



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Arvydas Rimkus

**LENKIAMŲJŲ PLIENO PLAUSŲ ARMUOTŲ GELŽBETONINIŲ
ELEMENTŲ ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖ**

**STRESS AND STRAIN ANALYSIS OF STEEL FIBER REINFORCED
CONCRETE FLEXURAL MEMBERS**

Baigiamasis magistro darbas

Programa: Statinių konstrukcijos, valstybinis kodas 621H21001

Specializacija: Tiltų ir viadukų

Statybos inžinerija 02T

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Katedros vedėjas


(parašas)

Gintaris Kaklauskas

(vardas, pavardė)

2013 06 03

(data)

Arvydas Rimkus

**LENKIAMŲJŲ PLIENO PLAUSŲ ARMUOTŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ
ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖ**

**STRESS AND STRAIN ANALYSIS OF STEEL FIBER REINFORCED
CONCRETE FLEXURAL MEMBERS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

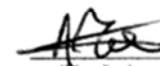
Tiltų ir viadukų/Specialiųjų statinių specializacija

Statybos inžinerija 02T

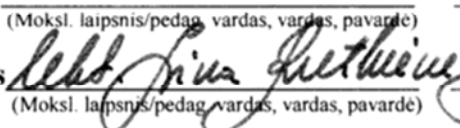
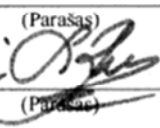
Vadovas

Prof. habil. dr. Gintaris Kaklauskas  2013 06 03
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas

Adas Meškėnas  2013-05-03
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas

  2013-05-20
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

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

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
TILTŲ IR SPECIALŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Technologijos mokslų sritis
Statybos inžinerijos mokslo kryptis
Statybos inžinerijos studijų kryptis
Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

TVIRTINU
Katedros vedėjas



Gintaris Kaklauskas
(vardas, pavardė)

2013-06-03

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

2012-.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei) Arvydui Rimkui

(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema Lenkiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų analizė
patvirtinta 2012 m. spalio 10 d. dekanų įsakymu Nr. 522st

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2013 m. birželio 12 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Apžvelgti plieno plaušu armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų tempiamojo betono įtempių ir deformacijų nustatymo metodus. Atlikti standartinių dispersiškai armuotų betoninių sijelių bandymus. Išbandytoms sijelėms Rilem metodu nustatyti tempiamojo betono liekamuosius įtempius. Baigtinių elementų programa skaitiškai sumodeliuoti sijelių deformavimosi ir pleišėjimo elgseną bei palyginti teorinius ir eksperimentinius. Autoriaus pasiūlytu, nesudėtingu analiziniu metodu gauti eksperimentinių sijelių tempiamojo betono liekamųjų įtempių priklausomybes. Išanalizuoti supleišėjusių strypais ir plieno plaušu armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų plyšio pločio nustatymo metodus. Atlikti plyšio pločio dydį lemiančių parametrų skaitinę analizę.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: Adas Meškėnas, doktorantas

.....
(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Vadovas.....
(parašas)

Užduotį gavau

(parašas)

..... Arvydas Rimkus
(vardas, pavardė)

2012-10-10
(data)

Prof. habil. dr. Gintaris Kaklauskas

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Arvydas Rimkus, 20074232

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, TILfm-11

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2013 m. birželio 12 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Lenkiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų analizė“ patvirtintas 2012 m. spalio 23 d. dekanų potvarkiu Nr. 522st, 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: Adas Meškėnas. Mano darbo vadovas prof. habil. dr. Gintaris Kaklauskas.

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



(Parašas)

Arvydas Rimkus

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Tiltų ir specialiųjų statinių katedra

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

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

Pavadinimas **Lenkiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų analizė**

Autorius **Arvydas Rimkus**

Vadovas **prof. habil. dr. Gintaris Kaklauskas**

Kalba:
lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe atliekama lenkiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų analizė. Darbą sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados bei literatūros sąrašas. Pirmajame skyriuje apžvelgiami dažniausiai naudojami supleišėjusios medžiagos elgseną aprašantys metodai. Analizuojami liekamųjų įtempių ir plyšio pločio nustatymo būdai. Antrajame skyriuje pateikiamas liekamųjų įtempių nustatymo metodas, taikant eksperimentinius standartinių sijų apkrovos ir atsiveriančio plyšio pločio rezultatus. Atliekama pateikto metodo ir egzistuojančių liekamųjų įtempių nustatymo būdų lyginamoji analizė. Siūlomo metodo adekvatumas tikrinamas baigtinių elementų programa ATENA, lyginant apskaičiuotas sijų apkrovos ir įlinkių priklausomybes su gautomis eksperimentiniais bandymais. Trečiajame skyriuje siūlomas universalus lenkiamųjų gelžbetoninių elementų plyšio pločio nustatymo metodas, paremtas diskretaus pleišėjimo idėja. Naudojant eksperimentinių tyrimų rezultatus, analizuojamos ir parenkamos pagrindinės siūlomo metodo parametrų reikšmės. Analizuojama pagrindinių sijos charakteristikų įtaka siūlomo metodo parametrų dydžiui. Pateikiamos išvados ir rekomendacijos.

Darbo apimtis – 77 puslapiai, 49 paveikslai, 9 lentelės, 40 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: liekamieji įtempiai, plieno plaušu armuotas betonas, lenkiamieji elementai, plyšio plotis.

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 Final work

Title **Stress and Strain Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete
Flexural Members**

Author **Arvydas Rimkus**

Academic supervisor **Prof Dr Habil Gintaris Kaklauskas**

**Thesis
language:**
Lithuanian

Annotation

The master thesis is carried out for stress and strain analysis of steel fibre reinforced concrete flexural members. Thesis consists of introduction, three chapters, conclusions and references. First chapter provides an overview of the most commonly used methods of residual stress and crack width determination. Second chapter focuses on determination of residual stress on a base of standard specimen test results. Comparative analysis of residual stress determination methods is performed. All models are analysed and compared with experimental data using finite element program ATENA. Third chapter presents universal crack width determination method for flexural members on a basis of Discrete crack model. Parameters of proposed method are identified using numerical analysis of experimental data. Proposed method parameters are compared using varying beam characteristics. Conclusions and recommendations are presented in the final chapter.

Thesis consists of 77 pages, 49 figures, 9 tables, 40 references.

Keywords: residual stresses, steel fibre reinforced concrete, flexural members, crack width.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
ĮVADAS	13
1. LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ LIEKAMŲJŲ ĮTEMPIŲ IR PLYŠIŲ PLOČIŲ SKAIČIAVIMO METODŲ APŽVALGA	16
1.1. Liekamojo stiprio nustatymo metodai.....	16
1.1.1. Naamano metodas.....	16
1.1.2. Rilem TC162-TDF metodas	18
1.1.3. DBV Merkblatt metodas	19
1.2. Eksperimentiniai metodai liekamajam stipriui nustatyti.....	21
1.2.1. Vienašis tempimo bandymas	22
1.2.2. Rilem TC162-TDF lenkimo bandymas	22
1.2.3. DBV Merkblatt lenkimo bandymas.....	23
1.3. Plyšio pločio nustatymo metodai	24
1.3.1. Eurokodo metodas	25
1.3.2. Model Code metodas	27
1.3.3. Rilem TC162-TDF metodas	29
1.4. Išvados	31
2. LENKIAMŲJŲ PLIENO PLAUSŲ ARMUOTŲ BETONINIŲ ELEMENTŲ LIEKAMŲJŲ ĮTEMPIŲ SKAIČIAVIMAS	32
2.1. Autoriaus atlikti eksperimentiniai tyrimai	32
2.2. Dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymas	35
2.2.1. Liekamųjų įtempių nustatymas taikant Naamano metodą.....	36
2.2.2. Liekamųjų įtempių nustatymas taikant Rilem TC162-TDF metodą	37
2.2.3. Liekamųjų įtempių nustatymas taikant autoriaus pateiktą metodą.....	38
2.2.4. Rezultatų palyginimas	43
2.3. Liekamųjų įtempių nustatymo metodų analizė taikant BE programą ATENA	45
2.4. Išvados	49
3. LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PLYŠIŲ PLOČIŲ SKAIČIAVIMAS	50
3.1. Plyšių pločių skaičiavimas naudojant autoriaus siūlomą metodą	50
3.2. Pagrindinių autoriaus siūlomo metodo parametrų α ir l_{damage} nustatymas	55
3.2.1. D. Duponto atlikti plyšių pločių nustatymo tyrimai	55
3.2.2. Pagrindinių autoriaus siūlomo metodo parametrų α ir l_{damage} skaitinė analizė	58

3.3.	Plyšių pločių skaičiavimo metodų lyginamoji analizė.....	60
3.3.1.	Leuveno universitete atliktų sijų lenkimo bandymų rezultatai.....	61
3.3.2.	Vilniaus Gedimino technikos universitete atliktų sijų lenkimo bandymų rezultatai...	65
3.4.	Atstumą tarp plyšių l_{cr} lemiančių veiksnių analizė	68
3.5.	Išvados	72
BENDROSIOS IŠVADOS IR REZULTATAI		74
NAUDOTA LITERATŪRA		75

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė	16
2 pav. Naamano siūloma įtempių ir deformacijų priklausomybė (Naaman 2003a)	17
3 pav. Rilem siūloma įtempių ir deformacijų priklausomybė (Rilem TC162-TDF 2003)	18
4 pav. Elemento mastelio faktoriaus priklausomybė nuo elemento aukščio (Rilem TC162-TDF 2003)	19
5 pav. Rilem TC162-TDF siūlomos plyšio pločių ir įlinkių reikšmės liekamųjų įtempių nustatymui (Rilem TC162-TDF 2003)	19
6 pav. DBV Merklbalt siūloma įtempių ir deformacijų priklausomybė (DBV 2001)	20
7 pav. Elemento mastelio faktoriaus priklausomybė nuo elemento aukščio (DBV 2001)	20
8 pav. Apkrovos ir įlinkių diagrama liekamųjų įtempių f_{r1} nustatymui (DBV 2001)	21
9 pav. Apkrovos ir įlinkių diagrama liekamųjų įtempių f_{r2} nustatymui (DBV 2001)	21
10 pav. Vienašio tempimo bandymo schema (Rilem TC162-TDF 2001)	22
11 pav. Rilem TC162-TDF bandymo schema (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002)	23
12 pav. DBV Merkblatt bandymo schema (DBV 2001)	24
13 pav. Lenkiamos gelžbetoninės sijos deformacijų ir įtempių pasiskirstymas	26
14 pav. Efektyvusis lenkiamos gelžbetoninės sijos tempiamojo betono plotas	29
15 pav. Plieno plaušu armuoto gelžbetoninio elemento deformacijų ir įtempių pasiskirstymas	30
16 pav. Eksperimentiniams tyrimams naudojamas plieno plaušas	32
17 pav. Poslinkio matuoklių išdėstymo schema	33
18 pav. Bandymo eiga	33
19 pav. Bandymų metu gautos apkrovos ir plyšio pločio ($P - w$) priklausomybės sijoms armuotoms 0,5 % plieno plaušu pagal elemento tūrį	34
20 pav. Bandymų metu gautos apkrovos ir plyšio pločio ($P - w$) priklausomybės sijoms armuotoms 1,0 % plieno plaušu pagal elemento tūrį	34
21 pav. Bandymų metu gautos apkrovos ir plyšio pločio ($P - \delta$) priklausomybės sijoms armuotoms 0,5 % plieno plaušu pagal elemento tūrį	35
22 pav. Bandymų metu gautos apkrovos ir plyšio pločio ($P - \delta$) priklausomybės sijoms armuotoms 1,0 % plieno plaušu pagal elemento tūrį	35
23 pav. Įtempių ir atsiveriančio plyšio pločio diagramos gautos taikant Naamano metodą (Naaman 2003a)	36
24 pav. Įtempių ir deformacijų diagramos gautos taikant Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodą 0,5 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui	38

25 pav. Įtempių ir deformacijų diagramos gautos taikant Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodą 1,0 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui	38
26 pav. Besideformuojanti sijos dalis	39
27 pav. Įtempių ir deformacijų diagrama autoriaus siūlomą metodu	40
28 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas supleišėjusiame dispersiškai armuoto betono skerspjūvyje	40
29 pav. Liekamųjų įtempių ir plyšio pločio diagramos gautos taikant autoriaus siūlomą metodą 0,5 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui	42
30 pav. Liekamųjų įtempių ir plyšio pločio diagramos gautos taikant autoriaus siūlomą metodą 1,0 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui	42
31 pav. Liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybių, gautų nagrinėtais metodais, palyginimas 0,5 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui	43
32 pav. Liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybių, gautų nagrinėtais metodais, palyginimas 1,0 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui	44
33 pav. Eksperimentinės sijos modelis BE programa ATENA	45
34 pav. Tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė naudojama modeliuojant sijas BE programa ATENA	45
35 pav. Modeliuojamos sijos stebėjimo taškų išdėstymas	46
36 pav. Apkrovos ir plyšio pločio priklausomybių gautų programa ATENA palyginimas 0,5 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui	47
37 pav. Apkrovos ir plyšio pločio priklausomybių gautų programa ATENA palyginimas 1,0 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui	48
38 pav. Plyšių pasiskirstymas lenkiamame elemente	51
39 pav. Deformacijų pasiskirstymas ruože tarp plyšių	53
40 pav. Grafinis plyšio pločio nustatymas	54
41 pav. Nagrinėjamų sijų, apkrautų 2 centruotomis apkrovomis, bandymų schema	56
42 pav. Lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės, gautos autoriaus siūlomą metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu, Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu bei eksperimentinių tyrimų metu Leuven universitete išbandytoms 1-2 sijoms	61
43 pav. Lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės, gautos autoriaus siūlomą metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu, Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu bei eksperimentinių tyrimų metu Leuven universitete išbandytoms 3-8 sijoms	62
44 pav. Lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės, gautos autoriaus siūlomą metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu, Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu bei eksperimentinių tyrimų metu Leuven universitete išbandytoms 9-14 sijoms	63

45 pav. Lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės, gautos autoriaus siūlomu metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu, Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu bei eksperimentinių tyrimų metu Leuven universitete išbandytoms 15-19 sijoms ...	64
46 pav. Nagrinėjamų sijų, apkrautų 2 koncentruotomis apkrovomis, bandymų schema	66
47 pav. Lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės, gautos autoriaus siūlomu metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu, Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu bei eksperimentinių tyrimų metu VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedroje išbandytoms 1-6 sijoms	67
48 pav. Elementų, kurių efektyvusis armavimo koeficientas kinta nuo 0,5 % iki 2,5 %, o naudingasis skerspjūvio aukštis nuo $d = 0,8h$ iki $d = 0,9h$, atstumo tarp plyšių ir armatūros skersmens priklausomybės	70
49 pav. Elementų, kurių tempiamos armatūros skersmuo kinta nuo 6 mm iki 18 mm, o naudingasis skerspjūvio aukštis nuo $d = 0,8h$ iki $d = 0,9h$, atstumo tarp plyšių ir efektyviojo armavimo koeficiento priklausomybės	71

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Parametrai plieno armatūra armuotų gelžbetoninių sijų plyšio pločiu skaičiavimui.....	28
2.1 lentelė. Pagrindiniai parametrai, liekamųjų įtempių nustatymui pagal Naamano metodą (Naaman 2003a).....	36
2.2 lentelė. Pagrindiniai parametrai, liekamųjų įtempių nustatymui pagal Rilem TC162-TDF metodą (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002).....	37
3.1 lentelė. Pagrindiniai eksperimentinių sijų parametrai.....	56
3.2 lentelė. Eksperimentinių tyrimų rezultatai.....	57
3.3 lentelė. Parametrų l_{damage} ir α skaitinės analizės rezultatai ($\alpha = 1 \div 2$).....	58
3.4 lentelė. Parametrų l_{damage} ir α skaitinės analizės rezultatai ($\alpha = 2 \div 3$).....	59
3.5 lentelė. Pagrindiniai eksperimentinių sijų parametrai.....	66
3.6 lentelė. Pagrindiniai teorinių bandinių parametrai.....	69

IVADAS

Darbo aktualumas

Gelžbetonis, dėl savo ilgaamžiškumo, nedidelės kainos bei architektūrinės formos įvairovės – plačiausiai statybų pramonėje taikoma medžiaga (Jun ir Stang 1998; Cachim ir kt. 2002; Bentur ir Mindess 2007). Vienas iš pagrindinių šios medžiagos trūkumų – pleišėjimas. Dažniausiai pleišėjimas pasireiškia dėl mažo tempiamojo betono stiprio bei per didelio betono trapumo (Dupont 2003; Meškėnas ir kt. 2011; Gribniak ir kt. 2012). Neretai eksploatacijos metu konstrukcijose atsiveria neleistino pločio plyšiai, kuriais agresyvi aplinka pasiekia plieninę armatūrą sukeldama koroziją. Nesiimant papildomų apsaugos priemonių ilginiui tokia konstrukcija tampa netinkama eksploatuoti.

Vienas iš efektyviausių šios problemos sprendimų būdų – dispersinio armavimo taikymas, naudojant chaotiškai išsidėsčiusį plaušą elemento tūryje (Balaguru ir Shah 1992). Plaušas kerta besiveriantį plyšį taip jį varžydamas bei perimdamas tempimo įtempius plyšyje. Pagrindinė charakteristika, apibūdinanti supleišėjusios medžiagos elgseną bei nusakanti plyšyje esančių įtempių dydį – liekamieji įtempiai. Egzistuoja keli empiriniai metodai, kuriais galima nustatyti tik vidutines ar apytikslias liekamųjų įtempių reikšmes su daugiau nei 2 kartų atsarga. Supleišėjusio tempiamojo dispersiškai armuoto betono tiksliam mechaninės elgsenos aprašymui nepakanka žinoti vidutinių ar apytikslių įtempių plyšyje reikšmių. Būtina nustatyti liekamųjų įtempių dydį bet kokiu plyšio vėrimosi momentu.

Dėl netiesinių medžiagų savybių bei sudėtingos betono ir armatūros sąveikos, tiek įprastai, tiek ir papildomai plaušu armuotiems elementams iki šiol nėra pasiūlyto patikimo betono pleišėjimo modelio. Dažniausiai pleišėjimo analizės uždaviniai sprendžiami pusiau empiriniais metodais, kurie neadekvačiai įvertinama supleišėjusios medžiagos elgseną. Dėl šios priežasties ženkliai padidėja gelžbetoninių konstrukcijų eksploatacinės išlaidos.

Tyrimų objektas ir metodai

Darbe teoriškai ir eksperimentiškai nagrinėjamas tiek įprastai, tiek ir papildomai plieno plaušu armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų įtempių būvis bei pleišėjimas. Įtempių ir deformacijų priklausomybės gaunamos taikant atvirkštinį uždavinį, iš apkrovų ir plyšių plokščių priklausomybių. Naudojant baigtinių elementų programą *ATENA*, patikrinamas nagrinėjamų fizikinių medžiagų modelių adekvatumas.

Pleišėjimo analizės uždaviniai sprendžiami naudojant diskretaus pleišėjimo idėją. Nagrinėjamų plyšio pločio nustatymo metodų adekvatumui įvertinti atliekama skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių lyginamoji analizė.

Pagrindinis darbo tikslas

Išnagrinėti dispersiškai armuotų lenkiamųjų elementų įtempių ir deformacijų būvį bei pleišėjimą, taikant teorinius ir eksperimentinius metodus.

Uždaviniai

1. Apžvelgti plieno plaušu armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų tempiamojo betono įtempių ir deformacijų nustatymo metodus.
2. Atlikti standartinių dispersiškai armuotų betoninių sijelių bandymus.
3. Išbandytoms sijelėms Rilem metodu nustatyti tempiamojo betono liekamuosius įtempius.
4. Baigtinių elementų programa skaitiškai sumodeliuoti sijelių deformavimosi ir pleišėjimo elgseną bei palyginti teorinius ir eksperimentinius.
5. Autoriaus pasiūlytu, nesudėtingu analiziniu metodu gauti eksperimentinių sijelių tempiamojo betono liekamųjų įtempių priklausomybes.
6. Išanalizuoti supleišėjusių strypais ir plieno plaušu armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų plyšio pločio nustatymo metodus.
7. Atlikti plyšio pločio dydį lemiančių parametrų skaitinę analizę.

Naujumas ir originalumas

1. Realizuota skaitinė procedūra dispersiškai armuoto betono liekamiesiems įtempiams nustatyti pagal eksperimentinius standartinių sijelių apkrovos ir įlinkio bei apkrovos ir plyšio pločio rezultatus.
2. Pasiūlytas modifikuotas lenkiamųjų dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų plyšio pločio skaičiavimo metodas, pagrįstas diskretaus pleišėjimo algoritmu. Įvedus armatūros ir betono sukibimo pažeidimo zonos ilgį, pasiūlytuoju algoritmu gauti rezultatai adekvačiai įvertina tiek įprastai, tiek ir dispersiškai armuotų elementų pleišėjimą.

Darbo rezultatų apibavimas

Magistrinio darbo autorius 2012 metais dalyvavo *Lietuvos mokslo tarybos* projekte *Studentų mokslinės veiklos skatinimas* ir atliko mokslinę praktiką tema *Dispersiškai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų analizė*.

Magistriniame darbe atliktų tyrimų rezultatai paskelbti dviejose mokslinėse konferencijose:

- Projekto *Studentų mokslinės veiklos skatinimas* ataskaitinė konferencija *Studentų moksliniai tyrimai 2011/2012*, Vilnius, Lietuva, 2012;
- 16-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija *Mokslas – Lietuvos ateitis*, Vilnius, Lietuva, 2012.

Magistrinio darbo tema paskelbti trys moksliniai straipsniai:

- Meškėnas, A.; Gelažius, V.; Kaklauskas, G.; Gribniak, V.; Rimkus, A. 2013. A new technique for constitutive modeling of SFRC, *Procedia Engineering*, 57: 762-766.
- Rimkus, A.; Meškėnas, A. 2013. Dispersiškai armuotų lenkiamųjų betoninių elementų liekamųjų įtempių ir plyšio pločio nustatymas, 16-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija *Mokslas – Lietuvos ateitis*.
- Rimkus, A.; Meškėnas, A. 2013. Dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamųjų įtempių nustatymas taikant atvirkštinio uždavinio sprendimą, 16-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija *Mokslas – Lietuvos ateitis*.

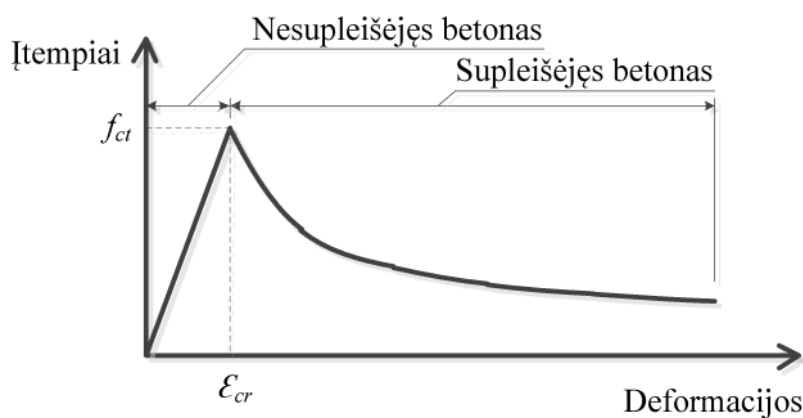
Darbo struktūra

Magistrinį darbą sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados bei literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 77 puslapiai. Tekste panaudota 51 numeruota formulė, 49 paveikslai ir 9 lentelės. Rašant darbą remtasi 40 literatūros šaltiniais.

1. LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ LIEKAMŲJŲ ĮTEMPIŲ IR PLYŠIŲ PLOČIŲ SKAIČIAVIMO METODŲ APŽVALGA

1.1. Liekamojo stiprio nustatymo metodai

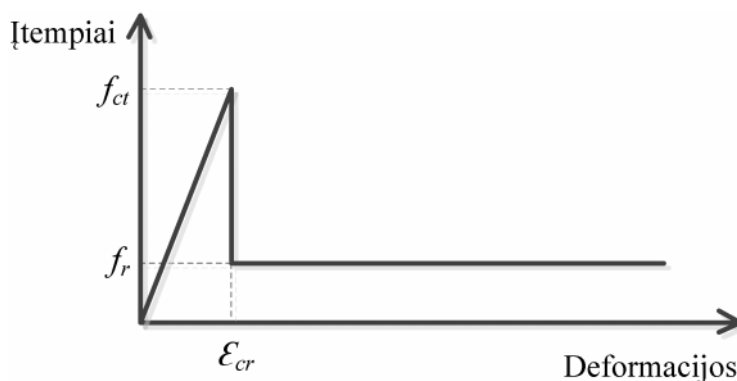
Plieno plaušu armuotų betoninių elementų darbą tampriojoje stadijoje, iki atsiveriant pirmajam plyšiui, nusako tiesinė įtempių ir deformacijų priklausomybė. Laikoma, kad tamprioji stadija tęsiasi iki įtempiai elemente pasiekia tempiamojo betono stiprį, o deformacijos – pleišėjimo deformacijų reikšmę (žr. 1 pav.). Supleišėjusių dispersiškai armuotų betoninių elementų liekamųjų įtempių nustatymui dažniausiai naudojami metodai paremti Naamano analitine išraiška (Naaman 2003a), Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002) ar DBV Merkblatt (DBV 2001) metodais, paremtais standartinių sijų bandymais.



1 pav. Plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybė

1.1.1. Naamano metodas

Vienas iš liekamųjų įtempių nustatymo būdų – empirinė Naamano išraiška (Naaman 2003a). Taikant šį metodą gaunama pastovi liekamųjų įtempių reikšmė f_r bet kurioje plyšio formavimosi stadijoje. Naaman siūloma trilinejinė įtempių ir deformacijų priklausomybė pateikta 2 paveiksle.



2 pav. Naamano siūloma įtempių ir deformacijų priklausomybė (Naaman 2003a)

Pagal Naamano empirinį metodą (Naaman 2003a), liekamųjų įtempių reikšmė (žr. 1 formulę), siejama su plieno plaušo faktoriumi F (Campione 2008) (žr. 2 formulę), plaušo ir betono vidutiniais sukibimo įtempiais τ bei trimis papildomais koeficientais, įvertinančiais plaušo inkaravimo ilgį λ_1 , plaušo orientaciją plyšyje λ_2 bei plaušo tarpusavio sąveiką λ_3 . Taria, kad koeficientų reikšmės, kai plieno plaušo ilgio ir skersmens santykis $l_f / d_f \leq 100$, yra: $\lambda_1=0,25$, $\lambda_2=1,2$, $\lambda_3=1,0$. Taikant šį metodą laikoma, kad plaušo ir betono vidutiniai sukibimo įtempiai yra du kartus didesni už tempiamąjį betono stiprį $\tau=2f_{ct}$.

$$f_r = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot F; \quad (1)$$

$$F = V_f \cdot \frac{l_f}{b_f} \cdot \beta; \quad (2)$$

čia V_f – plieno plaušo tūrio dalis betone; β – koeficientas, apibūdinantis plaušo ir betono sukibimą, $\beta=0,5$ naudojant tiesų plaušą, $\beta=0,75$ naudojant banguotą plaušą, $\beta=1,0$ naudojant plaušą užlenktais galais; l_f ir b_f – atitinkamai plieno plaušo ilgis ir skersmuo.

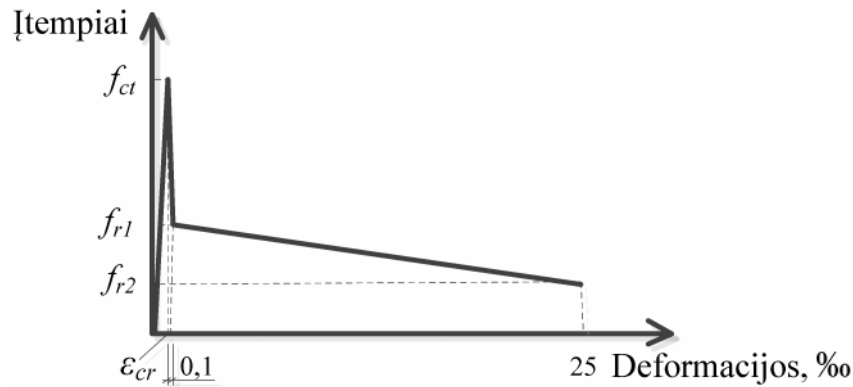
$$V_f = \frac{D_f}{\rho_f + D_f}; \quad (3)$$

čia D_f – plieno plaušo kiekis elemente; ρ_f – plieno plaušo tankis.

Naamano siūlomu metodu (Naaman 2003a) nustatomos apytikslės liekamųjų įtempių reikšmės visose plyšio vėrimosi stadijose. Metodas yra netikslus, kadangi juo įvertinami vos keli plaušo parametrai: kiekis elemente, forma bei matmenys.

1.1.2. Rilem TC162-TDF metodas

Vienas dažniausiai taikomų liekamųjų įtempių nustatymo būdų - Rilem TC162-TDF metodas (Rilem TC162-TDF 2003). Šis būdas paremtas eksperimentiniais duomenimis, gautais atliekant standartinių sijų lenkimo bandymus viena koncentruota apkrova pagal Rilem TC162-TDF grupės pasiūlytą metodą (Brite-Euram 2002 b, c, d, e). Supleišėjusio elemento liekamieji įtempiai šiuo metodu nustatomi naudojant du charakteringus taškus (žr. 3 pav.), kurie apskaičiuojami prie tam tikrų sijos įlinkių arba plyšio pločių reikšmių (žr. 4 ir 5 formules).



3 pav. Rilem siūloma įtempių ir deformacijų priklausomybė (Rilem TC162-TDF 2003)

$$f_{r1} = 0,675 \cdot k \cdot \frac{P_1 \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2}; \quad (4)$$

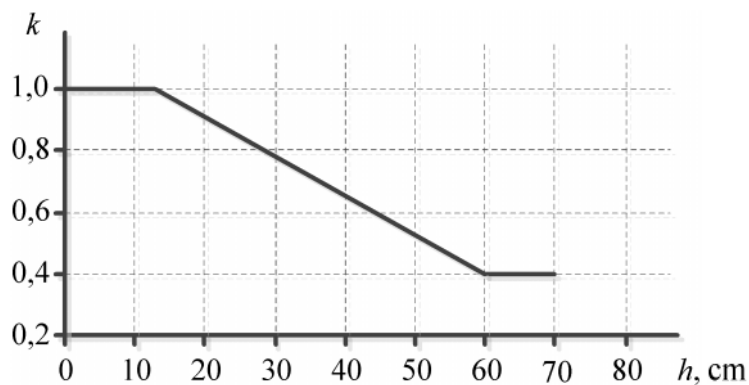
$$f_{r2} = 0,555 \cdot k \cdot \frac{P_2 \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2}; \quad (5)$$

čia k – elemento mastelio faktorius (žr. 6 formulę), kuris priklauso nuo elemento matmenų (žr. 4 pav.); P_1 ir P_2 – apkrovos, plyšio pločiams pasiekus atitinkamai $w_1=0,5$ mm ir $w_2=3,5$ mm arba įlinkiams $\delta_1=0,46$ mm ir $\delta_2=3,0$ mm (žr. 5 pav.); L – elemento ilgis; b – elemento plotis; h_{sp} – elemento aukštis ties įpjova.

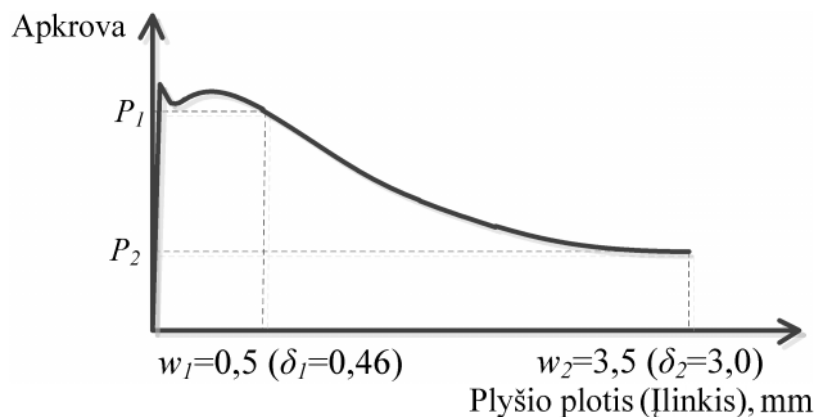
Liekamųjų įtempių reikšmę f_{r1} atitinka elemento deformacija lygi $\varepsilon_{cr} + 0,1 \cdot 10^{-3}$, f_{r2} reikšmę – ribinė betono deformacija $\varepsilon_{cu} = 25 \cdot 10^{-3}$.

$$k = 1,0 - 0,6 \cdot \frac{h - 12,5}{47,5}; \quad (6)$$

čia h – elemento aukštis, $12,5\text{cm} \leq h \leq 60\text{cm}$.



4 pav. Elemento mastelio faktoriaus priklausomybė nuo elemento aukščio (Rilem TC162-TDF 2003)



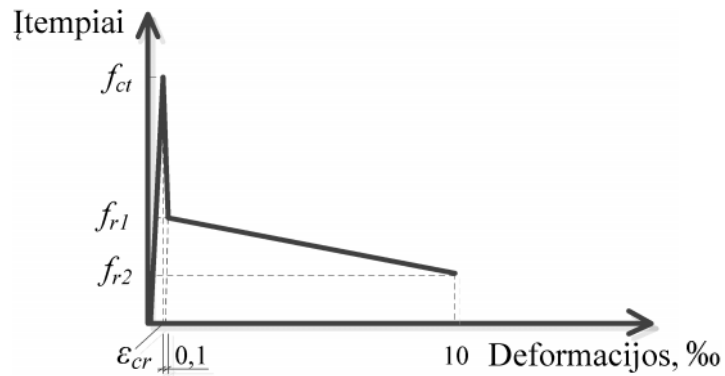
5 pav. Rilem TC162-TDF siūlomos plyšio pločių ir įlinkių reikšmės liekamųjų įtempių nustatymui (Rilem TC162-TDF 2003)

Rilem siūlomu metodu (Rilem TC162-TDF 2003) nustatomos vidutinės liekamųjų įtempių reikšmės interpoliuojant tarp dviejų charakteringų liekamųjų įtempių reikšmių. Taikant šį metodą, tikslios liekamųjų įtempių reikšmės konkrečiu apkrovimo metu nėra žinomos. Be to, plieno plaušo poveikis šiuo metodu įvertinama netiesiogiai, t.y. remiantis standartinių lenkiamųjų sijų bandymų rezultatais, kurie dėl daugybės bandymų eigą lemiančių veiksnių gali būti netikslūs.

1.1.3. DBV Merkblatt metodas

Kaip alternatyva Rilem TC162-TDF metodui (Rilem TC162-TDF 2003), plieno plaušu armuotų sijų liekamųjų įtempių nustatymui naudojamas Vokietijos betono ir statybos technikos sąjungos DBV Merkblatt pasiūlytas metodas (DBV 2001). Liekamieji įtempiai nustatomi naudojant eksperimentinius duomenis, gautus iš standartinių sijų lenkimo bandymo dviem koncentruotomis apkrovomis pagal DBV Merkblatt pasiūlytą metodą (DBV 2001). Supleišėjusio elemento liekamųjų įtempių ir deformacijų priklausomybė nustatoma naudojant du charakteringus taškus (žr. 6 pav.),

kurie apskaičiuojami atsižvelgiant į eksperimentinių bandinių elgseną apkrovimo metu, t.y. apkrovos ir įlinkio diagramą $P - \delta$ (žr. 7 ir 8 formules).



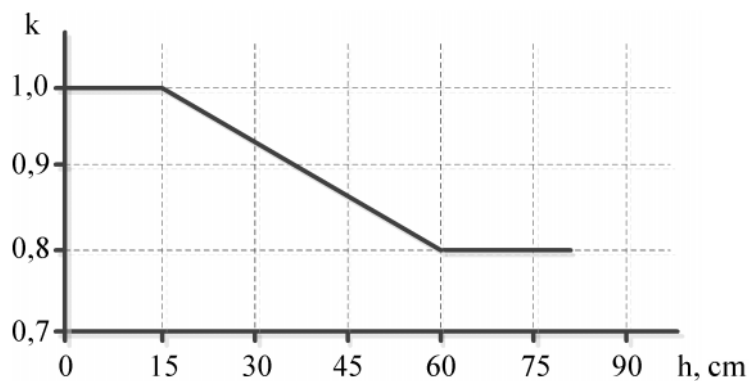
6 pav. DBV Merklbalt siūloma įtempių ir deformacijų priklausomybė (DBV 2001)

$$f_{r1} = 540 \cdot k \cdot \frac{W_1}{b \cdot h^2}; \quad (7)$$

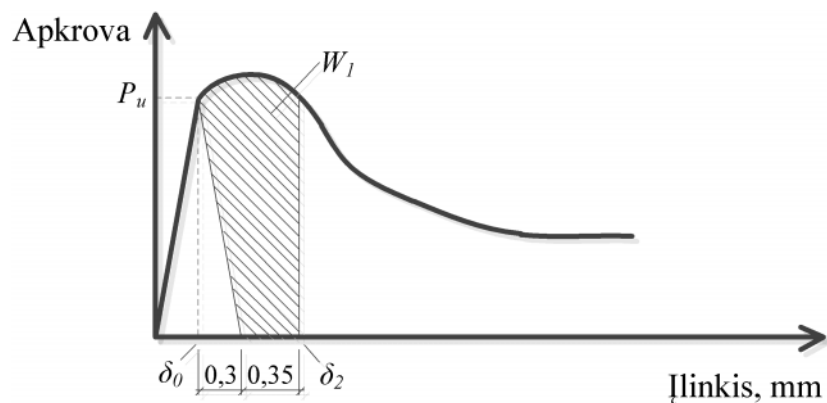
$$f_{r2} = 74 \cdot k \cdot \frac{W_2}{b \cdot h^2}; \quad (8)$$

čia k – elemento mastelio faktorius, kuris priklauso nuo elemento matmenų (žr. 7 pav.); W_1 ir W_2 – apkrovos ir įlinkių diagramų plotai atitinkamai apriboti DBV Merklbalt (DBV 2001) pateiktomis įlinkių reikšmėmis (žr. 8 ir 9 pav.); b – elemento plotis; h – elemento aukštis.

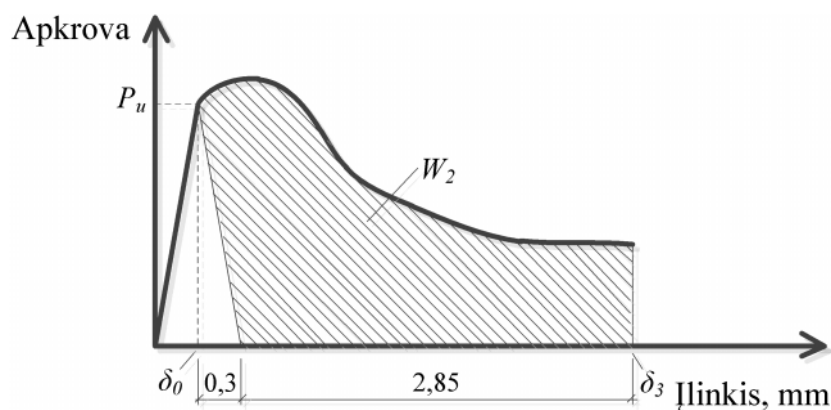
Liekamųjų įtempių reikšmę f_{r1} atitinka elemento deformacija lygi $\epsilon_{cr} + 0,1 \cdot 10^{-3}$, f_{r2} reikšmę – ribinė betono deformacija $\epsilon_{cu} = 10 \cdot 10^{-3}$.



7 pav. Elemento mastelio faktoriaus priklausomybė nuo elemento aukščio (DBV 2001)



8 pav. Apkrovos ir įlinkių diagrama liekamųjų įtempių fr1 nustatymui (DBV 2001)



9 pav. Apkrovos ir įlinkių diagrama liekamųjų įtempių fr2 nustatymui (DBV 2001)

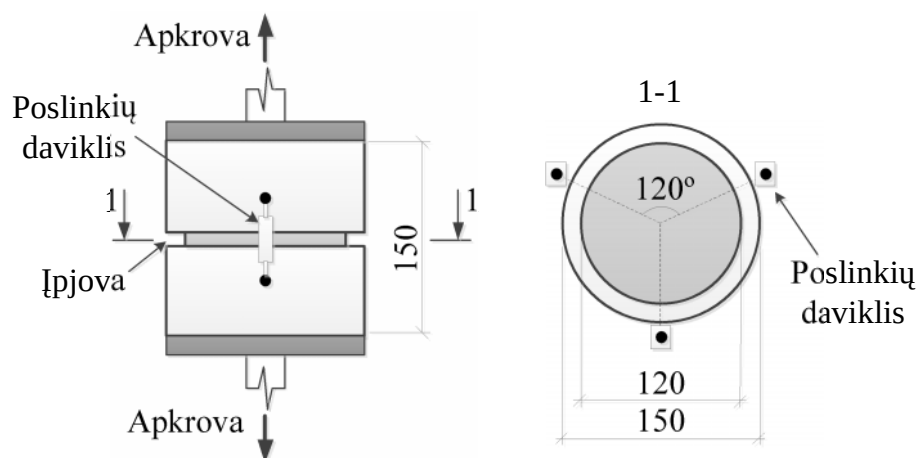
Skirtingai nei Rilem TC162-TDF būdu (Rilem TC162-TDF 2003), DBV Merkblat (DBV 2001) metodu liekamieji įtempiai nustatomi naudojant dviem koncentruotomis jėgomis lenkiamų sijų bandymų rezultatus. Ruože tarp apkrovų pridėjimo vietų sija veikia vienodo dydžio lenkimo momentas. Tokiu būdu, tolygiai apkrautas ruožas supleišėja silpniausiam skerspjūvyje (nebūtinai sijos viduryje). Šis modelis gali būti taikomas iki elemento deformacijos pasiekia 10 %. Pateiktos santykinai nedidelės ribinės deformacijos riboja modelio taikymą skaitinio modeliavimo uždaviniuose.

1.2. Eksperimentiniai metodai liekamajam stipriui nustatyti

Plieno plaušu armuotų betoninių elementų liekamųjų įtempių nustatymas empiriniais metodais nėra patikimas, todėl norint tiksliai įvertinti supleišėjusios medžiagos elgseną atliekami eksperimentiniai tyrimai. Egzistuoja trys dažniausiai naudojami metodai, kuriais tiesiogiai ar netiesiogiai nustatomas liekamųjų įtempių dydis.

1.2.1. Vienašis tempimo bandymas

Vienašis tempimo bandymas – tiesioginis liekamųjų įtempių nustatymo būdas. Šį metodą pasiūlė tarptautinės betono ir gelžbetonio mokslo asociacijos Rilem darbo grupė TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2001). Eksperimentui naudojami 150 mm skersmens, 150 mm aukščio plieno plaušu armuoto betono cilindrai (žr. 10 pav.). Plyšių lokalizavimui cilindro viduryje visu perimetru padaroma 15 mm įpjova. Bandymo metu nustatomi tempimo įtempiai betone bei ties cilindro įpjova trimis poslinkių davikliais, išdėstytais 120° kampu vienas nuo kito, matuojamas atsiveriančio plyšio plotis. Eksperimentas atliekamas presu su deformacijų kontrole, cilindrą tempiant trimis etapais. Pirmuoju etapu bandinys veikiamas apkrova, sukeliančia $5 \mu\text{m}/\text{min}$ deformacijas iki elemento deformacijos pasiekia $50 \mu\text{m}$, antruoju etapu – $100 \mu\text{m}/\text{min}$ iki $1000 \mu\text{m}$, trečiuoju etapu – $500 \mu\text{m}/\text{min}$ iki 3 mm. Bandymas laikomas pavykusiu, kai kiekvieno poslinkių daviklio rodmenų paklaida neviršija 10% nuo visų daviklių rodmenų vidurkio.



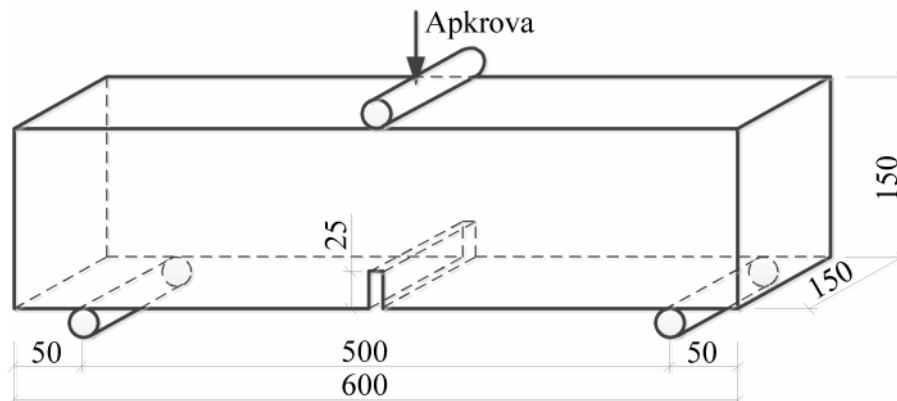
10 pav. Vienašio tempimo bandymo schema (Rilem TC162-TDF 2001)

Vienašis tempimo bandymas yra sudėtingas ir brangus eksperimentas, kuriam reikalingas preciziškas bandinių paruošimas ir ypač tiksli bandymo įranga. Netinkamai įtvirtintus bandinius į tempimo presą, bandymo metu dėl susidariusių ekscentricitetų gali atsirasti lenkimo momentai, dėl kurių elementas pleišėja netolygiai. Tokiu atveju gaunami netikslūs bandymų rezultatai, kurie negali būti naudojami. Dėl sudėtingos bandymo schemos, praktikoje šis metodas taikomas retai.

1.2.2. Rilem TC162-TDF lenkimo bandymas

Vienas iš dažniausiai naudojamų bandymų, kuriuo remiantis galima nustatyti plieno plaušu armuotų elementų liekamuosius įtempius, – Rilem TC162-TDF lenkimo bandymas (Rilem TC162-

TDF 2000a, 2000b, 2002). Šio bandymo rezultatai naudojami sudarant liekamųjų įtempių ir vidutinių betono deformacijų priklausomybę.



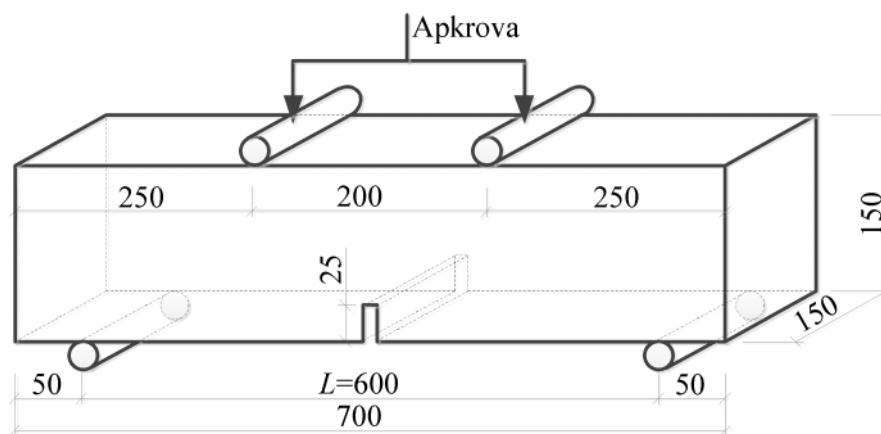
11 pav. Rilem TC162-TDF bandymo schema (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002)

Bandymui naudojama 150 x 150 x 600 mm laisvai atremta sija armuota plieno plaušu (žr. 11 pav.). Plyšių lokalizavimui sijos viduryje, skersine kryptimi, išfrezuojama 25 mm aukščio įpjova. Apkraunant siją būtent silpniausiam jos skerspjūvyje atsiveria plyšys. Bandymo metu sija apkraunama viena koncentruota apkrova, pridėta sijos viduryje. Sija lenkiama presu, kuris kontroliuojamas įlinkiu, kai apkrova sukelia 0,2 mm/min įlinkį iki elemento įlinkis pasiekia 3,0 mm, arba plyšio plotis – 3,5 mm. Eksperimento metu fiksuojamos apkrovos, sijos vidurio taško įlinkis bei atsiveriančio plyšio plotis ties įpjova.

1.2.3. DBV Merkblatt lenkimo bandymas

DBV Mrkblatt lenkimo bandymas (DBV 2001) – alternatyva Rilem TC162-TDF bandymui (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002) pakeičiant sijos apkrovimo būdą. Šį metodą pasiūlė Vokietijos betono ir statybos technikos sąjunga DBV Merkblatt. Kaip ir prieš tai pateiktu bandymu, šio bandymo rezultatai naudojami sudarant liekamųjų įtempių ir vidutinių betono deformacijų priklausomybę.

Bandymui naudojama 150 x 150 x 700 mm laisvai atremta sija armuota plieno plaušu (žr. 12 pav.). Plyšių lokalizavimui sijos viduryje, skersine kryptimi, išfrezuojama 25 mm aukščio įpjova. Skirtingai nei Rilem TC162-TDF bandymu (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002), šio bandymo metu sija apkraunama dviem koncentruotomis apkrovomis, pridėtomis $L/3$ atstumu viena nuo kitos. Naudojant dvi koncentruotas apkrovas, ruožė tarp apkrovų pridėjimo vietų, siją veikia vienodo dydžio lenkimo momentas. Tokiu būdu, tolygiai apkrautas ruožas supleišėja silpniausiam skerspjūvyje (nebūtinai sijos viduryje).



12 pav. DBV Merklblatt bandymo schema (DBV 2001)

Sija lenkiama presu, kuris kontroliuojamas įlinkiu, kai apkrova sukelia 0,2 mm/min įlinkį. Eksperimento metu fiksuojamos apkrovos bei sijos vidurio taško įlinkis.

1.3. Plyšio pločio nustatymo metodai

Viena iš pagrindinių gelžbetoninių elementų tinkamumo ribinio būvio sąlygų – pleišėjimo ribojimas. Elemento pleišėjimas turėtų būti apribotas taip, kad dėl jo konstrukcijos išvaizda netaptų nepageidaujama ir nekenktų tinkamam jos darbui ar ilgaamžiškumui. Gelžbetoninėms konstrukcijoms, veikiamoms lenkimo, skersinės jėgos, sukimo ar tempimo, pleišėjimas yra įprastas reiškinys. Plyšiams gali būti leidžiama atsirasti niekaip nebandant riboti jų pločio, jeigu jie nekenkia konstrukcijos paskirčiai. Dėl šio priežasties reikalingi adekvatūs plyšio pločio skaičiavimo metodai, kuriais, atsižvelgiant į konstrukcijos paskirtį bei pobūdį, būtų galima nustatyti ribinį plyšio plotį w_{max} . Įprastoms gelžbetoninėms konstrukcijoms, armuotoms plienine strypine armatūra, dažniausiai naudojami plyšio pločio skaičiavimo metodai aprašyti Eurokode (LST EN-1992-1-1:2005 2007), bei tarptautinės betono federacijos *FIB* rekomendacijose Model Code (Model Code 2010). Gelžbetoninėms konstrukcijoms, kurios sustiprintos plieno plaušu, iki šiol nėra universalus metodo, adekvačiai įvertinančio plyšių pločius. Egzistuoja keli empiriniai metodai (Nemegeer 1996, Frosch 1999, Rilem TC162-TDF 2003), kurių pritaikymas, nagrinėjant įvairiai apkrautas konstrukcijas, yra ribotas.

Šiame poskyriuje nagrinėjami įprastai (plienine strypine armatūra) ir plieno plaušu armuotų gelžbetoninių lenkiamų elementų plyšio pločio skaičiavimo metodai. Pateikiamas empirinis plyšių pločių skaičiavimo metodas, skirtas dispersiškai armuotų elementų analizei. Siūlomas universalus plyšio pločio nustatymo būdas įprastai ir dispersiškai armuotoms konstrukcijoms.

1.3.1. Eurokodo metodas

Eurokode (LST EN-1992-1-1:2005 2007) pateiktas metodas taikomas plieno strypais armuoto betono atsiveriančių plyšių pločių skaičiavimui. Eurokode siūloma maksimalaus plyšio pločio išraiška siejama su didžiausiu atstumu tarp elemente atsivėrusių plyšių bei skirtumu tarp vidutinių armatūros ir betono deformacijų:

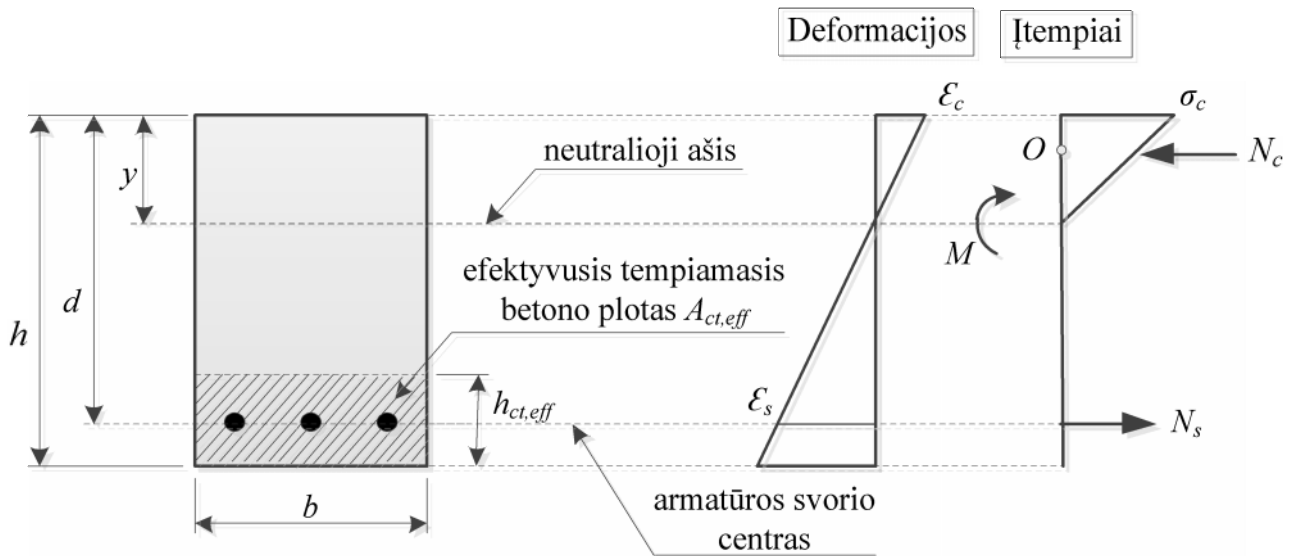
$$w_{\max} = s_{r,\max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (9)$$

čia $s_{r,\max}$ – didžiausias atstumas tarp plyšių; ε_{sm} – vidutinės armatūros deformacijos; ε_{cm} – vidutinė betono deformacija.

Skirtumas tarp vidutinių armatūros ir betono deformacijų nustatomas taikant šią lygtį:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (10)$$

čia σ_s – tempiamosios armatūros įtempiai plyšyje; k_t – nuo apkrovimo trukmės priklausantis koeficientas ($k_t = 0,6$ – veikiant trumpalaikiai apkrovai; $k_t = 0,4$ – veikiant ilgalaikiai apkrovai); α_e – armatūros ir efektyviojo betono tamprumo modulių santykis ($\alpha_e = E_s/E_{c,eff}$); E_s – plieninės armatūros tamprumo modulis; $E_{c,eff}$ – efektyvusis betono tamprumo modulis, apskaičiuojamas priklausomai nuo išorinio poveikio veikimo trukmės (kai išorinis poveikis trumpalaikis $E_{c,eff} = E_c$); ρ_{eff} – efektyvusis armavimo koeficientas ($\rho_{eff} = A_s/A_{ct,eff}$), kur A_s – armatūros skerspjūvio plotas tempiamoje elemento zonoje; $A_{ct,eff}$ – efektyvusis tempiamojo betono plotas, priklauso nuo aukščio $h_{ct,eff} = 2,5(h-d)$ (žr. 13 pav.).



13 pav. Lenkiamos gelžbetoninės sijos deformacijų ir įtempių pasiskirstymas

Tempiamosios armatūros įtempiai plyšyje nustatomi naudojant jėgų ir lenkimo momentų statinės pusiausvyros lygtis. Jėgų statinės pusiausvyros lygtis:

$$\sum N = N_c + N_s; \quad (11)$$

$$\sum N = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot b \cdot y - \sigma_s \cdot A_s. \quad (12)$$

Lenkimo momentų apie tašką O statinės pusiausvyros lygtis:

$$\sum M = M_s - M; \quad (13)$$

$$\sum M = \sigma_s \cdot A_s \cdot \left(d - \frac{y}{3} \right) - M, \quad (14)$$

čia y – supleišėjusio skerspjūvio gniuždomosios zonos aukštis; d – naudingasis elemento aukštis; A_s – armatūros skerspjūvio plotas, tempiamoje elemento zonoje; b – sijos plotis; M – išorinis lenkiamasis momentas; σ_c – įtempiai betone; σ_s – strypinės armatūros tempimo įtempiai.

Išsprendus šias lygtis nustatomi pagrindiniai nežinomieji: supleišėjusio gelžbetoninio elemento gniuždomosios zonos aukštis y ir įtempiai strypinėje armatūroje σ_s . Didžiausias atstumas tarp plyšių lenkiamame arba tempiamame elemente, kai atstumas tarp armatūros strypų neviršija $5 \cdot (c + 0,5 \cdot \phi)$, nustatomas taikant šią išraišką:

$$s_{r,\max} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{eff}}, \quad (15)$$

čia c – betono apsauginio sluoksnio storis; ϕ – armatūros strypo skersmuo; k_1 – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į sukibusios armatūros sukibties savybes ($k_1 = 0,8$ – didelės sukibties strypams, $k_1 = 1,6$ – strypams su beveik lygiu paviršiumi); k_2 – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į deformacijų pasiskirstymą ($k_2 = 0,5$ – lenkimo atveju, $k_2 = 1,0$ – grynojo tempimo atveju); k_3 ir k_4 – koeficientai, nurodyti nacionaliniame Eurokodo priede, atitinkamai lygūs 3,4 ir 0,425.

Didžiausias atstumas tarp plyšių lenkiamame arba tempiamame elemente, kai atstumas tarp armatūros strypų didesnis kaip $5 \cdot (c + 0,5 \cdot \phi)$, nustatomas taikant šią išraišką:

$$s_{r,\max} = 1,3 \cdot (h - y), \quad (16)$$

čia y – nesupleišėjusio skerspjuvio gniuždomosios zonos aukštis.

1.3.2. Model Code metodas

Model Code pateiktas metodas (Model Code 2010) skirtas įprastai, plieno strypais, armuoto betono atsiveriančių plyšių pločių skaičiavimui. Šis metodas yra analogiškas Eurokode pateiktam algoritmui (LST EN-1992-1-1:2005 2007). Bet kurioje plyšio formavimosi stadijoje bendruoju atveju plyšio plotis skaičiuojamas taikant šią išraišką:

$$w_d = 2 \cdot l_{s,\max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}), \quad (17)$$

čia $l_{s,\max}$ – atstumas nuo atsivėrusio plyšio iki pjūvio elemente, kuriame tempimo įtempiai betone lygūs tempiamajam betono stipriui f_{ct} ; ε_{sm} – vidutinės armatūros deformacijos; ε_{cm} – vidutinė betono deformacija; ε_{cs} – betono traukimosi deformacija.

Atstumas tarp atsivėrusio plyšio ir elemento pjūvio, kuriame tempimo įtempiai betone lygūs tempiamajam betono stipriui f_{ct} , apskaičiuojami pagal šią išraišką:

$$l_{s,\max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{f_{ctm}}{\tau_{bm}} \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{s,eff}}, \quad (18)$$

čia ϕ_s – armatūros strypo skersmuo; f_{ctm} – vidutinė tempiamojo betono stiprio reikšmė; $\rho_{s,eff}$ – efektyvusis armavimo koeficientas; τ_{bm} – vidutinė armatūros ir betono sukibimo įtempių reikšmė (žr. 1.1 lentelę).

Bendruoju atveju iš (17) ir (18) lygčių plyšio plotis išreiškiamas taip:

$$w_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{s,eff}} \cdot \frac{f_{ctm}}{\tau_{bm}} \cdot \left(\frac{\sigma_s - \beta \cdot \sigma_{sr}}{E_s} + \eta_r \cdot \varepsilon_r \right), \quad (19)$$

čia σ_s – tempiamos armatūros įtempiai plyšyje; σ_{sr} – tempiamos armatūros įtempiai plyšyje pleišėjimo momentu; β – empirinis koeficientas, įvertinantis vidutinės deformacijos elemente (žr. 1.1 lentelę); η_r – koeficientas, įvertinantis susitraukimo mastą; ε_r – betono susitraukimo deformacija; E_s – armatūros tamprumo modulis.

Tempiamos armatūros įtempiai plyšyje apskaičiuojami iš statinės pusiausvyros. Tempiamos armatūros įtempiai plyšyje pleišėjimo momentu nustatomi pagal šią išraišką:

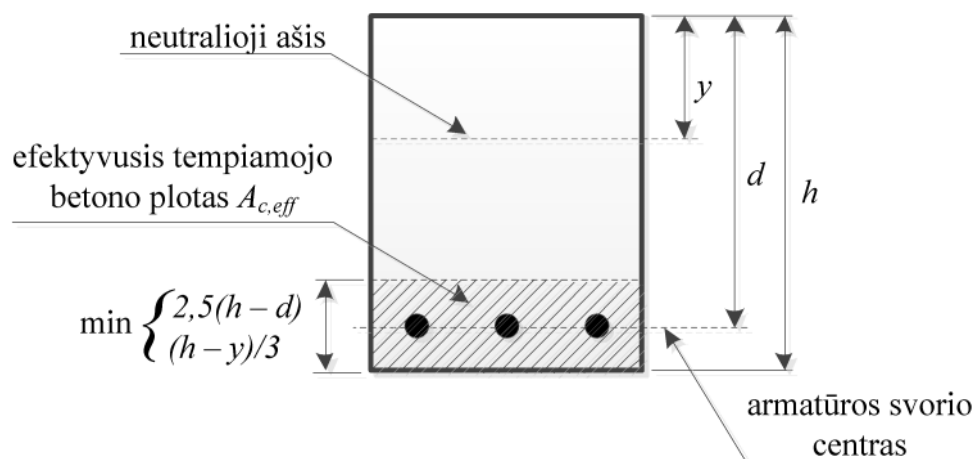
$$\sigma_{sr} = \frac{f_{ctm}}{\rho_{s,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff}), \quad (20)$$

čia α_e – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis, $\alpha_e = E_s/E_c$.

Efektyvusis armavimo koeficientas apskaičiuojamas naudojant šią išraišką:

$$\rho_{s,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}}, \quad (21)$$

čia A_s – tempiamos armatūros plotas; $A_{c,eff}$ – efektyvusis tempiamojo betono plotas (žr. 14 pav).



14 pav. Efektyvusis lenkiamos gelžbetoninės sijos tempiamojo betono plotas

1.1 lentelė. Parametrai plieno armatūra armuotų gelžbetoninių sijų plyšio pločiu skaičiavimui

Parametras	Plyšio formavimosi metu		Susiformavus plyšiams	
	Veikiant trumpalaikiai apkrovai	Veikiant ilgalaikiai apkrovai	Veikiant trumpalaikiai apkrovai	Veikiant ilgalaikiai apkrovai
τ_{bm}	$1,8 \cdot f_{ctm}(t)$	$1,35 \cdot f_{ctm}(t)$	$1,8 \cdot f_{ctm}(t)$	$1,8 \cdot f_{ctm}(t)$
β	0,6	0,6	0,6	0,4
η_r	0	0	0	1

1.3.3. Rilem TC162-TDF metodas

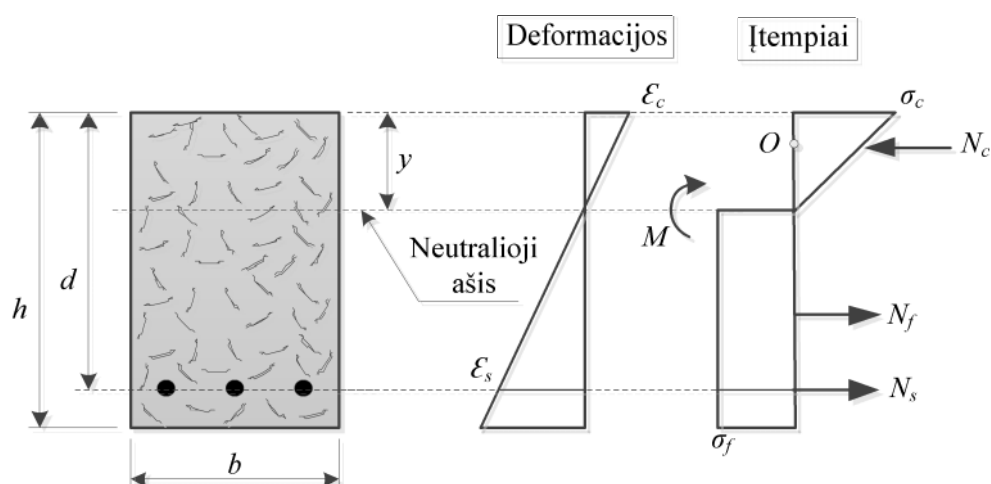
Rilem TC162-TDF metodas (Rilem TC162-TDF 2003) skirtas plieno plaušu armuoto betono atsiveriančių plyšių pločių skaičiavimui. Taip sustiprintuose gelžbetoniniuose elementuose plyšio plotis priklauso nuo betono stiprio, plieno plaušo parametrų, strypinės armatūros skersmens, jos išdėstymo elemento skerspjūvyje ir t.t. (Dupont 2003). Pradėjus pleišėti elementui, armuotam strypine armatūra, tempimo įtempius plyšyje perima tik armatūra, tuo tarpu plieno plaušu armuotame gelžbetoniniame elemente, dalį strypinei armatūrai tenkančių įtempių perima plieno plaušas. Dėl šios priežasties Rilem TC162-TDF grupė patobulino Eurokode pateiktą metodą (LST EN-1992-1-1:2005 2007). Esminis metodo patobulinimas – įvertinama plieno plaušo poveikis gelžbetoninių elementų elgsenai.

Maksimalaus plyšio pločio skaičiavimui naudojama tokia pati išraiška kaip ir pateikta Eurokode (žr. 15 formulę). Pagrindinis dydis, kurį nustatant įvertinamas plieno plaušas – atstumas tarp atsiveriančių plyšių. Šis dydis nustatomas taikant šią išraišką:

$$s_{r,\max} = l_{cr,\max} = \left(k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{eff}} \right) \cdot \left(50 \cdot \frac{l_f}{d_f} \right), \quad (22)$$

čia l_f – plieno plaušo ilgis; d_f – plieno plaušo skersmuo.

Skirtumui tarp vidutinių armatūros ir betono deformacijų (žr. 19 formulę) nustatyti naudojamos įtempių armatūroje σ_s ir σ_{sr} reikšmės. Šios reikšmės apskaičiuojamos atsižvelgiant į plieno plaušą esantį plyšyje. Įtempiai armatūroje nustatomi naudojant jėgų ir lenkimo momentų statinės pusiausvyros lygtis.



15 pav. Plieno plaušu armuoto gelžbetoninio elemento deformacijų ir įtempių pasiskirstymas

Jėgų statinės pusiausvyros lygtis:

$$\sum N = N_c - N_f - N_s; \quad (23)$$

$$\sum N = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot b \cdot y - \sigma_f \cdot b \cdot (h - y) - \sigma_s \cdot A_s. \quad (24)$$

Lenkimo momentų apie tašką O statinės pusiausvyros lygtis:

$$\sum M = M_f + M_s - M; \quad (25)$$

$$\sum M = \sigma_f \cdot b \cdot (h - y) \cdot \left(h - \frac{h - y}{2} - \frac{y}{3} \right) + \sigma_s \cdot A_s \cdot \left(d - \frac{y}{3} \right) - M, \quad (26)$$

čia y – supleišėjusio skerspjūvio gniuždomosios zonos aukštis; d – naudingasis elemento aukštis; A_s – armatūros skerspjūvio plotas, tempiamoje elemento zonoje; h – sijos aukštis; b – sijos plotis; M –

išorinis lenkiamasis momentas; σ_c – įtempiai betone; σ_f – liekamieji įtempiai plyšyje; σ_s – strypinės armatūros tempimo įtempiai, kai $M > M_{cr}$, kur M_{cr} – pleišėjimo momentas. Kai $M = M_{cr}$, tai $\sigma_s = \sigma_{sr}$.

Iš statinės pusiausvyros lygčių (24) ir (26) nustatomi pagrindiniai nežinomieji: supleišėjusio dispersiškai armuoto gelžbetoninio elemento gniuždomosios zonos aukštis y ir įtempiai strypinėje armatūroje σ_s . Įvertinus šiuos dydžius apskaičiuojamas maksimalaus atsiveriančio plyšio plotis.

1.4. Išvados

1. Tyrimų metu apžvelgti dažniausiai naudojami supleišėjusio plieno plaušu armuoto betono elgseną aprašantys metodai. Liekamųjų įtempių nustatymui taikomi metodai paremti Naamano analitine išraiška (Naaman 2003a), Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002) ar DBV Merkblatt (DBV 2001) standartinių sijų bandymais. Nustatyta, kad egzistuojantys liekamųjų įtempių nustatymo būdai leidžia apskaičiuoti tik vidutinės ($\sigma_f = \text{const.}$) ar apytiksliai reikšmes, gautas interpoliuojant tarp dviejų charakteringų liekamųjų įtempių reikšmių. Šiais metodais gautos liekamųjų įtempių ir deformacijų priklausomybės retai atspindi realių matmenų konstrukcinių elementų elgseną.
2. Plieno plaušu armuotų betoninių elementų liekamųjų įtempių nustatymas empiriniais metodais nėra patikimas, todėl norint tiksliau įvertinti supleišėjusios medžiagos elgseną atliekami eksperimentiniai tyrimai. Egzistuoja trys dažniausiai naudojami metodai, kuriais tiesiogiai ar netiesiogiai nustatomas liekamųjų įtempių dydis. Dėl sąlyginai nesudėtingos bandymo įrangos ir bandinių paruošimo, dažniausiai praktikoje taikomas Rilem TC162-TDF grupės pasiūlytas lekiamos sijos su įpjova viduryje bandymas (Rilem TC162-TDF 2003).
3. Analizuojant egzistuojančius plieno plaušu armuotų elementų plyšių pločių skaičiavimo metodus, nustatyta, kad šie metodai siejami tik su plieno plaušo ilgiu ir jo skersmeniu, neįvertinant plaušo formos. Plaušo forma lemia betono ir plaušo sukibimo kokybę (Naaman 2003b, ASTM A 820 2004), nuo kurios tiesiogiai priklauso atsiveriančio plyšio plotis. Plieno plaušu armuotiems elementams taikant egzistuojančius plyšių pločių nustatymo metodus neadekvačiai įvertinama supleišėjusios medžiagos elgsena, dėl kurios netiksliai nustatomi plyšių pločiai.

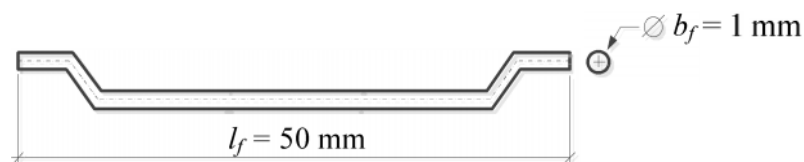
2. LENKIAMŲJŲ PLIENO PLAUSŲ ARMUOTŲ BETONINIŲ ELEMENTŲ LIEKAMŲJŲ ĮTEMPIŲ SKAIČIAVIMAS

2.1. Autoriaus atlikti eksperimentiniai tyrimai

Eksperimentiniais tyrimais siekiama nustatyti plieno plaušu armuotų sijų, veikiamų trumpalaikę apkrovą, apkrovos ir plyšio pločio priklausomybes. Poskyriuje pateikiamos eksperimentiniams tyrimams naudotų elementų charakteristikos, įrangos aprašymas, vykdytų bandymų eiga bei tyrimų rezultatai.

Bandiniai

Eksperimentinę programą sudaro dešimties sijų, armuotų plieno plaušu, bandymai. Tyrimų metu išbandytos dvi dispersiškai armuotų betoninių sijų serijos, armuotos 0,5 ir 1,0 % plieno plaušu, skaičiuojant elemento tūriui. Visų dešimties sijų, kurių matmenys 150 x 150 x 600 mm, armavimui naudotas apvalaus skerspjūvio plaušas lenktais galais, kurio ilgis $l_f = 50$ mm, skersmuo $b_f = 1$ mm (žr. 16 pav.). Gniuždomasis sijų stipris nustatytas bandant 150 mm kubelius 28 dieną po betonavimo. Gautos 43,1 ir 44,8 MPa gniuždomojo stiprio reikšmės sijoms armuotoms atitinkamai 0,5 ir 1,0% plieno plaušu. Plyšių lokalizavimui kiekvieno bandinio viduryje, statmenai liejimo kryptčiai, padaroma 25 mm aukščio įpjova.

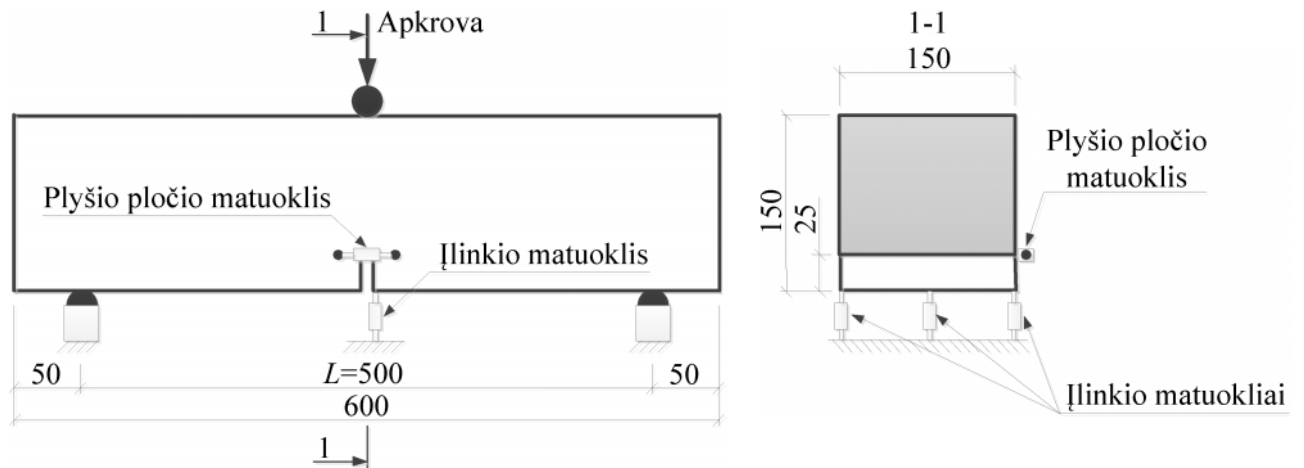


16 pav. Eksperimentiniams tyrimams naudojamas plieno plaušas

Bandymų eiga

Lenkimo bandymams taikoma Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) aprašyta bandymo schema. Bandymo metu sija apkraunama viena koncentruota apkrova, pridėta sijos viduryje. Eksperimento metu fiksuojamos apkrovos, sijos vidurio taško įlinkis bei atsiveriančio plyšio plotis. Atsiveriančio plyšio plotis nustatomas poslinkio matuokliu, kuris pritvirtintas ties sijos įpjova (žr. 17 pav.). Po sija, išilgai įpjovos, išdėstomi trys įlinkio matuokliai. Dėl ne vienodo plyšio vėrimosi, bendras sijos įlinkis priimamas kaip trijų įlinkio matuoklių rodmenų vidurkis.

Sija lenkiama presu, kuris kontroliuojamas atsiveriančio plyšio pločiu. Sijos apkrovimo greitis 0,2 mm/min. Eksperimentas tęsiamas iki elemento įlinkis pasiekia 3,0 mm, arba plyšio plotis – 3,5 mm ribą. Pasiekus ribinį įlinkį ar plyšio plotį, poslinkio matuokliai nuimami ir padidinus apkrovimo greitį sijos lenkiamos iki suirimo (žr. 18 pav.).



17 pav. Poslinkio matuoklių išdėstymo schema

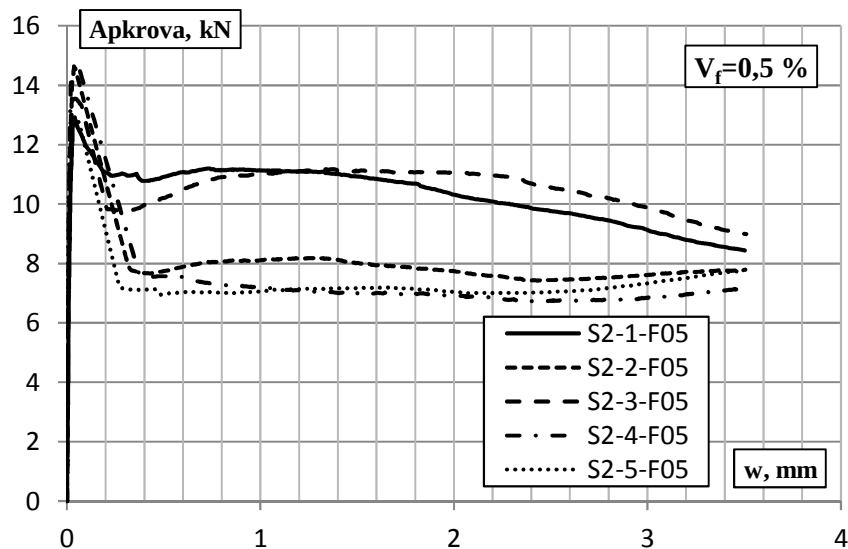


18 pav. Bandymo eiga

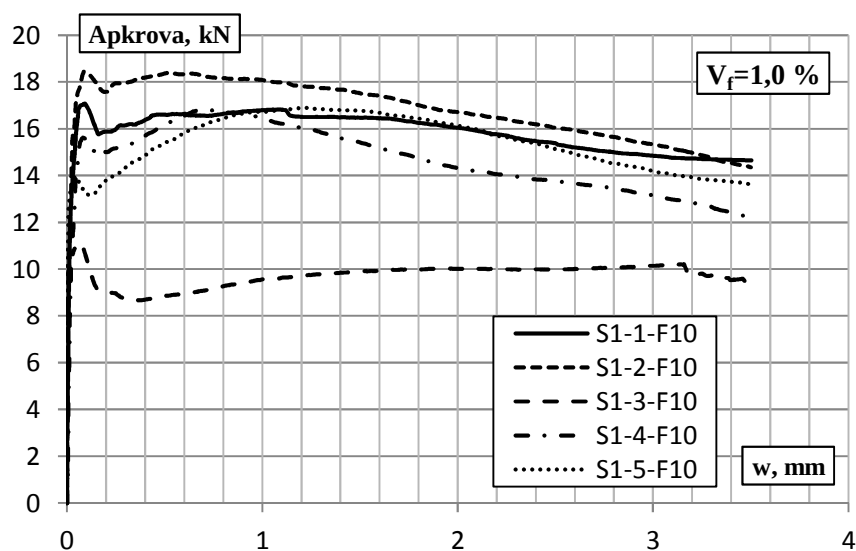
Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Tyrimų metu gautos apkrovos ir plyšio pločio ($P - w$) bei apkrovos ir įlinkių ($P - \delta$) priklausomybės (žr. 19-22 pav.). Visi vienos serijos bandiniai yra identiški ir bandomi naudojant

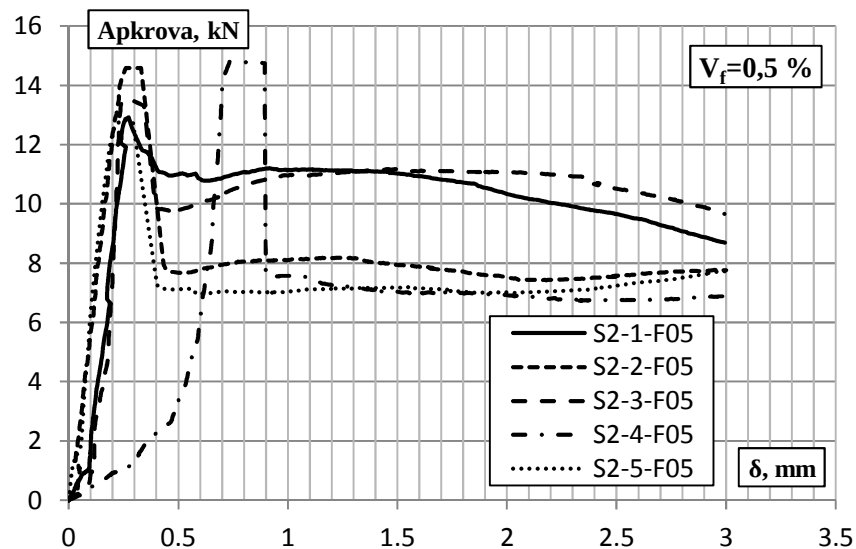
tokią pat metodiką, tačiau supleišėjusių elementų elgsena žymiai skiriasi. Didelė rezultatų sklaida gaunama dėl skirtingo plieno plaušo orientavimosi ir kiekio plyšio vėrimosi zonoje.



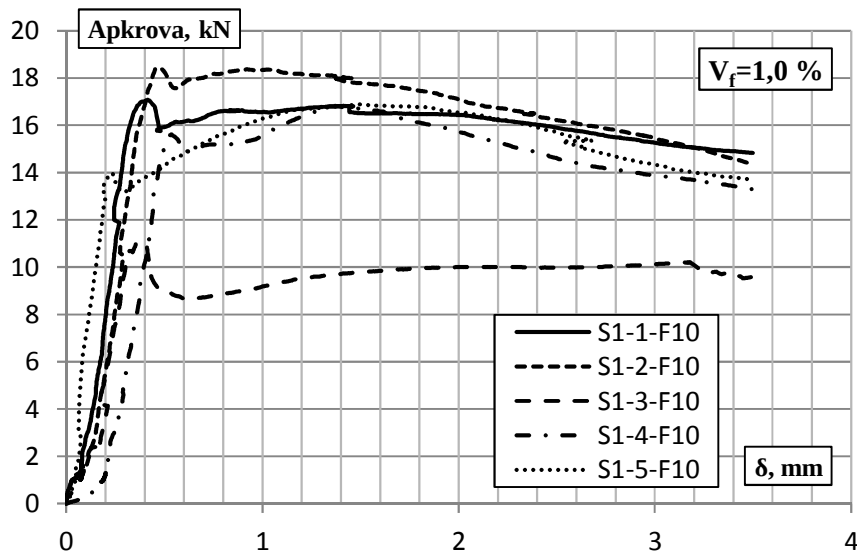
19 pav. Bandymų metu gautos apkrovos ir plyšio pločio ($P - w$) priklausomybės sijoms armuotoms 0,5 % plieno plaušu pagal elemento tūrį



20 pav. Bandymų metu gautos apkrovos ir plyšio pločio ($P - w$) priklausomybės sijoms armuotoms 1,0 % plieno plaušu pagal elemento tūrį



21 pav. Bandymų metu gautos apkrovos ir plyšio pločio ($P - \delta$) priklausomybės sijoms armuotoms 0,5 % plieno plaušu pagal elemento tūrį



22 pav. Bandymų metu gautos apkrovos ir plyšio pločio ($P - \delta$) priklausomybės sijoms armuotoms 1,0 % plieno plaušu pagal elemento tūrį

2.2. Dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymas

Šiame poskyriuje pateikiami trys plieno plaušu armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymo būdai. Liekamieji įtempiai skaičiuojami naudojant Naamano empirinę išraišką (Naaman 2003a), Rilem TC162-TDF metodą (Rilem TC162-TDF 2003) bei autoriaus siūlomą algoritmą. Šiais būdais nustatomi 2.1 poskyriuje aprašytų sijų liekamieji įtempiai.

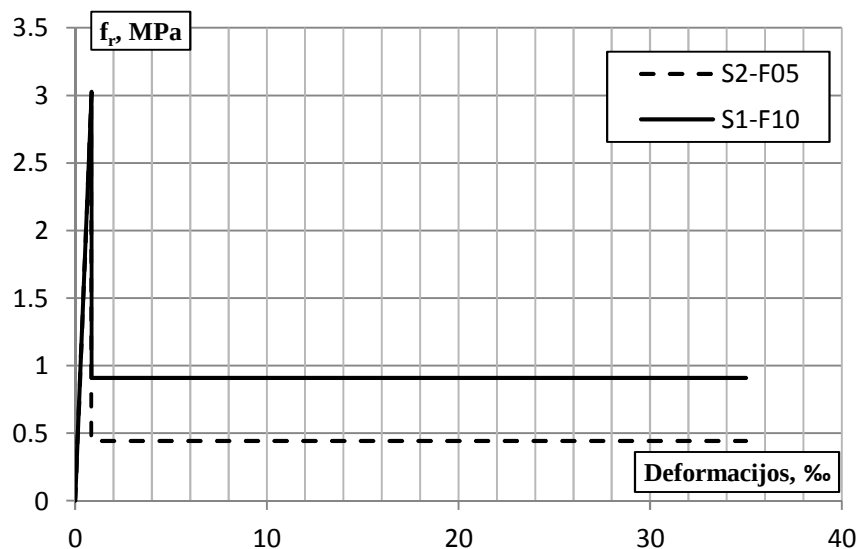
2.2.1. Liekamųjų įtempių nustatymas taikant Naamano metodą

Naudojant metodiką, aprašytą 1.1.1. skyrelyje, apskaičiuojama liekamųjų įtempių reikšmė f_r . Liekamieji įtempiai nustatomi 2.1. poskyriuje aprašytoms sijoms, kurių pagrindiniai parametrai, reikalingi Naamano metodo taikymui (Naaman 2003a), pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Pagrindiniai parametrai, liekamųjų įtempių nustatymui pagal Naamano metodą (Naaman 2003a)

Sija	f_{ct} , MPa	F	V_f , %	l_f , mm	b_f , mm	λ_1	λ_2	λ_3	β
S2-1-F05	2,95	0,25	0,5	50	1,0	0,25	1,2	1,0	1,0
S2-2-F05									
S2-3-F05									
S2-4-F05									
S2-5-F05									
S1-1-F10	3,03	0,5	1,0	50	1,0	0,25	1,2	1,0	1,0
S1-2-F10									
S1-3-F10									
S1-4-F10									
S1-5-F10									

Apskaičiavus visų dešimties dispersiškai armuoto betono sijų liekamuosius įtempius naudojant empirinę Naaman išraišką (Naaman 2003a) (žr. 1 formulę) sudaromos tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės (žr. 23 pav.). Dėl naudoto vienodo plieno plaušo tipo, ilgio bei skersmens visiems bandiniams, pateikiami bendri sijų serijų rezultatai.



23 pav. Įtempių ir atsiveriančio plyšio pločio diagramos gautos taikant Naamano metodą (Naaman 2003a)

Iš pateiktų rezultatų galime teigti, kad liekamųjų įtempių skirtumas nagrinėtų sijų serijoms gaunamas dėl plieno plaušo kiekio skirtumo elemente bei skirtingų plaušo ir betono sukibimo įtempių, kurie tiesiogiai priklauso nuo tempiamojo betono stiprio.

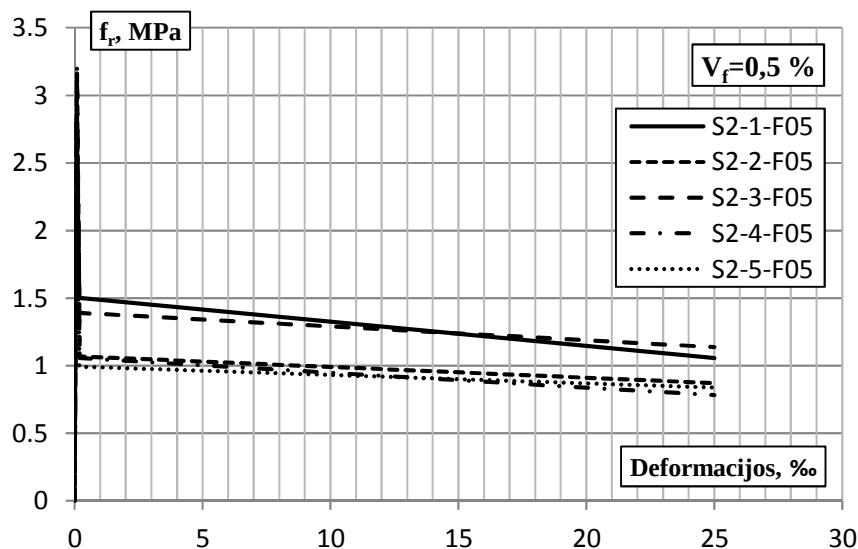
2.2.2. Liekamųjų įtempių nustatymas taikant Rilem TC162-TDF metodą

Naudojant metodiką, aprašytą 1.1.2. skyrelyje, apskaičiuojamos liekamųjų įtempių reikšmės f_{r1} ir f_{r2} prie Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002) nurodytų plyšio pločio reikšmių, 0,5 ir 3,5 mm atitinkamai. Pagrindiniai parametrai, reikalingi Rilem TC162-TDF metodo taikymui, pateikti 2.2 lentelėje.

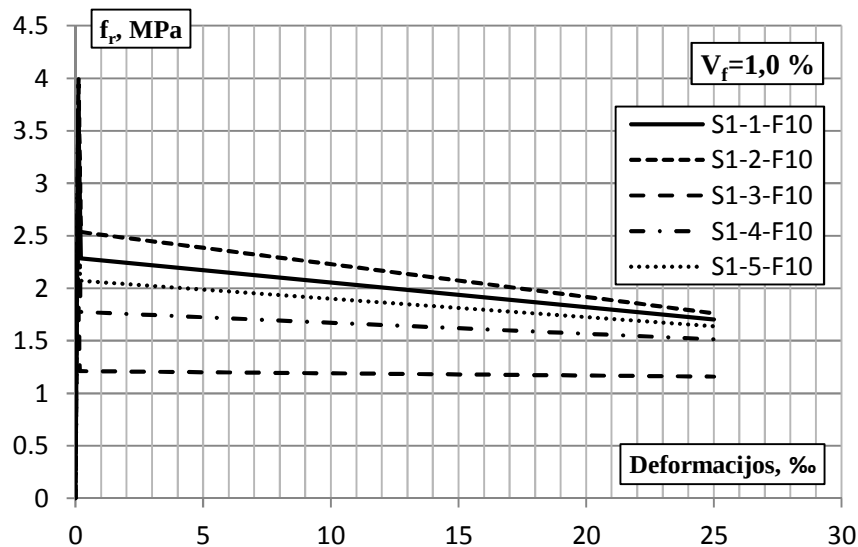
2.2 lentelė. Pagrindiniai parametrai, liekamųjų įtempių nustatymui pagal Rilem TC162-TDF metodą (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002)

Sija	P_1 , kN	P_2 , kN	l , mm	b , mm	h_{sp} , mm	k
S2-1-F05	10,78	9,21	500	150	125	0,968
S2-2-F05	7,67	7,59				
S2-3-F05	9,97	9,93				
S2-4-F05	7,58	6,82				
S2-5-F05	7,12	7,30				
S1-1-F10	16,38	14,87				
S1-2-F10	18,19	15,38				
S1-3-F10	8,69	10,12				
S1-4-F10	12,72	13,21				
S1-5-F10	14,86	14,28				

Apskaičiavus nagrinėjamų sijų liekamuosius įtempius naudojant Rilem TC162-TDF metodą (žr. 4 ir 5 formulės) sudaromos tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės (žr. 24 ir 25 pav.).



24 pav. Įtempių ir deformacijų diagramos gautos taikant Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodą 0,5 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui



25 pav. Įtempių ir deformacijų diagramos gautos taikant Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodą 1,0 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui

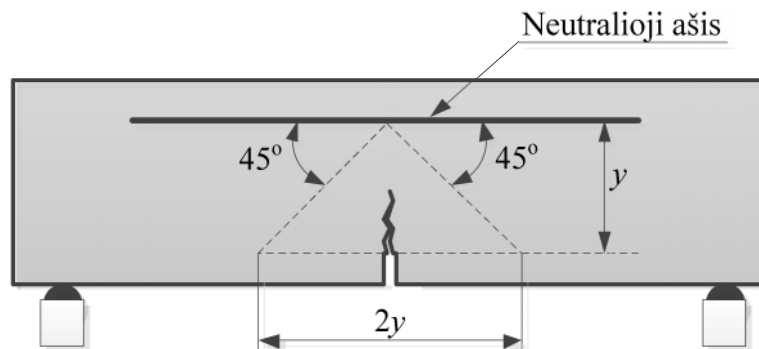
Kaip matyti iš 24 ir 25 paveikslų, gaunama žymi tos pačios serijos sijų liekamųjų įtempių sklaida, nors ir sijos pagamintos identišškai. Šis rezultatų išsibarstymas atsiranda dėl netolygaus ir nevienodo plieno plaušo pasiskirstymo elemente.

2.2.3. Liekamųjų įtempių nustatymas taikant autoriaus pateiktą metodą

Darbo autorius pateikė metodą supleišėjusio dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymui iš eksperimentinių lenkiamų sijų duomenų, gautų Rilem TC162-TDF bandymu (Rilem TC162-TDF 2003). Taikant šį metodą įtempių ir deformacijų priklausomybėms gauti naudojamos

tik jėgų ir lenkimo momentų statinės pusiausvyros lygtys. Siūlomas algoritmas paremtas prielaida, kad koncentruota apkrova veikiamas plieno plaušu armuotas elementas plastiškai deformuojasi tik tam tikroje bazėje, kurios ilgis lygus dviem neutraliosios ašies aukščiams (žr. 26 pav.) (Dupont 2003):

$$\varepsilon_{pl} = \frac{w}{2 \cdot y}; \quad (27)$$

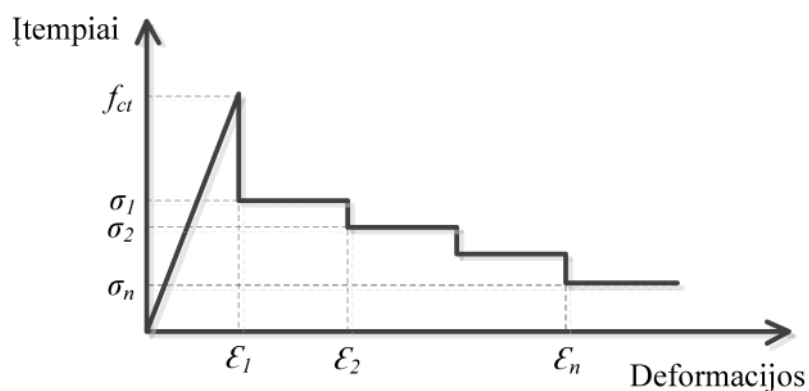


26 pav. Besideformuojanti sijos dalis

Supleišėjusio dispersiškai armuoto betono deformacijas ε sudaro dvi dedamosios: elastinė (ε_{el}) ir plastinė (ε_{pl}) deformacijų dalis (žr. 10 formulę). Dupont nustatė, kad elastinė supleišėjusios medžiagos deformacijų dalis sudaro tik 2-5 % nuo visų elemento deformacijų (Dupont 2003). Dėl nereikšmingo supleišėjusios medžiagos elastinių deformacijų dydžio, siūlomame liekamųjų įtempių nustatymo algoritme jos nevertinamos.

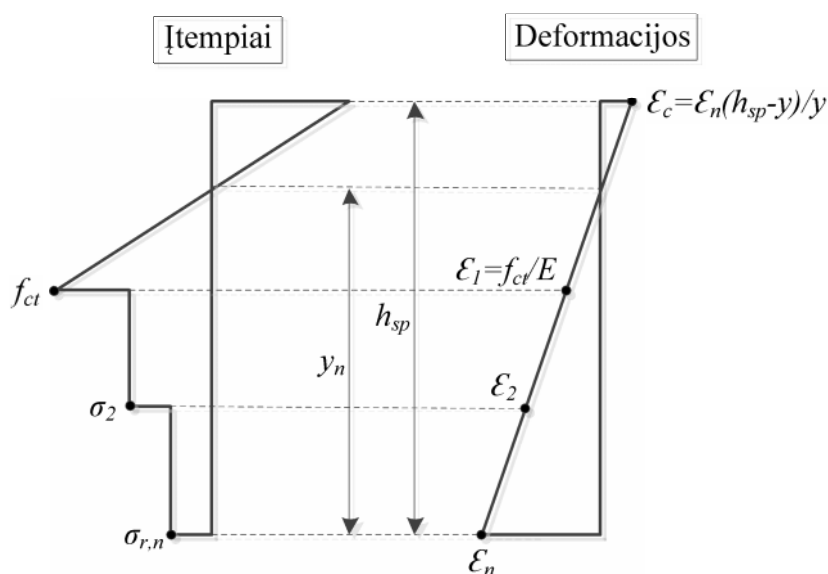
$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} = \frac{\sigma}{E} + \frac{w}{2 \cdot y}. \quad (28)$$

Apkraunant elementą neutraliosios ašies padėtis nuolat kinta, atstumas y yra nepastovus ir nuolat didėja (Robins ir kt. 2001), todėl turi būti apskaičiuojamas kiekvienu apkrovimo žingsniu. Keičiantis neutraliosios ašies padėčiai atitinkamai keičiasi ir įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje. Veriantis plyšiui, plaušas yra ištraukiamas, todėl dispersiškai armuotas betoninis elementas gali atlaikyti vis mažesnius tempimo įtempius. Efektyviausiai tempimo įtempiai perduodami per plyšyje išsidėsčiusį plaušą ties neutraliąja ašimi (Kratky ir kt. 2009). Dėl šių priežasčių, skirtingai nei Rilem TC162-TDF metodu (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002), autoriaus siūlomu algoritmu, elementui pleišėjant, liekamieji įtempiai nustatomi kiekvienu apkrovos žingsniu (žr. 27 pav.).



27 pav. Įtempių ir deformacijų diagrama autoriaus siūlomu metodu

Pagal siūlomo modelio prielaidas sudaromos įtempių ir deformacijų pasiskirstymo diagramos supleišėjusio elemento skerspjūviui (žr. 28 pav.). Užrašomos jėgų ir lenkimo momentų statinės pusiausvyros lygtys (žr. 9 ir 10 formules).



28 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas supleišėjusiame dispersiškai armuoto betono skerspjūvyje

Jėgų statinės pusiausvyros lygtis:

$$\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_n \cdot E \cdot \frac{(h_{sp} - y_n)^2}{y_n} = \frac{f_{ct}^2 \cdot y_n}{2 \cdot E \cdot \varepsilon_n} + \frac{\left(\varepsilon_2 - \frac{f_{ct}}{E}\right)}{\varepsilon_n} \cdot y_n \cdot \sigma_2 + \frac{(\varepsilon_n - \varepsilon_2)}{\varepsilon_n} \cdot y_n \cdot \sigma_{r,n}; \quad (29)$$

Lenkimo momentų apie neutraliąją ašį statinės pusiausvyros lygtis:

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon_n \cdot E}{3} \cdot \frac{(h_{sp} - y_n)^3}{y_n} + \frac{f_{ct}^3 \cdot y_n^2}{3 \cdot E^2 \cdot \varepsilon_n^2} + \frac{\varepsilon_2 - \frac{f_{ct}}{E}}{\varepsilon_n} \cdot y_n \cdot \sigma_2 \cdot \left(\frac{f_{ct} \cdot y_n}{E \cdot \varepsilon_n} + \frac{\varepsilon_2 - \frac{f_{ct}}{E}}{2 \cdot \varepsilon_n} \right) + \\ & + \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_2}{\varepsilon_n} \cdot y_n \cdot \sigma_{r,n} \cdot \left(\frac{\varepsilon_2 \cdot y_n}{\varepsilon_n} + \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_2}{\varepsilon_n} \cdot y_n \right) = \frac{P_n \cdot L}{4 \cdot b}. \end{aligned} \quad (30)$$

Vienas iš pagrindinių šio metodo nežinomųjų, t.y. neutraliosios zonos aukštis, apskaičiuojamas iš liekamųjų įtempių išraiškos, gautos iš lenkimo momentų ir jėgų statinės pusiausvyros lygčių (žr. 31 formulę). Pateikta išraiška pritaikyta nustatyti bet kokio n žingsnio neutraliosios zonos aukštį y_n . Pagrindinis skaitinio modelio parametras – liekamieji įtempiai – nustatomas iš jėgų statinės pusiausvyros lygties (žr. 32 formulę). Sudarant minėtas lygtis, kiekvienu apkrovos žingsniu įvertinamas įtempių persiskirstymas elemente. Skaičiuojant liekamuosius įtempius antrojo ir tolimesnių apkrovos žingsnių metu, sumažėja tempiamojo betono stiprio poveikis, todėl gaunamos tikslesnės liekamųjų įtempių reikšmės.

Iš (29) ir (30) formulių nustatoma liekamųjų įtempių išraiška:

$$\begin{aligned} \sigma_{r,n} &= \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_n^2 \cdot E \cdot \left(\frac{h_{sp} - y_n}{y_n} \right)^2 - \frac{f_{ct}^2}{2 \cdot E} - \left(\varepsilon_2 - \frac{f_{ct}}{E} \right) \cdot \sigma_2 - \sum_{i=3}^n (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) \cdot \sigma_{r,n} = \\ &= \frac{\frac{P_n \cdot L \cdot \varepsilon_n^2}{4 \cdot b \cdot y_n^2} - \frac{\varepsilon_n^3 \cdot E}{3} \cdot \left(\frac{h_{sp} - y_n}{y_n} \right)^3 - \frac{f_{ct}^3}{3 \cdot E^2} - \left(\varepsilon_2 - \frac{f_{ct}}{E} \right) \cdot \frac{\sigma_2}{2} \cdot \left(\frac{f_{ct}}{E} + \varepsilon_2 \right) - \sum_{i=3}^n (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) \cdot \frac{\sigma_{r,n}}{2} \cdot (\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n)}{\frac{\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n}{2}}. \end{aligned} \quad (31)$$

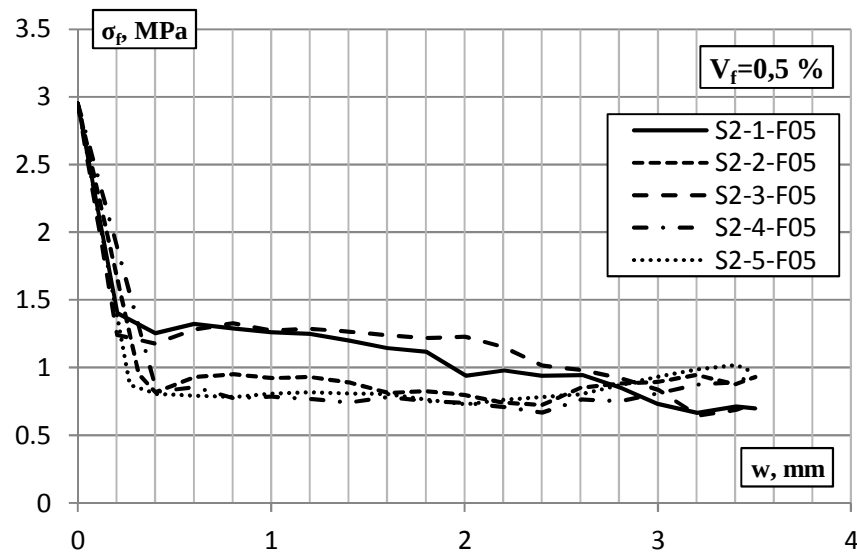
Iš (29) formulės nustačius neutraliosios zonos aukštį, apskaičiuojamas liekamųjų įtempių dydis:

$$\varepsilon_n \cdot E \cdot \frac{(h_{sp} - y_n)^2}{2 \cdot y_n} - \frac{f_{ct}^2 \cdot y_n}{2 \cdot E \cdot \varepsilon_n} - \left(\varepsilon_2 - \frac{f_{ct}}{E} \right) \cdot y_n \cdot \sigma_2 - \frac{y_n}{\varepsilon_n} \cdot \sum_{i=3}^n (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) \cdot \sigma_{r,n} = 0. \quad (32)$$

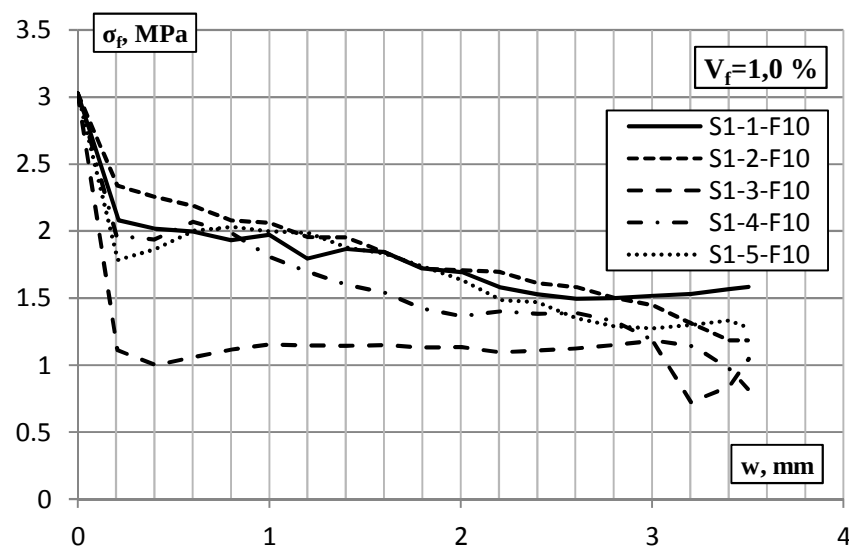
čia n – apkrovimo žingsnis; σ_2 – liekamieji įtempiai 2 apkrovimo žingsniu; $\sigma_{r,n}$ – liekamieji įtempiai n žingsniu, ε_n – elemento deformacijos n žingsniu, $\varepsilon_n = w_n / (2 \cdot y_n)$; w_n – atsiveriančio plyšio plotis n žingsniu; y_n – neutraliosios ašies aukštis n žingsniu; E – betono tamprumo modulis; h_{sp} – elemento

aukštis ties įpjova; f_{ct} – tempiamasis betono stipris; P_n – apkrova n žingsniu; L – elemento ilgis; b – elemento plotis.

Liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, taikant autoriaus siūlomą modelį nustatomos 2.3 poskyriuje aprašytoms sijoms. Liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės pateiktos 29 ir 30 paveiksluose.



29 pav. Liekamųjų įtempių ir plyšio pločio diagramos gautos taikant autoriaus siūlomą metodą 0,5 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui



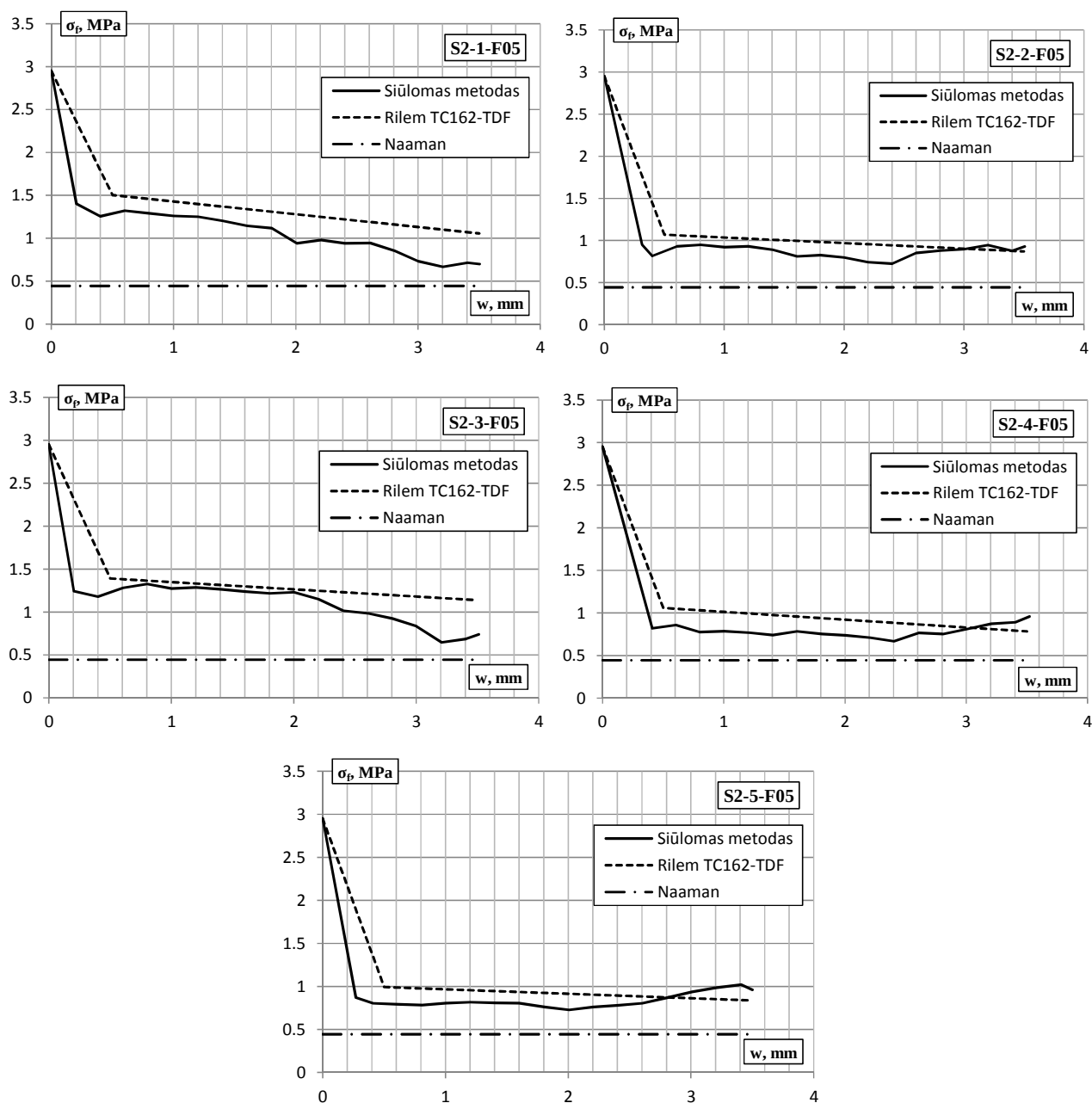
30 pav. Liekamųjų įtempių ir plyšio pločio diagramos gautos taikant autoriaus siūlomą metodą 1,0 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui

Kaip matyti iš 29 ir 30 paveikslų, gautos kintamos liekamųjų įtempių reikšmės, kurios priklauso nuo besiveriančio plyšio pločio. Kaip ir Rilem TC162-TDF metodu (Rilem TC162-TDF

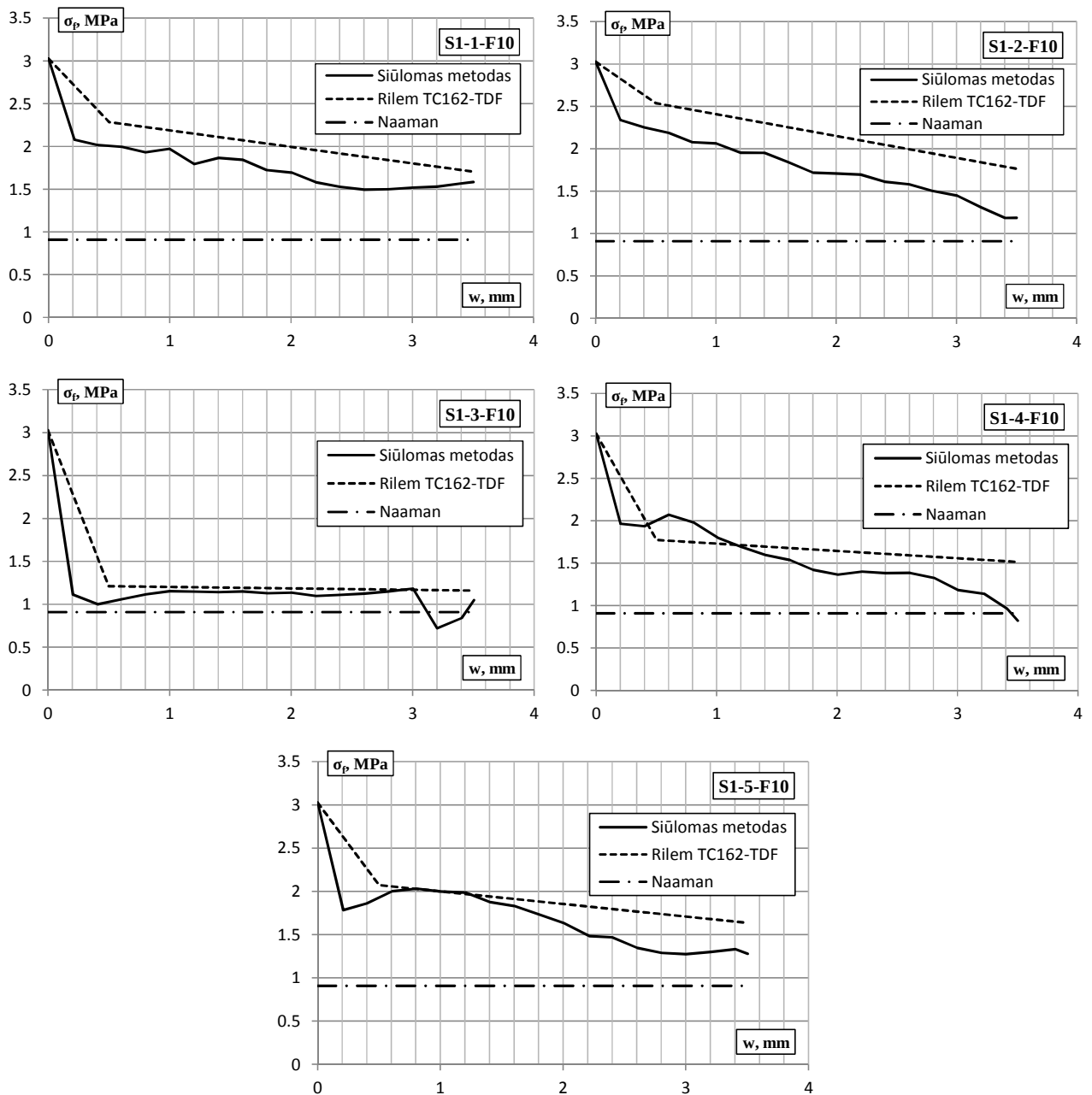
2000a, 2000b, 2002), gaunama žymi tos pačios serijos sijų liekamųjų įtempių sklaida. Rezultatų išsibarstymas atsiranda dėl netolygaus ir nevienodo plieno plaušo pasiskirstymo elemente.

2.2.4. Rezultatų palyginimas

Tyrimo metu eksperimentinėms sijoms, kurios aprašytos 2.1 poskyriuje, liekamųjų įtempių reikšmės nustatytos empirine Naamano išraiška (Naaman 2003a), Rilem TC162-TDF metodu (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002) ir autoriaus siūlomu algoritmu. Nagrinėtų metodų liekamųjų įtempių rezultatų palyginimas pateiktas 31 ir 32 paveiksluose.



31 pav. Liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybių, gautų nagrinėtais metodais, palyginimas 0,5 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui

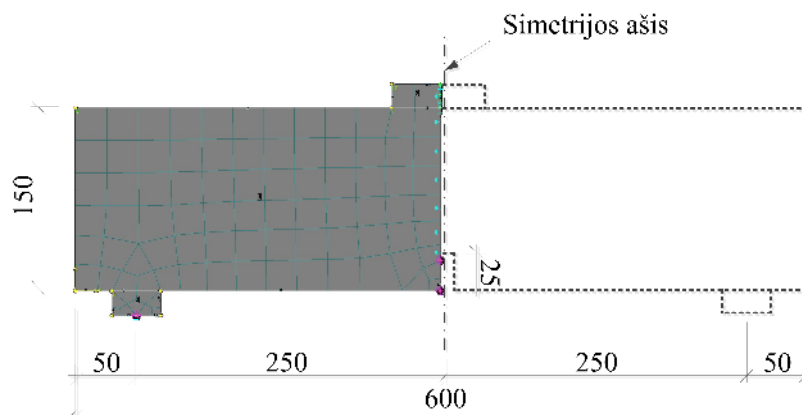


32 pav. Liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybių, gautų nagrinėtais metodais, palyginimas 1,0 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui

Kaip matyti iš 31 ir 32 paveikslų, naudojant autoriaus siūlomą metodą tiek 0,5 % plieno plaušu armuotoms sijoms, tiek ir 1,0 % liekamųjų įtempių reikšmės gaunamos gerokai didesnės už Naamano metodu (Naaman 2003a) gautas reikšmes, tačiau mažesnės nei gautos Rilem TC162-TDF metodu (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002). Išnagrinėjus rezultatus, galima teigti, kad liekamųjų įtempių dydis, gautas autoriaus siūlomu metodu, yra artimas vidutinei įtempių reikšmei, gautai panaudojus Naamano empirinę išraišką (Naaman 2003a) ir Rilem TC 162-TDF metodą (Rilem TC162-TDF 2000a, 2000b, 2002).

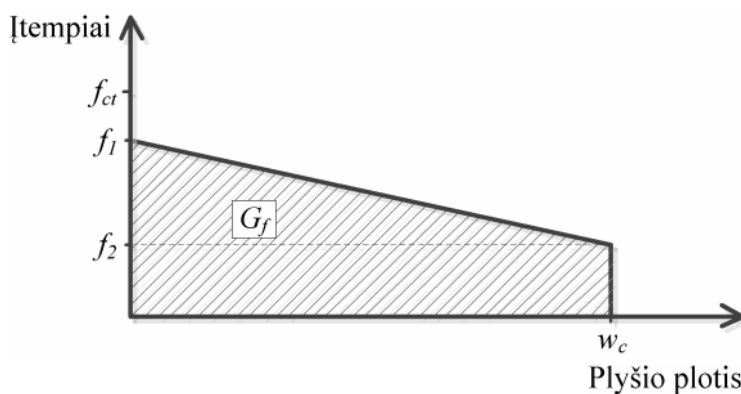
2.3. Liekamųjų įtempių nustatymo metodų analizė taikant BE programą ATENA

Skyrelyje 2.2.3. gautų liekamųjų įtempių rezultatų adekvatumui įvertinti naudojama baigtinių elementų programa ATENA. Tyrimo metu modeliuojamas standartinių sijų su įpjova lenkimo bandymas pagal Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodiką. Kadangi tiriamos sijos yra simetriškos (turi vertikalią simetrijos ašį), modeliavimo paprastumui nagrinėjama tik pusė sijos (žr. 33 pav.).



33 pav. Eksperimentinės sijos modelis BE programa ATENA

Supleišėjusių plieno plaušu armuotų sijų elgseną geriausiai apibūdina liekamojo stiprio ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės. Dėl šios priežasties modeliuojamoms sijoms užduodamos tempiamojo betono ir atsiveriančio plyšio pločio diagramos su liekamųjų įtempių reikšmėmis (žr. 34 pav.), apskaičiuotomis trimis skirtingais metodais: autorių siūlomu algoritmu, taikant Naamano empirinę išraišką (Naaman 2003a) bei Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu. Minėtos priklausomybės programai ATENA užduodamos per medžiagos irimo energijos dydį G_f (žr. 15 formulę) bei koeficientus c_1 ir c_2 , kurie nusako santykinį liekamųjų įtempių dydį tiriamo medžiagos pleišėjimo pradžioje ir pabaigoje (žr. 16 ir 17 formules).



34 pav. Tempimo įtempių ir plyšio pločio priklausomybė naudojama modeliuojant sijas BE programa ATENA

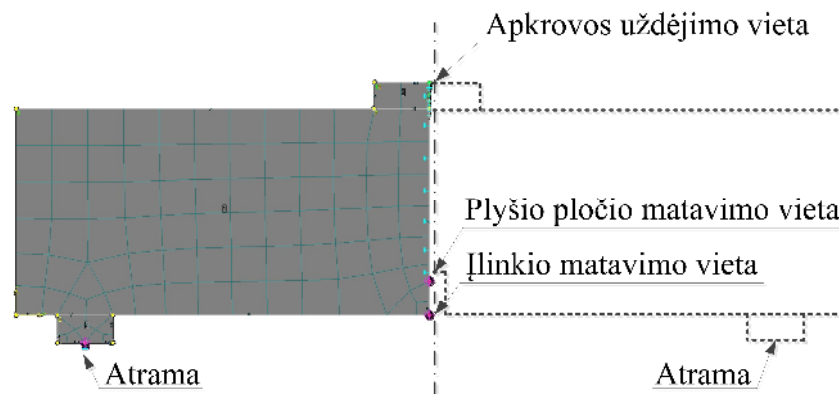
$$G_f = \frac{w_c \cdot (f_1 + f_2)}{2}; \quad (33)$$

$$c_1 = \frac{f_1}{f_{ct}}; \quad (34)$$

$$c_2 = \frac{f_2}{f_{ct}}; \quad (35)$$

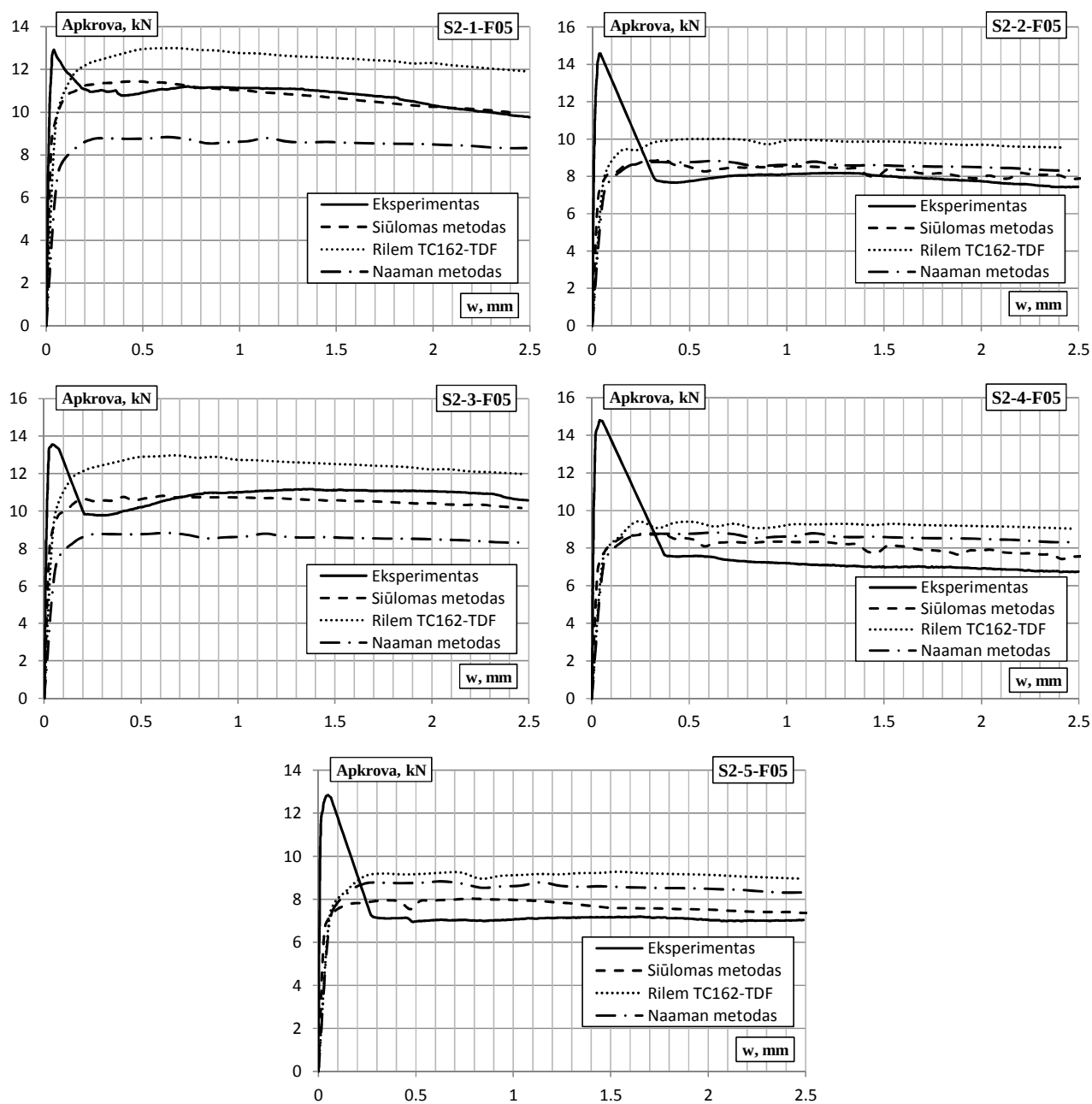
čia G_f – medžiagos irimo energija; w_c – atsiveriančio plyšio plotis; f_1 ir f_2 – liekamieji įtempiai atitinkamai tiriamo medžiagos pleišėjimo pradžioje ir pabaigoje; f_{ct} – tempiamasis betono stipris.

Vengiant įtempių koncentracijos modeliujamoje sijos dalyje, sija atremiama ir apkraunama per plokšteles iš visiškai standžios medžiagos. Sumodeliuota sijos dalis suskaidoma į baigtinius elementus ir apkraunama kontroliuojant atsiveriantį plyšio plotį. Apkrovimo procesas atliekamas palaipsniui, per 50 žingsnių. Tyrimo metu fiksuojamos apkrovos, sijos įlinkis bei atsiveriančio plyšio plotis ties įpjova (žr. 35 pav.).

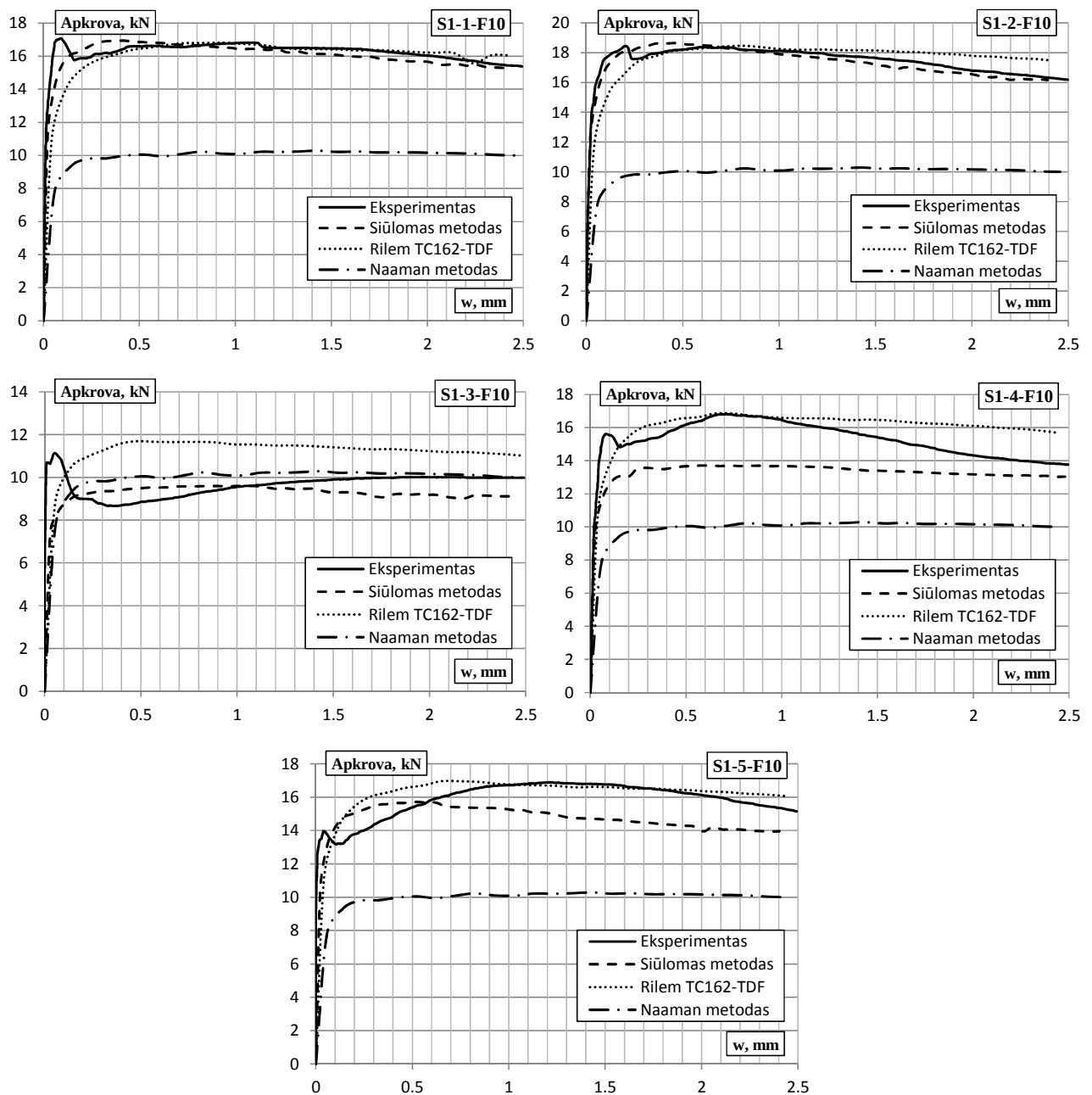


35 pav. Modeliuojamos sijos stebėjimo taškų išdėstymas

Baigtinių elementų programa ATENA sprendžiamas atvirkštinis uždavinys, kai iš supleišėjusios medžiagos elgseną aprašančios liekamųjų įtempių ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės (σ_f-w) gaunama apkrovos ir plyšio pločio priklausomybė ($P-w$). Kiekvienu nagrinėtu liekamųjų įtempių nustatymo modeliu gautos apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės palyginamos su eksperimentinėmis, gautomis atlikus bandymus pagal Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodiką (žr. 36 ir 37 pav.).



36 pav. Apkrovos ir plyšio pločio priklausomybių gautų programa ATENA palyginimas 0,5 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui



37 pav. Apkrovos ir plyšio pločio priklausomybių gautų programa ATENA palyginimas 1,0 % plieno plaušu armuotoms sijoms, skaičiuojant elemento tūriui

Kaip matyti iš 36 ir 37 paveikslų, naudojant autoriaus siūlomą bei Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodus apkrovos ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės pakankamai gerai sutapo su priklausomybėmis, gautomis eksperimentiniu būdu. Naudojant Naamano empirinę išraišką (Naaman 2003a) minėtos priklausomybės skyrėsi labiau. Gautos maksimalios 10 % paklaidos autorių pateiktu skaičiavimu, 25 % – Rilem TC162-TDF modeliu bei 35 % – Naamano modeliu.

2.4. Išvados

1. Atlikti plieno plaušu armuotų sijų su įpjova lenkimo bandymai pagal Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodiką. Išbandytos dvi bandinių serijos, po 5 sijas, armuotas 0,5 ir 1,0 % plieno plaušu elemento tūriui. Iš gautų apkrovos ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybių galime teigti, kad didėjant plieno plaušo kiekiui, prie vienodo plyšio pločio elementas atlaiko didesnes apkrovas. Tai galime sieti su supleišėjusio elemento plastiškumu, kuris tiesiogiai priklauso nuo plieno plaušo kiekio (Altun ir kt. 2007). Gaunama žymi išbandytų sijų, iš tos pačios bandinių serijos, apkrovų ir atsiveriančių plyšių pločių priklausomybių sklaida. Šis rezultatų išsibarstymas galimai atsiranda dėl netolygaus ir nevienodo plieno plaušo pasiskirstymo elemente.
2. Tyrimų metu pateiktas alternatyvus dispersiškai armuotų betoninių elementų liekamųjų įtempių nustatymo būdas, naudojant standartinių sijų bandymų rezultatus. Taikant autoriaus pateiktą metodą, liekamieji įtempiai, skirtingai nei Naamano (Naaman 2003a) ir Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodais, gali būti nustatyti kiekvienu apkrovos žingsniu, bet koku plyšio vėrimosi momentu.
3. Nagrinėtų metodų adekvatumas tikrintas baigtinių elementų programa *ATENA*. Taikant nagrinėtus metodus, gautos apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės palygintos su eksperimentiniais rezultatais. Siūlomo metodo paklaidos 3-4 kartus mažesnės, lyginant su Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) ir Naamano (Naaman 2003a) analitiniais metodais. Pateiktas liekamųjų įtempių nustatymo būdas leidžia tiksliau aprašyti ir įvertinti supleišėjusio dispersiškai armuoto betono elgseną.

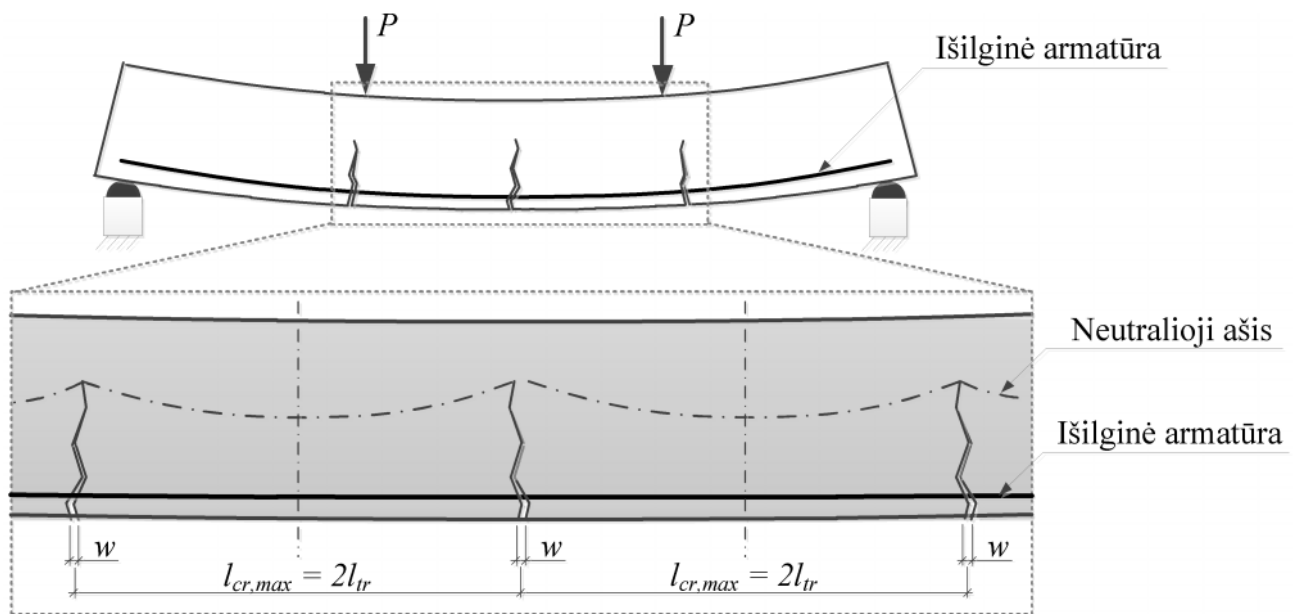
3. LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PLYŠIŲ PLOČIŲ SKAIČIAVIMAS

3.1. Plyšių pločių skaičiavimas naudojant autoriaus siūlomą metodą

Kaip ir minėta pirmajame šio darbo skyriuje, supleišėjusių plieno plaušu armuotų elementų elgseną apibūdina liekamas medžiagos stipris (Dupont 2003). Dažniausiai naudojamu metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003), skirtu dispersiškai armuotų elementų atsiveriančio plyšio pločiui nustatymui, tiesiogiai liekamas medžiagos stipris nėra vertinamas. Dėl šios priežasties šis metodas neadekvačiai įvertina atsiveriančius plyšių plotius.

Darbo autorius pasiūlė universalų metodą supleišėjusio dispersiškai armuoto betono atsiveriančių plyšių pločių nustatymui, įvertinant liekamąjį medžiagos stiprį. Siūlomas metodas paremtas diskretaus pleišėjimo idėja, kai pagrindiniai plyšiai elemente atsiveria tam tikru atstumu, kintančiu atsižvelgiant į įvairius veiksnius. Adekvatus šių veiksnių įvertinimas – vienas svarbiausių atliekamo tyrimo uždavinių. Iki šiol diskretaus pleišėjimo modelis buvo pritaikytas tik įprastai (strypine armatūra) armuotiems gelžbetoniniams elementams. Siūlomas metodas skirtas lenkiamiems tiek įprastai, tiek ir papildomai plieno plaušu armuotiems gelžbetoniniams elementams.

Diskretaus pleišėjimo modeliu, įprastai armuotam elementui, betono deformacija plyšyje yra lygi nuliui, o armatūroje pasiekia maksimalią reikšmę. Dispersinio armavimo atveju, betono deformacijas plyšyje nusako liekamieji įtempiai, kurie atsiranda dėl plyšį kertančio plieno plaušo. Toliau nuo plyšio, palaipsniui, dėl armatūros ir betono sukibimo, betonas įsijungia į elemento darbą ir perima įtempius, tenkančius armatūrai. Atstumas, nuo elemento plyšio iki pjūvio, kuriame pasiekiamas betono tempiamasis stipris, vadinamas įtempių perdavimo ilgiu l_{tr} (angl. *transfer length*). Pasiekus tempiamąjį betono stiprį, elemente atsiveria kitas plyšys, kuris elementą dalija į atskirus blokus. Atskirų blokų ilgis, t.y. atstumas tarp plyšių l_{cr} , yra neapibrėžtas, tačiau turi patekti į tam tikrus rėžius: $l_{tr} < l_{cr} \leq 2l_{tr}$ (žr. 38 pav.) Susiformavus pagrindiniams plyšiams elemente, didinant apkrovą auga tik plyšių plotis, kadangi elementas jau būna suskilęs į blokus, kurių ilgis yra mažesnis kaip du įtempių perdavimo ilgiai.



38 pav. Plyšių pasiskirstymas lenkiamame elemente

Siūlomu metodu atsiveriančių plyšių plotis nustatomas analogiškai egzistuojantiems Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003), Model Code MC2010 ar Euronotmų (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodams:

$$w = \int_0^{l_{cr}} [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] dx, \quad (36)$$

čia ε_s – armatūros deformacijos; ε_c – betono deformacijos; l_{cr} – atstumas tarp plyšių.

Maksimaliam, vidutiniam ar minimaliam plyšio pločiui nustatyti naudojamos atstumo tarp plyšių reikšmės l_{cr} , kurios lygios atitinkamai:

$$l_{cr,max} = 2 \cdot l_{tr}; \quad (37)$$

$$l_{cr,vid} = 1,5 \cdot l_{tr}; \quad (38)$$

$$l_{cr,min} = l_{tr}. \quad (39)$$

Vienas iš pagrindinių skirtumų tarp siūlomo ir įprasto diskrečių plyšių metodų – įtempių perdavimo ilgio l_{tr} skaičiavimas. Įprastu diskrečių plyšių metodu strypine armatūra armuotiems lenkiamiems elementams, atstumas, kuris reikalingas tempiamajam betono stipriui pasiekti, nustatomas iš ašinių jėgų betne lygčių:

Ašinė jėga, kurią armatūra perduoda betonui, išreiškiama per šlyties įtempius, kurie yra pastovūs visoje armatūros ir betono sąlyčio zonoje $\tau(x) = \text{const}$.

$$N_c(x) = \int_0^x n \cdot \pi \cdot \phi \cdot \tau(x) dx = n \cdot \pi \cdot \phi \cdot \tau \cdot \int_0^x dx = n \cdot \pi \cdot \phi \cdot \tau \cdot x \Big|_0^x = n \cdot \pi \cdot \phi \cdot \tau \cdot x; \quad (40)$$

$$n = \frac{A_s}{\frac{\pi \cdot \phi^2}{4}}; \quad (41)$$

$$N_c(x) = \frac{A_s}{\frac{\pi \cdot \phi^2}{4}} \cdot \pi \cdot \phi \cdot \tau \cdot x = \frac{4 \cdot A_s}{\phi} \cdot \tau \cdot x. \quad (42)$$

Ašinė jėga betone, išreiškiama per tempimajį betono stiprį:

$$N_c(x) = f_{ct} \cdot A_{c,eff}. \quad (43)$$

Gautos tiesės lygtys rodo, kaip pradedant nuo plyšio auga ašinė jėga betone. Žinant, kad bloko centre, kai $x = l_{tr}$, pasiekiamas betono tempiamasis stipris, sulyginus (42) ir (43) lygtys, gaunama įtempių perdavimo ilgio išraiška:

$$\frac{4 \cdot A_s}{\phi} \cdot \tau \cdot l_{tr} = f_{ct} \cdot A_{c,eff}; \quad (44)$$

$$l_{tr} = \frac{f_{ct} \cdot A_{c,eff} \cdot \phi}{4 \cdot A_s \cdot \tau} = \frac{f_{ct} \cdot \phi}{4 \cdot \tau \cdot \rho_{s,eff}}, \quad (45)$$

čia n – armatūros strypų skaičius; ϕ – armatūros strypo skersmuo; τ – armatūros ir betono sukibimo įtempiai; A_s – armatūros skerspjūvio plotas; f_{ct} – tempiamasis betono stipris; $A_{c,eff}$ – efektyvusis tempiamojo betono plotas; $\rho_{s,eff}$ – efektyvusis armavimo koeficientas.

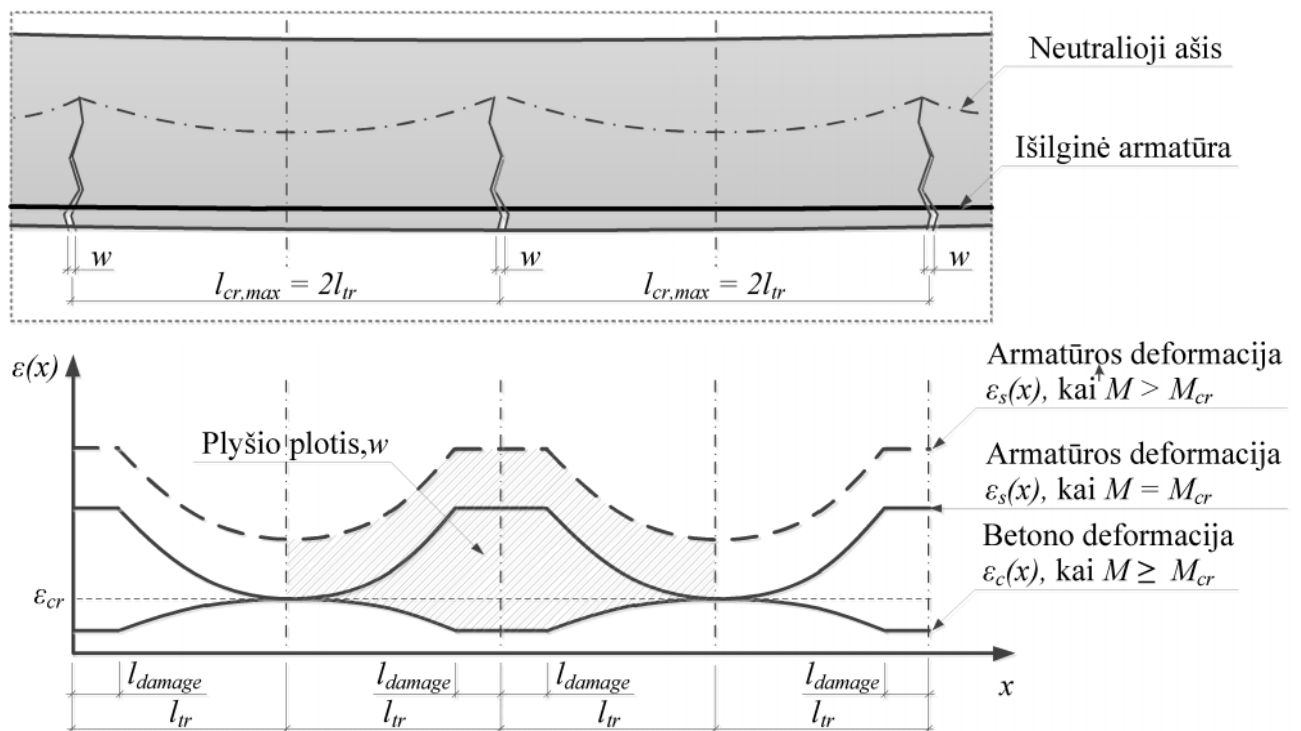
Gelžbetoniniams elementams, papildomai armuotiems plieno plaušu, dėl plyšyje veikiančių liekamųjų įtempių, tempiamasis betono stipris pasiekiamas greičiau. Dėl šios priežasties reikalingas daug mažesnis įtempių perdavimo atstumas. Dispersiškai armotų gelžbetoninių lenkiamų elementų įtempių perdavimo atstumas nustatomas pagal šią išraišką:

$$l_{tr} = \frac{(f_{ct} - f_r) \cdot \phi}{4 \cdot \tau \cdot \rho_{s,eff}}, \quad (46)$$

Tiek įprastu diskrečių plyšių metodu, tiek ir autoriaus siūlomu metodu atstumas tarp plyšių siejamas su įtempiais betone ties plyšiu, elemento efektyviojo armavimo koeficientu, armatūros styro skersmeniu bei vidutiniais armatūros ir betono sukibimo įtempiais. Šių parametrų nustatymas idealizuotomis sąlygomis galimai yra klaidingas ir neatspindi realios elemento elgsenos. Dėl šio priežasties, siekiant adekvačiai įvertinti įtempių perdavimo atstumą, autoriaus siūlomu metodu papildomai įvertinama pažeista ar ne efektyviai veikianti armatūros ir betono sąveikos zona. Įtempių perdavimo atstumas, įvertinus ne idealų armatūros ir betono sukibimą, padidinamas dydžius l_{damage} (žr. 47 formulę), kuris ir nusako pažeistos zonos ilgį (žr 39 pav.).

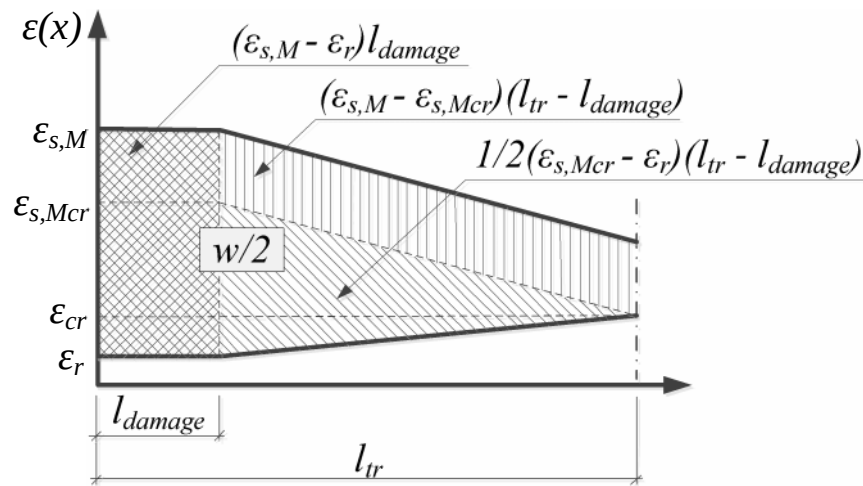
$$l_{tr} = \frac{(f_{ct} - f_r) \cdot \phi}{4 \cdot \tau \cdot \rho_{s,eff}} + l_{damage}; \quad (47)$$

čia ϕ – armatūros styro skersmuo; τ – armatūros ir betono sukibimo įtempiai; f_r – liekamieji įtempiai betone; f_{ct} – tempiamasis betono stipris; l_{damage} – pažeistos betono ir armatūros sukibimo zonos ilgis; $\rho_{s,eff}$ – efektyvusis armavimo koeficientas.



39 pav. Deformacijų pasiskirstymas ruože tarp plyšių

Grafiškai plyšio plotis nustatomas iš ploto, kurį riboja armatūros ir betono deformacijų pasiskirstymo funkcijos (žr. 40 pav.). Armatūros ir betono deformacijos nustatomos iš jėgų ir lenkimo momentų statinės pusiausvyros lygčių.



40 pav. Grafinis plyšio pločio nustatymas

Maksimalaus plyšio pločio skaičiavimui nagrinėjamas didžiausio ilgio betoninis blokas, kurio ilgis $l_{cr} = 2l_{tr}$. Kai elementą veikia lenkimo momentas lygus pleišėjimo momentui $M = M_{cr}$, maksimalus plyšio plotis nustatomas naudojant šią išraišką:

$$w_{\max} = 2 \left[(\varepsilon_{s,Mcr} - \varepsilon_r) l_{damage} + (1/2)(\varepsilon_{s,Mcr} - \varepsilon_r)(l_{tr} - l_{damage}) \right]. \quad (48)$$

Kai elementą veikia lenkimo momentas, didesnis nei pleišėjimo momentas $M > M_{cr}$, maksimalus plyšio plotis nustatomas naudojant šią išraišką:

$$w_{\max} = 2 \left[(\varepsilon_{s,M} - \varepsilon_r) l_{damage} + (\varepsilon_{s,M} - \varepsilon_{s,Mcr})(l_{tr} - l_{damage}) + 1/2(\varepsilon_{s,Mcr} - \varepsilon_r)(l_{tr} - l_{damage}) \right]. \quad (49)$$

Pagrindiniai autoriaus siūlomo plyšių pločių nustatymo metodo parametrai

Esminis autoriaus siūlomo metodo skirtumas nuo jau egzistuojančių plyšio pločio nustatymo metodų – atstumo tarp plyšių l_{cr} nustatymas. Šis dydis tiesiogiai priklauso nuo įtempių perdavimo atstumo l_{tr} . Vienas iš svarbiausių veiksnių nusakančių įtempių perdavimo ilgį – armatūros ir betono sąveiką apibūdinantys parametrai: šlyties įtempiai τ ir pažeistos betono ir armatūros sukibimo zonos ilgis l_{damage} .

Remiantis Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) rekomendacijomis vidutiniai sukibimo įtempiai yra tiesiogiai proporcingi betono tempiamajam stipriui. Šiose rekomendacijose pateikiama, kad supaprastintam armatūros ir betono sąveikos modeliavimui vidutiniai sukibimo įtempiai yra du kartus didesni už tempiamąjį betono stiprį, $\tau = 2f_{ct}$. *Model Code MC2010* plyšio pločio skaičiavimui pateikiamos šlyties įtempių reikšmės priklauso nuo elemento apkrovimo tipo bei plyšio formavimosi stadijos, $\tau = (1,35 \div 1,8)f_{ct}$. VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedros mokslininkai nustatė, kad maksimalūs sukibimo įtempiai gali būti tris kartus didesni nei tempiamasis betono stipris, $\tau = (1 \div 3)f_{ct}$.

Dėl skirtingų betono ir armatūros sukibimo įtempių interpretacijų, pateiktų nagrinėtuose plyšio pločio nustatymo metoduose, sudėtinga, remiantis empirinių modelių rekomendacijomis, adekvačiai įvertinti šlyties įtempius. Dėl šios priežasties būtina nustatyti realią tempiamojo betono stiprio ir sukibimo įtempių priklausomybę. Ši priklausomybė išreiškiama koeficientu α , kuris nustatomas iš šios išraiškos:

$$\alpha = \frac{\tau}{f_{ct}}. \quad (50)$$

Įtempių perdavimo ilgį koreguojantis koeficientas l_{damage} siejamas su neigiamą technologinių veiksnių poveikiu elemento gamybos bei eksploatavimo metu (Hoy ir Bartos 1999; Cunha ir kt. 2007). Betonavimo metu, esant horizontaliems armatūros strypams, sunkesnės užpildo dalelės leidžiasi žemyn, o susidariusios oro tuštumos kyla į viršų ir kaupiasi ties horizontaliais strypais. Dėl šios priežasties blogėja sukibimo kokybė. Prie neigiamų technologinių veiksnių priskiriama ir armatūros korozija bei temperatūros poveikis, kurie taip pat mažina betono ir armatūros sukibimą. Būtent šiuos veiksnius įvertina siūlomas įtempių perdavimo ilgį koreguojantis koeficientas l_{damage} .

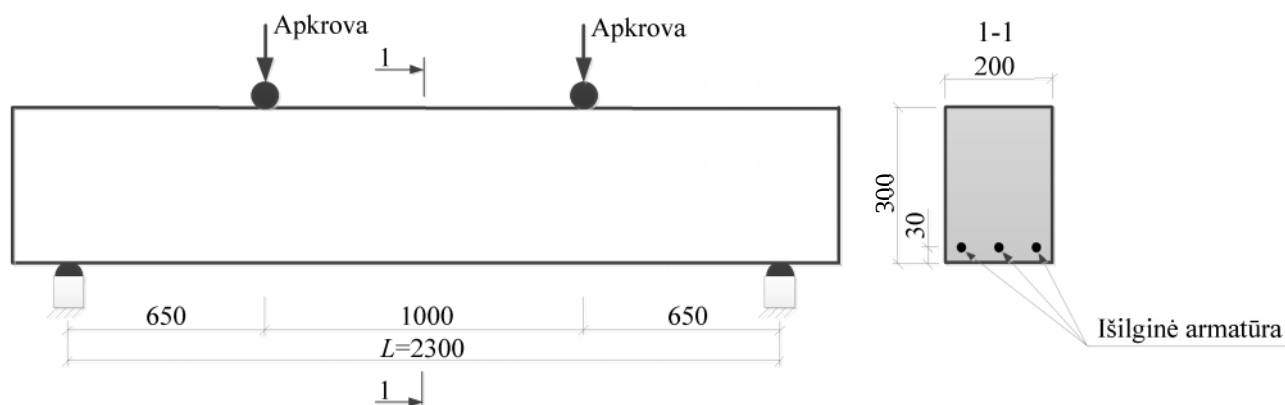
3.2. Pagrindinių autoriaus siūlomo metodo parametrų α ir l_{damage} nustatymas

Iki šiol nėra sukurtas universalus medžiagų savybėmis pagrįstas modelis, leidžiantis tiksliai aprašyti betono ir armatūros sąveiką. Dėl šios priežasties 3.1.2. skyrelyje aptarti koeficientai l_{damage} ir α , nustatomi eksperimentiniu būdu naudojant autoriaus siūlomą metodiką.

3.2.1. D. Duponto atlikti plyšių pločių nustatymo tyrimai

Šių koeficientų nustatymui naudojami eksperimentiniai lenkiamų sijų tyrimai, atlikti Leuven universitete (Belgija). Nagrinėjama 19 plieno plaušu ir strypine armatūra armuotų sijų, kurios

išbandytos veikiant dviem koncentruotoms apkrovoms (žr. 41 pav.). Visos 19 stačiakampio skerspjūvio (300 x 200 mm) sijų armuotos trimis išilginės armatūros strypais, naudojant 30 mm apsauginio betono sluoksnį.



41 pav. Nagrinėjamų sijų, apkrautų 2 koncentruotomis apkrovomis, bandymų schema

Bandinių serija pagaminta varijuojant plieno plaušo kiekiu elementuose, armatūros strypų skersmeniu bei plieno plaušo ilgio ir skersmens santykiu. Atskirai pagamintais bandiniais kiekvienai sijai nustatytas vidutinis gniuždomasis betono stipris, tempiamasis betono stipris bei supleišėjusios medžiagos elgseną apibūdinantis liekamasis stipris. Liekamasis stipris nustatomas naudojant Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) siūlomą metodiką ($f_r = 0,45f_{r1}$). Pagrindiniai eksperimentinių sijų parametrai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Pagrindiniai eksperimentinių sijų parametrai

Sija	Plieno plaušo kiekis, %	Plieno plaušo tipas	Atstumas tarp apkrovų, mm	Strypinės armatūros kiekis	f_{cm} , N/mm ²	f_{ct} , N/mm ²	f_r , N/mm ²
1	0	-	1000	3 x Ø20 mm	40,2	3,048	0
2	0,25	RC 65/60 BN	1000	3 x Ø20 mm	40,0	2,964	0,720
3	0,75	RC 65/60 BN	1000	3 x Ø20 mm	38,7	3,302	1,890
4	0	-	1000	3 x Ø16 mm	40,2	3,053	0
5	0,25	RC 65/60 BN	1000	3 x Ø16 mm	40,0	2,968	0,720
6	0,75	RC 65/60 BN	1000	3 x Ø16 mm	38,7	3,307	1,890
7	0	-	1000	3 x Ø16 mm	29,8	2,883	0
8	0,25	RL 45/50 BN	1000	3 x Ø16 mm	26,8	2,714	0,495
9	0,75	RL 45/50 BN	1000	3 x Ø16 mm	27,5	2,374	1,215
10	0	-	1000	3 x Ø20 mm	29,8	2,879	0
11	0,25	RL 45/50 BN	1000	3 x Ø20 mm	26,8	2,710	0,495
12	0,75	RL 45/50 BN	1000	3 x Ø20 mm	27,5	2,371	1,215

3.1 lentelės tęsinys

Sija	Plieno plaušo kiekis, %	Plieno plaušo tipas	Atstumas tarp apkrovų, mm	Strypinės armatūros kiekis	f_{cm} , N/mm ²	f_{ct} , N/mm ²	f_r , N/mm ²
13	0,5	RC 65/60 BN	1000	3 x Ø16 mm	48,0	3,986	1,845
14	0,5	RC 80/35 BN	1000	3 x Ø16 mm	46,0	3,816	2,205
15	0,75	RC 80/35 BN	1000	3 x Ø16 mm	50,6	4,240	2,745
16	0,5	RC 65/60 BN	1000	3 x Ø20 mm	47,4	3,726	1,800
17	0	-	1500	3 x Ø20 mm	40,0	2,964	0
18	0,25	RC 65/60 BN	1500	3 x Ø20 mm	41,2	3,556	1,035
19	0,75	RC 65/60 BN	1500	3 x Ø20 mm	40,3	3,895	2,655

čia R – plieno plaušas lenktais galais; C – blokais suklijuotas plieno plaušas; L – nesuklijuotas plieno plaušas; 65 – plieno plaušo ilgio ir skersmens santykis; 60 – plieno plaušo ilgis; B – plieno plaušas be papildomo padengimo; N – plieno plaušo tempiamasis stipris 1100 MPa.

Sijos lenkiamos presu, kuris kontroliuojamas apkrova. Bandymų metu fiksuojamos sijų deformacijos ir vidutinis atsiveriančio plyšio plotis ties tašku esančiu 10 mm virš apatinės sijos briaunos, tarp apkrovų pridėjimo vietų, t.y. pastovaus lenkimo momento zonoje. Atstumų tarp plyšių bei įtempių perdavimo ilgių reikšmės pateiktos 1.4 lentelėje. Eksperimento metu fiksuoti vidutiniai atstumai tarp plyšių, todėl įtempių perdavimo ilgis priimamas 1,5 karto mažesnis už atstumą tarp plyšių.

3.2 lentelė. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Sija	Atstumas tarp plyšių, l_{cr} , mm	Įtempių perdavimo ilgis, l_{tr} , mm
1	100	50
2	87	43,5
3	70	35
4	80	40
5	96	48
6	64	32
7	149	74,5
8	111	55,5
9	102	51
10	110	55
11	123	61,5
12	89	44,5

3.2 lentelės tęsinys

Sija	Atstumas tarp plyšių, l_{cr} , mm	Įtempių perdavimo ilgis, l_{tr} , mm
13	99	49,5
14	72	36
15	65	32,5
16	82	41
17	118	59
18	79	39,5
19	71	35,5

3.2.2. Pagrindinių autoriaus siūlomo metodo parametrų α ir l_{damage} skaitinė analizė

Pritaikius autoriaus siūlomą įtempių perdavimo atstumo l_{tr} skaičiavimo algoritmą (žr. 47 formulę), išreiškiamas pažeistos betono ir armatūros sukibimo zonos ilgis l_{damage} (žr. 51 formulę). Šia išraiška nustatoma priklausomybė tarp l_{damage} ir α parametrų.

$$l_{damage} = l_{tr} - \frac{(f_{ct} - f_r) \cdot \phi}{4 \cdot \alpha \cdot f_{ct} \cdot \rho_{s,eff}}. \quad (51)$$

Panaudojus eksperimentinių tyrimų rezultatus, atliekama skaitinė lenkiamų gelžbetoninių elementų analizė. Atsižvelgiant į 3.1 poskyriuje pateiktą informaciją, kad maksimalūs sukibimo įtempiai τ gali būti 3 kartus didesni nei tempiamasis betono stipris f_{ct} nagrinėjama riba, kai $\alpha = 1 \div 3$. Kiekvienai α reikšmei nustatomos visų nagrinėjamų sijų l_{damage} reikšmės ir apskaičiuojama gautų l_{damage} reikšmių deviacija kiekvienoje bandinių serijoje (žr. 3.3 ir 3.4 lentelėse).

3.3 lentelė. Parametrų l_{damage} ir α skaitinės analizės rezultatai ($\alpha = 1 \div 2$)

	α										
	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Sija	l_{damage} , mm										
1	-39,5	-29,8	-21,8	-15,0	-9,2	-4,1	0,3	4,2	7,7	10,8	13,6
2	-22,4	-15,1	-9,0	-3,82	0,6	4,4	7,8	10,7	13,4	15,7	17,8
3	1,3	5,4	8,8	11,7	14,2	16,4	18,3	20,0	21,4	22,7	24,0
4	-72,7	-61,3	-51,7	-43,6	-36,7	-30,7	-25,5	-20,8	-16,7	-13,0	-9,7
5	-31,5	-22,8	-15,6	-9,4	-4,2	0,4	4,3	7,8	11,0	13,7	16,3
6	-11,4	-6,4	-2,3	1,1	4,1	6,7	8,9	10,9	12,7	14,2	15,7
7	-26,7	-15,3	-5,7	2,4	9,3	15,3	20,5	25,2	29,3	33,0	36,3

3.3 lentelės tęsinys

	α										
	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Sija	$l_{damage}, \text{ mm}$										
8	-29,1	-19,7	-11,9	-5,3	0,4	5,3	9,6	13,4	16,7	19,8	22,5
9	6,4	12,0	16,7	20,7	24,0	27,0	29,5	31,8	33,8	35,6	37,2
10	-32,8	-23,2	-15,1	-8,3	-2,5	2,6	7,0	10,9	14,4	17,5	20,3
11	-4,8	3,1	9,7	15,3	20,0	24,2	27,8	31,0	33,8	36,3	38,6
12	7,6	12,3	16,2	19,5	22,4	24,8	27,0	28,9	30,6	32,1	33,5
13	-1,7	4,5	9,6	13,9	17,6	20,9	23,7	26,2	28,4	30,4	32,1
14	-5,2	-0,4	3,7	7,1	10,0	12,5	14,7	16,7	18,4	20,0	21,4
15	-1,1	2,9	6,3	9,1	11,6	13,7	15,6	17,2	18,6	19,9	21,1
16	-0,2	4,8	8,9	12,5	15,5	18,1	20,4	22,4	24,2	25,8	27,2
17	-27,5	-17,8	-9,8	-3,0	2,8	7,9	12,3	16,2	19,7	22,8	25,6
18	-22,6	-15,8	-10,1	-5,2	-1,1	2,5	5,6	8,4	10,9	13,1	15,0
19	13,5	16,6	19,2	21,3	23,2	24,8	26,2	27,5	28,6	29,5	30,4
<i>M</i>	-15,8	-8,7	-2,8	2,2	6,4	10,1	13,4	16,2	18,8	21,1	23,1
<i>s</i>	21,03	18,81	17,05	15,64	14,51	13,60	12,87	12,30	11,84	11,48	11,20

čia *s* – imties standartinis nuokrypis (deviacija); *M* – bandinių serijos vidurkis.

3.4 lentelė. Parametrų l_{damage} ir α skaitinės analizės rezultatai ($\alpha = 2 \div 3$)

	α									
	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
Sija	$l_{damage}, \text{ mm}$									
1	16,1	18,4	20,5	22,4	24,2	25,8	27,3	28,8	30,1	31,3
2	19,7	21,5	23,1	24,5	25,9	27,1	28,2	29,3	30,3	31,2
3	25,0	26,0	26,9	27,8	28,5	29,2	29,9	30,5	31,0	31,5
4	-6,7	-4,0	-1,5	0,8	2,9	4,8	6,6	8,3	9,9	11,3
5	18,5	20,6	22,5	24,2	25,8	27,3	28,6	29,9	31,1	32,2
6	16,9	18,1	19,2	20,2	21,1	21,9	22,7	23,4	24,0	24,7
7	39,3	42,0	44,5	46,8	48,9	50,8	52,6	54,3	55,9	57,3
8	24,9	27,2	29,2	31,1	32,8	34,4	35,8	37,2	38,5	39,6
9	38,7	40,0	41,2	42,4	43,4	44,3	45,2	46,0	46,8	47,5
10	22,8	25,1	27,2	29,1	30,9	32,5	34,0	35,4	36,7	37,9
11	40,7	42,6	44,3	45,8	47,3	48,6	49,9	51,0	52,1	53,1
12	34,7	35,8	36,8	37,8	38,6	39,4	40,2	40,8	41,5	42,1

3.4 lentelės tęsinys

	α									
	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
Sija	l_{damage} , mm									
13	33,8	35,2	36,6	37,8	38,9	40,0	40,9	41,8	42,7	43,4
14	22,7	23,8	24,9	25,8	26,7	27,5	28,3	29,0	29,6	30,3
15	22,2	23,1	24,0	24,8	25,6	26,2	26,9	27,5	28,0	28,5
16	28,5	29,7	30,8	31,8	32,7	33,6	34,3	35,1	35,7	36,4
17	28,1	30,4	32,5	34,4	36,2	37,8	39,3	40,8	42,1	43,3
18	16,8	18,5	19,9	21,3	22,6	23,7	24,8	25,8	26,7	27,6
19	31,2	32,0	32,6	33,3	33,8	34,3	34,8	35,3	35,7	36,1
<i>M</i>	25,0	26,6	28,2	29,6	30,9	32,1	33,2	34,2	35,2	36,1
<i>s</i>	10,99	10,83	10,71	10,63	10,58	10,55	10,54	10,55	10,56	10,59

čia *s* – imties standartinis nuokrypis (deviacija); *M* – bandinių serijos vidurkis.

Nagrinėjant 3.3 ir 3.4 lentelėse pateiktus tyrimo rezultatus, pastebima, kad esant ne dideliame tempiamojo betono stiprio ir sukibimo įtempių santykiui α , gaunamos neigiamos l_{damage} reikšmės. Tai galima paaiškinti tuo, kad esant sąlyginai mažiems sukibimo įtempiams tarp armatūros ir betono ($\alpha = 1 \div 1,4$), ženkliai padidėja teorinis idealios medžiagos įtempių perdavimo ilgis, kuris, nustatant l_{damage} reikšmę, yra atimamas iš realaus eksperimentiniu būdu gauto įtempių perdavimo atstumo.

Išanalizavus rezultatus nustatyta, kad pažeistos betono ir armatūros sukibimo zonos ilgis l_{damage} bandinių serijoje varijuoja mažiausiai ($s = 10,54$), kai $\alpha = 2,7$, ir vidutinė jo reikšmė yra $l_{damage} = 33,2$ mm. Atsižvelgiant į ne vienodus nagrinėtų sijų parametrus, gautas imties standartinis nuokrypis stebėtinai mažas, $s = 10,54$. Galima daryti prielaidą, kad l_{tr} nustatymo metodas tikslus.

3.3. Plyšių pločių skaičiavimo metodų lyginamoji analizė

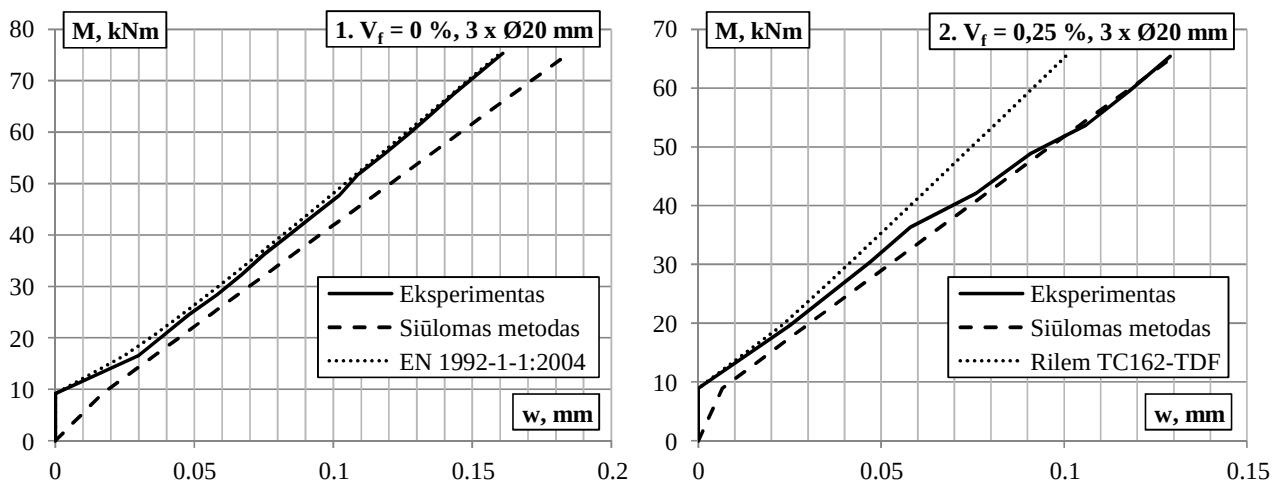
Šiame poskyriuje pateikiama skirtingų plyšių pločių skaičiavimo metodų lyginamoji analizė, kurios metu nagrinėjami lenkiamieji tiek įprastai, tiek ir papildomai plieno plaušu armuoti gelžbetoniniai elementai. Analizei naudojami šie plyšio pločio nustatymo būdai:

- Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodas;
- Autoriaus siūlomas metodas;
- Model Code MC2010 metodas;
- Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodas.

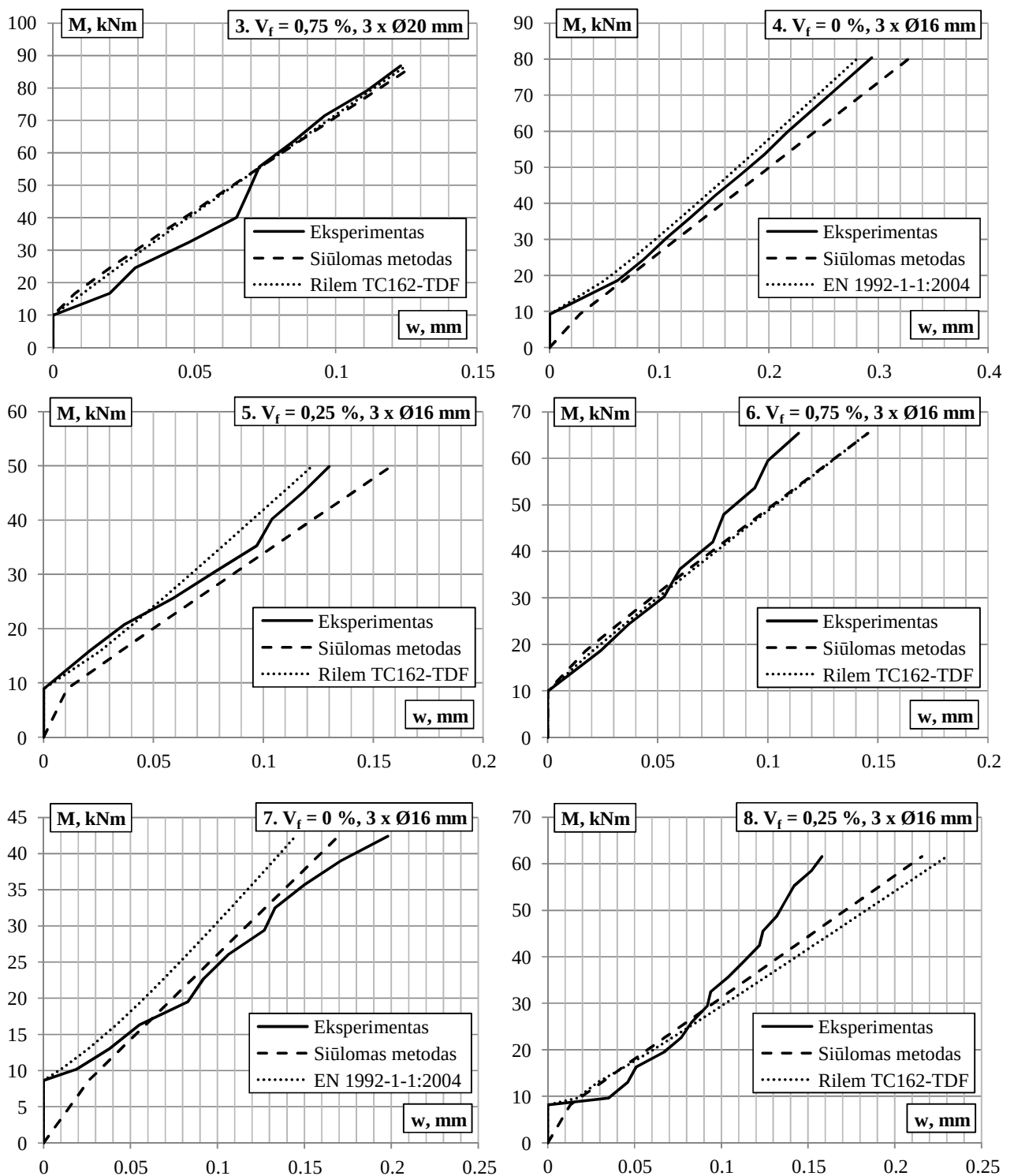
Analizės metu nustatytos plyšio pločio reikšmės palygintos su reikšmėmis, gautomis atliekant eksperimentinius bei teorinius tyrimus. Nagrinėti teorinių sijų, 3.2. poskyriuje pateiktų 19 lenkiamų sijų bei VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedros mokslo laboratorijoje atliktų 6 plieno plaušu armuotų sijų rezultatai.

3.3.1. Leuveno universitete atliktų sijų lenkimo bandymų rezultatai

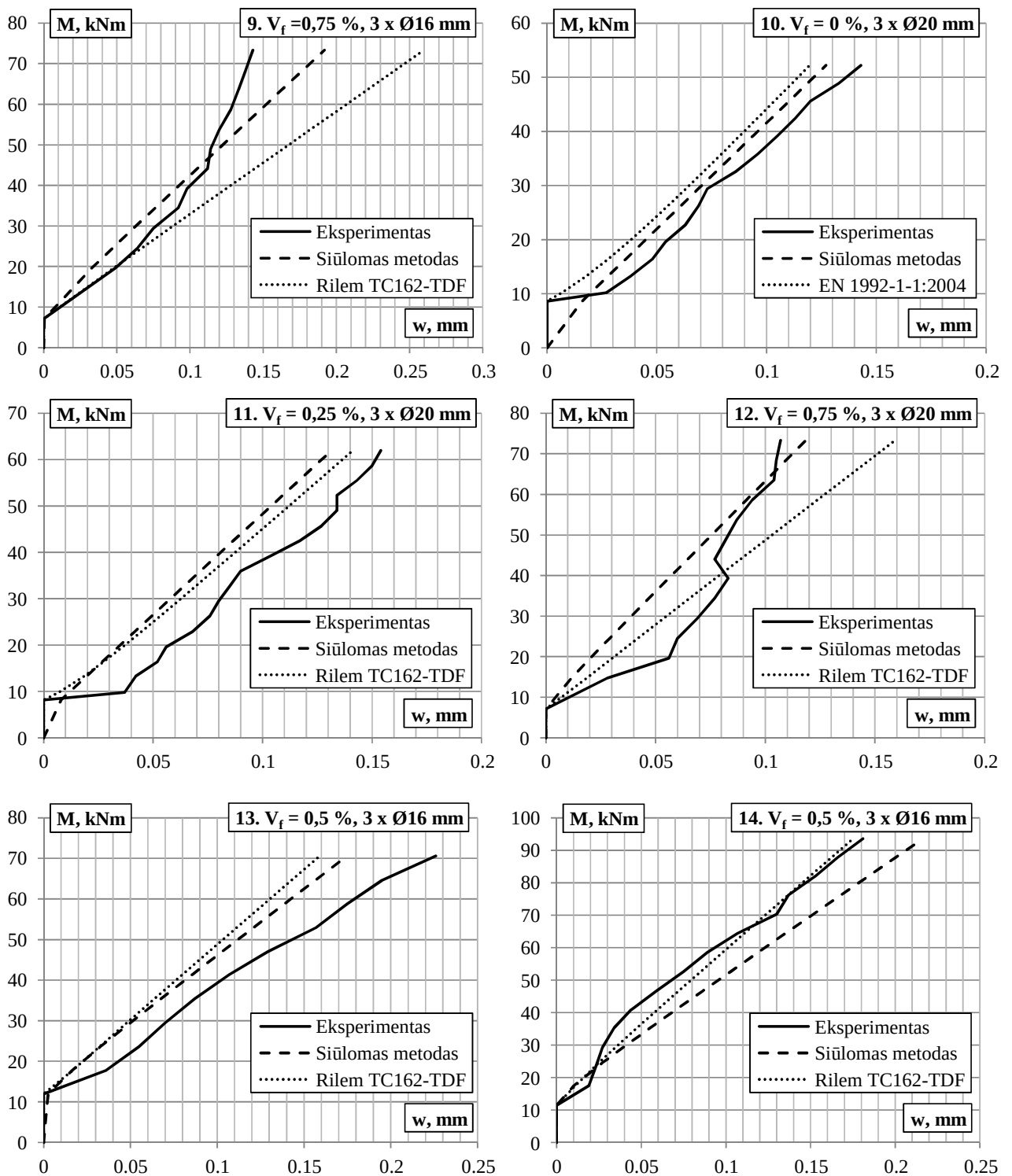
Autoriaus siūlomu metodu, pateiktu 3.1. poskyriuje, naudojant l_{damage} ir α parametrus, nustatytus iš eksperimentinių Leuven universiteto lenkiamų sijų rezultatų, gaunamos lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės. Šios priklausomybės palyginamos su priklausomybėmis gautomis Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) ir Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodais bei eksperimentiniais Leuven universiteto lenkiamų sijų rezultatais (žr. 42-45 pav). Autoriaus siūlomu metodu papildomai plieno plaušu armuotoms sijoms liekamas stipris nustatomas naudojant Rilem TC162-TDF siūlomą metodiką ($f_r = 0,45f_{r1}$). Visais atvejais nagrinėjami vidutiniai atsiveriančių plyšių pločiai, kai $l_{cr} = 1,5l_{tr}$.



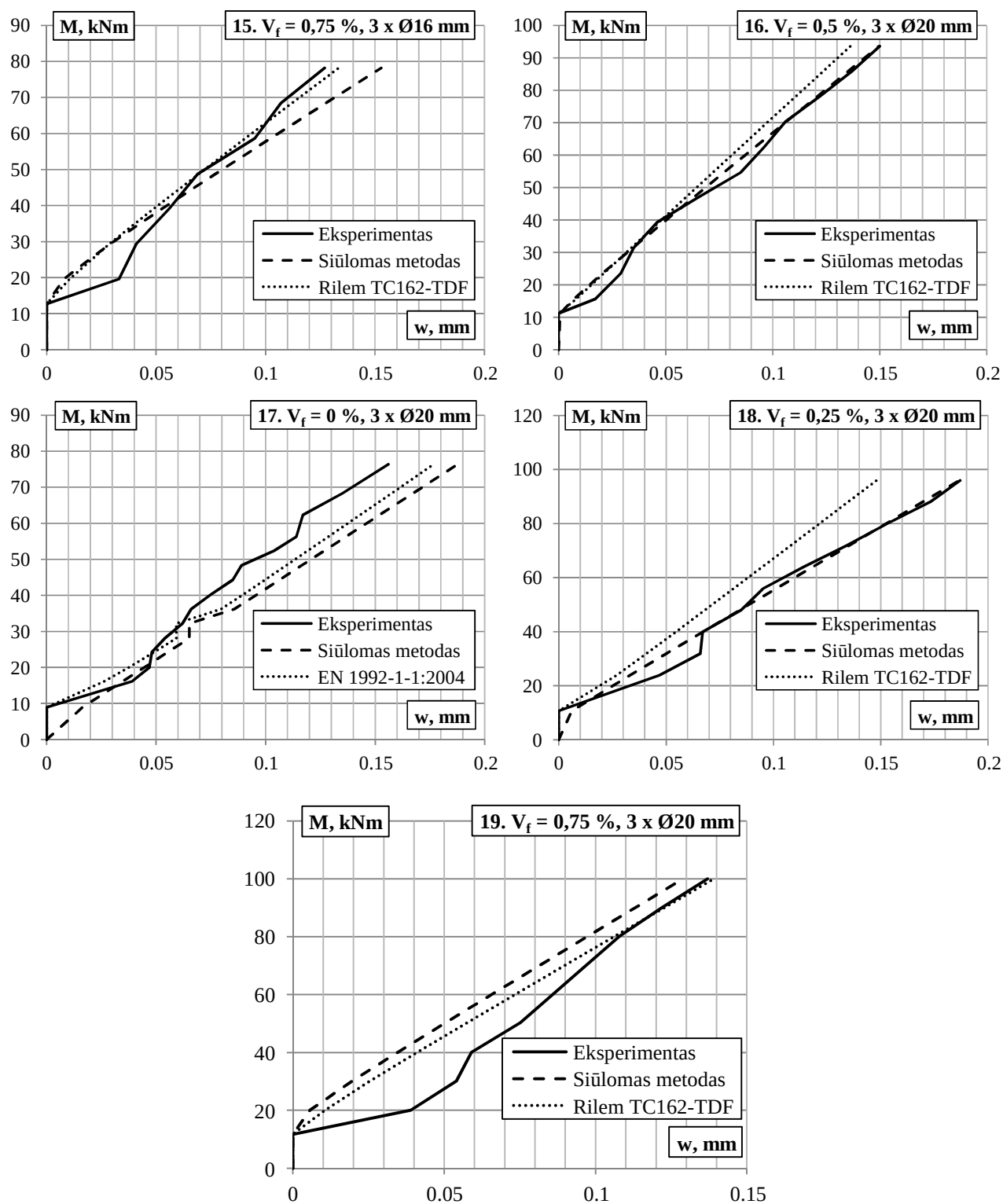
42 pav. Lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės, gautos autoriaus siūlomu metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu, Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu bei eksperimentinių tyrimų metu Leuven universitete išbandytoms 1-2 sijoms



43 pav. Lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės, gautos autoriaus siūlomu metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu, Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu bei eksperimentinių tyrimų metu Leuven universitete išbandytoms 3-8 sijoms



44 pav. Lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės, gautos autoriaus siūlomu metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu, Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu bei eksperimentinių tyrimų metu Leuven universitete išbandytoms 9-14 sijoms



45 pav. Lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės, gautos autoriaus siūlomu metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu, Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu bei eksperimentinių tyrimų metu Leuven universitete išbandytoms 15-19 sijoms

Kaip matyti iš 42-45 paveikslų, įprasta strypine armatūra armuotiems elementams atsiveriančio plyšio plotis, nustatytas autoriaus siūlomu metodu, gaunamas ne žymiai didesnis už apskaičiuotą pagal Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodą. Dėl šios priežasties, galima

teigti, kad siūlomu metodu atsiveriančio plyšio plotis įvertinamas su didesne atsarga. Autoriaus siūlomu metodu, įprastai armuotų sijų plyšių pločiai nustatyti su maksimaliomis 20% paklaidomis, kai tuo tarpu Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu gaunamos maksimalios 25% paklaidos. Nepaisant to, tiek atoriaus siūlomu metodu, tiek ir Eurokodo metodu (LST EN-1992-1-1:2005 2007), gaunamos ~13 % vidutinės plyšių pločių paklaidos. Tai leidžia teigti, jog plyšių pločiai, nustatyti šiais metodais yra pakankamai tikslūs.

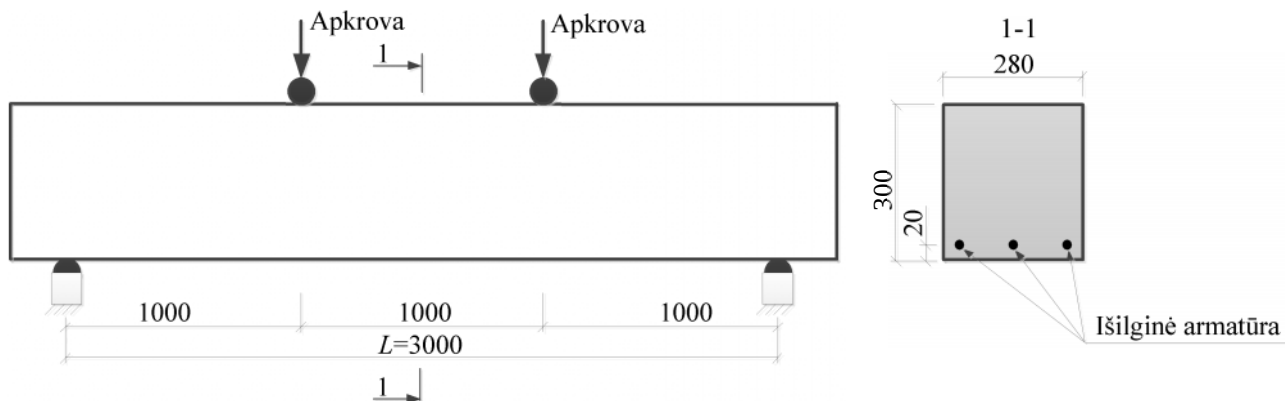
Nagrinėjant papildomai plieno plaušu armuotas sijas, atsiveriančių plyšių pločiai, autoriaus siūlomu metodu dažniausiai gaunami didesni ir tikslesni nei Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu. Siūlomu metodu nustatytos 25 % maksimalios paklaidos, Rilem TC162-TDF metodu – 45 %.

Apibendrinus rezultatus, galima teigti, kad autoriaus siūlomas atsiveriančio plyšio pločio nustatymo metodas, tiek įprastai, tiek ir papildomai plieno plaušu armuotiems gelžbetoniniams elementams, yra tikslesnis ir patikimesnis lyginant su Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) ar Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodais. Pažymėtina, kad armatūros ir betono sukibimą apibūdinantys parametrai α ir l_{damage} , kurie naudojami siūlomame metode, buvo nustatyti naudojant būtent Leuven universiteto bandytas siją, kurių rezultatai nagrinėjami šiame skyrelyje. Tikėtina, kad naudojant nustatytas α ir l_{damage} reikšmes kitai bandinių serijai, autoriaus siūlomas metodas gali būti ne toks tikslus. Dėl šios priežasties atliekamas papildomas šio metodo tyrimas, kurio metu tikrinamas jo adekvatumas.

3.3.2. Vilniaus Gedimino technikos universitete atliktų sijų lenkimo bandymų rezultatai

Šiame poskyryje tikrinamas autoriaus siūlomo metodo adekvatumas, lyginant atsiveriančių plyšių pločių reikšmes, gautas taikant siūlomą ir Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) modelius, su plyšio pločio reikšmėmis nustatytomis eksperimentiniu būdu. Siūlomo metodo skaičiavimui, pateiktam 3.2 poskyriuje, naudojami l_{damage} ir α parametrai, nustatyti iš eksperimentinių Leuven universiteto lenkiamų sijų rezultatų. Atliekamu tyrimu tikrinamas šių parametų tikslumas.

Minėtais metodais atsiveriančio plyšio plotis nustatomas sijoms, išbandytos VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedros mokslo laboratorijoje. Nagrinėjama 6 plieno plaušu ir strypine armatūra armuotos sijos, išbandytos veikiant dviem koncentruotoms apkrovoms (žr. 45 pav.). Visos 6 stačiakampio skerspjūvio (300 x 280 mm) sijos armuotos trimis Ø10 mm skersmens išilginės armatūros strypais, naudojant 20 mm apsauginio betono sluoksnį. Iš šių sijų suformuotos trys bandinių serijos su atitinkamai 0,5, 1,0, ir 1,5 % plieno plaušo kiekiu elemento tūriui. Pagrindiniai eksperimentinių sijų parametrai pateikti 3.5 lentelėje.



46 pav. Nagrinėjamų sijų, apkrautų 2 koncentruotomis apkrovomis, bandymų schema

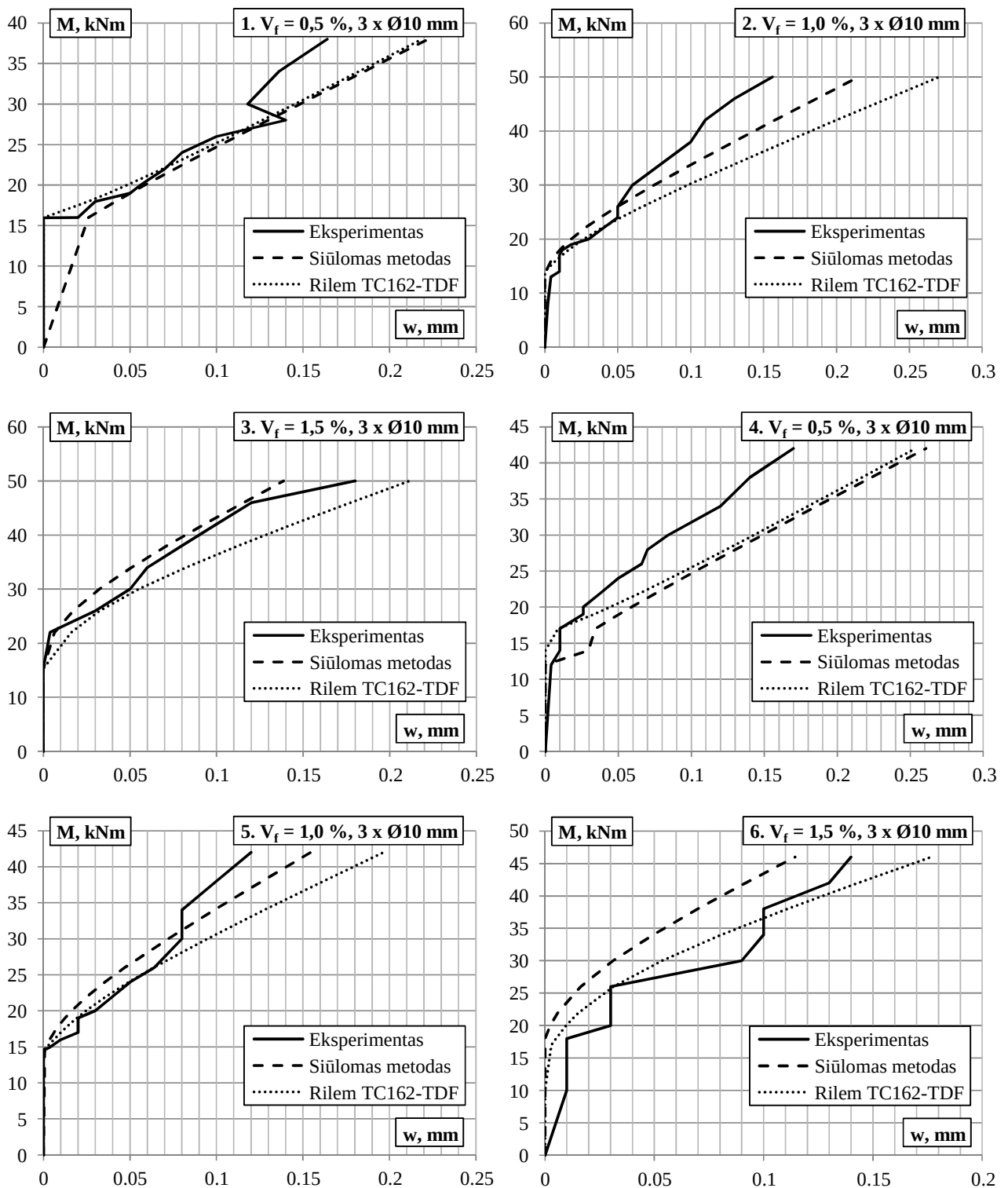
3.5 lentelė. Pagrindiniai eksperimentinių sijų parametrai

Sija	Plieno plaušo kiekis, %	Plieno plaušo tipas	Atstumas tarp apkrovų, mm	Strypinės armatūros kiekis	f_{cm} , N/mm ²	f_{ct} , N/mm ²	f_r , N/mm ²
1	0,5	RI 55 N	1000	3 x Ø10 mm	55,62	3,76	1,25
2	1,0	RI 55 N	1000	3 x Ø10 mm	47,95	3,78	2,0
3	1,5	RI 55 N	1000	3 x Ø10 mm	52,15	3,42	2,7
4	0,5	RI 55 N	1000	3 x Ø10 mm	55,62	3,99	1,25
5	1,0	RI 55 N	1000	3 x Ø10 mm	47,95	3,82	2,0
6	1,5	RI 55 N	1000	3 x Ø10 mm	52,15	3,26	2,7

čia R – plieno plaušas lenktais galais; I – plieno plaušas su įspaudais per visą plaušo ilgį; 55 – plieno plaušo ilgio ir skersmens santykis; N – plieno plaušo tempiamasis stipris 1020 MPa.

Tiek siūlomu algoritmu, tiek ir Rilem TC162-TDF metodu (Rilem TC162-TDF 2003) papildomai plieno plaušu armuotoms sijoms liekamasis stipris apskaičiuojamas pagal D. Ulbino (Ulbinas 2012) siūlomą liekamųjų įtempių nustatymo būdą, įvertinant tempiamojo sustandėjimo efektą. Liekamieji įtempiai yra lygūs 1,25 MPa, 2,0 MPa ir 2,7 MPa sijoms armuotoms atitinkamai 0,5, 1,0 ir 1,5 % plieno plaušu elemento tūriui. Visais atvejais nagrinėjami vidutiniai atsiveriančių plyšių pločiai, kai $l_{cr} = 1,5l_{tr}$.

Gelžbetoninės sijos, papildomai armuotos plieno plaušu, lenktos presu, kuris kontroliuojamas apkrova. Bandymų metu fiksuotos sijų deformacijos, įlinkiai ir atsiveriančių plyšių pločiai. Šios priklausomybės palyginamos su priklausomybėmis gautomis Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu bei eksperimentiniais VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedros mokslo laboratorijoje gautais lenkiamų sijų rezultatais (žr. 47 pav).



47 pav. Lenkimo momentų ir atsiveriančio plyšio pločio priklausomybės, gautos autoriaus siūlomu metodu, Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodu, Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) metodu bei eksperimentinių tyrimų metu VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedroje išbandytoms 1-6 sijoms

Kaip matyti iš 47 paveikslo, plieno plaušų armuotiems gelžbetoniniams elementams atsiveriančio plyšio plotis, nustatytas autoriaus siūlomu metodu, gaunamas vidutiniškai 20 % mažesnis už apskaičiuotą pagal Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodą. Dėl šios priežasties, galima teigti, kad siūlomu metodu atsiveriančio plyšio plotis įvertinamas su mažesne

atsarga. Trims iš šešių nagrinėtų sijų, autoriaus pateiktu metodu plyšių pločiai nustatyti tiksliau nei Rilem TC162-TDF metodu. Autoriaus siūlomu metodu gautos 15 % vidutinės paklaidos, Rilem TC162-TDF metodu – 35 %. Dviem sijoms abiejais nagrinėtais metodais apskaičiuoti plyšių pločių rezultatai sutapo. Vienos sijos plyšių pločiai tiksliau įvertinti Rilem TC162-TDF pateiktu skaičiavimo algoritmu.

Apibendrinus rezultatus, galima teigti, kad autoriaus siūlomas atsiveriančio plyšio pločio nustatymo metodas, kuriam naudojami l_{damage} ir α parametrai, nustatyti iš eksperimentinių Leuven universiteto lenkiamų sijų rezultatų, yra patikimesnis už Rilem TC162-TDF metodą. 3.2. poskyriuje nustatyti parametrai α ir l_{damage} yra pakankamai tikslūs ir universalūs, todėl gali būti naudojami tiek įprastai, tiek ir papildomai plieno plaušu armuotų lenkiamų gelžbetonių elementų plyšių pločių skaičiavimui.

3.4. Atstumas tarp plyšių l_{cr} lemiančių veiksnių analizė

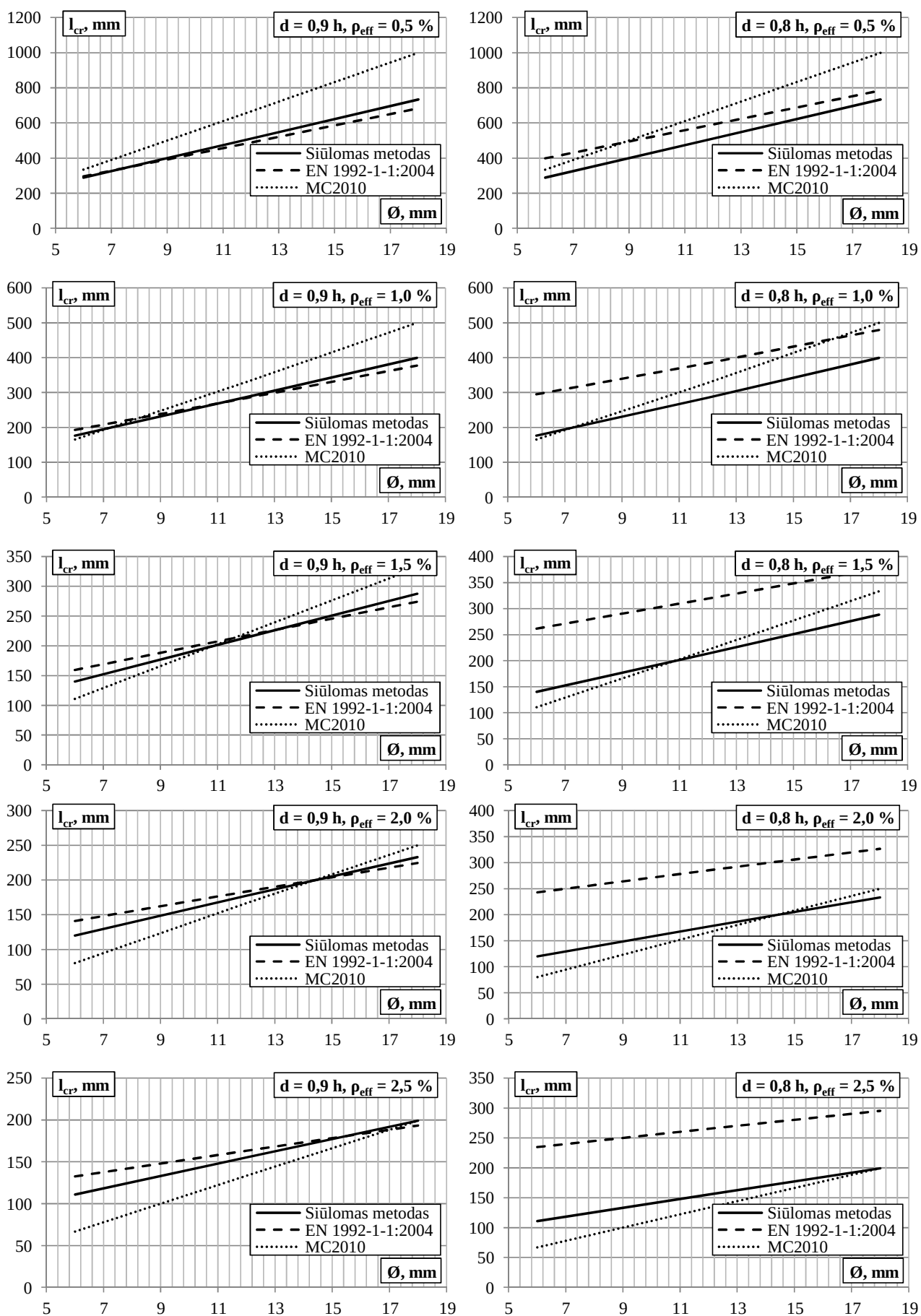
Vienas iš svarbiausių dydžių, nusakančių atsiveriančio plyšio plotį – atstumas tarp plyšių. Autoriaus siūlomu metodu šis dydis tiesiogiai susijęs su parametrais α ir l_{damage} , kurie priklauso nuo armatūros ir betono tarpusavio sąveikos. Teoriškai, siūlomų parametrų α ir l_{damage} fizikinės prasmės yra žinomos: α – santykis tarp tempiamojo betono stiprio ir sukibimo įtempių, esančių tarp armatūros ir betono; l_{damage} – pažeistos betono ir armatūros sukibimo zonos ilgis. Siūlomu metodu šie dydžiai nustatomi naudojant eksperimentinių tyrimų rezultatus ir nėra tiesiogiai susiejami su nagrinėjamų sijų charakteristikomis. Tikėtina, kad nustačius pagrindinių sijos charakteristikų daromą poveikį minėtiems parametrams, būtų galima išplėsti autoriaus siūlomo metodo pritaikymo sritis bei sumažinti rezultatų paklaidas.

Tyrimas atliekamas nagrinėjant lenkiamų gelžbetoninių sijų charakteristikų poveikį atstumui tarp plyšių l_{cr} . Analizės metu priimama, kad elemente susidaro maksimalūs plyšiai, t.y. atstumas tarp plyšių yra lygus dviem įtempių perdavimo ilgiams $l_{cr} = 2l_{tr}$. Parametrai analizuojami taikant dažniausiai naudojamus plyšio pločio skaičiavimo metodus: Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) ir Model Code (Model Code 2010) bei autoriaus siūlomą metodą. Tyrimo metu varijuojama pagrindinėmis lenkiamus gelžbetoninius elementus apibūdinančiomis charakteristikomis: tempiamos armatūros skersmeniu $\emptyset$, naudinguoju skerspjūvio aukščiu d bei efektyviuoju armavimo koeficientu ρ_{eff} . Pagrindiniai nagrinėjamų teorinių bandinių parametrai pateikti 3.6 lentelėje. Skaitinės analizės, atliktos Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007), Model Code (Model Code 2010) ir autoriaus siūlomu metodais, rezultatai pateikti 48 ir 49 paveiksluose.

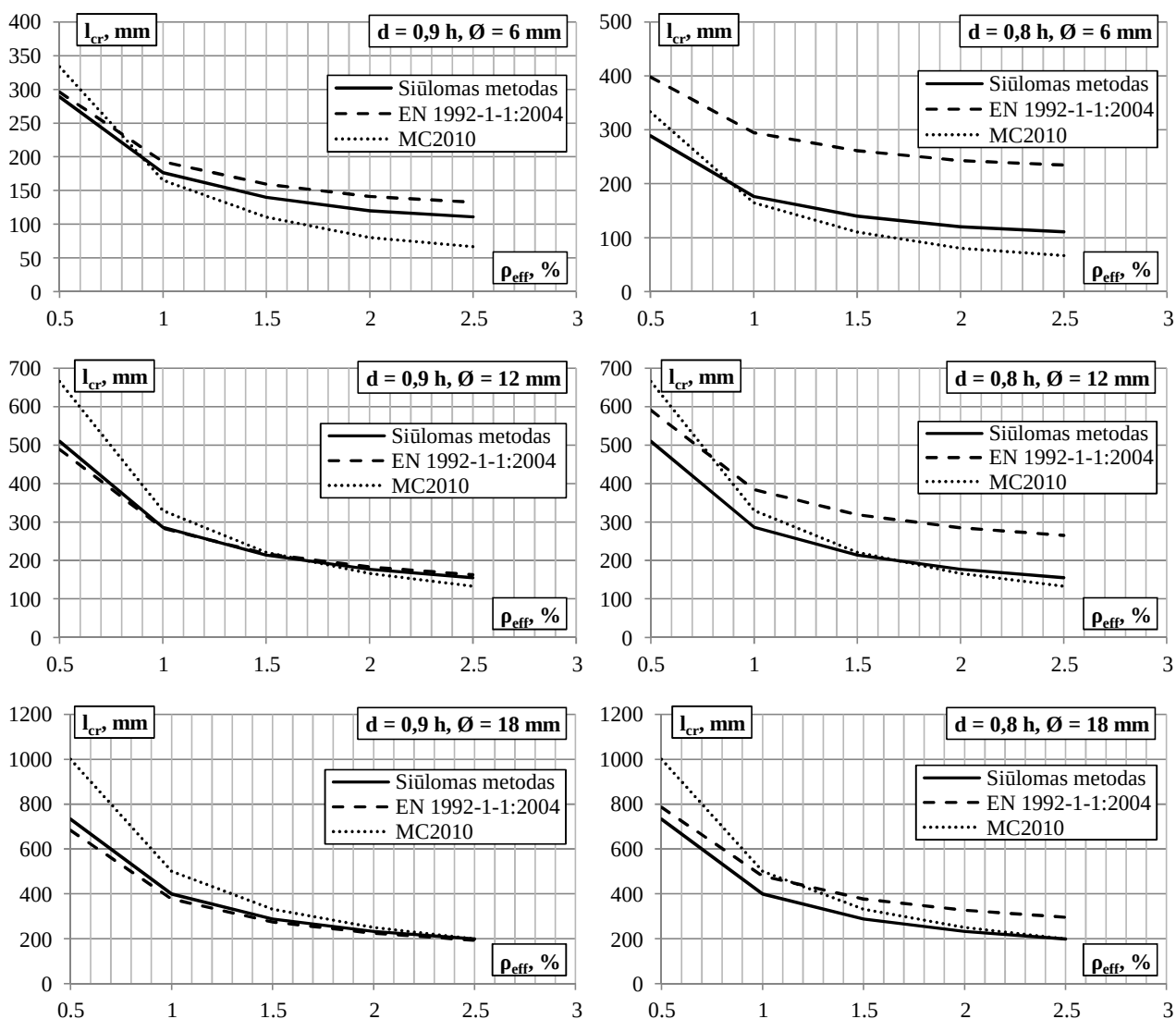
3.6 lentelė. Pagrindiniai teorinių bandinių parametrai

Sija	$\varnothing$, mm	ρ_{eff} , %	A_s , m ²	d , mm	$A_{ct,eff}$, m ²	E_c , MPa	E_s , MPa	f_{ct} , MPa	$h \times b$, mm	c , mm
1	6	0,5	$7,5 \cdot 10^{-5}$	270	0,015	$32 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$	3,6	300 x 200	27
2		1,0	$15 \cdot 10^{-5}$							
3		1,5	$22,5 \cdot 10^{-5}$							
4		2,0	$30 \cdot 10^{-5}$							
5		2,5	$37,5 \cdot 10^{-5}$							
6	12	0,5	$7,5 \cdot 10^{-5}$	270	0,015	$32 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$	3,6	300 x 200	24
7		1,0	$15 \cdot 10^{-5}$							
8		1,5	$22,5 \cdot 10^{-5}$							
9		2,0	$30 \cdot 10^{-5}$							
10		2,5	$37,5 \cdot 10^{-5}$							
11	18	0,5	$7,5 \cdot 10^{-5}$	270	0,015	$32 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$	3,6	300 x 200	21
12		1,0	$15 \cdot 10^{-5}$							
13		1,5	$22,5 \cdot 10^{-5}$							
14		2,0	$30 \cdot 10^{-5}$							
15		2,5	$37,5 \cdot 10^{-5}$							
16	6	0,5	$15 \cdot 10^{-5}$	240	0,03	$32 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$	3,6	300 x 200	57
17		1,0	$30 \cdot 10^{-5}$							
18		1,5	$45 \cdot 10^{-5}$							
19		2,0	$60 \cdot 10^{-5}$							
20		2,5	$75 \cdot 10^{-5}$							
21	12	0,5	$15 \cdot 10^{-5}$	240	0,03	$32 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$	3,6	300 x 200	54
22		1,0	$30 \cdot 10^{-5}$							
23		1,5	$45 \cdot 10^{-5}$							
24		2,0	$60 \cdot 10^{-5}$							
25		2,5	$75 \cdot 10^{-5}$							
26	18	0,5	$15 \cdot 10^{-5}$	240	0,03	$32 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$	3,6	300 x 200	51
27		1,0	$30 \cdot 10^{-5}$							
28		1,5	$45 \cdot 10^{-5}$							
29		2,0	$60 \cdot 10^{-5}$							
30		2,5	$75 \cdot 10^{-5}$							

čia $\varnothing$ – tempiamos armatūros skersmuo; ρ_{eff} – efektyvusis armavimo koeficientas; A_s – tempiamos armatūros skerspjūvio plotas; d – naudingasis skerspjūvio aukštis; $A_{ct, eff}$ – efektyvusis tempiamojo betono plotas; E_c – betono tamprumo modulis; E_s – armatūros tamprumo modulis; f_{ct} – tempiamasis betono stipris; h, b – sijos skerspjūvio aukštis ir plotis; c – betono apsauginio sluoksnio storis.



48 pav. Elementų, kurių efektyvusis armavimo koeficientas kinta nuo 0,5 % iki 2,5 %, o naudingasis skerspjūvio aukštis nuo $d = 0,8h$ iki $d = 0,9h$, atstumo tarp plyšių ir armatūros skersmens priklausomybės



49 pav. Elementų, kurių tempiamos armatūros skersmuo kinta nuo 6 mm iki 18 mm, o naudingasis skerspjūvio aukštis nuo $d = 0,8h$ iki $d = 0,9h$, atstumo tarp plyšių ir efektyviojo armavimo koeficiento priklausomybės

Iš 48 paveikslo matyti, kad egzistuoja tiesioginė priklausomybė tarp tempiamos armatūros skersmens ir atstumo tarp plyšių, neatsižvelgiant į naudingąjį elemento skerspjūvio aukštį. Visais nagrinėjamais plyšio pločio nustatymo metodais, didėjant tempiamos armatūros skersmeniui – atstumas tarp plyšių taip pat didėja. Šią priklausomybę galima paaiškinti tuo, kad didinant tempiamos armatūros skersmenį ir išlaikant pastovų tempiamos armatūros skerspjūvio plotą – mažėja armatūros strypų skaičius. Sumažėjus armatūros strypų skaičiui, armatūros ir betono sąveikos plotas taip pat sumažėja, todėl atstumas l_{tr} , reikalingas įtempių perdavimui iš armatūros į betoną, padidėja. Atstumas tarp plyšių yra tiesiogiai priklausomas nuo įtempių perdavimo ilgio ($l_{cr} = 2l_{tr}$), todėl sumažėjus armatūros ir betono sąveikos plotui, l_{cr} atitinkamai padidėja.

Nagrinėjant atvejus, kai didėja efektyviojo armavimo koeficientas išlaikant vienodą tempiamos armatūros skersmenį (žr. 49 pav.), atstumas tarp plyšių palaipsniui mažėja. Tai galima

paašškinti tuo, kad dėl didesnio betono ir armatūros sąveikos ploto, atstumas reikalingas įtempių perdavimui labiau armuotuose elementuose mažėja. Šios tendencijos pastebimos visais nagrinėjamais plyšio pločio skaičiavimo metodais.

Pastebima, kad varijuojant naudinguoju skerspjūvio aukščiu d (žr. 48-49 pav.), autoriaus siūlomą ir Model Code (Model code 2010) pateiktu metodais, gaunamos identiškos tiek $l_{cr}-\emptyset$, tiek ir $l_{cr}-\rho_{eff}$ priklausomybės. Eurokode (LST EN-1992-1-1:2005 2007) nurodytais skaičiavimais didėjant naudingajam skerspjūvio aukščiui, atstumas tarp plyšių mažėja. Šią priklausomybę galima paašškinti tuo, kad esant didesniam naudingajam skerspjūvio aukščiui, tempiamai armatūrai tenka didesnė apkrovos dalis, dėl kurios greičiau pasiekiamas tempiamasis betono stipris f_{ct} , t.y. sumažėja įtempių perdavimo atstumas l_{tr} . Kaip matyti iš 48 paveikslo, Eurokode pateiktas plyšio pločio nustatymo metodas pakankamai tiksliai įvertina atsiveriančio plyšio plotį. Tai leidžia teigti, kad atstumo tarp plyšių skaičiavimo metodai, pagal autoriaus siūlomą ir Modelio kode aprašytą algoritmus, gali būti patikslinti įvertinant naudingąjį skerspjūvio aukštį d .

Analizuojant rezultatus, matyti, kad autoriaus siūlomą metodą atstumo tarp plyšių reikšmės yra artimos reikšmėms, gautoms Eurokode ir Model Code aprašytais algoritmais. Remiantis atlikta grafine analize (žr. 48-49 pav.), galima teigti, kad Eurokodo ir Model Code skaičiavimais gautų atstumo tarp plyšių vidurkis yra artimas autoriaus siūlomą metodą apskaičiuotoms atstumo tarp plyšių reikšmėms. Tai patvirtina, kad siūlomas metodas patikimai įvertina atstumą tarp atsiveriančių plyšių, kuris lemia skaičiuojamo plyšio pločio dydį.

3.5. Išvados

1. Tyrimo metu plieno plaušu armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų atsiveriančių plyšių pločių skaičiavimui pritaikytas diskretaus pleišėjimo modelis, įvertinantis kiekvieno atskiro plyšio susidarymą. Naudojant šį modelį, pasiūlytas universalus lenkiamų gelžbetoninių elementų plyšio pločio nustatymo metodas. Pagrindiniai siūlomo metodo parametrai nustatyti remianti eksperimentiniais tyrimais, atliktais Leuven universitete. Įrodyta, jog siūlomas metodas gali būti pritaikytas lenkiamiems tiek įprastai, tiek ir papildomai plieno plaušu armuotiems gelžbetoniniams elementams.
2. Atliktos lyginamosios analizės metu nustatyta, kad autoriaus siūlomas atsiveriančio plyšio pločio nustatymo metodas tiek įprastai, tiek ir papildomai plieno plaušu armuotiems gelžbetoniniams elementams, yra tikslesnis ir patikimesnis lyginant su Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) ar Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodais. Siūlomą metodą nustatytos 20 % paklaidos, Eurokodo – 25 %, Rilem TC162-TDF – 40 %.

3. Grafinės analizės metu nustatytas pagrindinių sijos charakteristikų daromas poveikis atstumui tarp atsiveriančių plyšių. Koeficientų l_{damage} ir α reikšmės, kurios nustatytos eksperimentiniu būdu, tolesnių tyrimų metu turėtų būti tikslinamos įvertinant naudingąjį skerspjuvio aukštį d , tempiamos armatūros skersmenį $\emptyset$ bei efektyvųjį armavimo koeficientą ρ_{eff} .

BENDROSIOS IŠVADOS IR REZULTATAI

1. Tyrimų metu nustatyta, kad egzistuojantys liekamųjų įtempių skaičiavimo būdai, t.y. Naamano (Naaman 2003a), Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003), DBV Merkblatt (DBV 2001) metodai, leidžia gauti tik vidutines ($\sigma_r = \text{const.}$) ar apytikslias reikšmes. Šiais metodais gautos liekamųjų įtempių ir deformacijų priklausomybės neatspindi supleišėjusių realių matmenų konstrukcinių elementų elgsenos.
2. Autoriaus pasiūlyta skaitinė procedūra leidžia pagal eksperimentinius standartinių sijelių apkrovos ir įlinkio bei apkrovos ir plyšio pločio rezultatus nustatyti dispersiškai armuoto betono liekamuosius įtempius.
3. Baigtinių elementų programa ATENA buvo analizuoti pasiūlytojo bei kitų liekamųjų įtempių nustatymo metodų adekvatumas. Nustatyta, kad siūlomuoju metodu gautos iki 3 kartų mažesnės paklaidos nei Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) ir Naamano (Naaman 2003a) būdais. Pasiūlytasis liekamųjų įtempių nustatymo metodas leidžia tiksliau aprašyti ir įvertinti supleišėjusio dispersiškai armuoto betono elgseną.
4. Lenkiamųjų dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų plyšio pločiui skaičiuoti autorius pasiūlė modifikuotą diskretaus pleišėjimo algoritmą. Armatūros ir betono sukibimo pažeidimo zonos ilgio koncepcija atveria galimybes diskretaus pleišėjimo algoritmu adekvačiai įvertinti tiek įprastai, tiek ir dispersiškai armuotų elementų pleišėjimą.
5. Lyginamosios analizės metu ribotai eksperimentinių sijų duomenų imčiai nustatyta, kad autoriaus siūlomas atsiveriančio plyšio pločio nustatymo metodas tiek strypais, tiek ir plieno plaušu armuotiems gelžbetoniniams elementams yra tikslesnis nei Eurokodo (LST EN-1992-1-1:2005 2007) ar Rilem TC162-TDF (Rilem TC162-TDF 2003) metodai. Saičiavimo paklaida siūlomajam metodui sudarė 20 %, Eurokodui – 25 %, Rilem TC162-TDF – 40 %.

NAUDOTA LITERATŪRA

- Altun, F.; Haktanir, T.; Ari, K. 2007. Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams. *Construction and Building Materials*, 21(3): 654–661.
- ASTM A 820. 2004. *Standart Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete*, ASTM International, West Conshohocken.
- Balaguru, P. N.; Shah S.P. 1992. *Fiber Reinforced Cement Composites*. New York USA: McGraw-Hill, 530 p.
- Barros, J. A. O.; Cuncha, V. M. C. F.; Ribeiro, A. F.; Antunes, J. A. B. 2005. Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete, *Materials and Structures (Rilem)*, 38: 47–56.
- Bentur, A.; Mindess, S. 2007. *Fibre Reinforced Cementitious Composites* 2nd edition, Taylor and Francis, London and New York, 237–268.
- Brite-Euram project BRPR-CT98-0813. 2002b. Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete, *Final Report of Subtask 3.1, Section design of SFRC using a σ - ϵ approach*, ISBN 90-5682-358-2.
- Brite-Euram project BRPR-CT98-0813. 2002c. Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete, *Final Report of Subtask 4.1, Trial beams in bending and bending + compression*, ISBN 90-5682-358-2.
- Brite-Euram project BRPR-CT98-0813. 2002d. Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete, *Final Report of Subtask 3.5, Finite element analysis of SFRC structures*, ISBN 90-5682-358-2.
- Brite-Euram project BRPR-CT98-0813. 2002e. Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete, *Final Report of Subtask 7.1: Recommendations on design of SFRC*, ISBN 90-5682-358-2.
- Cachim, P.; Figueiras, J.; Pereira, P. 2002. Fatigue behaviour of fibre-reinforced concrete in compression, *Cement and Concrete Composites* 24(2): 211–217.
- Campione G. 2008. Simplified flexural response of steel fiber reinforced concrete beams. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(4): 283–293.
- Cunha, V. M. C. F.; Barros, J. A. O.; Sena-Cruz, J. M. 2007. Pullout Behaviour of Hooked-end Steels Fibers in Self-Compacting Concrete: Report 07-DEC/E06. 90 p.
- DBV (German Concrete and Construction Technology Association). DBV-Steel Fiber Reinforced Concrete. Deutscher Beton-und Bautechnik-Verein EV. 2001. (in German).
- Dupont, D. 2003. Modeling and Experimental Validation of the Constitutive Law (σ - ϵ) and Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete. Doctor dissertation, Catholic University of Leuven, 215 p.

- Frosch, R. J. 2002. Modeling and control of side face beam cracking, *ACI Structural Journal*, 99: 376–385.
- Gribniak, V. 2009. Shrinkage influence on tension-stiffening of concrete structures. PhD thesis. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University; (full-text access at <http://www.dart-europe.eu/full.php?id=182160>).
- Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Kwan, A. K. H.; Bacinskas, D., Ulbinas, D. 2012. Deriving stress-strain relationships for steel fibre concrete in tension from tests of beams with ordinary reinforcement. *Engineering Structures* 42:387–395. ISSN: 0141-0296. (ISI Web of Science)
- Hoy, C. W.; Bartos, P. J. M. 1999. Interaction and packing of fibres: Effects on the mixing process. Rilem Proceedings PRO 6, Rilem Publications. Bagneaux, 181–191.
- Jun, Z.; Stang, H. 1998. Fatigue performance in flexure of fiber reinforced concrete, *ACI Mater. J.* 95: 58–67.
- Kaklauskas, G. 2001. Integral Flexural Constitutive Model for Deformational Analysis of Concrete Structures: monograph. Vilnius: Technika. 139 p.
- Kaklauskas, G.; Ghaboussi J. 2001. Stress-strain relations for cracked tensile concrete from RC beam tests. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 127: 64–73.
- Kaklauskas, G.; Gribniak, V. 2011. Eliminating shrinkage effect from moment-curvature and tension-stiffening relationships of reinforced concrete members. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 137: 1460–1469.
- Krátký, J.; Vodička, J.; Vašková, J. 2009. Determination of Tensile Part of Fibre Concrete Stress-Strain Diagram from Bending Test Measurement, *In Proceedings 5th International Conference FIBRECONCRETE*, Prague, ISBN 978-80-01-04381-3, 167–174.
- Lietuvos standartas LST EN-1992-1-1:2005. 2007. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis: Bendrosios ir pastatų taisyklės. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas.
- Lofgren, I. 2005. Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis. Chalmers University of Technology. Göteborg. 279 p.
- Model Code. 2010. Model Code 2010 – Final draft, 2: 132–147.
- Naaman, A. E. 2003a. Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites. Rilem Workshop on High Performance Fiber reinforced Cement Composites, 95– 113.
- Naaman, A. E. 2003b. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3): 241–252.
- Nataraja M. C.; Dhang N.; Gupta, A. P. 1999. Stress-strain curves for steel fiber reinforced concrete under compression, *Cement and Concrete Composites* 21: 383–390.

- Nemegeer, D. 1996. Design guidelines for Dramix steel wire fibre reinforced Concrete, *Indian Concrete Journal* 70(10): 575-584.
- Olesen, J. F.: 2001. Fictitious crack propagation on fibre-reinforced concrete beams. *ASCE, J. of Eng. Mech.* 127(3): 272–280.
- Özcan, M.; Bayraktar, A.; Şahin, A.; Haktanir, T.; Türker, T. 2009. Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behaviour. *Construction and Building Materials*, 23(2): 1064–1077.
- Paskova, T.; Meyer, C. 1997. Low-cycle fatigue of plain and fiber-reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, 94: 273–286.
- Perumal, P.; Thanukumari, B. 2010. Seismic performance of hybrid fibre reinforced Beam Column joint, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 1(3): 749–763.
- Plizzari, G. A.; Cangiano, S.; Cere, N. 2000. Postpeak behavior of fiber-reinforced concrete under cyclic tensile loads, *ACI Mater. J.* 97: 182–192.
- Prudencio, L.; Austin, S.; Jones, P.; Armelin, H.; Robins, P. 2006. Prediction of steel fibre reinforced concrete under flexure from an inferred fibre pull-out response. *Materials and Structures (Rilem)*, 39(6): 601–610.
- Rilem TC162-TDF. 2000a. Test and design methods for steel fiber reinforced concrete. Recommendations for bending test. *Materials and Structures (Rilem)*, 33 (225): 3–5.
- Rilem TC162-TDF. 2000b. Test and design methods for steel fiber reinforced concrete. Recommendations for σ - ϵ design method. *Materials and Structures (Rilem)*, 33 (226): 75–81.
- Rilem TC162-TDF. 2001. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Uni-axial tension test for steel fibre reinforced concrete, *Materials and Structures (Rilem)*. 34: 3–6.
- Rilem TC162-TDF. 2002. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete—Final Recommendation. *Materials and Structures (Rilem)*, 35 (253): 579–582.
- Rilem TC162-TDF. 2003. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete— σ - ϵ design method Final Recommendation. *Materials and Structures (Rilem)*, 36 (262): 560–567.
- Robins, P.; Austin, S.; Chandler, J. 2001. Flexural strain and crack width measurement of steel-fibre-reinforced concrete by optical grid and electrical gauge methods, *Cement & Concrete Research*, 31: 719–729.
- Ulbinas, D. 2012. Plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų pleišėtumo ir standumo analizė. Vilnius: Technika. 98 p.
- Vandewalle, L. 2000. Cracking behaviour of concrete beams reinforced with a combination of ordinary reinforcement and steel fibers. *Materials and Structures (Rilem)*, 33(3): 164–170.