 2007. 232 p.

Mohamed, I. 2015. Behaviour of UHPC structural members subjected to the pure torsion. Kassel, Germany: University press, 287 p.

Naaman, A. E. 2003. Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites. Rilem Workshop on High Performance Fiber reinforced Cement Composites, 95–113.

Office of International programs [interaktyvus]. 2014. Chapter2: France [žiūrėta 2015-10-13]. Prieiga per internetą: http://international.fhwa.dot.gov/prefab_bridges/chapter_two_d.cfm

Resplendino, J. 2004. First Recommendations for Ultra-High-Performance Concretes and examples of Application. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel University Press. Kassel, Germany. 79-90 p.

Rokugo, K. 2008. Recommendations for design and Consruction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC). Japan. 113 p.

SETRA – AFGC Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes. 2002. Interim Recommendations, AFGC Groupe de travail BFUP, ed. January . 155 p.

Sokolov, A. 2010. *Tension stiffening model for reinforced concrete beams*. Doctoral dissertation. Vilnius: Technika, 91 p.

Spasojevic, A. 2008. STRUCTURAL IMPLICATIONS OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBRE-REINFORCED CONCRETE IN BRIDGE DESIGN. Ecole Polytechnique federale de lausanne. Doctor disertation. Suisse. 285 p.

Tanaka, Y.; Musha, H.; Tanaka, S.; Ishida, M. 2010. Durability performance of UFC sakata-mira Footbridge under sea envinronment. Taisei Cosporation and Taiheiyo Cement Corporation. Concrete Institute: Korea. 7 p.

Toutlemonde, F. And Resplendino, J. 2009. Designing and Building with UHPFRC. Marseille, France. 785 p.

Šerelis, E. 2016. Ypač stipraus betono struktūros savybių ir technologijos tyrimai. Daktaro disertacija. Kaunas: Technologija, 132 p.

Ulbinas, D. 2012. *Plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų pleišėtumo ir standumo analizė*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika, 98 p.

Дегтев Ю. В. 2015. Самоуплотняющиеся бетоны на композиционных вяжущих для малых архитектурных форм. Диссертация. Белгород. 218 р.

Мещерин, В. 2008. Высокопрочные и сверхпрочные бетоны: технологии производства и сферы применения. Статья в журнале СтройПРОФИль №8(70).

