



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Vaidotas Gelažius

**ATVIRKŠTINIS PLIENO PLAUSŲ ARMUOTO BETONO LIEKAMŲJŲ
ĮTEMPIŲ MODELIS**

**THE INVERSE MODEL OF FIBRE REINFORCED CONCRETE RESIDUAL
STRESSES**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Vaidotas Gelažius

**ATVIRKŠTINIS PLIENO PLAUSŲ ARMUOTO BETONO LIEKAMŲJŲ
ĮTEMPIŲ MODELIS**

**THE INVERSE MODEL OF FIBRE REINFORCED CONCRETE RESIDUAL
STRESSES**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

(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 SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Statinių konstrukcijos studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Tiltų ir viadukų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

Nr.

Vilnius

Studentui (ei) Vaidotas Gelažius
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Atvirkstinis plieno plaušų armuoto betono latakų įtempimo modelis

patvirtinta 2012 m. 10 23 d. dekanu potvarkiu Nr. 522 st.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2013 m. 06 03 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti dispersitai armuoto betono plėtimą bei deformacijų analizę. Įvykdyti plieno plaušų armuotų latakų elementų eksperimentinę programą. Pasinaudoti supaprastuotą FRC latakų stiprų nustatymo metodu.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

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

Vadovas
(Parašas)

Hab. dr. prof. Gintaras Koldauskas
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

Vaidotas Gelažius
(Vardas, pavardė)

2012 10 23
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų,
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2011-2012 m. m.
1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vaidotas Gelažius, 20065172

(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. gegužės 25 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Atvirkštinis plieno plaušu armuoto betono liekamųjų įtempių modelis“ patvirtintas 2012 m. spalio 23 d. dekanų potvarkiu Nr. 523st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

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)

Vaidotas Gelažius

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Tiltų ir specialiųjų statinių katedra

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

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

Pavadinimas **Atvirkštinis plieno plaušu armuoto betono liekamųjų įtempių modelis**

Autorius **Vaidotas Gelažius**

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

Kalba: lietuvių

Anotacija

Magistro moksliniame darbe atliekama dispersiškai armuoto betono (Fiber reinforced concrete, FRC) pleišėjimo bei deformacijų analizė. Siūlomas eksperimentu grįstas metodas supleišėjusio FRC liktinio stiprio nustatymui.

Darbą sudaro įvadas, trys skyriai, darbo pabaigoje pateikiami pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados, literatūros sąrašas. Taip pat yra du priedai.

Įvadiniame skyriuje atskleidžiamas nagrinėjamos problemos aktualumas, formuluojami darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame aptariami pasaulyje atliktų tyrimų dispersiškai armuoto betono mechanėms savybėms nustatyti rezultatai. Atliekama šiuo metu plačiausiai naudojamų supleišėjusio FRC liktinio stiprio analizės metodų apžvalga.

Antrasis skyrius skirtas pasiūlytojo liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės (σ - w) nustatymo metodo aprašymui.

Trečiajame skyriuje pateikti autoriaus atliktos eksperimentinės programos rezultatai. Taikant pasiūlytą metodą, nustatomas tiriamojo FRC eksperimentinių sijų liekamasis stipris ir palyginamas su rezultatais, gautais taikant RILEM TC-162 TDF metodiką. Atliekama baigtinių elementų analizė pasiūlytojo metodo adekvatumui įrodyti. Skyriaus pabaigoje aptariami darbo metu gauti rezultatai, formuluojamos išvados.

Pasiūlyto metodo taikymo pavyzdys pateikiamas pirmame priede. Antrame priede galima susipažinti su trečiajame skyriuje neaprašytų eksperimentinių sijų matavimo bei analizės rezultatais.

Prasminiai žodžiai

dispersiškai armuotas betonas, FRC, SFRC, liekamasis stipris, liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybė, atvirkštinio uždavinio sprendimo metodas.

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 **The Inverse Model of Fibre Reinforced Concrete Residual Stresses**

Author **Vaidotas Gelažius**

Academic supervisor **Prof Dr Habil Gintaris Kaklauskas**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

Master of Science work carried out fiber reinforced concrete (FRC) cracking and deformation analysis. The inverse technique was proposed for determination of residual stress of cracked FRC in tension.

Final work consist of introduction, three Chapters, at the end of the work presented general results and a conclusions are given. Also enclosed two annexes.

Topicality of the problem, aims and tasks of the work, scientific novelty are discussed in the introduction.

The first Chapter covers literature review on different steel fibre reinforced concrete mechanical properties research. Also reviewed the most widely used numerical and analytical methods for cracked FRC residual strength in tension.

The second Chapter describes proposed inverse technique for determination of stress-crack opening (o_{fr}-w) relation employing the experimental data.

The third Chapter presents the experimental data from three-point bending tests on notched beams. Attained residual stress-crack opening relations are compared with the post-cracking behavior, defined using RILEM technique. A nonlinear finite element analysis was utilized to verify the obtained stress-crack opening (o_{fr}-w) relation. Conclusions are formulated at the end of the Chapter.

The first Annex is designed for numerical example of the proposed inverse technique. The experimental and analytical results are shown at the second annex.

Keywords

fiber reinforced concrete, FRC, SFRC, residual stress, stress-crack opening relation, inverse technique.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
IVADAS	11
1. LITERATŪROS APŽVALGA	13
1.1. Mechaninės savybės ir medžiagų modeliai	13
1.2. Medžiagų modelių sudarymo metodai.	15
1.2.1 Rilem TC 162-TDF	16
1.2.2 DBV-Merkblatt „Stahlfaser“ metodas.....	20
1.3. Išvados	23
2. SIŪLOMAS MODELIAVIMO METODAS	24
2.1. Skaičiuojamosios schemos sudarymas	25
2.2. Liekamųjų įtempių nustatymo metodika	26
3. METODO TAIKYMAS	31
3.1. Eksperimentai	31
3.2. Eksperimentinių diagramų gavimas	31
3.3. Atvirkštinio metodu nustatytų σ_{fr-w} priklausomybių diagramos	35
3.4. Rilem TC-162 TDF metodika nustatytos σ_{fr-w} priklausomybių diagramos	37
3.5. Likutinio stiprio diagramų palyginimas, modeliavimas „ATENA“	39
IŠVADOS.....	44
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	46
A PRIEDAS. Pasiūlyto metodo taikymo pavyzdys	48
B PRIEDAS. Eksperimentų ir atliktos analizės rezultatai.....	52
B.1. Apkrovos ir plyšio pločio (P-w) eksperimentinės diagramos.....	52
B.2. Apkrovos ir įlinkio (P-f) eksperimentinės diagramos.....	55
B.3. Atvirkštinio ir Rilem metodais apskaičiuotų liekamųjų įtempių diagramos	58
B.4. Eksperimentinių ir apskaičiuotų „ATENA“ apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagramų palyginimas	61

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Tipinis plaušu armuoto lenkiamo gelžbetoninio elemento pleišėjimas (Löfgren 2005)	14
2 pav. Plieno plaušu armuoto gniuždomo betono įtempių ir deformacijų priklausomybė.....	14
3 pav. Eksperimentinių sijų 3 taškų lenkimo bandymo schema.....	17
4 pav. Ploto (D_{BZ}) nustatymo metodika	18
5 pav. $F_{R,i}$ nustatymas pagal Rilem TC 162-TDF	19
6 pav. Pataisos koeficiento (κ) nustatymas.....	19
7 pav. Rilem TC-162 TDF tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų ($\sigma-\varepsilon$) diagrama	20
8 pav. Eksperimentinių sijų 4 taškų lenkimo bandymo schema.....	21
9 pav. DBV-Merkblatt trilijinė tempiamojo plieno plaušu armuoto betono $\sigma-\varepsilon$ diagrama, taikoma tikamumo ribiniams būviams skaičiuoti.....	22
10 pav. DBV-Merkblatt dvilijinė tempiamojo plieno plaušu armuoto betono $\sigma-\varepsilon$ diagrama, taikoma saugos ribiniams būviams skaičiuoti	22
11 pav. Principinė bandymo schema	24
12 pav. Bandymų metu nustatytos apkrovos ir plyšio pločio (a) bei apkrovos ir įlinkių (b) diagramos	24
13 pav. Lenkiamo elemento schema	25
14 pav. Apkrovos (P_i) ir įlinkio (f_i) nustatymas atsižvelgiantį pasirinktuosius plyšio pločius (w_i) ..	26
15 pav. Supleišėjusiame elemente veikiančių liekamųjų įtempių pasiskirstymo schema	27
16 pav. Skaičiuojamoji schema pirmajame etape.....	27
17 pav. Skaičiuojamoji schema antrajame etape	28
18 pav. Skaičiuojamoji schema i -tajame etape.....	29
19 pav. Apskaičiuota liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybė	30
20 pav. Eksperimentinių duomenų matavimo schema	31
21 pav. Sijos S2-1-F 05 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama	32
22 pav. Sijos S2-2-F 05 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama	32
23 pav. Sijos S1-1-F 10 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama	33
24 pav. Sijos S1-2-F 10 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama	33
25 pav. Sijos S2-1-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama.....	34
26 pav. Sijos S2-2-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama.....	34
27 pav. Sijos S1-1-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama.....	35
28 pav. Sijos S1-2-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama.....	35
29 pav. Sijos S2-1-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama.....	36
30 pav. Sijos S2-2-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama.....	36

31 pav. Sijos S1-1-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama.....	37
32 pav. Sijos S1-2-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama.....	37
33 pav. Sijos S2-1-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant Rilem metodą.....	38
34 pav. Sijos S2-2-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant Rilem metodą.....	38
35 pav. Sijos S1-1-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant Rilem metodą.....	39
36 pav. Sijos S1-2-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės s diagrama, gauta taikant Rilem metodą.....	39
37 pav. Sijos S2-1-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinio uždavinio ir Rilem metodus, palyginamoji diagrama	40
38 pav. Sijos S2-2-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinio uždavinio ir Rilem metodus, palyginamoji diagrama	40
39 pav. Sijos S1-1-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinio uždavinio ir Rilem metodus, palyginamoji diagrama	41
40 pav. Sijos S1-2-F liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinio uždavinio ir Rilem metodus, palyginamoji diagrama	41
41 pav. Sijos S2-1-F 05 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų palyginimas	42
42 pav. Sijos S2-2-F 05 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų palyginimas	42
43 pav. Sijos S1-1-F 10 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų palyginimas	43
44 pav. Sijos S1-2-F 10 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų palyginimas	43
A.1 pav. Sijos S2-1-F 05 eksperimentinės apkrovos ir plyšio pločio (a) bei apkrovos ir įlinkio (b) diagramos	48
A.2 pav. Nustatyta liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybė	51
B.1 pav. Sijos S2-3-F 05 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybė	52
B.2 pav. Sijos S2-4-F 05 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybė	52
B.3 pav. Sijos S2-5-F 05 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybė	53
B.4 pav. Sijos S1-3-F 10 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybė	53
B.5 pav. Sijos S2-4-F 10 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybė	54
B.6 pav. Sijos S2-5-F 10 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybė	54
B.7 pav. Sijos S2-3-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama	55
B.8 pav. Sijos S2-4-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama	55
B.9 pav. Sijos S2-5-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama	56
B.10 pav. Sijos S1-3-F 10 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama	56
B.11 pav. Sijos S1-4-F 10 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama	57
B.12 pav. Sijos S1-5-F 10 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama	57

B.13 pav. Sijos S2-3-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinio uždavinio ir Rilem metodus, diagrama	58
B.14 pav. Sijos S2-4-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinio uždavinio ir Rilem metodus, diagrama	58
B.15 pav. Sijos S2-5-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, nustatytos taikant taikant atvirkštinio uždavinio ir Rilem metodus, diagrama.....	59
B.16 pav. Sijos S1-3-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, nustatytos taikant taikant atvirkštinio uždavinio ir Rilem metodus, diagrama.....	59
B.17 pav. Sijos S1-4-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, nustatytos taikant taikant atvirkštinio uždavinio ir Rilem metodus, diagrama.....	60
B.18 pav. Sijos S1-5-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės, nustatytos taikant taikant atvirkštinio uždavinio ir Rilem metodus, diagrama.....	60
B.19 pav. Sijos S2-3-F 05 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagramos	61
B.20 pav. Sijos S2-4-F 05 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagramos	61
B.21 pav. Sijos S2-5-F 05 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagramos	62
B.22 pav. Sijos S1-3-F 10 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagramos	62
B.23 pav. Sijos S1-4-F 10 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagramos	63
B.24 pav. Sijos S1-5-F 10 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagramos	63

IVADAS

Darbo aktualumas

XX amžiuje gelžbetonis tapo viena pagrindinių medžiagų, naudojamų statyboje, ir šiuo metu didžioji dalis statinių, ypač specialiosios paskirties (pvz, tiltų, elektrinių, užtvankų, įvairių stadionų ir t.t) yra būtent gelžbetoniniai. Didėjant betono gamybos apimtims, imta ieškoti būdų, kaip pagerinti šios medžiagos savybes. Vienas tokių būdų yra betono armavimas dispersine armatūra (angl. *Fiber reinforced concrete, FRC*). Plaušu armuotas betonas yra žymiai pranašesnis už paprastąjį dėl plastiško suirimo pobūdžio bei dispersinės armatūros gebėjimo varžyti plyšių vystymąsi. Toks armavimas gali visiškai pakeisti strypinę armatūrą konstrukciniuose elementuose kuriuose armatūra naudojama galimam pleišėjimui suvaržyti, pvz: sienų, pamatų, grindų armavimui ir pan. Dispersinė armatūra gali būti naudojama ir tradicinėse bei įtemptosiose gelžbetoninėse konstrukcijose. Plaušui suvaržius elemento pleišėjimą dėl mechaninio poveikio, suvaržyto betono susitraukimo, deformacijų bei perėmus dalį tempimo įtempių tarp plyšių, konstrukcinis elementas tampa standesnis ir jame atsiveriančių plyšių plotis kelis kartus mažesnis.

Nors dispersiškai armuotas betonas pasižymi geresnėmis eksploatacinėmis savybėmis nei paprastas, šiuo metu jis nėra plačiai taikomas. Pagrindinė priežastis – nors pasaulyje atlikta daug tyrimų plieno plaušu armuoto betono ir gelžbetonio srityje, tačiau Europos gelžbetonio projektavimo normose EN-1992-1-1:2005 iki šiol nėra dispersiškai armuotų betono ir gelžbetonio konstrukcijų projektavimą reglamentuojančių nuostatų. JAV gelžbetonio projektavimų normos ACI-544.4R-88 yra skirtos plieno plaušu armuoto betono ir gelžbetonio projektavimui, tačiau jose pateikti metodai yra dar pakankamai netikslūs (skaičiavimų rezultatai smarkiai skiriasi nuo eksperimentų) ir gali būti taikomi tik esant tam tikroms apibrėžtoms sąlygoms. Normų, reglamentuojančių konstrukcijų projektavimą naudojant sintetinį ar iš antrinių žaliavų pagamintą plaušą, šiuo metu pasaulyje nėra.

Sudėtingų konstrukcinių formų ir apkrovimo atvejais pasaulyje taikomi inžinierių atitinkamų šalių projektavimo normų metodai negali būti taikomi. Šiais atvejais konstrukcijų projektavimui gali būti taikomos netiesinės baigtinių elementų (*BE*) programos (pvz., *ATENA*), kurios įvertina netiesinę gelžbetonio elgseną. Taikant skaitinius metodus didelę įtaką skaičiavimo rezultatams turi taikomi fiziniai medžiagų modeliai. Vienas iš jų yra supleišėjusio dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių ir plyšio pločio (σ_{fr-w}) priklausomybė, kuri iki šiol yra mažai ištirta. Šiame darbe pasiūlytas metodas σ_{fr-w} nustatymui.

Tyrimų objektas

Darbe atliekama lenkiamos plieno plaušu armuotos sijos pleišėjimo bei deformacijų analizė. Objektas tiriamas makrolygiu, t.y. plaušu armuotas betonas nagrinėjamas kaip homogeninė medžiaga.

Sudaromas lenkiamo elemento modelis ir išsprendžiamas atvirkštinis uždavinys remiantis eksperimentiniais rezultatais, kurio metu apskaičiuojama supleišėjusio betono įtempių ir plyšio pločio (σ_{fr-w}) priklausomybė.

Darbo tikslas

Pasiūlomas skaitinio modeliavimo metodas, paremtas lenkiamos sijos eksperimentiniais rezultatais, kuris leidžia nustatyti dispersiškai armuoto supleišėjusio betono įtempių ir plyšio pločio (σ_{fr-w}) priklausomybę.

Darbo uždaviniai

Tiksliui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti skirtingų metodų, naudojamų plieno plaušu armuoto betono liekamojo stiprio nustatymui, analizę.
2. Sukurti algoritmą supleišėjusio dispersiškai armuoto betono liekamojo stiprio nustatymui.
3. Atlikti plieno plaušu armuotų lenkiamų elementų eksperimentinę programą.
4. Taikiant sukurtąjį algoritmą apskaičiuoti eksperimentinių sijų liekamąjį stiprį ir palyginti su rezultatais, gautais naudojant kitų autorių pasiūlytus metodus.
5. Panaudojant *BE* programą „*ATENA*“, sukurti analogišką eksperimentui modelį ir atlikti analizę panaudojant gautą σ_{fr-w} diagramą *FRC* modeliavimui. Palyginti rezultatus su eksperimentiniais.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Europos gelžbetonio projektavimo normose EN-1992-1-1:2005 iki šiol nėra dispersiškai armuotų betono ir gelžbetonio konstrukcijų projektavimą reglamentuojančių nuostatų ir supleišėjusio tempiamo betono netiesinės liekamųjų įtempių ir plyšio pločio (σ_{fr-w}) priklausomybės nustatymo metodų.

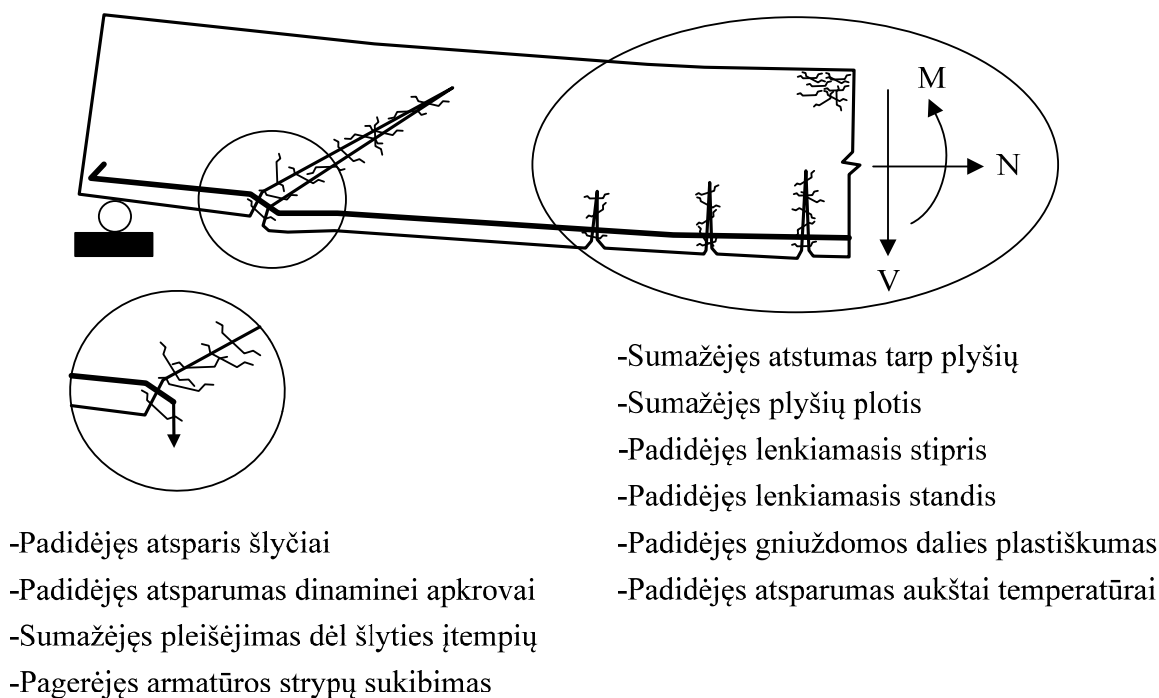
Gautos netiesinės liekamųjų įtempių ir plyšio pločio (σ_{fr-w}) priklausomybės leis atlikti plieno plaušu armuotų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų kompiuterinius skaičiavimus *BE* programomis (pvz., *ATENA*).

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Šiame skyriuje apžvelgiamas plieno plaušu armuotas betonas (*SFRC*). Režiumuojami pasaulyje atliktų tyrimų rezultatai šio tipo betono savybėms nustatyti. Palyginamos paprastojo betono ir dispersiškai armuotojo mechaninės savybės. Aptariami šio armavimo būdo privalumai bei trūkumai eksploataciniu ir gamybos aspektais. Pagrindinis plaušu armuoto betono privalumas yra savybė perimti tempimo įtempius atsivėrusiame plyšyje varžant tolimesnį pleišėjimą, tačiau įvertinti jo efektyvumą sudėtinga. Supažindinama su pasaulyje plačiausiai taikomais metodais supleišėjusio *SFRC* liekamojo stiprio nustatymui. Aptariami šių metodikų privalumai ir trūkumai, pateikiamos išvados.

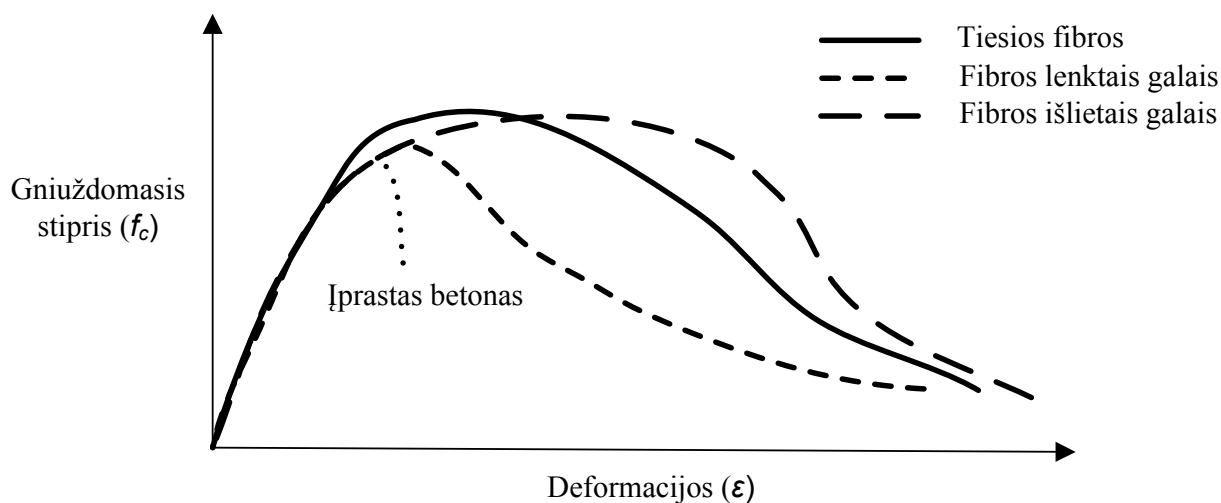
1.1. Mechaninės savybės ir medžiagų modeliai

Betonas – tai mišinys, sudarytas iš cemento, užpildų (smėlio, žvyro arba skaldos), cheminių priedų ir vandens. Dėl paprastos gamybos ir nebrangių medžiagų betonas yra viena plačiausiai naudojamų medžiagų statyboje. Nevienalytė sudėtis lemia, jog šios medžiagos tempiamasis stipris tesudaro 5-15 % gniuždomojo (LST EN 1992-1-1 3.1 lentelė). Tai lemia lenkiamų gelžbetoninių elementų pleišėjimą veikiant sąlyginai mažoms apkrovoms. Atsivėrus plyšiams, armatūra ima koroduoti, o apsauginiame betono sluoksnyje vyksta mikropleišėjimas dėl patenkančios drėgmės bei temperatūros poveikio. Plyšių plotis eksplotuojamame elemente yra reglamentuojamas projektavimo normose. Dėl šios priežasties neretai naudojamas didesnis armatūros kiekis, nei reikiamas veikiančių apkrovų ar įlinkių sąlygoms tenkinti. Pleišėjant dispersiškai armuotam betonui, plaušas varžo plyšių vystimasi, perimdamas įtempius plyšio zonoje. Ši savybė vadinama liekamuoju stipriu. Liekamųjų įtempių dėka atsirandandys plyšiai dispersiškai armuotuose gelžbetoniniuose elementuose kelis kartus mažesni nei paprastuosiuose. Chaotiškas dispersinės armatūros pasiskirstymas yra idealus varžant įvairių krypčių mikropleišėjimą, t.y. pleišėjimą, galintį atsirasti dėl susitraukimo, temperatūrinio poveikio arba dinaminės apkrovos (Kaklauskas *et al.* 2012). Plaušu armuotame betone sumažėja lokalių struktūros defektų įtaka mechaninėms jo savybėms. Robins ir Calderwood (1978) atlikę dinامينius plieno plaušu armuoto betono bandymus nustatė, jog dinaminės apkrovos atsparis padidėja nuo 3 iki 10 kartų. Tipinis lenkiamo plaušu armuoto gelžbetoninio elemento pleišėjimo pobūdis vaizduojamas 1 paveiksle. Plieno plaušas neturi įtakos lasvajam betono susitraukimui, tačiau žymiai suvaržo pleišėjimą bei vidutinį plyšių plotį esant suvaržyto susitraukimo metu (Hannant 1978; Swamy, Stavrides 1979). Šis armavimo būdas praktiškai neturi įtakos betono valkšnumui (Edgington 1973).



1 pav. Tipinis plaušu armuoto lenkiamo gelžbetoninio elemento pleišėjimas (Löfgren 2005)

Vienas pagrindinių betono trūkumų- trapus suirimo pobūdis, jis įvyksta gniuždymo ir tempimo metu. Veikiant ribinėms apkrovoms, trapūs elementai gali suirti be pastebimo deformatyvumo, pleišetumo ir pan. Todėl projektavimo normose yra ribojamas armavimo koeficientas, siekiant, jog gelžbetoninis elementas suirtų plastiškai, plieninei armatūrai neatlaikius veikiančių įrašų. Dispersinis armavimas visiškai pakeičia suirimo pobūdį, jis tampa plastiškas (žr. 2 pav). Tyrimai rodo, jog priklausomai nuo plaušo kiekio bei bei formos, ribinės gniuždomojo betono deformacijos gali būti iki keturių kartų didesnės (Shah 1978).



2 pav. Plieno plaušu armuoto gniuždomo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės

Dispersiškai armuoto betono gamyba yra sudėtingesnė nei paprastojo. Naudojant įpastinę gamybos technologiją, galima gaminti kokybišką betoną kuriame plieno plaušo kiekis neviršija 1.5 %. Gamybos procesas naudojant sintetinį plaušą yra dar sudėtingesnis, nes šio tipo plaušas turi savybę sudaryti neišmaišomus gniužulus. Tiekiant betoną siurbliais, galima naudoti mišinį, kuriame plieno plaušo kiekis neviršija 1 %, nes užkemšamos, praduriamos padavimo žarnos. Reikia įvertinti ir tai, jog dažnu atveju nesilaikoma statybinių reikalavimų, pvz. liejant monolitinius pastatų perdengimus, lyginimo darbų palengvinimui naudojamas papildomai vanduo. Tuomet neįmanoma numanyti plaušo efektyvumo dėl galimo nusėdimo, nepakankamo sukibimo ir pan.

1.2. Medžiagų modelių sudarymo metodai.

Šio darbo tikslas- nustatyti dispersiškai armuoto betono netiesinę liekamųjų įtempių (σ_{fr}) ir plyšio pločio (w) priklausomybę, todėl apžvelgiami kitų autorių pasiūlyti metodai. Šiuo metu supleišėjusio plieno plaušu armuoto betono liktinis stipris (f_{fr}) nutatomas dvejopai, t.y naudojant eksperimento duomenis arba jų neturint. Žinant betono mišinio sudėtį ir neatliekant bandymų, šie įtempiai gali būti nustatyti pasitelkiant labai apytikslius metodus. Taikant Henager ir Doherty (1976) pasiūlytą plieno plaušu armuoto gelžbetoninio elemento skaičiavimą, liktinis supleišėjusio betono stipris apskaičiuojamas atsižvelgiant į plieno plaušo kiekį bei formą pagal šią formulę:

$$f_{fr} = \frac{0.0072 \cdot l_f}{d_f \cdot \rho_f \cdot F_{bc}} \quad (MPa); \quad (1.1)$$

čia f_{fr} - plieno plaušu armuoto betono liktinis stipris (MPa),

l_f - plieno plaušo ilgis (mm),

d_f - plieno plaušo skersmuo (mm),

ρ_f - armavimo procentas (%),

F_{bc} - plaušo sukibimo su betonu koeficientas, varijuoja nuo 1 iki 1,2, priklausomai nuo formos. Šiame modelyje liktinio stiprio reikšmė laikoma pastovia, t.y nepriklausoma nuo atsivėrusio plyšio pločio. Atlikus tempiamų bei lenkiamų plieno plaušu armuotų elementų rezultatų analizę matyti, jog ši prielaida yra iš esmės neteisinga.

Naamano (2003) pasiūlytame skaitiniame liekamojo stiprio nustatymo metode taip pat taikoma pastoviojo liekamojo stiprio prielaida. Supleišėjusio betono liktinis stipris nustatomas:

$$\sigma_{fr} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot RI \quad (MPa) \quad (1.2)$$

- čia λ_1 - plaušo inkaravimo ilgio koeficientas, lygus 0,25,
 λ_2 - plaušo pasiskirstymo plyšyje koeficientas, 1,2,
 λ_3 - plaušo tarpusavio sąveikos koeficientas, 1,0,
 τ - vidutiniai plaušo ir betono sukibimo įtempiai, laikoma, jog $\tau = 2 \cdot f_{ct}$,
 RI - plaušo faktorius, jis lygus $RI = d_f / l_f \cdot \rho_f$.

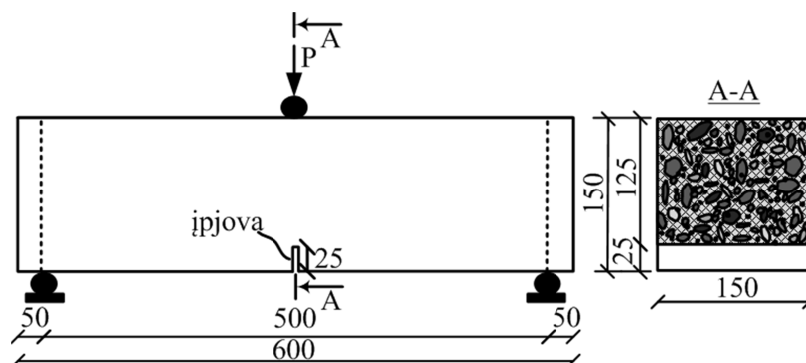
Šiomis liekamojo stiprio nustatymo metodikomis gauti rezultatai yra apytiksliai. Empiriniai koeficientai parinkti taip, jog paprastai apskaičiuotųjų liekamųjų įtempių reikšmė gaunama du kartus mažesnė nei nustatyta eksperimentų metu. Be to, šie metodai paremti prielaida, jog įtempiai, atsirandantys plyšyje besipriešinant plieno plaušui, laikomi pastoviais, nors iš tiesų jie kinta didėjant plyšiui. Norint adekvačiai įvertinti tempiamojo plaušu armuoto betono liekamuosius įtempius konkrečiam betono mišiniui, būtina naudoti eksperimentu grįstus metodus. Ašinio tempimo bandymai yra brangūs ir labai sudėtingi, todėl šiuo metu pasaulyje plačiausiai taikomi būdai: Rilem TC 162-TDF grupės pasiūlytas viena koncentruota bei DBV Merkblatt dviejų koncentruotų jėgų lenkiamos prizmės bandymai.

1.2.1 Rilem TC 162-TDF

Rilem TC 162-TDF yra aprašyti lenkiamų betoninių sijelių, armuotų plieno plaušu, gamyba, bandymai, bandymų rezultatų vertinimas ir konstrukcijų iš plieno plaušo armuoto gelžbetonio skaičiavimo metodai. Didelis dėmesys skiriamas bandinių gamybai ir bandymų eigai, nes tai labai sąlygoja bandymų rezultatus (apkrovos ir įlinkių ($F-\delta$) arba apkrovos ir plyšio pločio atsivėrimo ($F-CMOD$) diagramas). Vienas pagrindinių reikalavimų- eksperimento metu apkrova turi būti pridedama statmenai bandinio liejimo krypties. Šis metodas negali būti taikomas betonui, kurio klasė aukštesnė nei C50/60. Eksperimentinių sijelių matmenys- 150 mm x 150 mm x 550 mm arba 150 mm x 150 mm x 600 mm. Bandinių viduryje, apatinėje jų dalyje, padaroma 25 mm gylgio vertikali įpjova plyšio lokalizavimui.

Bandymo eiga

Paruoštas bandinys po 28 parų kietėjimo yra išbandomas hidraulinio presu atliekant 3 taškų lenkimo bandymą. Bandymo schema pavaizduota 3 pav.



3 pav. Eksperimentinių sijų 3 taškų lenkimo bandymo schema

Atstumas tarp atramų 500 mm ir vienas bandinių atrėmimo taškas turi turėti galimybę pasislinkti horizontalia kryptimi. Sijelių apkrovimo greitis (hidraulinio presu eigos greitis) turi būti 0,2 mm/min. Bandymo metu yra fiksuojami apkrovos ir bandinių vidurio taško įlinkių (δ) arba plyšio pločio ties bandinių apačia ($CMOD$) reikšmės. Bandymas tęsiamas, kol bandinių vidurio taško įlinkis arba plyšio plotis pasiekia atitinkamai 3,0 arba 3,5 mm.

Liekamųjų įtempių nustatymas

Betono, armuoto plieno plaušu, liktinio ekvivalentinio tempiamojo stiprio reikšmės ($f_{eq,i}$) galima apskaičiuoti remiantis tempiamojo betono darbo geba, t.y plotu ($D_{BZ,i}$) po apkrovos ir įlinkio (P - δ) diagrama:

$$f_{eq,2} = \frac{3 \cdot F_2 \cdot L}{2 \cdot b \cdot (h_{sp})^2} \quad (MPa); \quad (1.3)$$

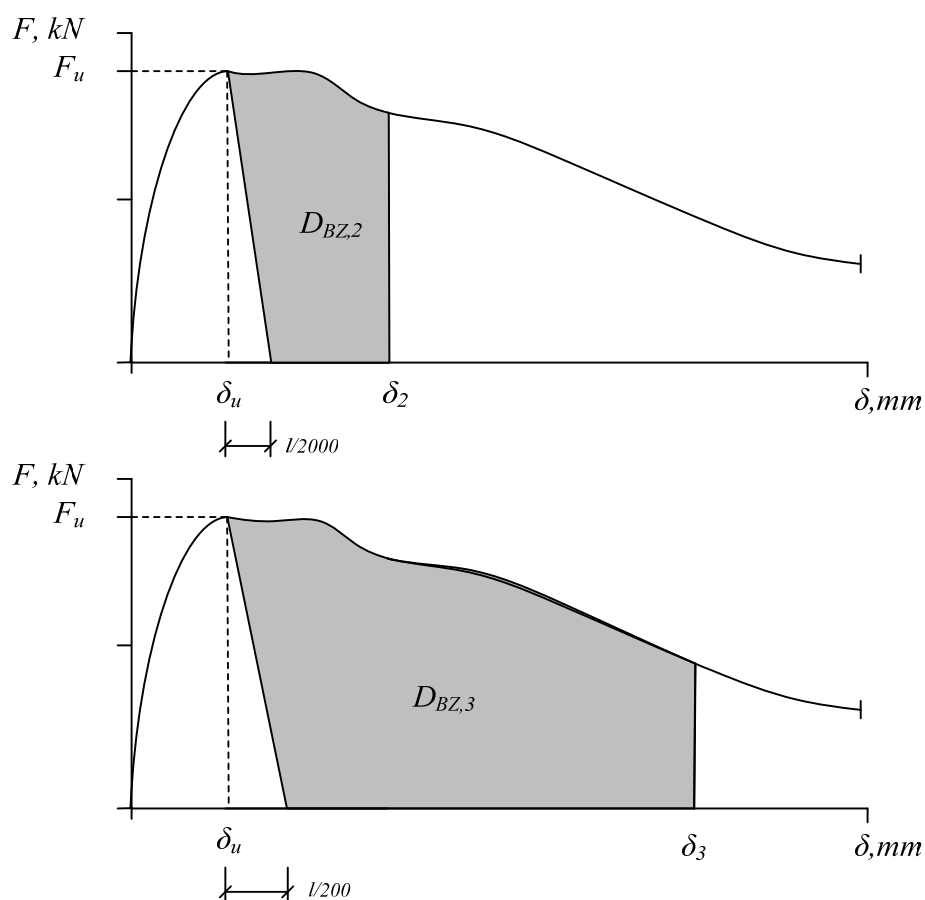
$$f_{eq,3} = \frac{3 \cdot F_3 \cdot L}{2 \cdot b \cdot (h_{sp})^2} \quad (MPa); \quad (1.4)$$

čia $F_2 = \frac{D_{BZ,2}}{L / 1200} \quad (N); \quad (1.5)$

$$F_3 = \frac{D_{BZ,3}}{L / 200} \quad (N). \quad (1.6)$$

F_2, F_3 - pakoreguotos apkrovos reikšmės, atitinkančios įlinkius $\delta_2 = \delta_u + 0,65\text{mm}$ ir $\delta_3 = \delta_u + 2,65\text{mm}$.

$D_{BZ,2}$ ir $D_{BZ,3}$ apskaičiuojama naudojantis 4 pav.



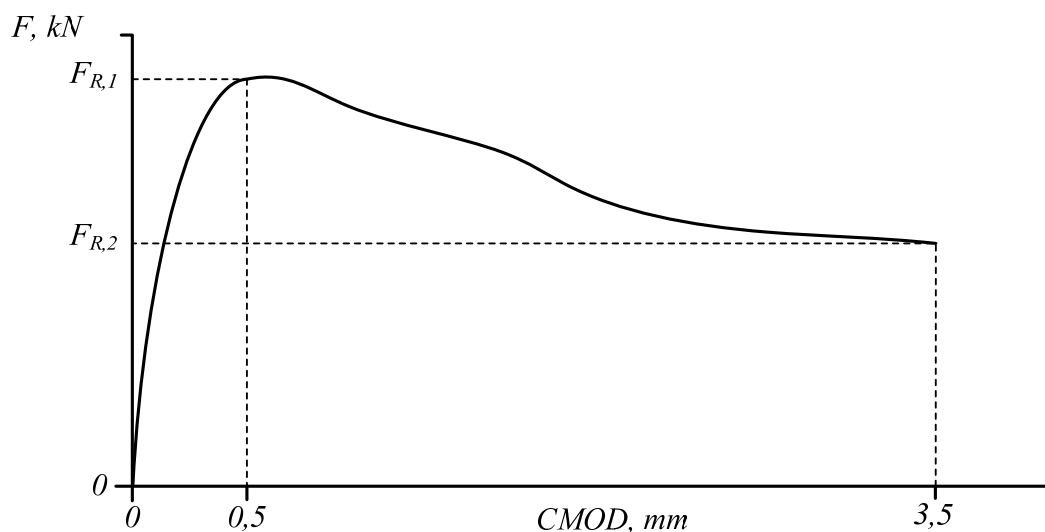
4 pav. Ploto (D_{BZ}) nustatymo metodika

4 paveiklėse δ_u - įlinkis esant maksimaliai apkrovai, kai įlinkis neviršija 0,5mm. Apskaičiuotosios ($f_{eq,2}$) ir ($f_{eq,3}$) ekvivalentinių liekamųjų įtempių reikšmės naudojamos tinkamumo ir stiprumo ribiniams būviams skaičiuoti.

Pagal RILEM TC-162 TDF (2003), liktiniai lenkiamojo plieno plaušu armuoto betono stipriai ($f_{R,i}$) nustatomi iš F - $CMOD$ diagramos. Gaunamos ($f_{R,2}$) ir ($f_{R,3}$) reikšmės, kai $CMOD=0,5$ ir 3,5, atitinkamai tinkamumo ir saugos ribinių būvių skaičiavimui:

$$f_{R,i} = \frac{F_{R,i} \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (MPa); \quad (1.7)$$

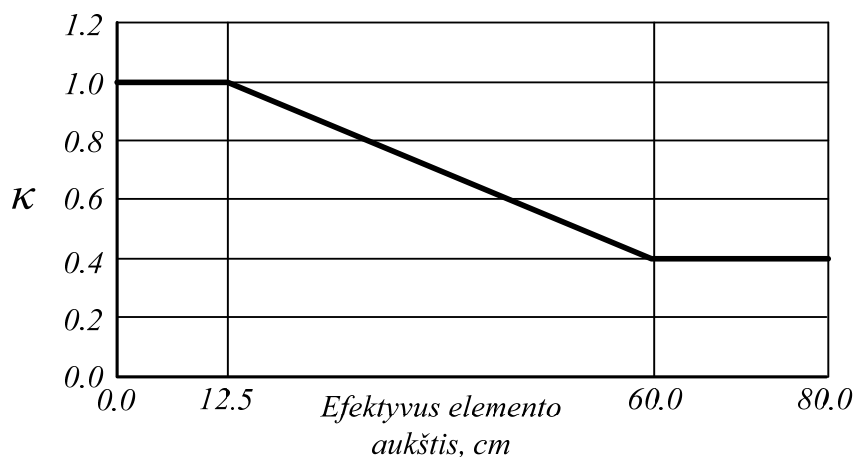
$F_{R,i}$ -apkrovos, kai $CMOD$ lygus 0,5 ir 3,5 mm, nustatymo schema pavaizduota 5 pav.



5 pav. $F_{R,i}$ nustatymas pagal Rilem TC 162-TDF

Įtempių ir deformacijų priklausomybės diagramos sudarymas

Sudaroma trilijinė įtempių ir deformacijų (σ - ϵ) priklausomybė (žr. 1.7 pav.), naudojant liktinių stiprių reikšmes ($f_{R,i}$). Elementų gabarito koeficientas (κ) įvedamas atsižvelgiant į tai, jog mažesnis ploto ir perimetro santykis lemia palankesnę plaušo išsidėstymą. Pateiktajame paveiksle matyti, jog elementuose, kurių efektyvusis aukštis daugiau nei 0,6m liekamasis stipris tesudaro 40 % to pačio mišinio stiprio mažuose elementuose (žr. 6 pav).

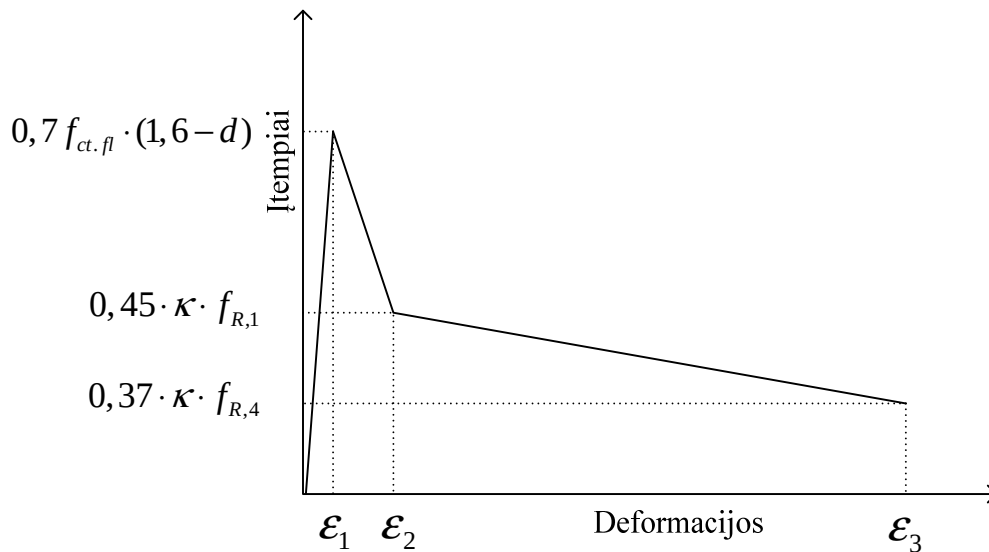


6 pav. Pataisos koeficiento (κ) nustatymas

Apskaičiavus liktinius stiprius ($f_{R,i}$) sudaroma trilijinė tempiamo betono įtempių ir deformacijų (σ - ϵ) diagrama (7 pav). Ribinės deformacijos apskaičiuojamos taip:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_c}; \epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1; \epsilon_3 = 10 (\%). \quad (1.8)$$

Reikia paminėti, jog deformacijos (ε_1 , ε_2) atitinka plyšio plotį ties įpjova (CTOD), kuris lygus atitinkamai 0,4 ir 2,96 mm.



7 pav. Rilem TC-162 TDF tempiamojo plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų (σ - ε) diagrama

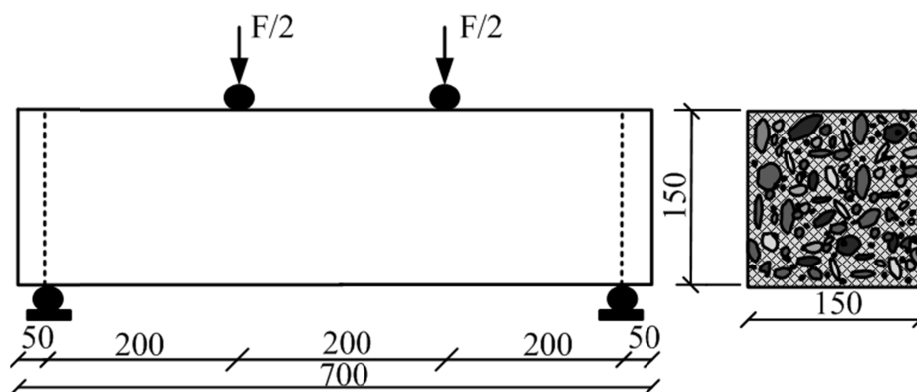
1.2.2 DBV-Merkblatt „Stahlfaser“ metodas

Vokietijos betono ir statybos technikos sąjungos (vok. Deutscher Beton- und Bautechnikverein) išleistame ledinyje DBV-Merkblatt „Stahlfaserbeton“ yra aprašyti lenkiamų betoninių sijelių, armuotų plieno plaušu, gamyba, bandymai ir bandymų rezultatų vertinimas. Šiuo metu tai vienas iš dviejų labiausiai paplitusių liekamųjų įtempių nustatymo būdų. Siūlomas skaitinis modelis liekamiesiems įtempiams nustatyti atliekant 4 taškų lenkimo bandymą.

Mažiausiai bandinių seriją turi sudaryti 6 bandiniai, kurių matmenys ($b \times h \times l$) 150 mm x 150 mm x 700 mm. Rekomenduojama, kad plieno plaušo ilgis būtų ne didesnis kaip 1,5 karto už didžiausią stambaus užpildo dalelės skersmenį. Didelis dėmesys skiriamas bandinių gamybai ir bandymų eigai, nes tai labai sąlygoja bandymų rezultatus (apkrovos ir įlinkių (F - δ) diagramas).

Bandymų eiga

Paruošti bandiniai po 28 parų kietėjimo yra išbandomi hidrauliniu presu atliekant 4 taškų lenkimo bandymą. Naudojamas dirbtinai nesusilpnintas skerspjuvis, stengiantis, jog bandinys labiau atspindėtų realų lenkiamą elementą. Bandymo schema pavaizduota 8 pav.



8 pav. Eksperimentinių sijelių 4 taškų lenkimo bandymo schema

Atstumas tarp atramų 600 mm ir vienas bandinių atrėmimo taškas turi turėti galimybę pasislinkti horizontalia kryptimi. Sijelių apkrovimo greitis (hidraulinio preso eigos greitis) turi būti 0,2 mm/min. Bandymo metu yra fiksuojami apkrovos ir bandinių vidurio taško įlinkių reikšmės. Bandymas tęsiamas, kol bandinių vidurio taško įlinkis pasiekia 3,5 mm.

Bandymų rezultatų vertinimas

Betono, armuoto plieno plaušu, liktinio ekvivalentinio tempiamojo stiprio reikšmės ($f_{R,i}$) apskaičiuojamos analogiškai RILEM metodikai. Nustatomas liktinis tempiamasis stipris:

$$f_{eq,ctk,I} = 0,45 \cdot f_{R,2}; \quad (1.9)$$

$$f_{eq,ctk,II} = 0,37 \cdot f_{R,3}. \quad (1.20)$$

Jau minėta anksčiau, jog didelis dėmesys skiriamas praktiniam pritaikymui, todėl nustatytiems liekamiesiems įtempiams pritaikomi betono atsargos, ilgalaikės apkrovos ir elemento gabarito koeficientai. Galutinės, projektavimui taikytinos liekamojo stiprio nustatymo formulės:

$$f_{eq,ctd,1} = \frac{f_{eq,ctk,1} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys}}{\gamma_{ct}^f}; \quad (1.21)$$

$$f_{eq,ctd,2} = \frac{f_{eq,ctk,2} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys}}{\gamma_{ct}^f} \leq f_{eq,ctd,1}; \quad (1.22)$$

$$f_{ctd}^f = \frac{\alpha_c^f \cdot f_{ctk}^f \cdot \alpha_{sys}}{\gamma_{ct}^f}; \quad (1.23)$$

čia $f_{eq,ctd,i}$ - skaičiuotinė ekvivalentinio tempiamojo stiprio reikšmė i -tojoje įlinkių stadijoje;

f_{ctd}^f - skaičiuotinė betono tempiamojo stiprio reikšmė;

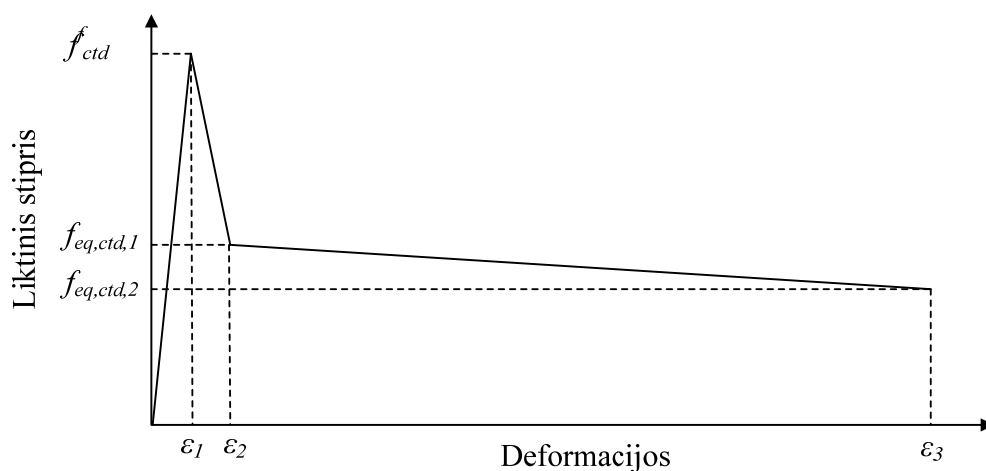
f_{ctk}^f - charakteristinė betono tempiamojo stiprio reikšmė;

α_c^f - ilgalaikės apkrovos koeficientas, įprastam betonui 0,85;

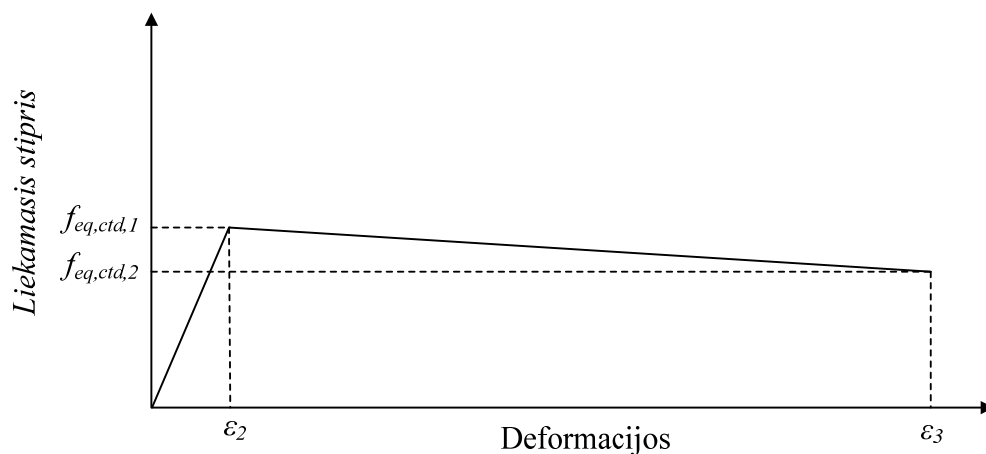
γ_{ct}^f - patikimumo koeficientas;

α_{sys} - elemento gabarito koeficientas, įvertinantis plaušo orientaciją. Nustatomas naudojantis grafiku, kokybiškai nesiskiriančiu nuo Rilem siūlomo (κ) koeficiento.

Pagrindinis skirtumas tarp aptariamų metodikų yra galutinių įtempių ir deformacijų priklausomybių kreivės. Sudarant medžiagos įtempių ir deformacijų (σ - ϵ) priklausomybes, yra naudojamos skirtingų charakterių diagramos, t.y trilijinė tinkamumo ir dvilijinė, saugos ribiniams būviams skaičiuoti (žr 9 ir 10 pav.).



9 pav. DBV-Merkblatt trilijinė tempimo plieno plaušu armuoto betono σ - ϵ diagrama, taikoma tikamumo ribiniams būviams skaičiuoti



10 pav. DBV-Merkblatt dvilijinė tempimo plieno plaušu armuoto betono σ - ϵ diagrama, taikoma saugos ribiniams būviams skaičiuoti

1.3. Išvados

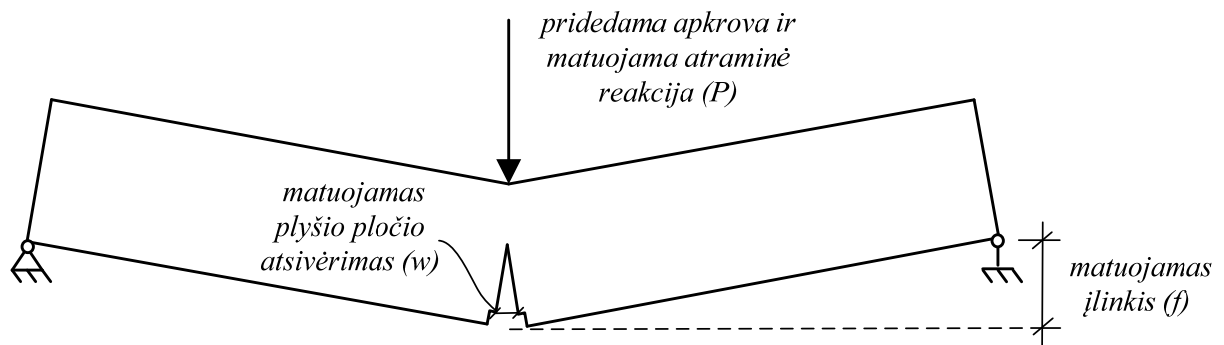
Plieno plaušu armuotas betonas mechaninėmis savybėmis yra žymiai panašesnis už įprastinį. Šis betonas pasižymi didesniu dinaminio poveikio atspariu, plastiniu suirimo pobūdžiu bei savybe perimti tempimo įtempius plyšio zonoje. Plastinė *SFRC* elgsena leidžia tiksliau prognozuoti statomų bei įvertinti galimą esamų konstrukcijų elgseną. Plaušo savybė priešintis pleišėjimui vadinama liktiniu stipriu, ji išreiškiama liekamaisiais įtempiais. Liktinis stipris lemia tankesnį, tačiau žymiai mažesnio pločio normalinių plyšių vystimasi bei standesnę elemneto elgseną. Dispersiškai armuotas betonas atsparesnis pleišėjimui dėl suvaržyto susitraukimo, šlyties, temperatūrinio poveikio ir t.t. Liekamųjų įtempių nustatymo uždavinys yra sudėtingas, tačiau būtinas vertinant *SFRC* elementų tinkamumo ribinius būvius, t.y standumą, atsparumą pleišėjimui bei atsiveriančių plyšių plotį.

Šiuo metu naudojami dviejų tipų liekamojo stiprio nustatymo metodai. *SFRC* liekamasis stipris gali būti nustatomas taikant skaitinius metodus, kuriuose empiriniais koeficientais aprašoma betono ir plaušo sąveika, plaušo kiekio bei formos faktoriai. Šie metodai nesudėtingi ir paprasti naudoti, tačiau gaunami rezultatai yra tik labai apytiksliai. Tiesioginių eksperimentų metu nustatytos liekamųjų įtempių reikšmės ne retai viršija apskaičiuotuosius du kartus. Plieno plaušu armuoto supleišėjusio betono liekamųjų įtempių ir deformacijų priklausomybė ($\sigma_{fr}-\varepsilon$) gali būti apskaičiuojama taikant eksperimentu grystus metodus. Pasaulyje plačiausiai taikomi viena koncentruota (RILEM TC-162 TDF) bei dvejomis koncentruotomis (DBV-Merkblatt „Stahlfaser“) jėgomis lenkiamos sijos bandymo rezultatais grysti liekamojo stiprio nustatymo metodai. Nesudėtingas eksperimentas, gana paprasta skačiavimo metodika ir gaunamų rezultatų adekvatumas yra šių metodikų privalumai. Šie skaitiniai būdai yra grysti statistiniais duomenimis, todėl jie gali būti taikomi tik standartinio gabarito elementui tirti. Rezultatų pritaikymui praktiniam naudojimui įvedamas gabarito pataisos koeficientas, tačiau jo skaitinė reikšmė yra abejotina (didesnių gabaritų elementuose liktinis stipris tesudaro 40 % eksperimentinės sijos stiprio).

Priežastys, lemiančios alternatyvaus supleišėjusio *FRC* liktinio stiprio nustatymo metodo poreikio būtinybę, yra šios: betono stiprio, plaušo tipo (tik plieno plaušas), gabarito ribojimas bei fiksuoto charakterio įtempių ir deformacijų ($\sigma_{fr}-\varepsilon$) priklausomybė. Todėl pasiūlomas eksperimento rezultatais grystas universalus supleišėjusio dispersiškai armuoto betono liktinio stiprio nustatymo metodas, kuriame nėra prieš tai išvardintų apribojimų

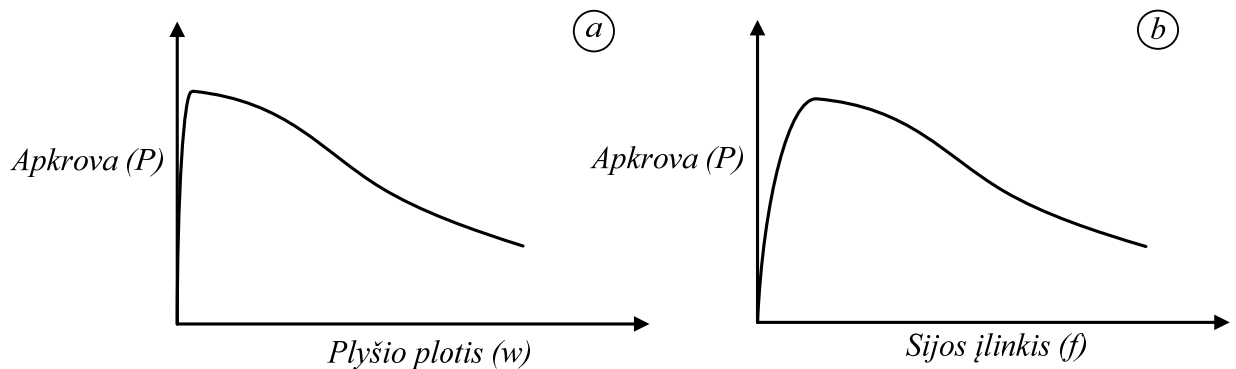
2. SIŪLOMAS MODELIAVIMO METODAS

Šiame darbe pasiūlytas eksperimentu grįstas būdas plieno plaušu armuoto betono liekamajam stipriui (f_{fr}) nustatyti. Darbo tikslas – pasitelkiant eksperimentinius duomenis nustatyti dispersiškai armuoto supleišėjusio betono liekamųjų įtempių (angl. *residual stress*) ir plyšio pločio atsivėrimo priklausomybę ($\sigma_{fr}-w$). Siūlomo metodo privalumai yra laisvai pasirenkami bandinių gabaritai, neribojamas betono stipris ir dispersinės armatūros tipas. Atliekamas viena koncentruota jėga laisvai atremtos sijos lenkimo bandymas (angl. *three point bending test*). Plyšio lokalizavimui sijos viduryje padaroma įpjova. Norint, jog elementas nesuirtų atsivėrus plyšiui, bandymas atliekamas kontroliuojant apkrovos pridėjimo taško poslinkio greitį. Įlinkis nustatomas sijos tarpatramio viduryje bei fiksuojama atsivėrusio plyšio pločio ir sijos atraminės reakcijos, apkrovos pridėties taške, kitimo istorija 11 pav)



11 pav. Principinė bandymo schema

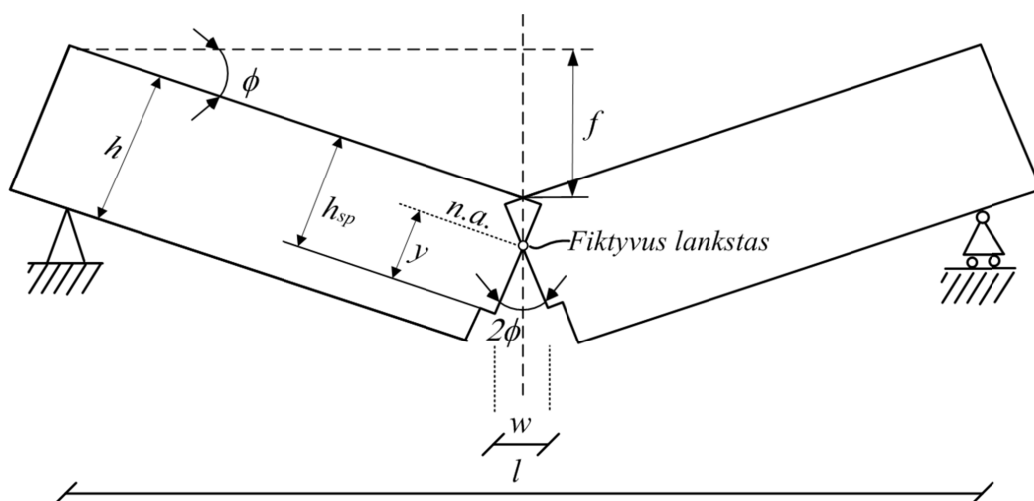
Pagal matavimų duomenis sudaromos apkrovos ir plyšio pločio ($P-w$) bei apkrovos ir įlinkių ($P-f$) diagramos (12 pav). Skaičiavimo rezultatai tiesiogiai priklauso nuo užfiksuotų duomenų tikslumo, todėl patartina naudoti keletą matavimo prietaisų, kuriems leistinos matavimo paklaidos neviršytų 0,01mm. Tokiu būdu galima atlikti eksperimento rezultatų kontrolę.



12 pav. Bandymų metu nustatytos apkrovos ir plyšio pločio (a) bei apkrovos ir įlinkių (b) diagramos

2.1. Skaičiuojamosios schemos sudarymas

Dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės ($\sigma_{fr}-w$) nustatymo modelis sudaromas naudojantis 13 pav. pavaizduota supleišėjusio lenkiamo elemento schema. Toks elementas nagrinėjamas kaip dviejų dalių mechanizmas, kurio padėtis apibūdinama pasisukimo kampu (φ) apie fiktyvųjį lankstą. Šio taško padėtis sutampa su sijos viduriniame pjūvyje esančia neutraliąja ašimi (n.a.).



13 pav. Lenkiamo elemento schema

Atsižvelgiant į 2.3 pav. pateiktą schema, galima užrašyti formulę siejančią elemento įlinkį, plyšio plotį ir neutraliosios ašies padėtį. Elemento įlinkio (f) ir posvyrio kampo (φ) geometrinis ryšys užrašomas taip:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{f}{\frac{l}{2}} = \frac{2 \cdot f}{l}. \quad (2.1)$$

Taip pat sudaroma atstumo nuo įpjovos viršaus iki neutraliosios ašies (y) ir plyšio pločio (w) priklausomybė:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{w}{2 \cdot y}. \quad (2.2)$$

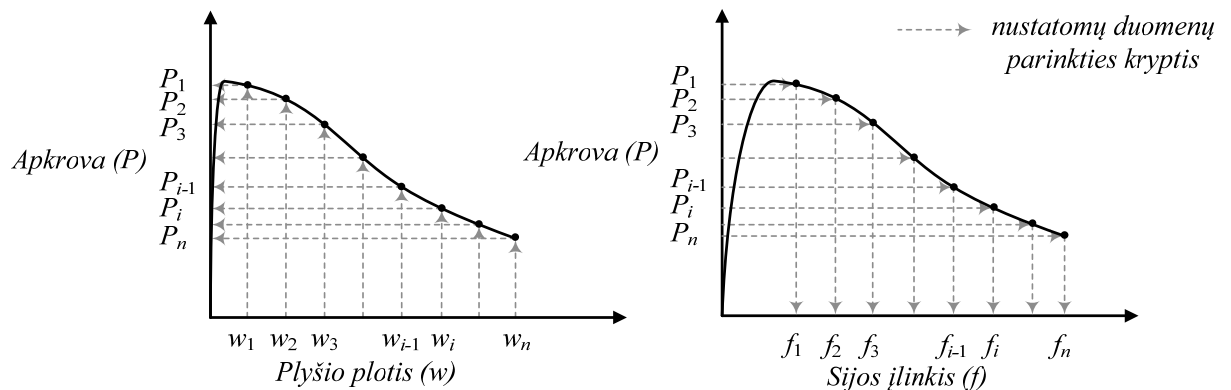
Akivaizdu, jog šiose lygtyse figūruoja posūkio kampas (φ). Taigi, galima užrašyti bendrą išraišką, vienijančią elemento įlinkį, plyšio plotį bei aukštį:

$$\frac{2 \cdot f}{l} = \frac{w}{2 \cdot y} \Rightarrow y = \frac{w \cdot l}{4 \cdot f}. \quad (2.3)$$

2.2. Liekamųjų įtempių nustatymo metodika

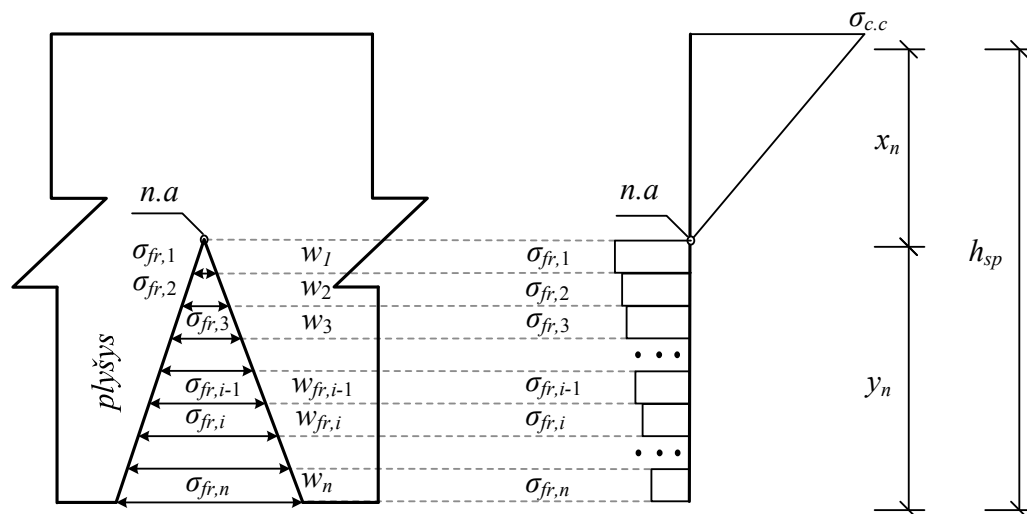
Bandymo metu gauta apkrovos ir plyšio pločio ($P-w$) diagrama yra sudalijama į mažus intervalus (Δw), kuriems nustatomos eksperimentinės apkrovos reikšmės P_i (žr. 14 pav.). Šių intervalų plotis yra pastovus $\Delta w = \text{const}$. Užtikrinant skaičiavimo rezultatų adekvatumą, Δw neturėtų viršyti 0,2 mm.

Pavyzdžiui, norima nustatyti liekamuosius įtempius $\Delta w = 0,1$ mm dydžio plyšio pločio intervalams. Tuomet, naudojant eksperimentinę ($P-w$) priklausomybę, nustatomos apkrovos reikšmės (P_i), atitinkančios pasirinktuosius plyšio pločius (w_i), čia ($w_i = 0,1; 0,2; 0,3; \dots, w_n$). Naudojant eksperimentinę apkrovos ir sijos įlinkio ($P-f$) diagramą, gautoms apkrovos reikšmėms (P_i), nustatomos jas atitinkančios sijos įlinkio reikšmės (f_i). Šių duomenų nustatymo schema pateikta 14 pav.



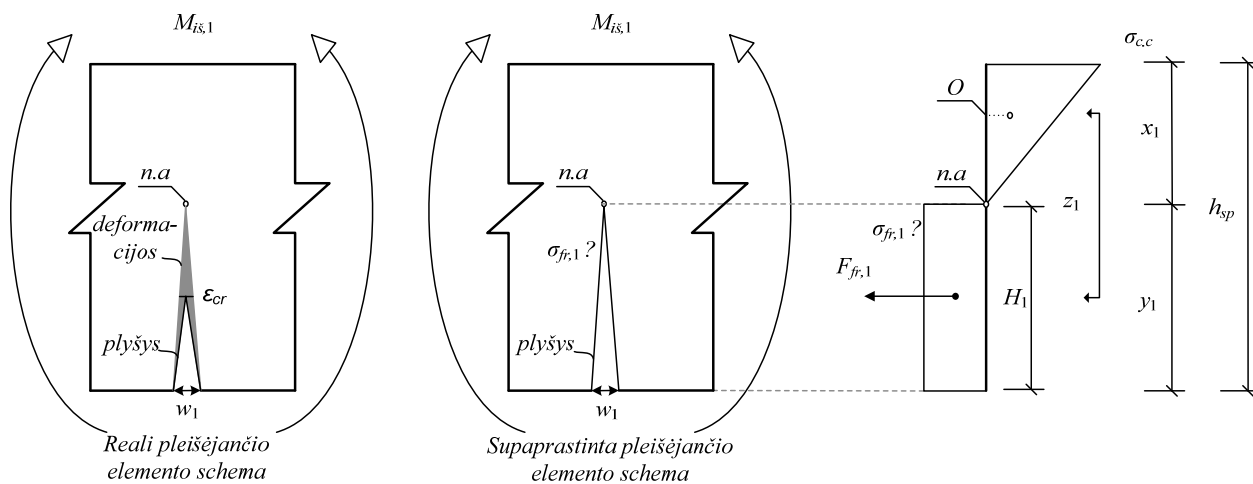
14 pav. Apkrovos (P_i) ir įlinkio (f_i) nustatymas atsižvelgiantį pasirinktuosius plyšio pločius (w_i)

Tempiamojo betono atlaikomoji įraša nevertinama, nes veikia tik labai arti neutraliosios ašies ir įtakos supleišėjusio elemento laikomajai galiai praktiškai neturi. Todėl tariama, jog liekamieji įtempiai veikia iki pat neutraliosios ašies. Sudaromas skaičiavimo modelis, laikantis prielaidos, jog kiekviename plyšio pločio intervale liekamieji įtempiai yra pastovūs. Pavyzdžiui, $w_1 = 0-0,10$ mm intervale liekamųjų įtempių reikšmė yra $\sigma_{fr,1}$; $w_2 = 0,10-0,20$ mm intervale įtempiai yra $\sigma_{fr,2}$ ir t.t. Liekamųjų įtempių pasiskirstymas plyšyje parodytas 15 pav.



15 pav. Supleišėjusiame elemente veikiančių liekamųjų įtempių pasiskirstymo schema

Pasirintiesiems apkrovimo žingsniams išsprendžiamos vidinių ir išorinių lenkimo momentų pusiausvyros lygtys. Pavyzdžiui, pirmojo apkrovos žingsnio metu yra žinomas veikiančios apkrovos dydis (P_1) ir ją atitinkančios įlinkio (f_1) bei plyšio pločio (w_1) reikšmės. Parašoma lenkimo momentų pusiausvyros lygtis apie gniuždomojo betono svorio centrą ir nustatoma liekamųjų įtempių reikšmė ($\sigma_{fr,1}$). 16 pav. parodyta skaičiuojamoji schema pirmajam analizės etapui.



16 pav. Skaičiuojamoji schema pirmajame etape

Pusiausvyros lygtis apie gniuždomojo betono svorio centrą (O):

$$M_{is,1} = F_{fr,1} \cdot z_1, \quad (2.4)$$

čia $F_{fr,1}$ – liekamųjų įtempių atstojamoji, kuri yra $F_{fr,1} = \sigma_{fr,1} \cdot H_1$, z_1 – liekamųjų įtempių atstojamosios veikimo petys taško (O) atžvilgiu, $z_1 = \frac{2}{3} \cdot x_1 + \frac{1}{2} \cdot H_1$; H_1 – plyšio ruožo, kuriame

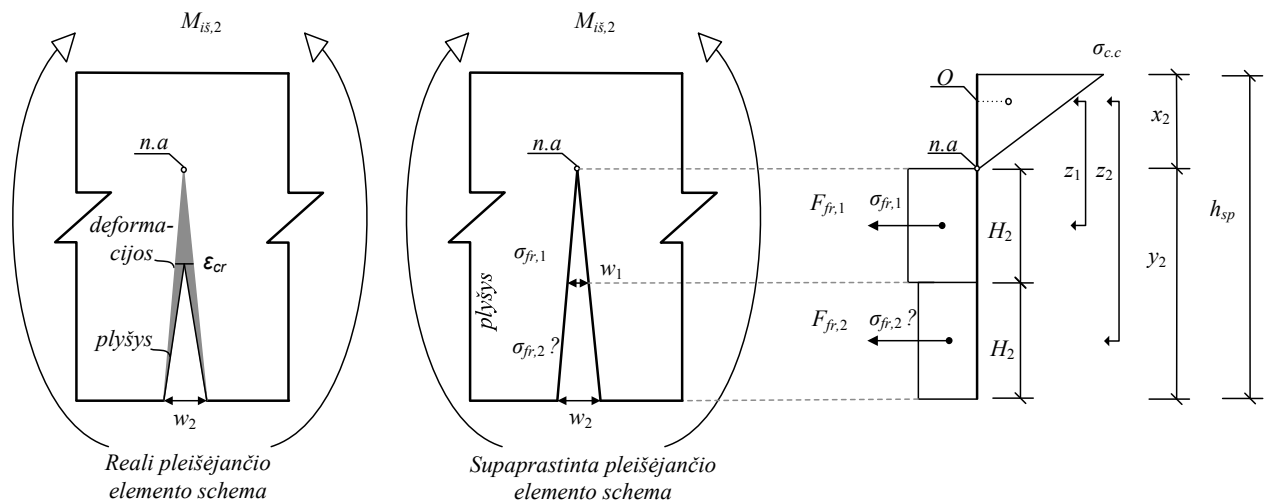
veikia ($\sigma_{fr,1}$) įtempiai, aukštis. $M_{i\bar{s},i}$ yra lenkimo momentas, padalintas iš elemento pločio, apskaičiuojamas taip:

$$M_{i\bar{s},i} = \frac{P_i \cdot l}{4 \cdot b}. \quad (2.5)$$

Pirmajame apkrovimo žingsnyje visoje plyšio zonoje veikia pastovūs įtempiai ($\sigma_{fr,1}$), todėl (H_1) yra lygus visam atsivėrusio plyšio aukščiui (y_1), kuris nustatomas pagal (2.3) formulę. Tuomet nežinomieji įtempiai pirmajame analizės etape nustatomi pagal formulę:

$$\sigma_{fr,1} = \frac{M_{i\bar{s},1}}{z_1 \cdot H_1}. \quad (2.6)$$

Antrojo apkrovos žingsnio metu yra žinomas veikiančios apkrovos dydis (P_2) ir šią apkrovą atitinkančios įlinkio (f_2) ir plyšio pločio (w_2) reikšmės. Be to, dar žinomi liekamieji įtempiai ($\sigma_{fr,1}$) veikiantys plyšio aukščio ruože (H_2). Skaičiuojamoji schema šiame etape pavaizduota 17 pav.



17 pav. Skaičiuojamoji schema antrajame apkrovos etape

Šiuo atveju pusiausvyros lygtis apie gniuždomojo betono svorio centrą (O):

$$M_{i\bar{s},2} = F_{fr,1} \cdot z_1 + F_{fr,2} \cdot z_2. \quad (2.7)$$

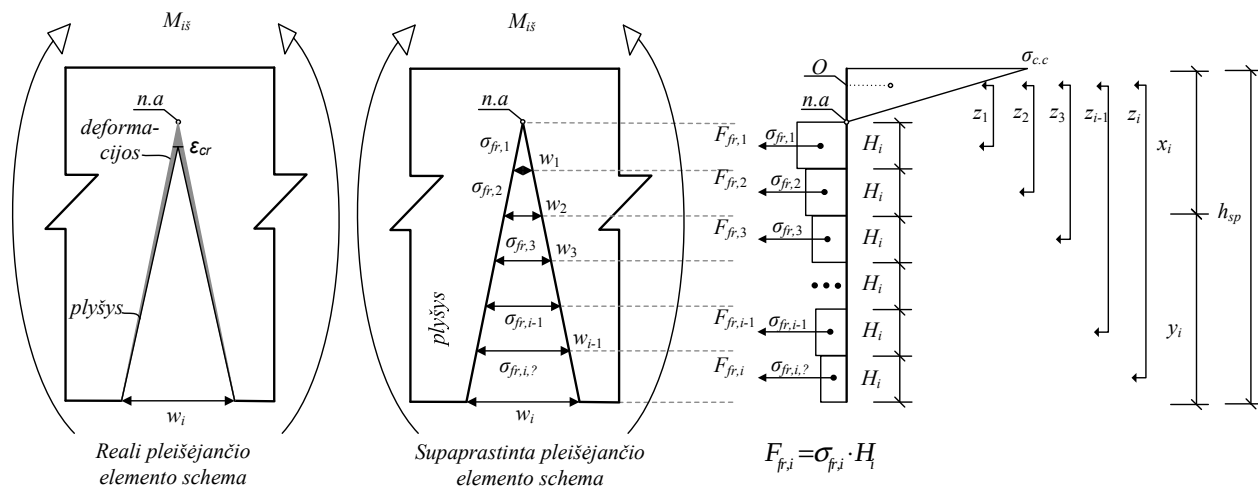
Kaip minėta, plyšio pločio vystymasis sudalomas į vienodo dydžio intervalus, todėl ruožų aukščiai, kuriuose veikia įtempiai ($\sigma_{fr,1}$) ir ($\sigma_{fr,2}$), yra $H_2 = \frac{y_2}{2}$.

Nežinomieji įtempiai ($\sigma_{fr,2}$) apskaičiuojami:

$$\sigma_{fr,2} = \frac{M_{i\bar{s},2} - F_{fr,1} \cdot z_1}{z_2 \cdot H_2}. \quad (2.8)$$

Liekamųjų įtempių analizė vyksta analogiškai ir i -tajame apkrovimo etape, kurio skaičiuojamoji schema pateikta 18 pav. Šioje apkrovimo stadijoje yra žinomas veikiančios jėgos

dydis (P_i) ir ją atitinkančios įlinkio (f_i) bei plyšio pločio (w_i) reikšmės. Taip pat žinomi liekamieji įtempiai ($\sigma_{fr,1}, \sigma_{fr,2}, \sigma_{fr,3}, \dots, \sigma_{fr,i-1}$), nustatyti ankstesniuose skaičiavimo etapuose, veikiantys atitinkamai ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_{i-1}$) plyšio pločio diapazonuose.



18 pav. Skaičiuojamoji schema i -tajame etape

Užrašomos pusiausvyros lygtis apie gniuždomojo betono svorio centrą (O):

$$M_{i\bar{s},i} = F_{fr,1} \cdot z_1 + F_{fr,2} \cdot z_2 + F_{fr,3} \cdot z_3 + \dots + F_{fr,i-1} \cdot z_{i-1} + F_{fr,i} \cdot z_i. \quad (2.9)$$

Priimant $\sigma_{fr,0} = 0$, įtempiai ($\sigma_{fr,i}$) apskaičiuojami pagal šią formulę:

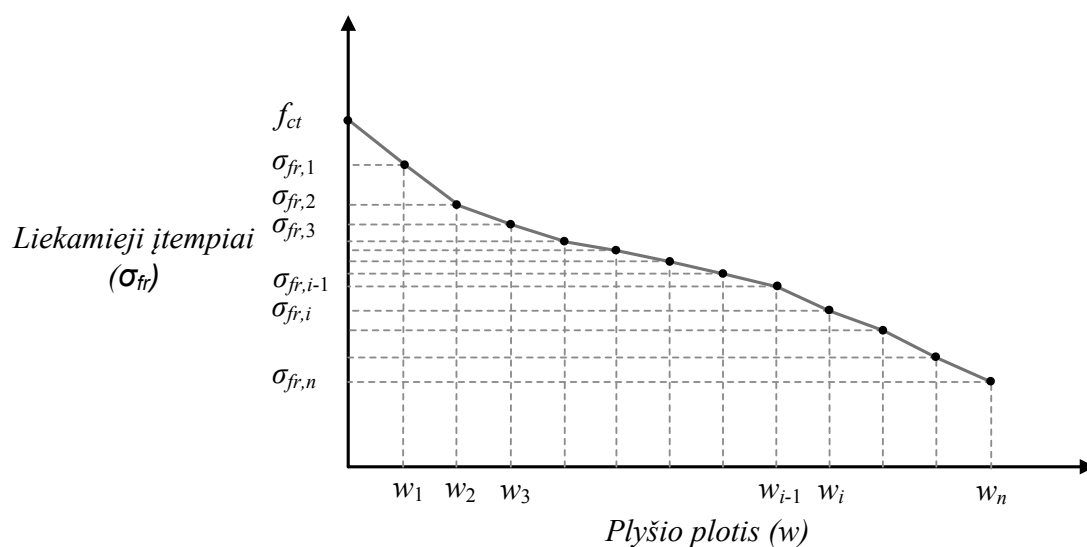
$$\sigma_{fr,i} = \frac{M_{i\bar{s},i} - \sum_{k=0}^{i-1} \sigma_{fr,k} \cdot z_k \cdot H_i}{z_i \cdot H_i}, \quad (2.10)$$

čia $\sigma_{fr,k}$ – liekamieji įtempiai, apskaičiuoti k -tojo apkrovimo metu; z_k – zonos, kurioje veikia ($\sigma_{fr,k}$) įtempiai, atstojamosios petys iki gniuždomojo betono svorio centro. Šis dydis apskaičiuojamas taip:

$$z_k = \frac{y_i + 2 \cdot y_i \cdot (k-1)}{2 \cdot i} + \frac{2}{3} \cdot x_i, \quad (2.11)$$

čia y_i – i -tajame skaičiavime nagrinėjamo elemento plyšio aukštis, apskaičiuojamas pagal 2.3 formulę; k – apkrovimo eilės numeris, kuriame nustatyti ($\sigma_{fr,k}$) įtempiai; x_i – gniuždomosios zonos aukštis i -tojo apkrovimo metu, ($x_i = h_{sp} - y_i$); H_i – ruožo, kuriame veikia ($\sigma_{fr,k}$) įtempiai, aukštis, ($H_i = y_i / i$); z_i – zonos, kurioje veikia ($\sigma_{fr,i}$) įtempiai, atstojamosios petys iki gniuždomojo betono svorio centro. Šis dydis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$z_i = \frac{y_i + 2 \cdot y_i \cdot (i-1)}{2 \cdot i} + \frac{2}{3} \cdot x_i, \quad (2.12)$$



19 pav. Apskaičiuota liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybė

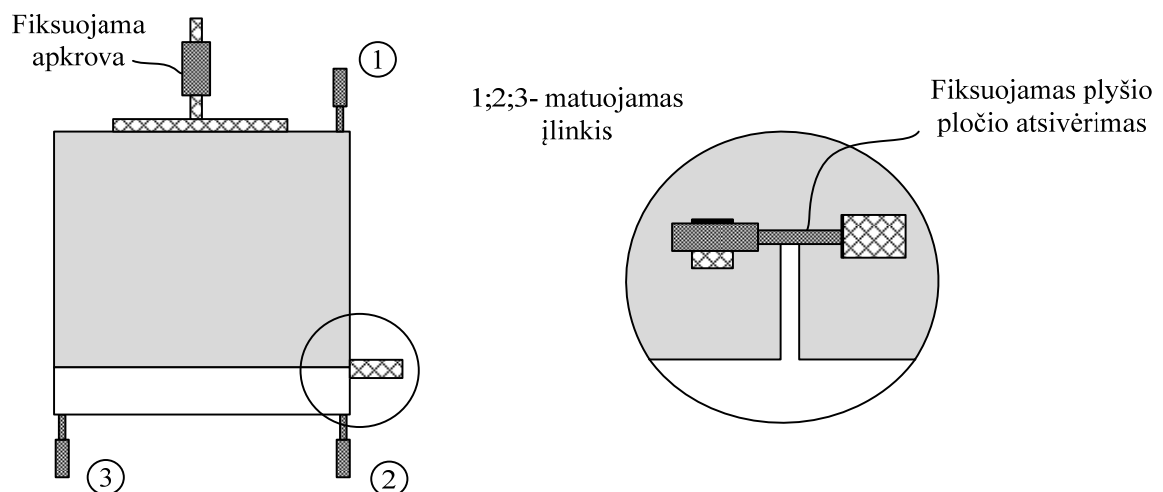
Apskaičiavus liekamuosius įtempius n -tajame apkrovimo etape sudaroma liekamųjų įtempių ir plyšio pločio atsivėrimo ($\sigma_{fr}-w$) diagrama (19 pav). Pradinio taško reikšmė yra tempiamojo betono stipris (f_{ct}). Atidėti taškai gali būti jungiami tiesėmis arba aproksimuojami pagal pageidautiną kreivę.

3. METODO TAIKYMAS

3.1. Eksperimentai

Pasiūlyto metodo adekvatumui patvirtinti atlikta eksperimentinė programa. Bandinių matmenys, eksperimento procedūra atlikta pagal RILEM TC-162 TDF reikalavimus. Išbandytos dviejų skirtingų armavimo plaušu bandinių serijos, sudarytos iš penkių sijelių. Buvo panaudotas plieno plaušas lenktais galais kurio ilgis (l_f) yra 50mm ir diametras (d_f) 1mm. Betono mišiniams, armuotams atitinkamai 40 kg/m³ ir 80 kg/m³ plieno plaušo ($V_f=0,5\%$ ir 1 %), nustatytas vidutinis betono cilindrinis 43,1 ir 44,8 MPa gniuždomasis stipris (f_{cm}).

Atliekant eksperimentą buvo naudojami keturi LVDT (Linear variable differential transformer) matuokliai. Plyšio atsivėrimo plotis nustatytas įpjovos lygyje priklijavus du kampuočius ir pritvirtinus matuoklį. Įlinkis matuotas sijos viduryje trimis matuokliais, vienu viršuje bei dvejais apačioje. Apkrovos istorija fiksuota matuokliu, kuriuo tiesiogiai perduota koncentruota apkrova sijai. Matavimo schema pateikta 20 pav.

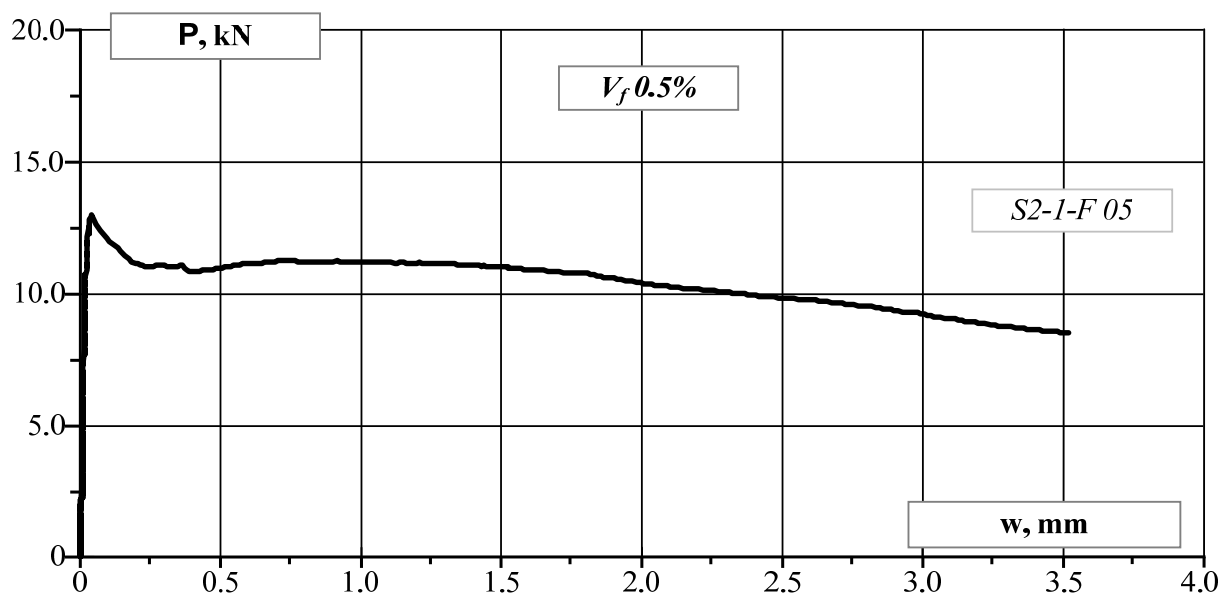


20 pav. Eksperimentinių duomenų matavimo schema

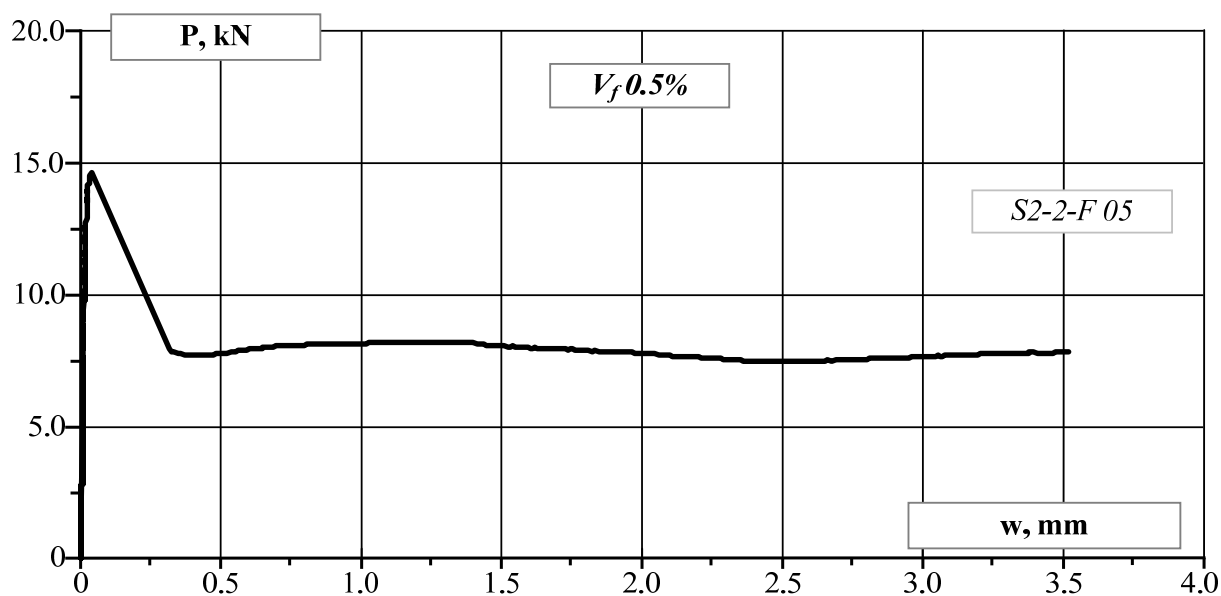
3.2. Eksperimentinių diagramų gavimas

Sudaromos apkrovos ir plyšio pločio ($P-w$) bei apkrovos ir įlinkio ($P-f$) priklausomybės naudojantis eksperimento metu užfiksuota apkrovos, įlinkio (trijų matuoklių vidurkio) ir plyšio pločio atsivėrimo, istorija. Šių priklausomybių diagramos pateiktos 21-28 paveiksluose. Aikščiau matyti, jog sijų, armuotų puse procento plieno plaušu, lenkiamasis liekamasis stipris tesudaro apie 65% vienu procentu armuotų bandinių lenkiamojo stiprio. Apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagramose nesudėtinga įžvelgti pleišėjimo apkrovą. Kaip minėta pirmajame skyriuje, dispersiškas

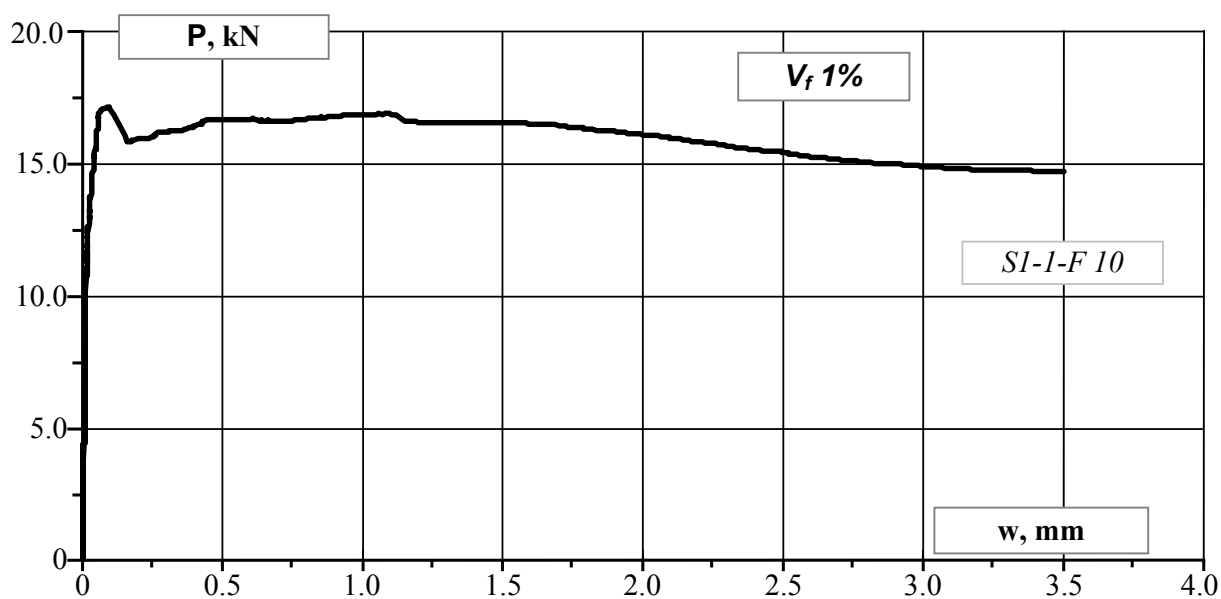
armavimas praktiškai nedaro įtakos tempiamojo betono stipriui, todėl elementai pleišėja veikiant panašioms apkrovoms.



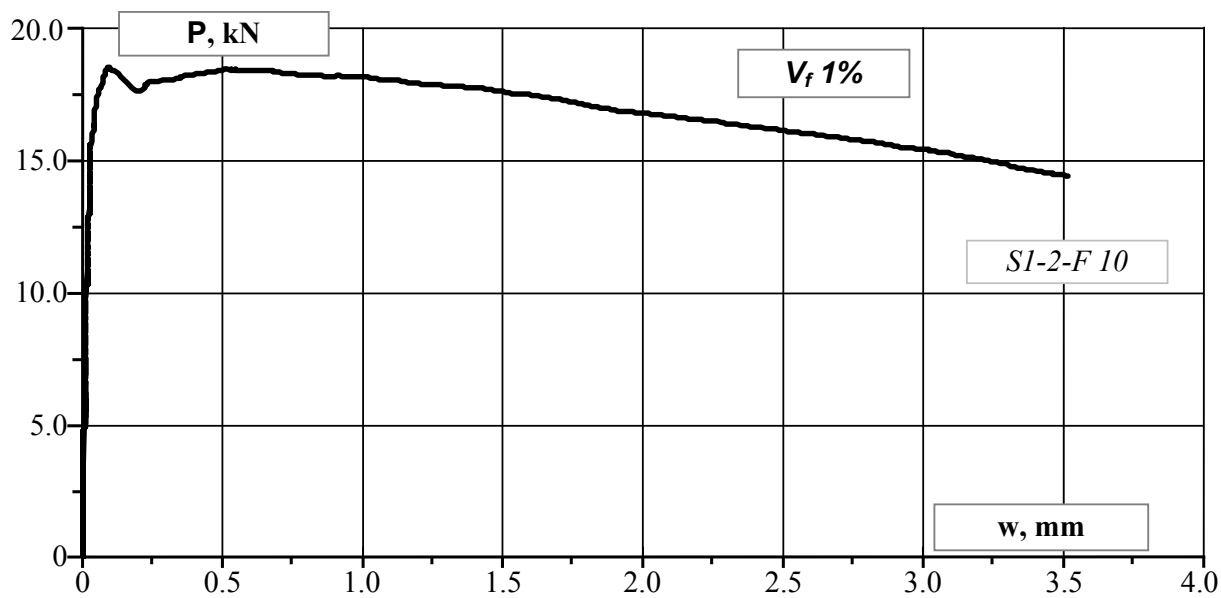
21 pav. Sijos S2-1-F 05 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama



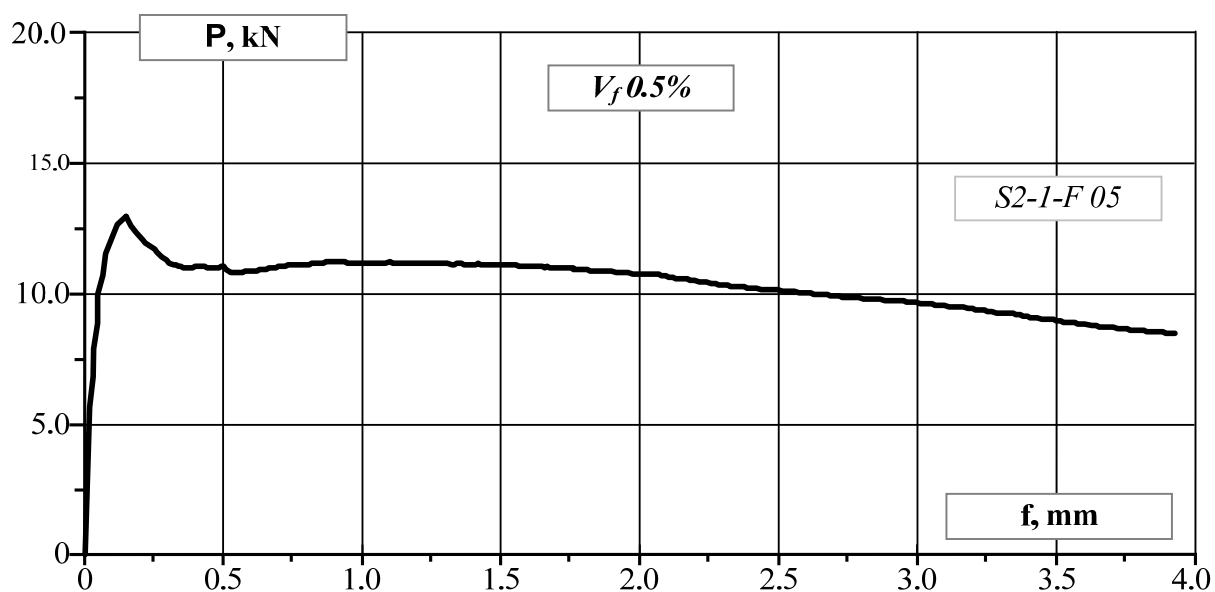
22 pav. Sijos S2-2-F 05 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama



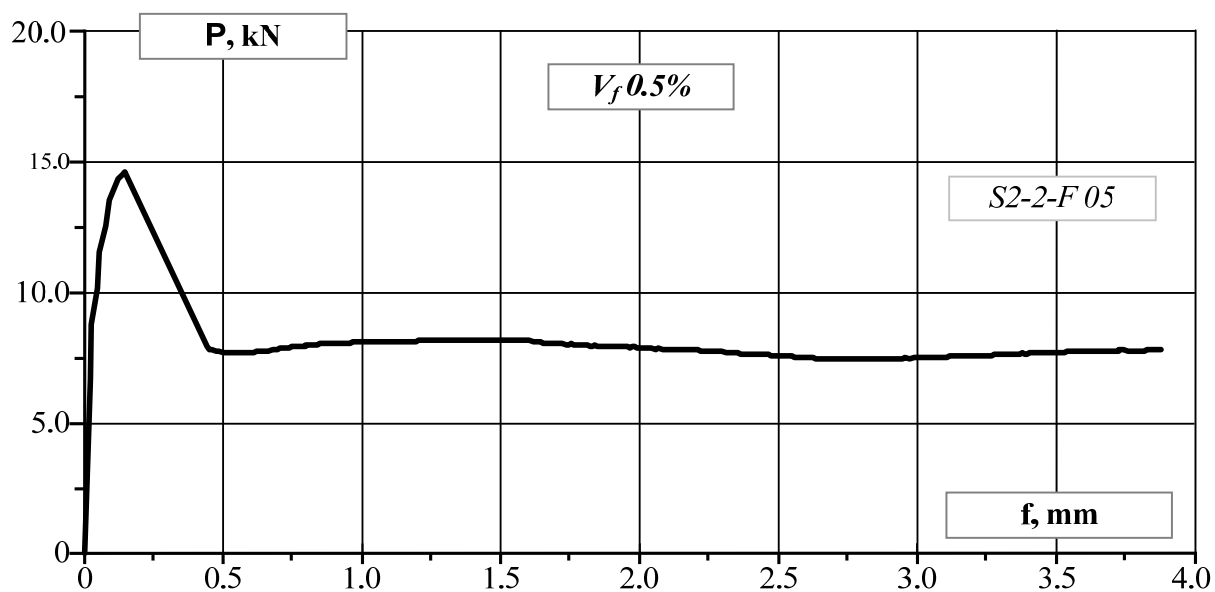
23 pav. Sijos S1-1-F 10 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama



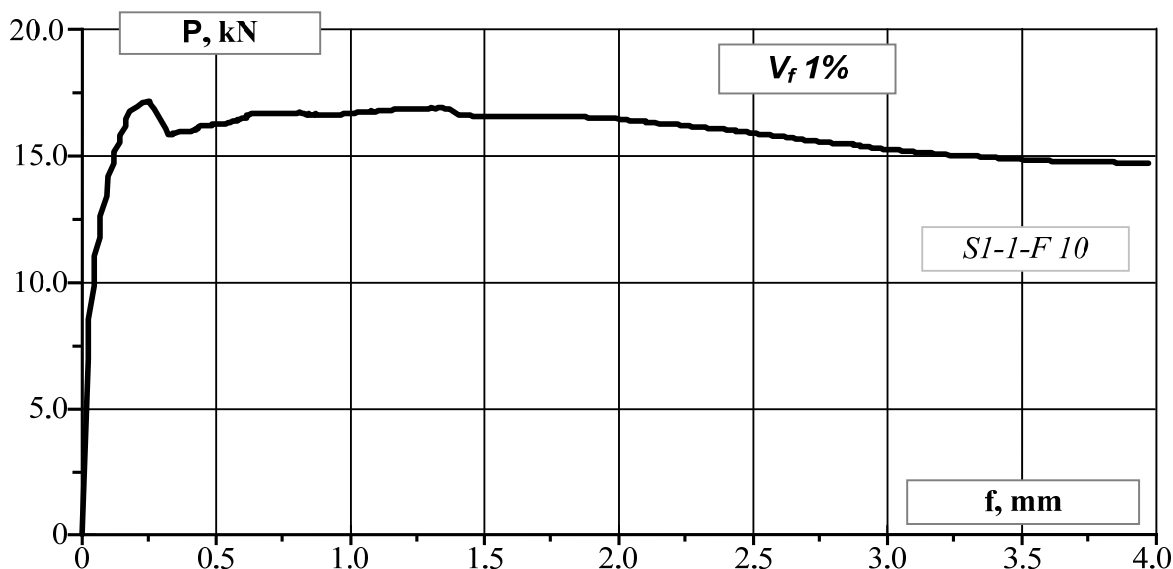
24 pav. Sijos S1-2-F 10 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama



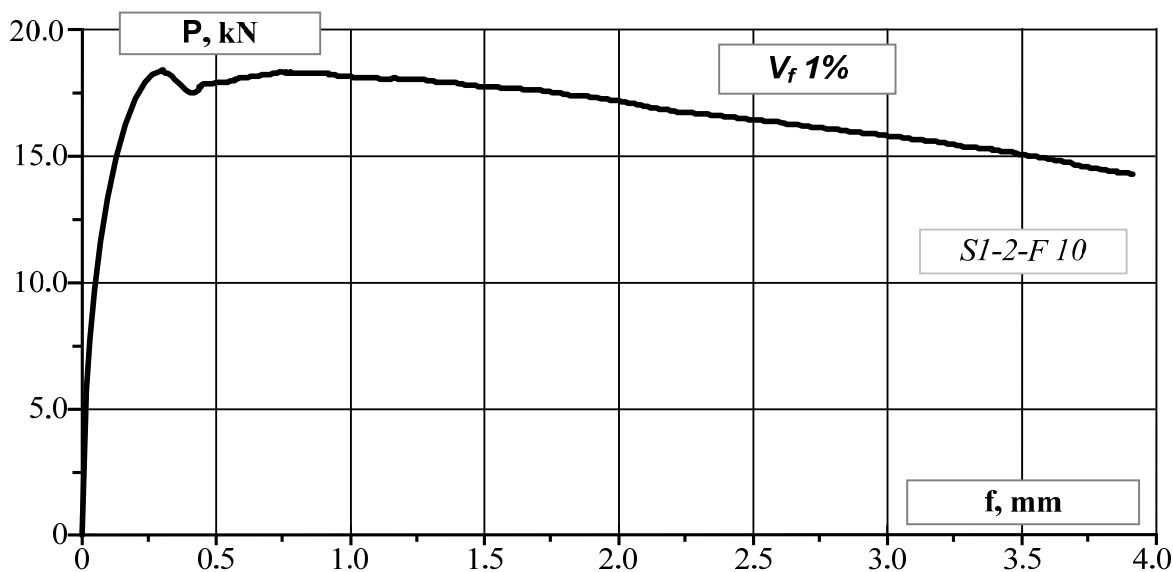
25 pav. Sijos S2-1-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama



26 pav. Sijos S2-2-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama



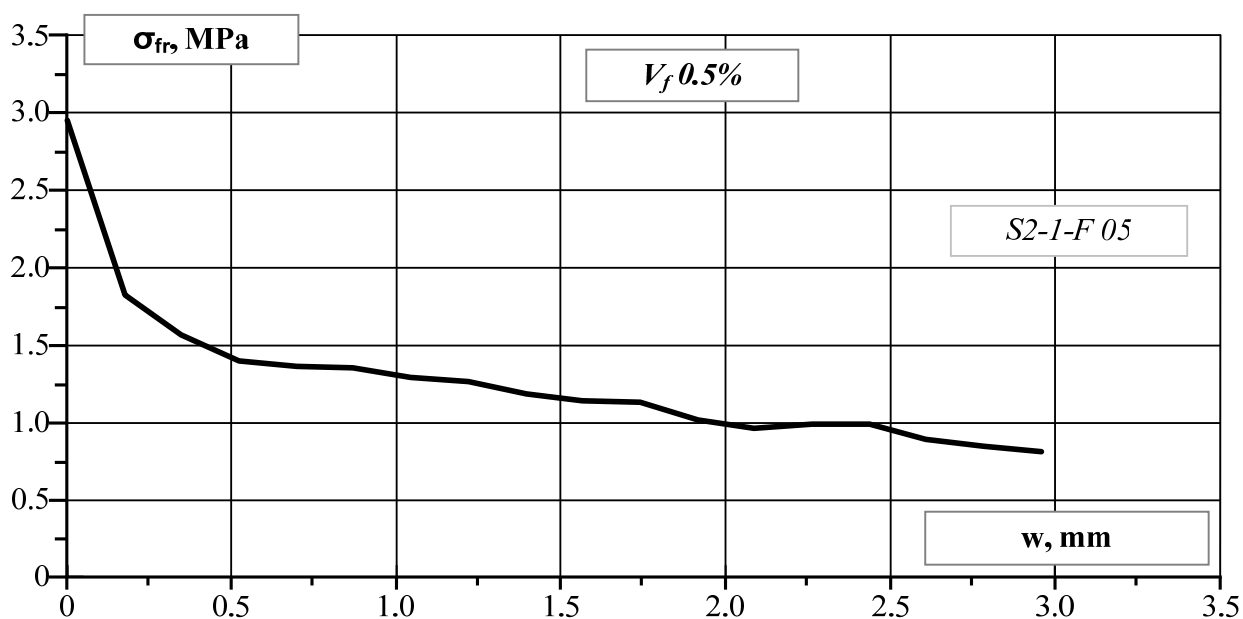
27 pav. Sijos S1-1-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama



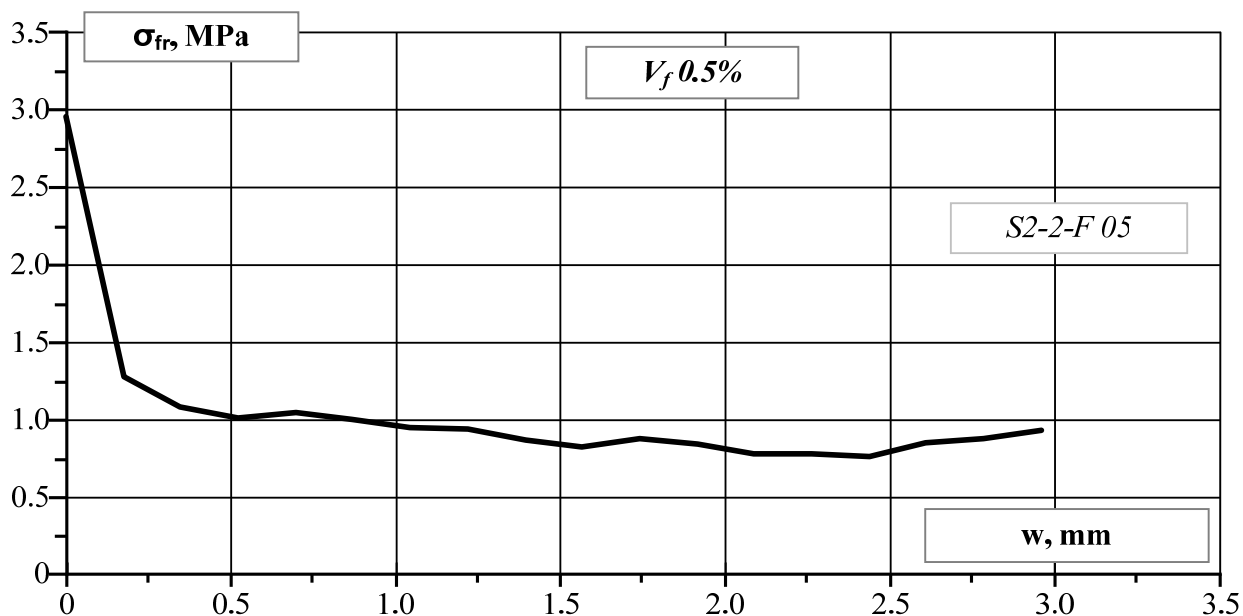
28 pav. Sijos S1-2-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama

3.3. Siūlomu metodu nustatyto liktinio stiprio rezultatai

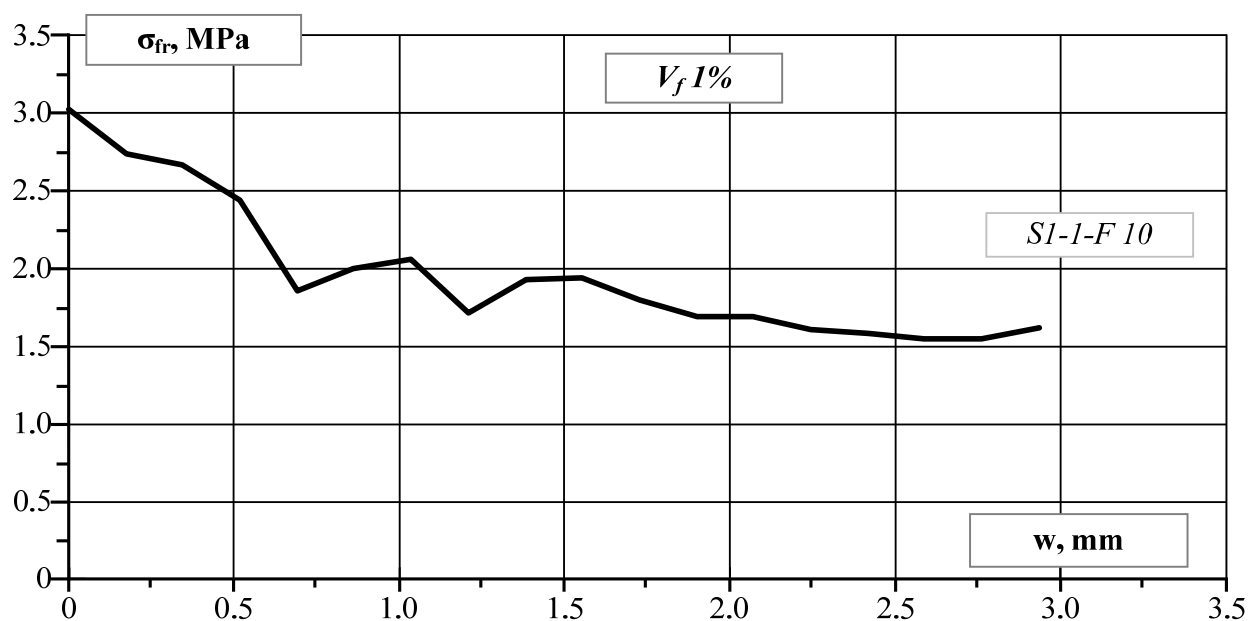
Apskaičiuojamos liekamųjų įtempių ir plyčio pločio priklausomybės (σ_{fr-w}) sijoms: S2-1-F 05; S2-2-F 05; S1-1-F 10; S1-2-F 10, taikant antrajame skyriuje aprašytą metodiką. Akivaizdu, jog plaušo kiekis daro didelę įtaką liktiniam supleišėjusio betono stipriui. Elementų, armuotų 0,5 % plieno plaušo, apskaičiuotas liekamasis stipris svyruoja apytiksliai nuo 1,5 iki 0,9 MPa (mažėjantis didėjant plyšio pločiui), kai 1 % betono mišinyje nuo 2,5 iki 1,4 Mpa (žr. 2 priedas).



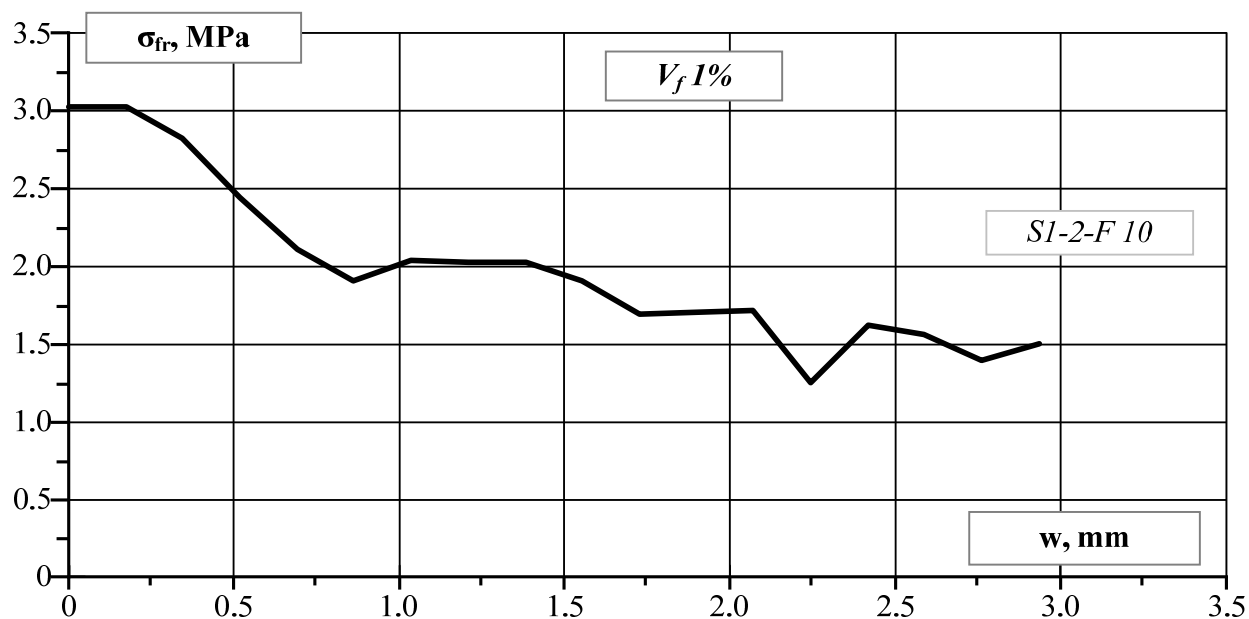
29 pav. Sijos S2-1-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant atvirkštinio uždavinio metodą



30 pav. Sijos S2-2-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant atvirkštinio uždavinio metodą



31 pav. Sijos S1-1-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant atvirkštinio uždavinio metodą

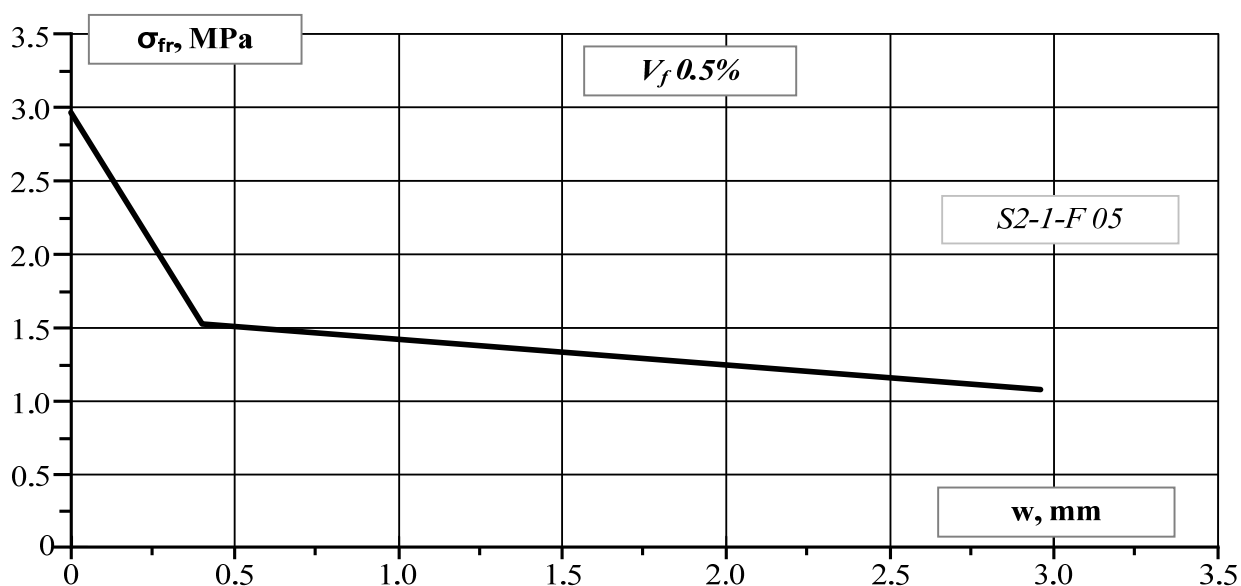


32 pav. Sijos S1-2-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant atvirkštinio uždavinio metodą

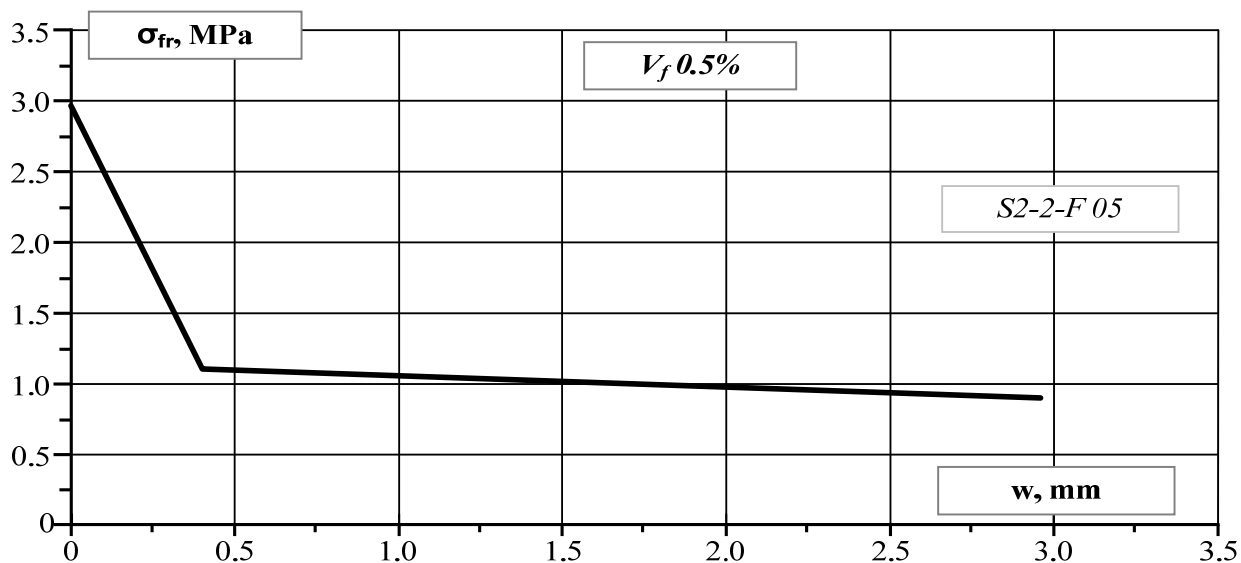
3.4. Liktinio stiprio rezultatai taikant Rilem TC-162 TDF metodiką

Apskaičiuojamos liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės (σ_{fr-w}) sijoms: S2-1-F 05; S2-2-F 05; S1-1-F 10; S1-2-F 10, taikant pirmajame skyriuje aprašytą Rilem TC-162 TDF

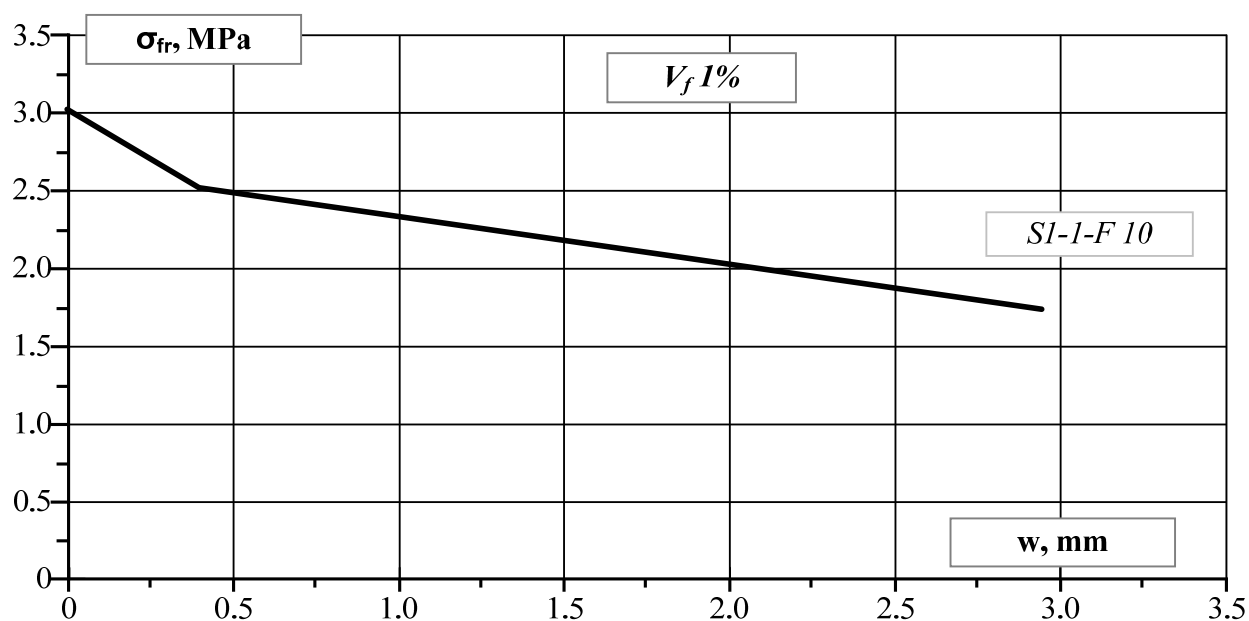
metodiką. Rilem įtempių ir deformacijų ($\sigma_{fr}-\varepsilon$) priklausomybė pakeičiama įtempių ir plyšio pločio ($\sigma_{fr}-w$) diagrama. Liekamojo įtempio reikšmės esant charakteringosioms deformacijoms ($\varepsilon_1, \varepsilon_3, \varepsilon_3$) yra: ε_1 - tempiamojo betono stipris (f_{ct}); ε_2 - supleišėjusio betono liktinis stipris, apskaičiuotas esant plyšio pločiui $CTOD=0,4\text{mm}$; ε_3 - supleišėjusio betono liktinis stipris, apskaičiuotas esant plyšio pločiui $CTOD=2,96\text{mm}$. Tuomet pleišėjimo deformacija yra laikoma grafiko pradiniu tašku ir atidedamos charakteringosios liktinio stiprio reikšmės. Taip daroma todėl, jog norima kiekybiškai palyginti siūlomo ir Rilem metodų rezultatus.



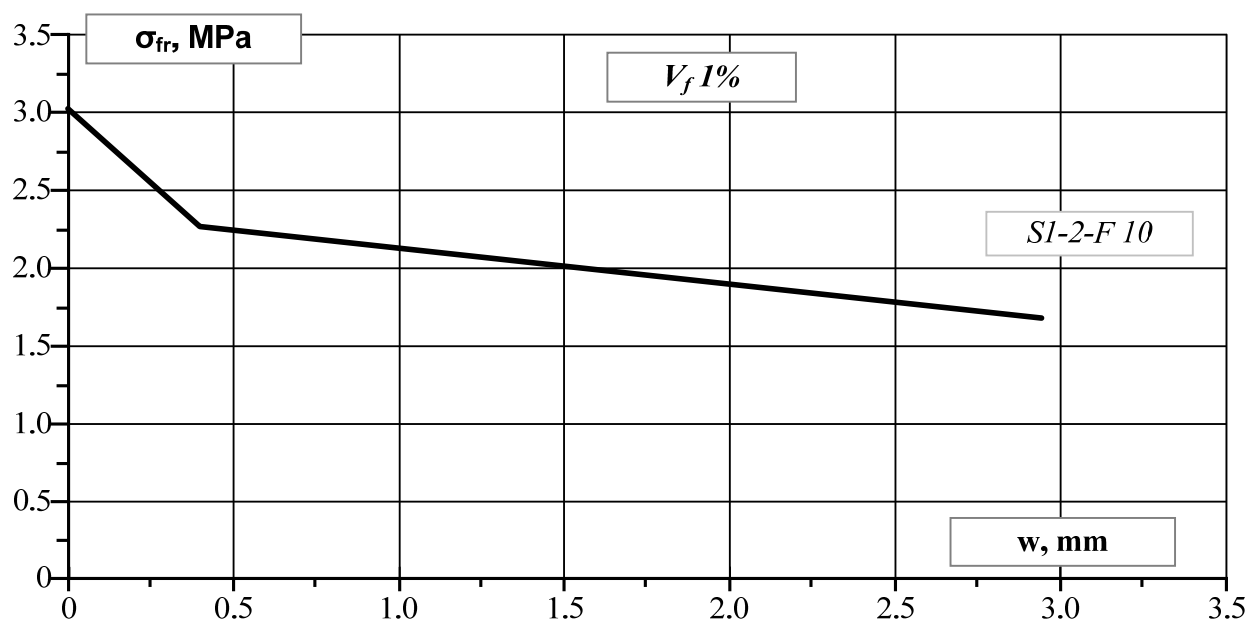
33 pav. Sijos S2-1-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant Rilem metodą



34 pav. Sijos S2-2-F 05 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant Rilem metodą



35 pav. Sijos SI-1-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant Rilem metodą

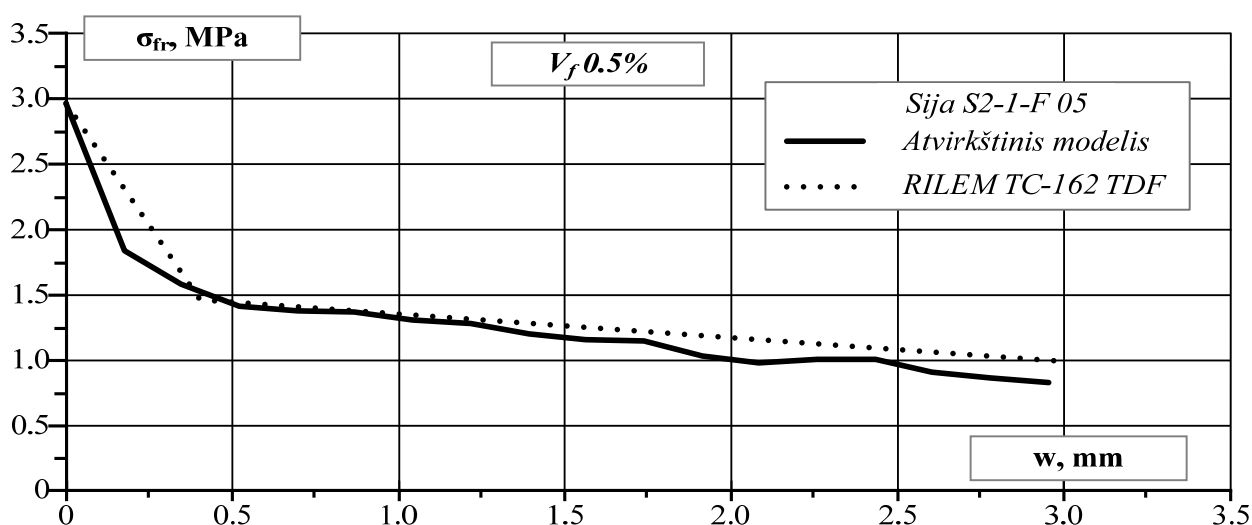


36 pav Sijos SI-2-F 10 liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybės diagrama, gauta taikant Rilem metodą

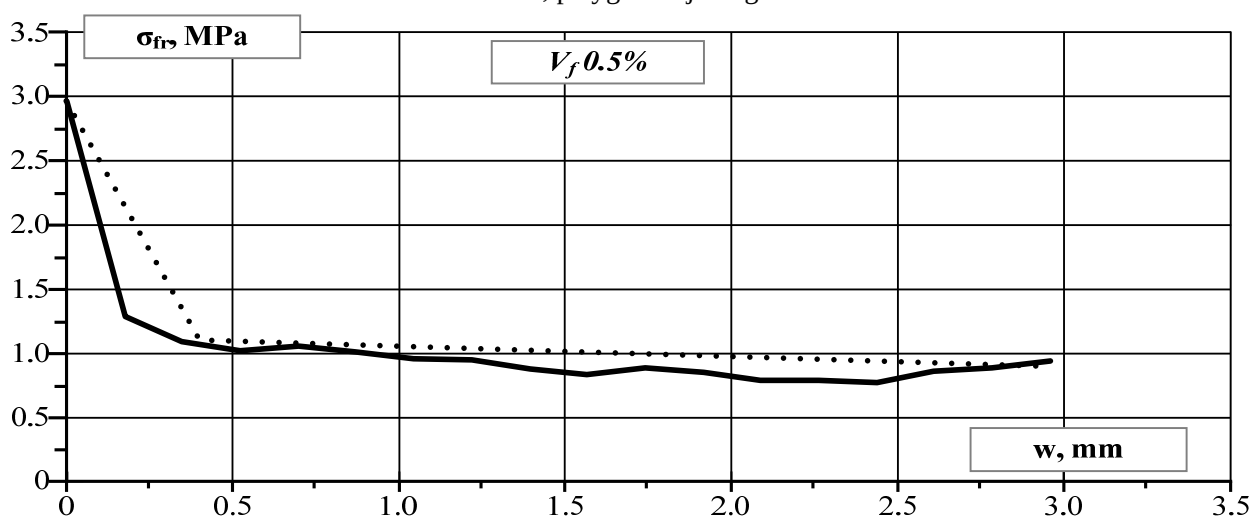
3.5. Liktinio stiprio diagramų palyginimas, modeliavimas „ATENA“

Šiame darbe pasiūlyto alternatyvaus plaušu armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymo būdo adekvatumas įrodomas dvejais būdais. Visų pirma, nustatyti liekamieji įtempiai palyginami su rezultatais, gautais naudojant Rilem metodiką. BE programa „ATENA“ panaudojama siekiant

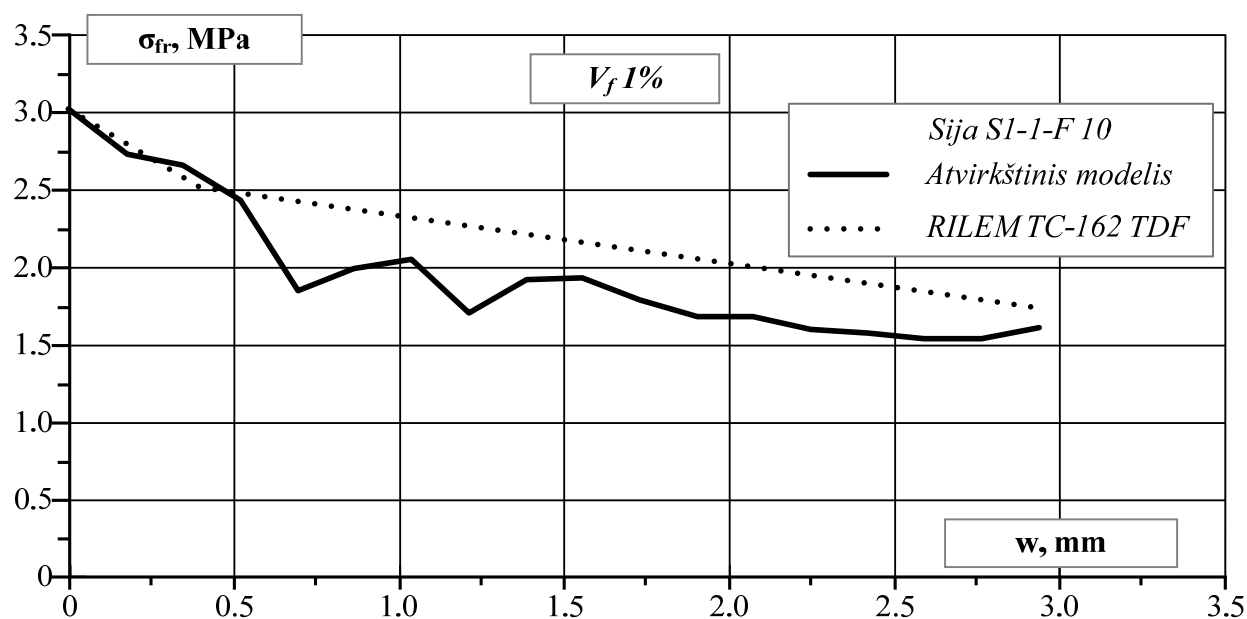
įsitikinti, ar apskaičiuotoji supleišėjusio betono $\sigma_{fr}-w$ priklausomybė leidžia tiksliai modeliuoti FRC konstrukcijas. Sukuriamas analogiškas eksperimentui modelis ir aprašomi medžiagos parametrai. Duomenys, naudojami sudarant medžiagos modelį yra šie: betono gniuždomasis bei tempiamasis stipriai (f_{ck} , f_{ct}), tamprumo modulis (E_c), bei aprašoma betono elgsena po pleišėjimo, panaudojant nustatytas liekamųjų įtempių priklausomybes. Gniuždomasis stipris nustatytas atlikus standartinį gniuždomos prizmės bandymą ir pagal (LST EN-1992-1-1:2005 3.1 lent.) nustatomas betono tempiamasis stipris bei deformacijų modulis. Tuomet atkartojama bandymo eiga ir rezultatai palyginami su eksperimentiniais. Pritaikytame skaičiavimo modelyje nevertinamas galimas apkrovos pikas prieš elementui supleišėjant, todėl diagramos iki plyšio neturi būti vertinamos.



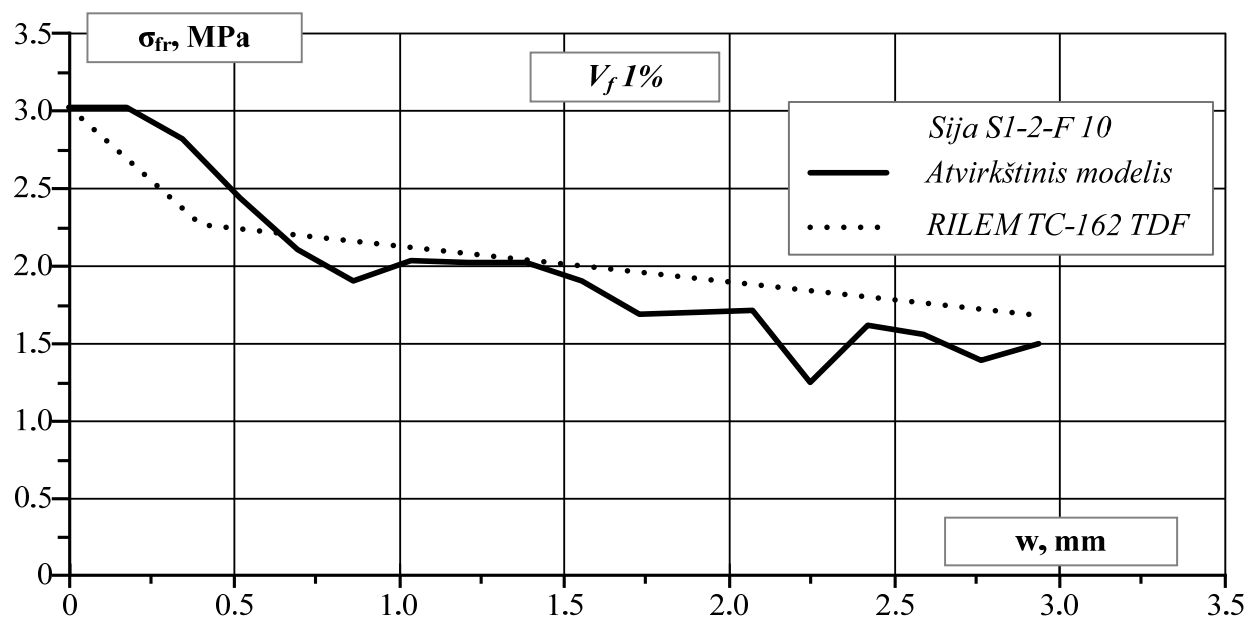
37 pav. Sijos S2-1-F 05 liekamųjų įtempių priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinį ir Rilem metodus, palyginimoji diagrama



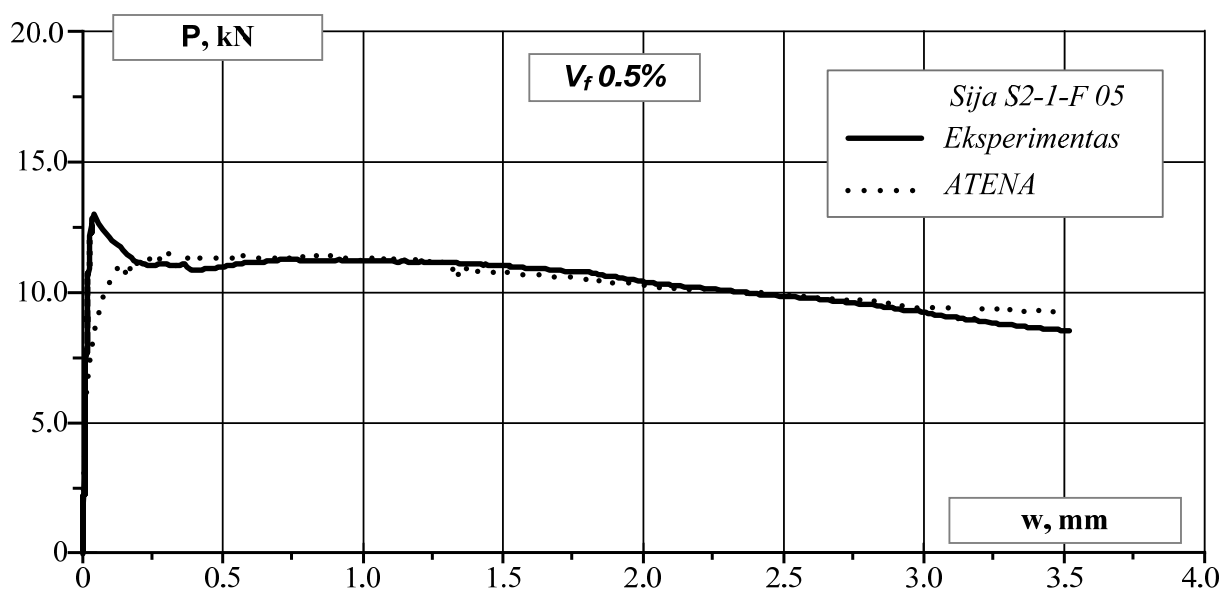
38 pav. Sijos S2-2-F 05 liekamųjų įtempių priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinį ir Rilem metodus, palyginimoji diagrama



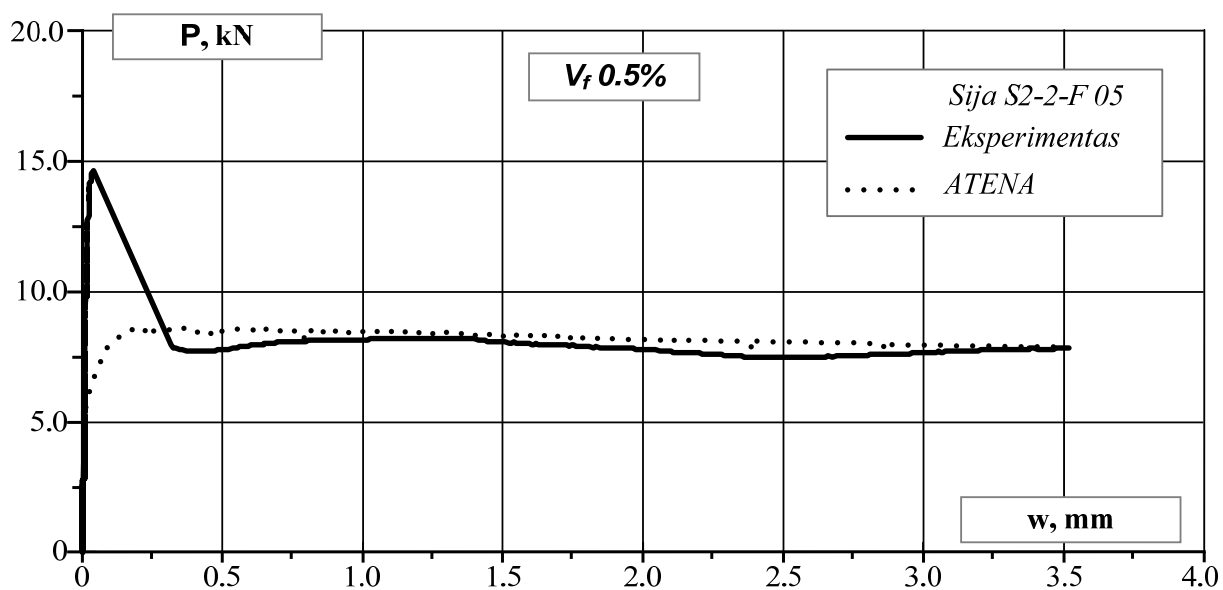
39 pav. Sijos S1-1-F 10 liekamųjų įtempių priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinį ir Rilem metodus, palyginimoji diagrama



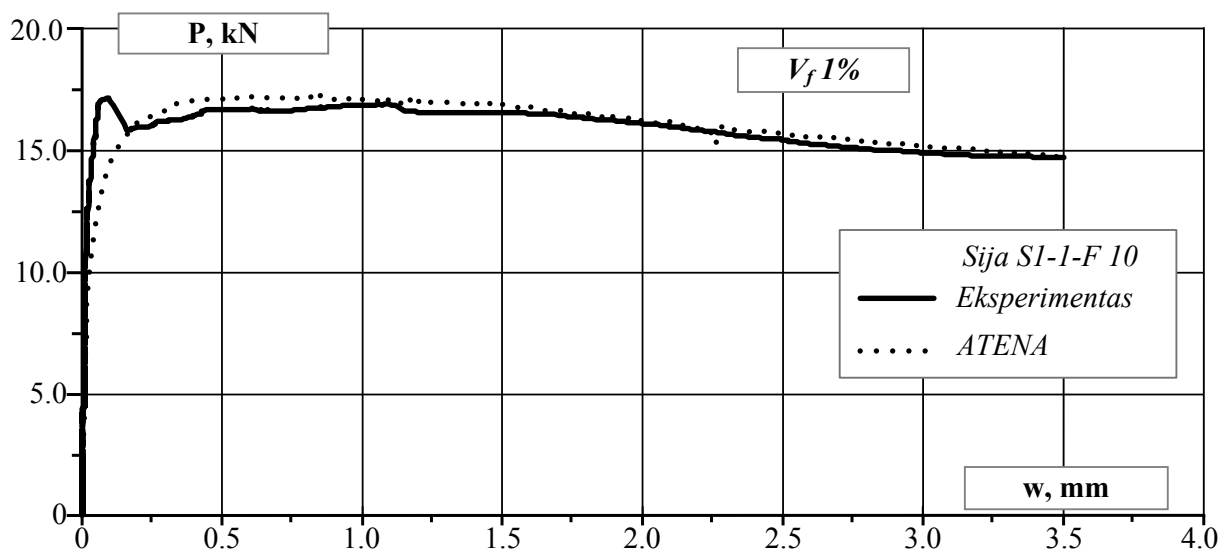
40 pav. Sijos S1-2-F 10 liekamųjų įtempių priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinį ir Rilem metodus, palyginimoji diagrama



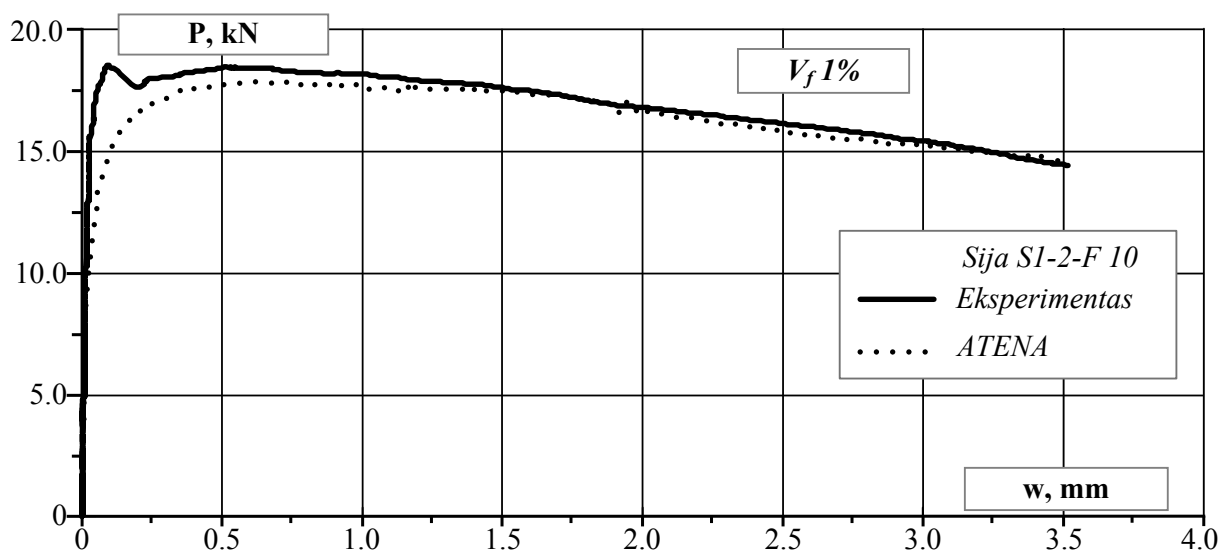
41 pav. Sijos S2-1-F 05 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų palyginimas



42 pav. Sijos S2-2-F 05 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų palyginimas



43 pav. Sijos S1-1-F 10 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų palyginimas



44 pav Sijos S1-2-F 10 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų palyginimas

IŠVADOS

Šiame darbe aptarta dispersiškai armuoto betono privalumai bei trūkumai. Šio betono privalumai yra tokie: didesnis atsparis dinaminiams bei temperatūriniais poveikiams, plastiškas suirimas, gebėjimas priešintis įvairaus pobūdžio pleišėjimui. Vienas didžiausių dispersiškai armuoto betono privalumų yra gebėjimas perimti tempimo įtempius atsivėrus plyšiui. Šis efektas vadinamas liekamuoju stipriu. Dėl chaotiško plaušo išsidėstymo, plaušo formos bei armavimo koeficiento skirtumų liekamasis stipris kiekvienam konkrečiam betono mišiniui skiriasi. Todėl reikalinga kuo paprastesnė ir efektyvesnė metodika naudojamo betono liekamojo stiprio nustatymui.

Šiuo metu liekamasis stipris gali būti apskaičiuojamas taikant tiesioginius skaitinius metodus arba eksperimentu grįstus metodus. Taikant tiesioginius nustatymo būdus, liekamasis stipris apskaičiuojamas taikant empirines formules. Parenkami koeficientai pagal betono mišinio sudėtį. Šie rezultatai yra labai apytiksliai, orientuoti į atsargos pusę. Ašinio tempimo bandymus sudėtinga ir brangu atlikti, todėl šiuo metu pasaulyje plačiausiai taikomi lenkiamų prizmių bandymo rezultatai grysti metodai. Kaip minėta, pagrindiniai jų trūkumai yra betono stiprio ribojimas, fiksuotas bandomo elemento gabaritas ir taikymas tik plieno plaušui. Todėl būtinas dispersiškai armuoto supleišėjusio betono liekamojo stiprio nustatymo metodas, kuris galėtų būti taikomas įvairių gabaritų bandiniams bei plaušo tipams.

Pristatomas koncentruota jėga lenkiamos sijos eksperimentu grystas būdas dispersine armatūra armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymui. Pateikiamos pagrindinės prielaidos ir nuosekliai aprašoma skaičiavimo eiga. Šio universalaus metodo privalumai yra šie: neribojamas bandinio gabaritas, betono stipris, plaušo pobūdis, t.y gali būti naudojamas sintetinis plaušas, plaušas pagamintas perdirbus senas padangas ir t.t.

Atliekama eksperimentinė programa pagal Rilem TC-162 TDF reikalavimus. Liekamieji įtempiai nustatomi taikant siūlomą bei RILEM metodus, pateikiamos liekamųjų įtempių diagramos ir atliekamas rezultatų palyginimas.

Specializuota netiesinė *BE* programa „*ATENA*“ sukuriama analogiškas eksperimentui modelis. Dispersiškai armuoto betono savybės, reikalingos programoje medžiagos modeliui sukurti, nustatomos atsižvelgiant į gniuždomo kubo bandymo rezultatus bei šiame darbe siūlomu metodu nustatytus liekamuosius įtempius, t.y supleišėjusio betono gebėjimą atlaikyti tempimo įtempius. Atlikus analizę ir palyginus rezultatus su ekperimentiniais gautas labai geras sutapimas. Tai rodo, jog liekamieji įtempiai nustatyti adekvačiai.

Reikia atkreipti dėmesį, jog net 0,5 % plieno plaušu armuotas betonas atsivėrus maksimalaus pločio plyšiams, geba atlaikyti įtempius, sudarančius ne mažiau nei 30 % tempiamojo stiprio. Nors projektavime tempiamojo betono darbas skaičiuojant saugos ribinius būvius nevertinamas, naudojant plaušu armuotą betoną žymiai padidinama elemento saugos atsarga.

Tolimesnė plaušu armuoto betono tyrimų eiga – nestandarinių gabaritų elementų bei ne plieno plaušu armuoto betono, tyrimai. Pasiūlytuoju metodu nustatyti elemento gabarito, plaušo formos bei mechaninių savybių įtaką supleišėjusio *FRC* liekamiesiems įtempiams. Norint įgyvendinti šį uždavinį, būtina atlikti plačią eksperimentinę programą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- ACI-544.4R-88. Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute, 1999.
- Deutscher Beton- und Betontechnikverein. 2001. *DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton*. Berlin.
- Edgington, J., 1973. *Steel-Fibre-Reinforced-Concrete*, PhD thesis, University of Surrey.
- Kaklauskas G., Bačinskas D., Gribniak V., Jakubovskis R., Ulbinas D., Gudonis E., Meškėnas A., Timinskas E., Sokolov A. Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos: vadovėlis. Vilnius: Technika, 2012. 300 p.
- Hannant, D. J., Mar. 1984, *Fibre Cements and Fibre Concretes*, Wiley & Sons, Chichester, 219 p.
- Henager, Charles H., and Doherty, Terrence J., Jan. 1976, Analysis of Reinforced Fibrous Concrete Beams, *Proceedings*, ASCE, V12, ST-1, p. 177-188.
- Lietuvos standartas LST EN-1992-1-1:2005. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis: Bendrosios ir pastatų taisyklės. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
- Löfgren I. 2005. *Fiber-reinforced Concrete for Industrial Construction*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- Naaman A. E. 2003. Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites. *RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, 95-113.
- RILEM TC 162-TDF. 2000. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending tests, *Materials and structures*, V33: 3-5.
- RILEM TC 162-TDF. 2002. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending tests, *Materials and structures*, V35: 579-582
- RILEM TC 162-TDF, 2003. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, σ - ϵ design method. Final recommendation, *Materials and Structures* 36, pp. 560-567.

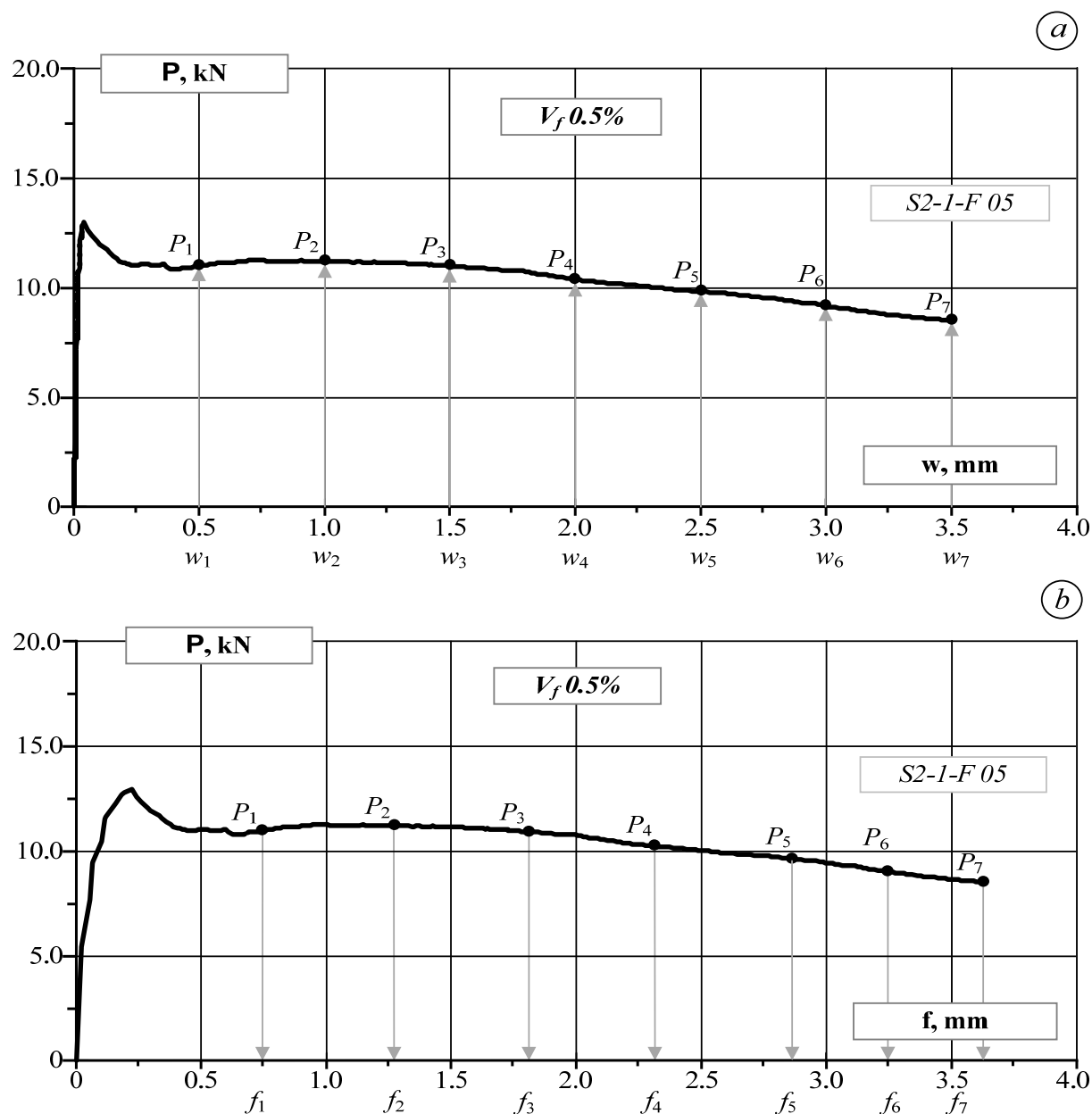
Robins, P. J., and Calderwood, R. W., Jan. 1978, *Explosive Testing of Fibre-Reinforced Concrete*, Concrete (London), V. 12, No. 1, pp. 26-28.

Shah, S. P., and Batson, G. B., Editors, 1987, *Fiber Reinforced Concrete-Properties and Applications*, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 597 p.

Swamy, R. N., and Stavrides, H., Mar. 1979, *Influence of Fiber Reinforcement on Restrained Shrinkage and Cracking*, ACI JOURNAL, *Proceedings* V. 76, No. 3, p. 443-460.

A PRIEDAS. Pasiūlyto metodo taikymo pavyzdys

Šiame priede pateikiamas liekamųjų įtempių ir plyšio pločio atsivėrimo priklausomybės (σ_f-w) nustatymo pavyzdys. Nagrinėjama eksperimentinė sija S2-1-F 05, aprašyta trečiajame skyriuje, kurios ilgis yra 500mm, plotis 150mm ir efektyvusis aukštis (h_{sp}) 125mm. Eksperimentiniai rezultatai pateikiami A.1 pav.



A.1 pav. Sijos S2-1-F 05 eksperimentinės apkrovos ir plyšio pločio (a) bei apkrovos ir įlinkio (b) diagramos

Pagal 14 pav. pateiktą schemą nustatomos įlinkių (f_i) ir apkrovų (P_i) reikšmės, atitinkančios pasirinktuosius plyšio plotius w_i (žr. A.1 pav). Plyšio pločio prieaugis Δw parenkamas 0,5 mm, taip gaunami 7 apkrovimo žingsniai. Apkrovos žingsnius i atitinkančios apkrovos P_i , plyšio pločio w_i bei įlinkio f_i reikšmės pateikiamos A.1 lentelėje.

A.1 lentelė. Eksperimentiniai duomenys

Apkrovos žingsnis (i)	1	2	3	4	5	6	7
Apkrova (P_i), kN	11,01	11,12	10,92	10,32	9,73	9,15	8,44
Plyšio plotis (w_i), mm	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Įlinkis (f_i), mm	0,751	1,37	1,784	2,31	2,84	3,25	3,637

Kiekviename apkrovimo etape i pagal 2.3 formulę nustatomas plyšio aukštis y_i . Siją veikiantis normalizuotas lenkimo momentas ($M_{i\bar{s},i}$), t.y lenkimo momentas padalintas iš elemento pločio, apskaičiuojamas taikant 2.5 išraišką. Gniuždomosios zonos aukštis: $x_i = h_{sp} - y_i$. Kaip minėta, plyšys dalijamas į vienodo aukščio zonas, kuriose veikia pastovūs liekamieji įtempiai, o jų aukščiai apskaičiuojami: $H_i = y_i/i$. Apskaičiuotosios gniuždomosios zonos (x_i), plyšio aukščio (w_i), pastovių įtempių veikimo zonos aukštis (H_i) ir lenkimo momento ($M_{i\bar{s},i}$) reikšmės pateikiamos A.2 lentelėje.

A.2 lentelė. Skaičiavime naudojami duomenys

Apkrovos žingsnis (i)	1	2	3	4	5	6	7
Gniuždomos zonos aukštis (x_i), m	0,0417	0,0288	0,0208	0,0163	0,0134	0,0096	0,0068
Plyšio aukštis (y_i), m	0,0833	0,0962	0,1042	0,1087	0,1116	0,1154	0,1182
Pastovių įtempių veikimo zonos aukštis (H_i), m	0,0833	0,0481	0,0347	0,0272	0,0223	0,0192	0,0169
Lenkimo momentas ($M_{i\bar{s},i}$), kN	9,167	9,267	9,100	8,600	8,108	7,625	7,033

Pirmajame apkrovimo žingsnyje veikiančių liekamųjų įtempių ($\sigma_{fr,1}$) atstojamosios veikimo petys z_1 , taško (O) atžvilgiu (žr 2.6 pav), apskaičiuojamas pagal 2.11 išraišką:

$$z_1 = \frac{y_1 + 2 \cdot y_1 \cdot (i-1)}{2 \cdot i} + \frac{2}{3} \cdot x_1 = \frac{0,0833 + 2 \cdot 0,0833 \cdot (1-1)}{2 \cdot 1} + \frac{2}{3} \cdot 0,0417 = 0,06944 \text{ m.}$$

Nustatoma veikiančio normalizuoto lenkimo momento reikšmė:

$$M_{i\bar{s},1} = \frac{P_1 \cdot l}{4 \cdot b} = \frac{11,01 \cdot 0,5}{4 \cdot 0,15} = 9,167 \text{ kN.}$$

Zonos, kurioje veikia įtempiai $\sigma_{fr,1}$, aukštis nustatomas:

$$H_1 = \frac{y}{i} = \frac{0,0833}{1} = 0,0833 \text{ m.}$$

Liekamieji įtempiai $\sigma_{fr,1}$ apskaičiuojami taikant 2.6 formulę:

$$\sigma_{fr,1} = \frac{M_{iš,1}}{z_1 \cdot H_1} = \frac{9,167}{0,0694 \cdot 0,0833} = 1,586 \text{ MPa.}$$

Antrajame apkrovimo žingsnyje veikiančių įtempių $\sigma_{fr,1}$, $\sigma_{fr,2}$ atstojamųjų taško (O) atžvilgiu veikimo pečiai:

$$z_1 = \frac{y_2 + 2 \cdot y_2 \cdot (k-1)}{2 \cdot i} + \frac{2}{3} \cdot x_2 = \frac{0,0962 + 2 \cdot 0,0962 \cdot (1-1)}{2 \cdot 2} + \frac{2}{3} \cdot 0,0288 = 0,04327 \text{ m,}$$
$$z_2 = \frac{y_2 + 2 \cdot y_2 \cdot (i-1)}{2 \cdot i} + \frac{2}{3} \cdot x_2 = \frac{0,0962 + 2 \cdot 0,0962 \cdot (2-1)}{2 \cdot 2} + \frac{2}{3} \cdot 0,0288 = 0,09134 \text{ m.}$$

Liekamieji įtempiai ($\sigma_{fr,2}$) apskaičiuojami taikant 2.8 formulę:

$$\sigma_{fr,2} = \frac{M_{iš,2} - [\sigma_{fr,1} \cdot H_2] \cdot z_1}{z_2 \cdot H_2} = \frac{9,267 - [1,586 \cdot 10^3 \cdot 0,0481] \cdot 0,04237}{0,09134 \cdot 0,0481} = 1,359 \text{ MPa.}$$

Trečiajame apkrovimo žingsnyje veikiančių įtempių $\sigma_{fr,1}$, $\sigma_{fr,2}$, $\sigma_{fr,3}$ atstojamųjų taško (O) atžvilgiu veikimo pečiai:

$$z_1 = \frac{y_3 + 2 \cdot y_3 \cdot (k-1)}{2 \cdot i} + \frac{2}{3} \cdot x_3 = \frac{0,1042 + 2 \cdot 0,1042 \cdot (1-1)}{2 \cdot 2} + \frac{2}{3} \cdot 0,0208 = 0,03125 \text{ m,}$$
$$z_2 = \frac{y_3 + 2 \cdot y_3 \cdot (k-1)}{2 \cdot i} + \frac{2}{3} \cdot x_3 = \frac{0,1042 + 2 \cdot 0,1042 \cdot (2-1)}{2 \cdot 2} + \frac{2}{3} \cdot 0,0208 = 0,06597 \text{ m,}$$
$$z_3 = \frac{y_3 + 2 \cdot y_3 \cdot (i-1)}{2 \cdot i} + \frac{2}{3} \cdot x_3 = \frac{0,1042 + 2 \cdot 0,1042 \cdot (3-1)}{2 \cdot 2} + \frac{2}{3} \cdot 0,0208 = 0,10069 \text{ m.}$$

Liekamieji įtempiai $\sigma_{fr,3}$ apskaičiuojami pagal 2.10 formulę:

$$\sigma_{fr,3} = \frac{M_{iš,3} - [\sigma_{fr,1} \cdot H_3] \cdot z_1 - [\sigma_{fr,2} \cdot H_3] \cdot z_2}{z_3 \cdot H_3} =$$
$$\frac{9,267 - [1,586 \cdot 10^3 \cdot 0,0347] \cdot 0,03125 - [1,359 \cdot 10^3 \cdot 0,0347] \cdot 0,06597}{0,10069 \cdot 0,0347} = 1,22 \text{ MPa.}$$

Tolimesnė skaičiavimo eiga analogiška pateiktiesiems apkrovos žingsniams. Apskaičiuoti liekamųjų įtempių atstojamųjų pečiai z_i pateikti A.3 lentelėje.

A.3 lentelė. Apskaičiuotos z_i reikšmės

Apkrovos žingsnis (i)	4	5	6	7
Atstojamosios petys z_1 , m	0,02446	0,02009	0,01603	0,01295
Atstojamosios petys z_2 , m	0,05163	0,04241	0,03526	0,02984
Atstojamosios petys z_3 , m	0,07880	0,06473	0,05449	0,04673
Atstojamosios petys z_4 , m	0,10598	0,08705	0,07372	0,06363
Atstojamosios petys z_5 , m	–	0,10937	0,09295	0,08052
Atstojamosios petys z_6 , m	–	–	0,11218	0,09741
Atstojamosios petys z_7 , m	–	–	–	0,11430

Taikant 2.10 išraišką, apskaičiuojami liekamieji įtempiai $\sigma_{fr,4}$, $\sigma_{fr,5}$, $\sigma_{fr,6}$, $\sigma_{fr,7}$. Paskutiniame skaičiavimo etape, įtempiai $\sigma_{fr,7}$ apskaičiuojami:

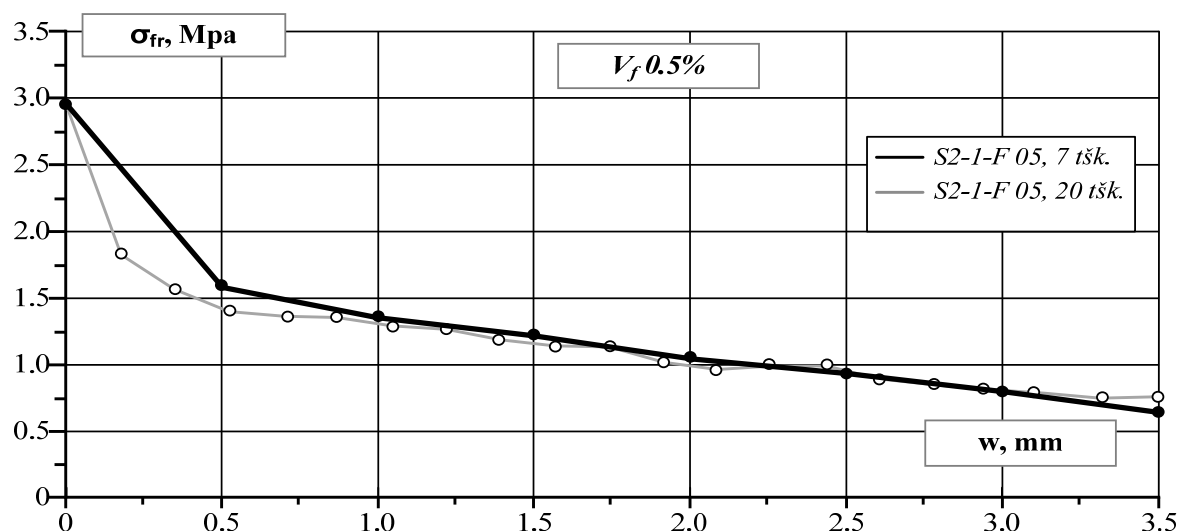
$$\sigma_{fr,7} = \frac{M_{is,7} - [\sigma_{fr,1} \cdot H_7] \cdot z_1 - [\sigma_{fr,2} \cdot H_7] \cdot z_2 - [\sigma_{fr,3} \cdot H_7] \cdot z_3 - [\sigma_{fr,4} \cdot H_7] \cdot z_4 - [\sigma_{fr,5} \cdot H_7] \cdot z_5 - [\sigma_{fr,6} \cdot H_7] \cdot z_6}{z_7 \cdot H_7} = 0,664 \text{ MPa.}$$

Šios liekamųjų įtempių reikšmės $\sigma_{fr,i}$, atitinkančios plyšio plotius w_i , pateiktos P1.4 lentelėje.

A.4 lentelė. Nustatytos liekamųjų įtempių reikšmės

Plyšio plotis (w), mm	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
Liekamieji įtempiai (σ_{fr}), Mpa	1.5837	1.3596	1.2203	1.05091	0.9443	0.8151	0.6645

Nubraižoma σ_{fr} - w priklausomybė (A.2 pav.), kuri gaunama apskaičiuotąsias reikšmes pavaizdavus taškais ir sujungus tiesėmis. Pradinio taško reikšmė yra tempiamojo betono stipris f_{ct} , kuris nustatomas pagal (EC2 3.1 lentelę) atsižvelgiant į vidutinį gniuždomąjį betono stiprį f_{cm} . Palyginimui pridėdama diagrama, gauta naudojant $\Delta w = 0,175 \text{ mm}$.

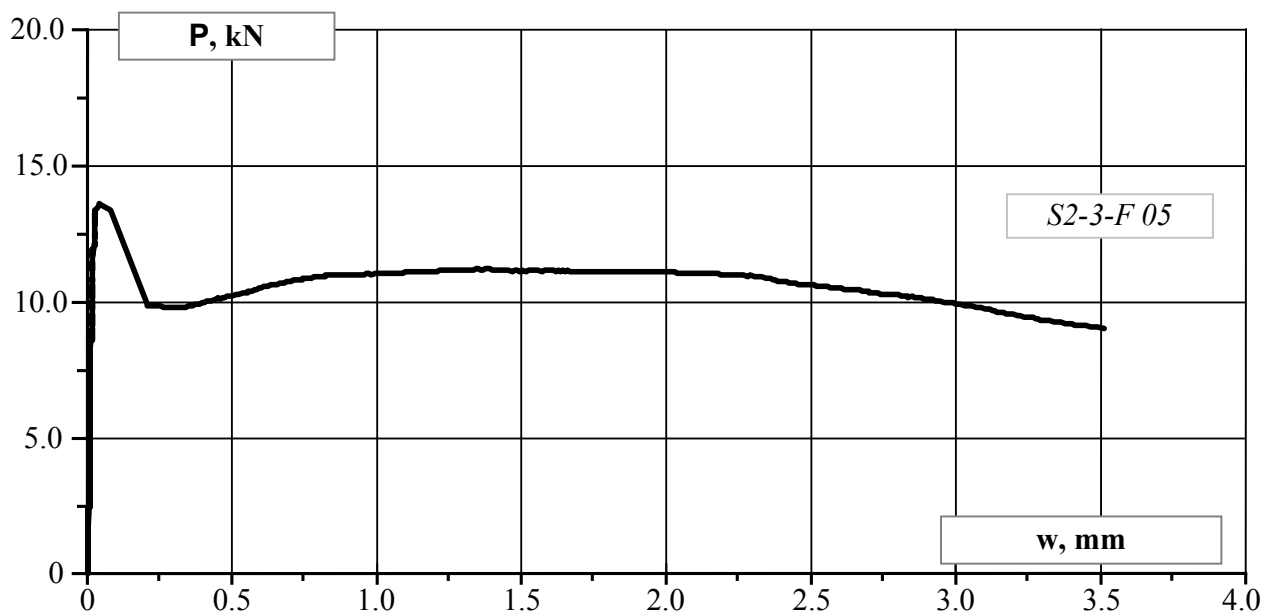


A.2 pav. Nustatyta liekamųjų įtempių ir plyšio pločio priklausomybė

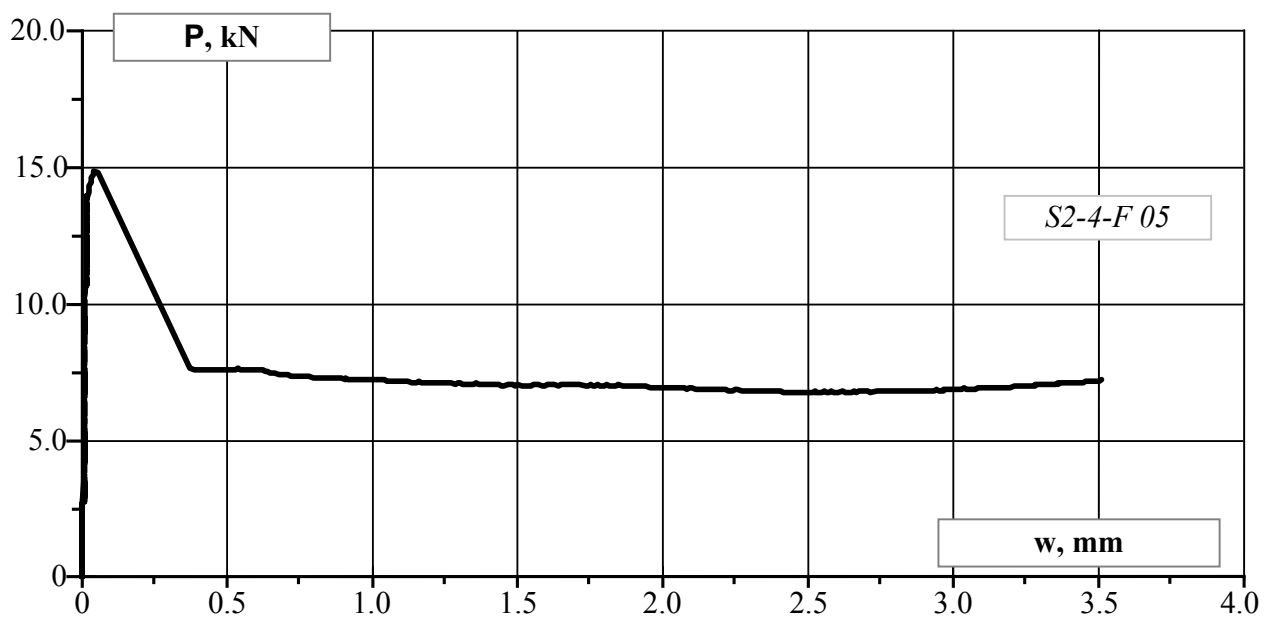
B PRIEDAS. Eksperimentų ir atliktos analizės rezultatai

B.1. Apkrovos ir plyšio pločio (P - w) eksperimentinės diagramos

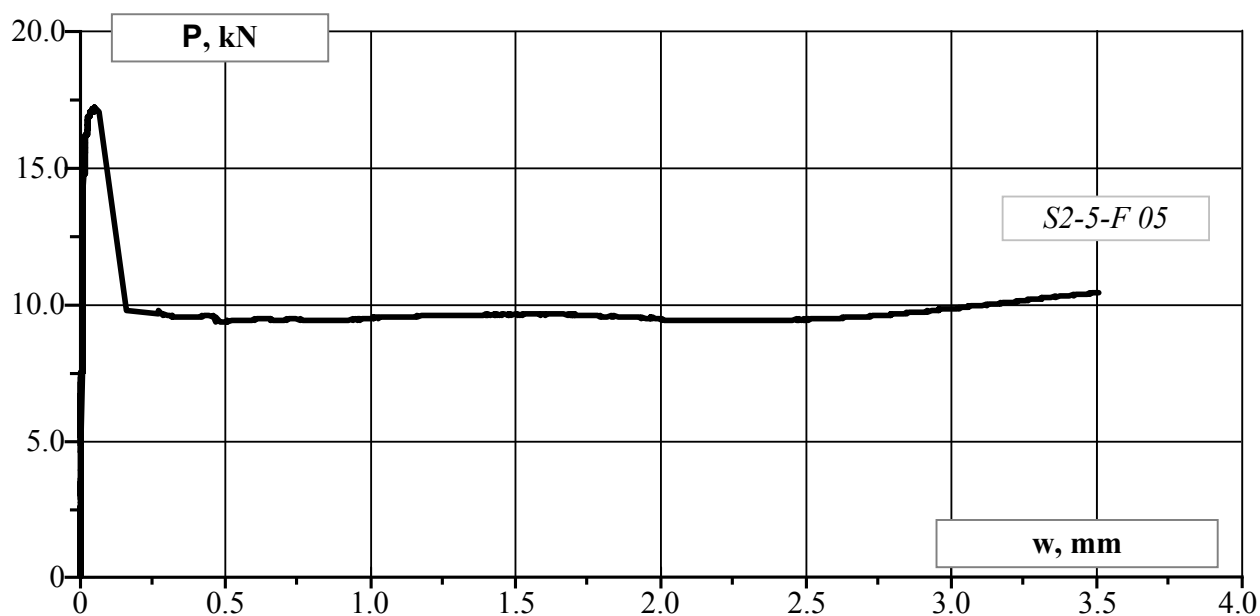
Šiame priede pateikiami pagrindinėje darbo dalyje nerodytų eksperimentinių sijų :S2-3-F 05; S2-4-F 05; S2-5-F 05; S1-3-F 10; S1-4-F 10; S1-5-F 10, bandymo bei atliktos analizės rezultatai. Eksperimentiniai apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės rezultatai pateikiami B.1-B.6 pav.



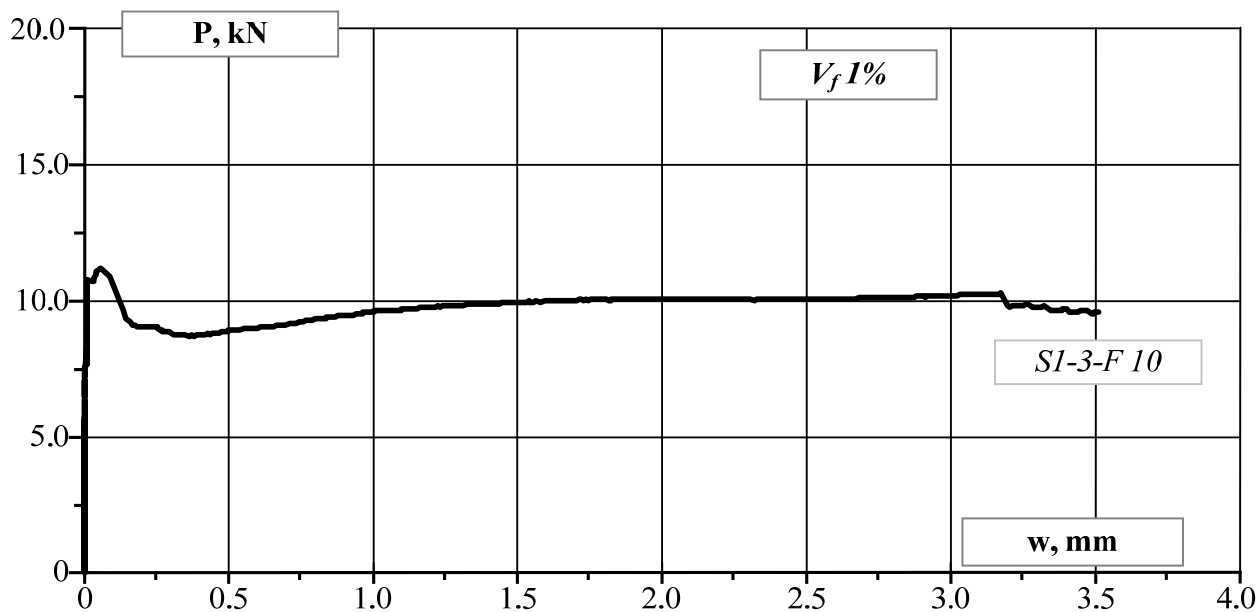
B.1 pav. Sijos S2-3-F 05 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama



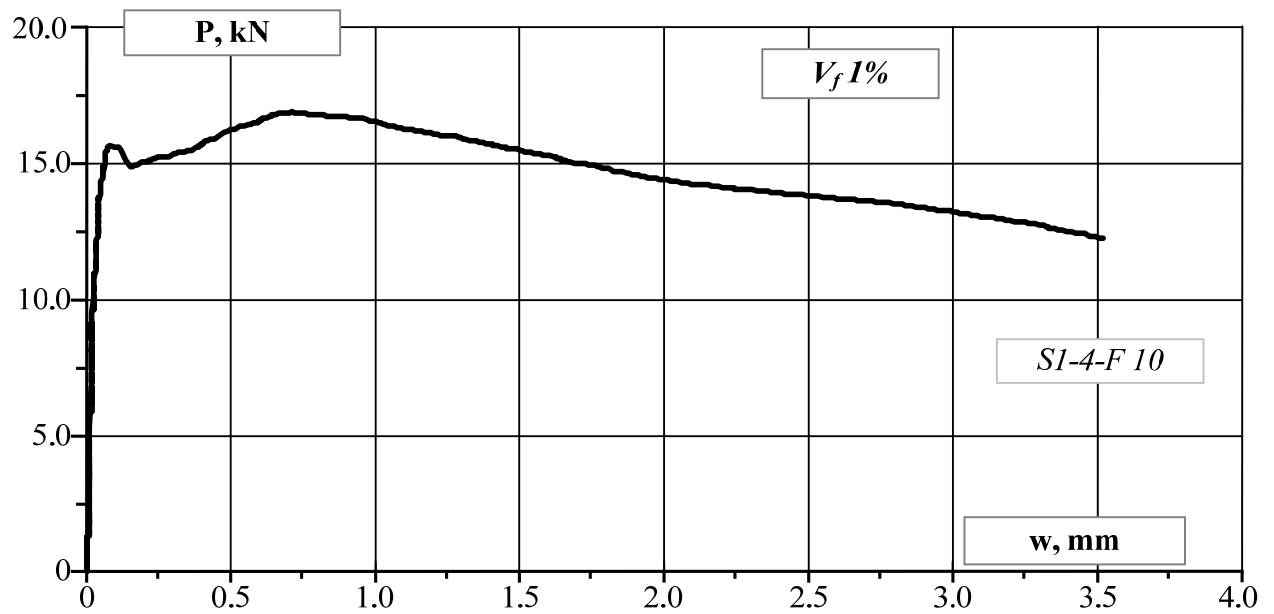
B.2 pav. Sijos S2-4-F 05 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama



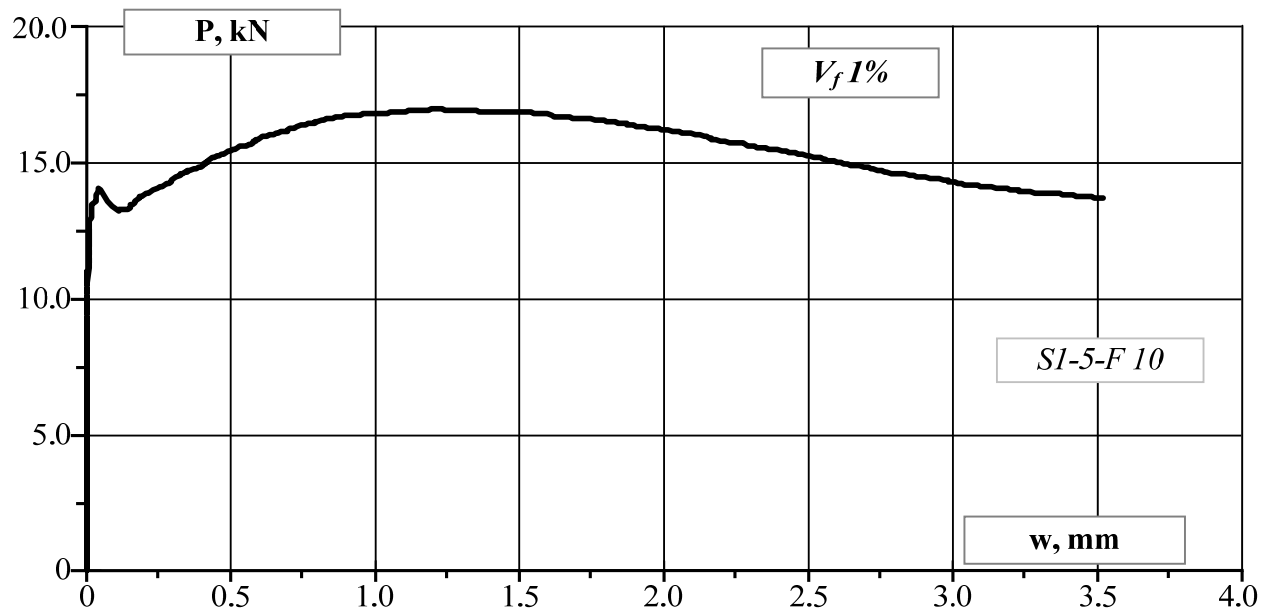
B.3 pav. Sijos S2-5-F 05 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama



B.4 pav. Sijos S1-3-F 10 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama



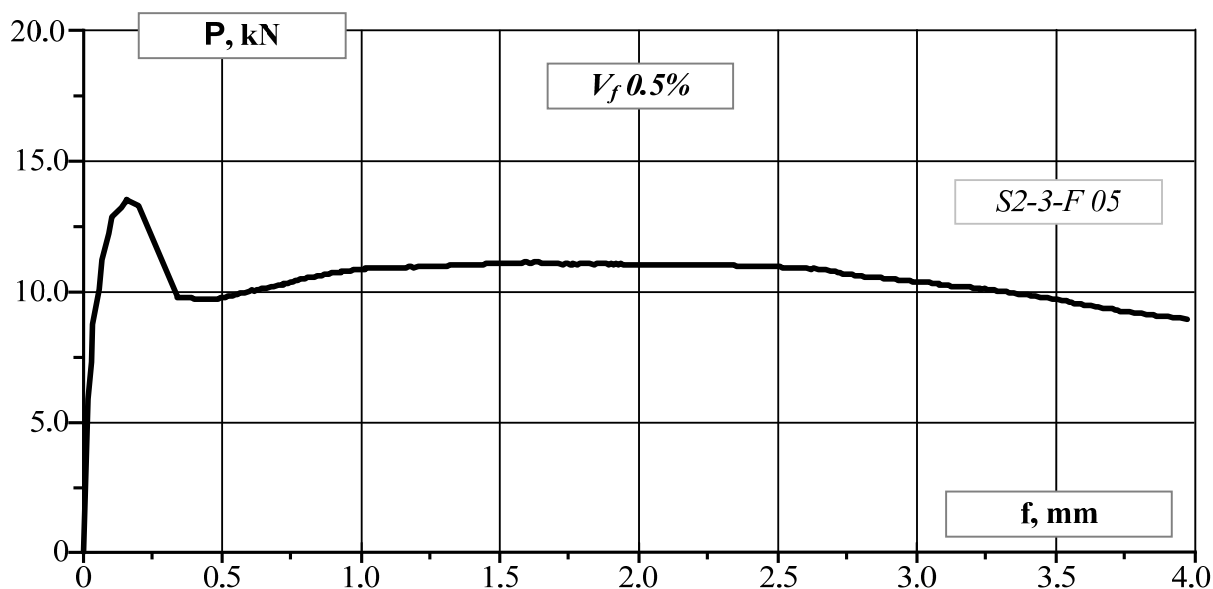
B.5 pav. Sijos S2-4-F 10 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama



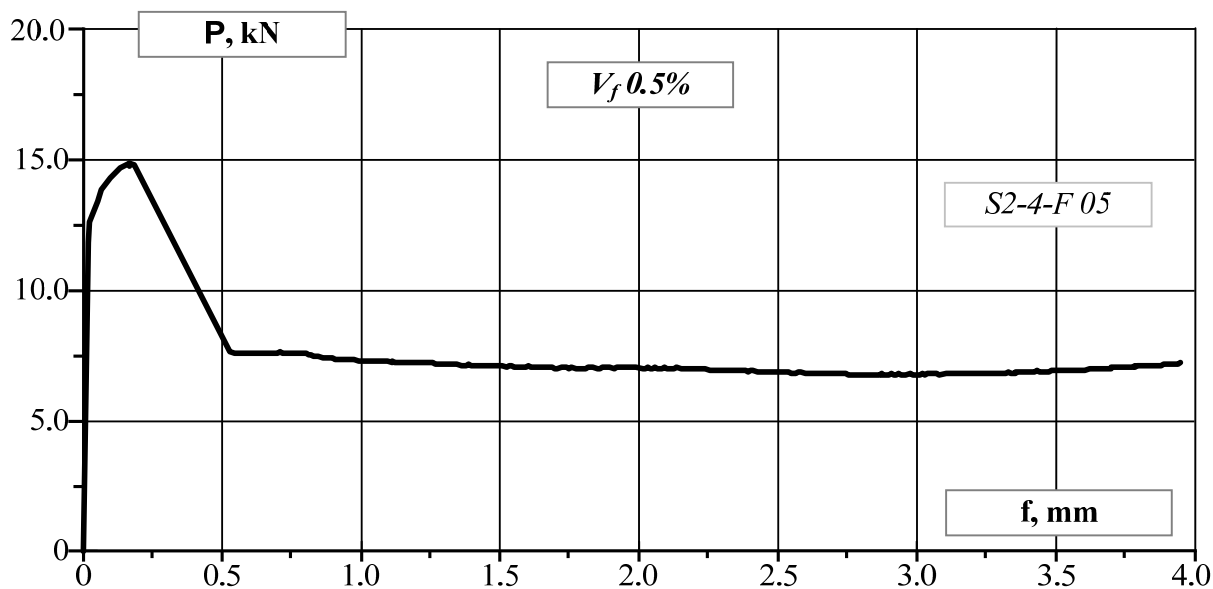
B.6 pav. Sijos S2-5-F 10 apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagrama

B.2. Apkrovos ir įlinkio (P - f) eksperimentinės diagramos

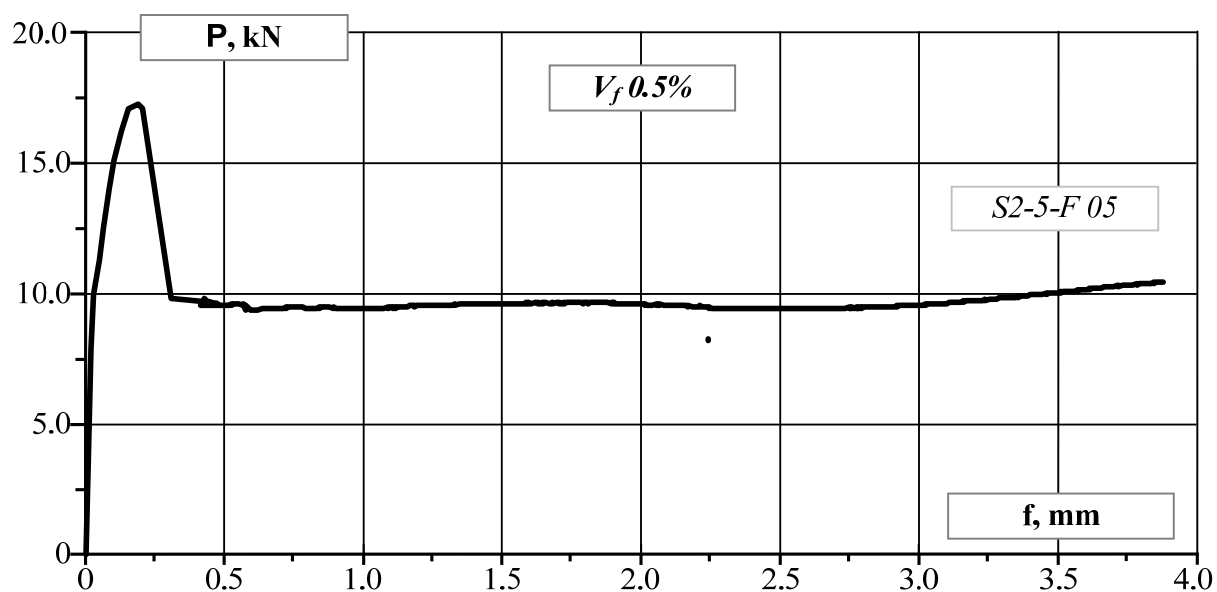
Šiame poskyryje pateikiamos bandymų metu nustatytos elementų apkrovos ir įlinkių priklausomybės diagramos.



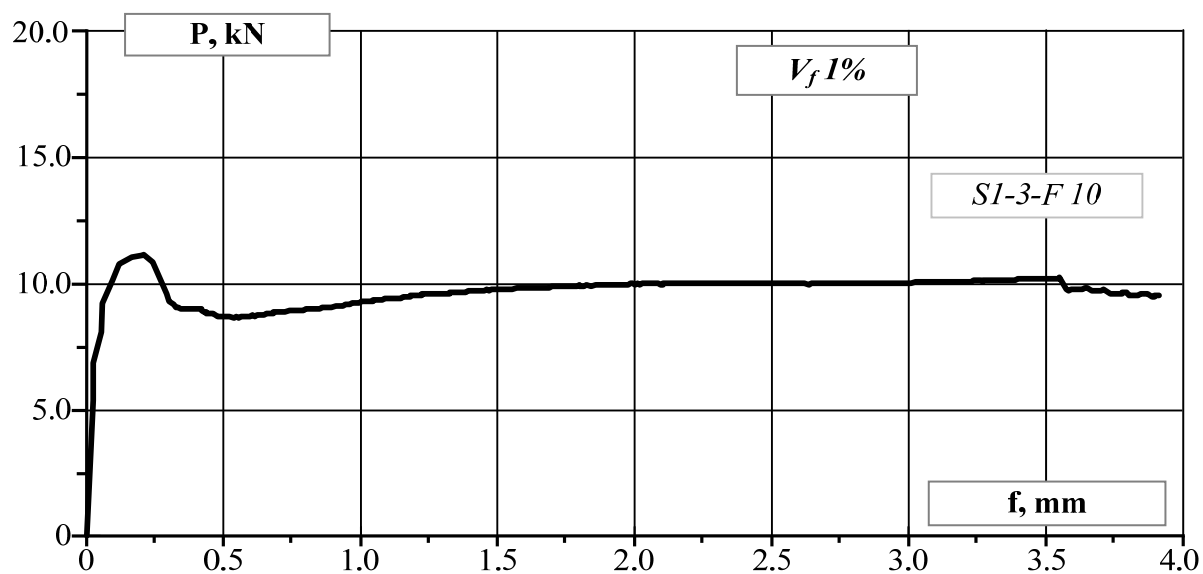
B.7 pav. Sijos S2-3-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama



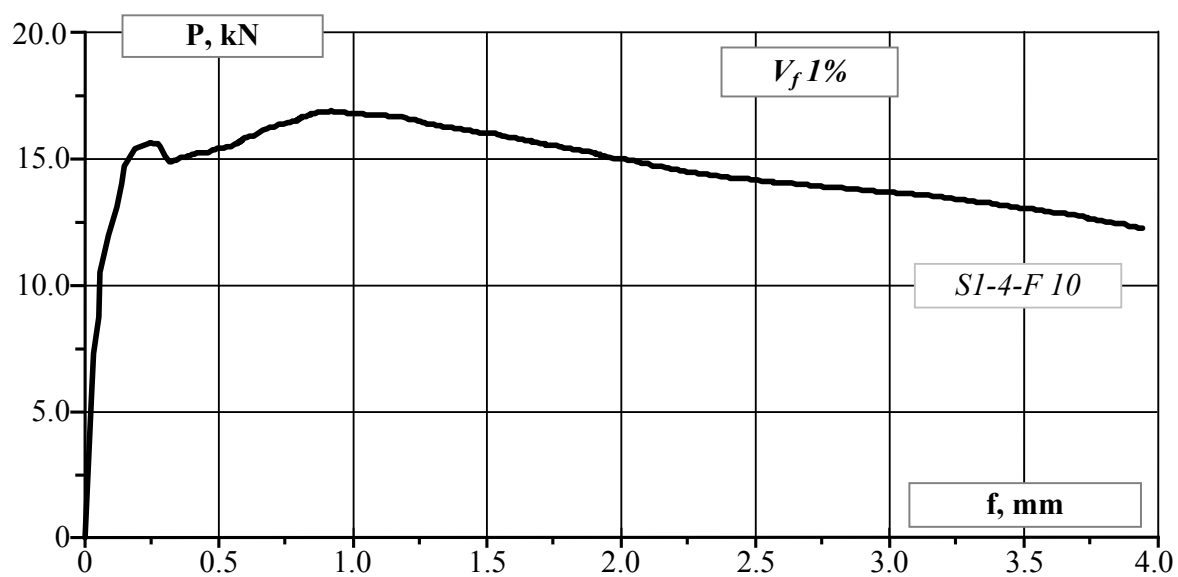
B.8 pav. Sijos S2-4-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama



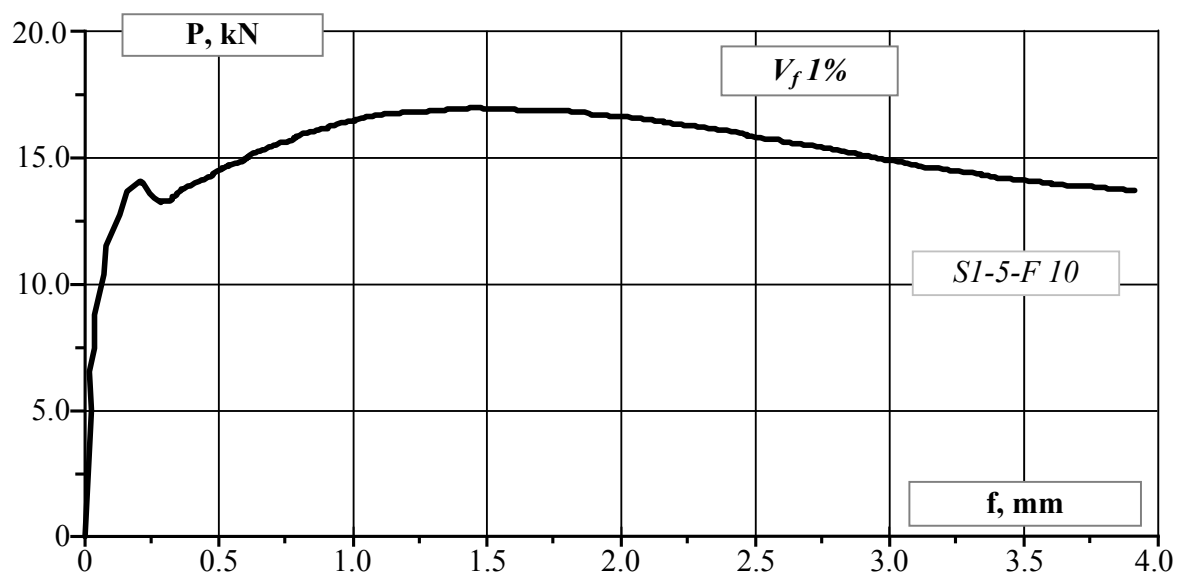
B.9 pav. Sijos S2-5-F 05 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama



B.10 pav. Sijos S1-3-F 10 apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama



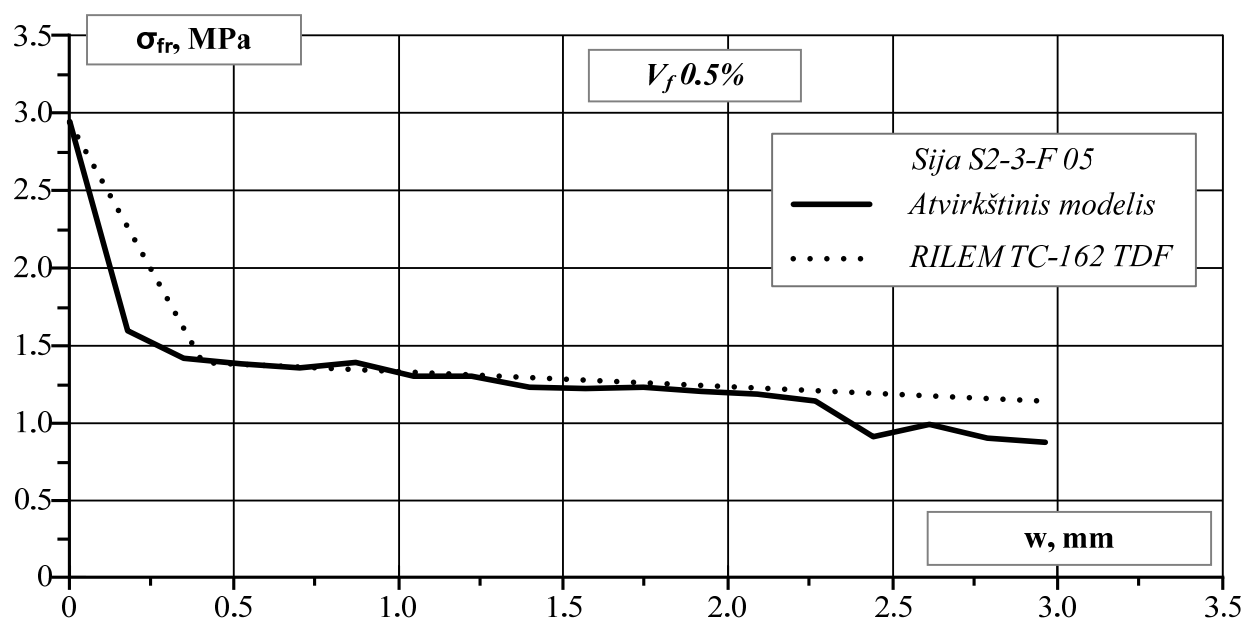
B.11 pav. Sijos $S1-4-F 10$ apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama



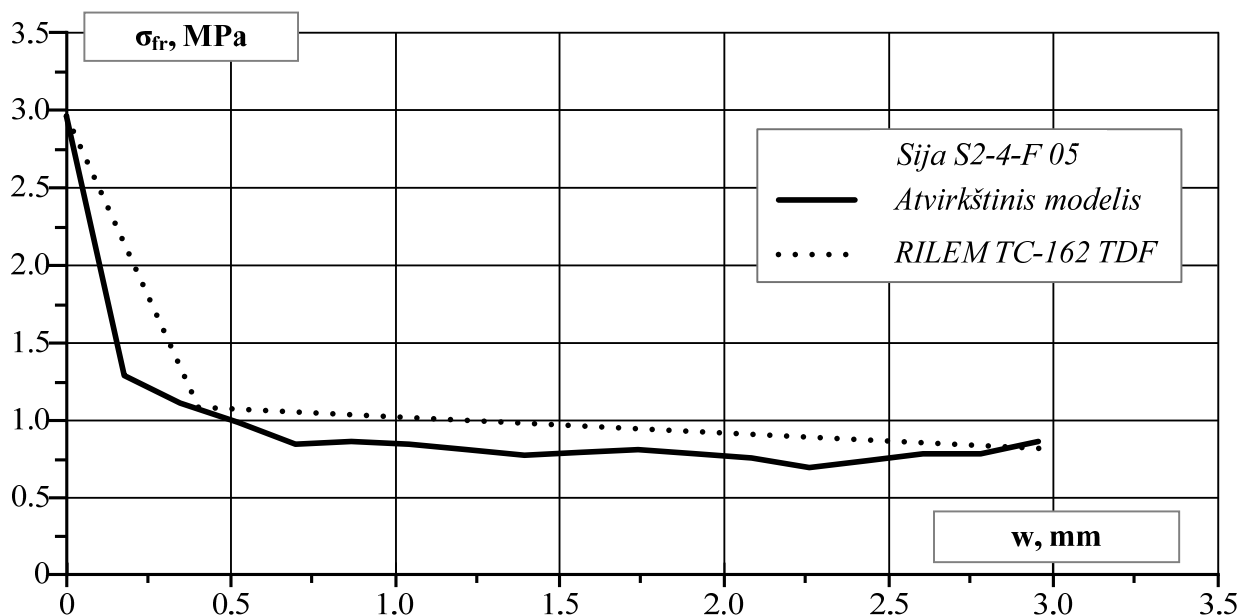
B.12 pav. Sijos $S1-5-F 10$ apkrovos ir įlinkio priklausomybės diagrama

B.3 Atvirkštinio ir Rilem metodais apskaičiuotų liekamųjų įtempių diagramos

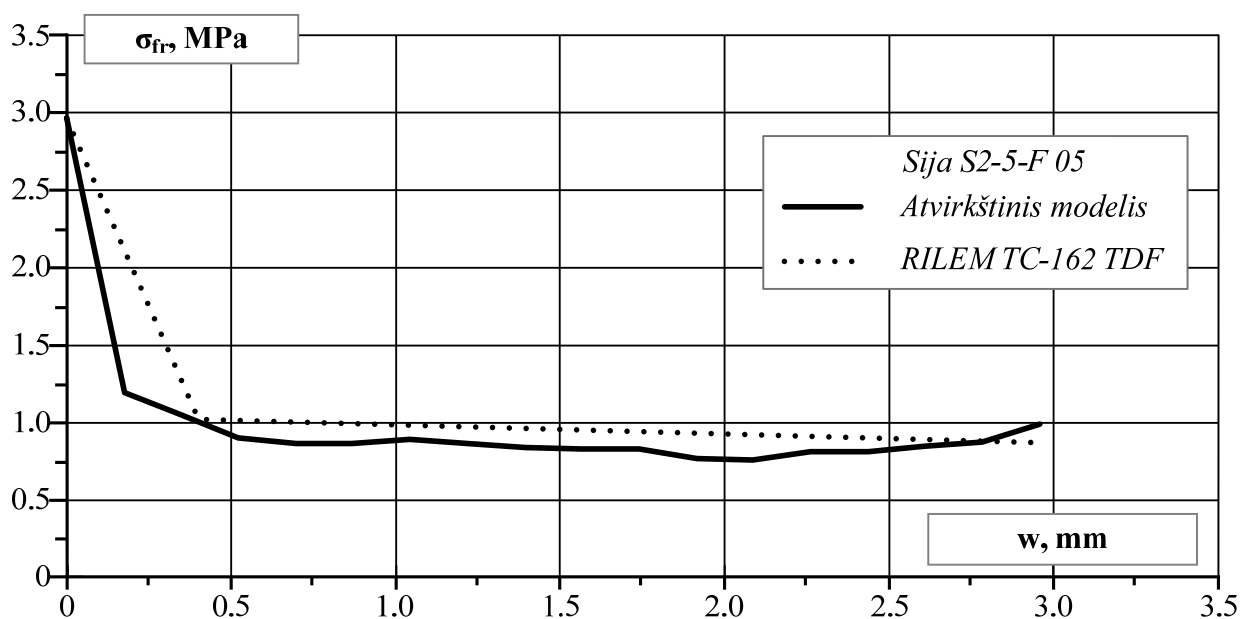
Šioje priedo dalyje, pateikiamos diagramos, kuriose palyginamos apskaičiuotosios liekamųjų įtempių priklausomybės, taikant pasiūlytą ir Rilem metodus.



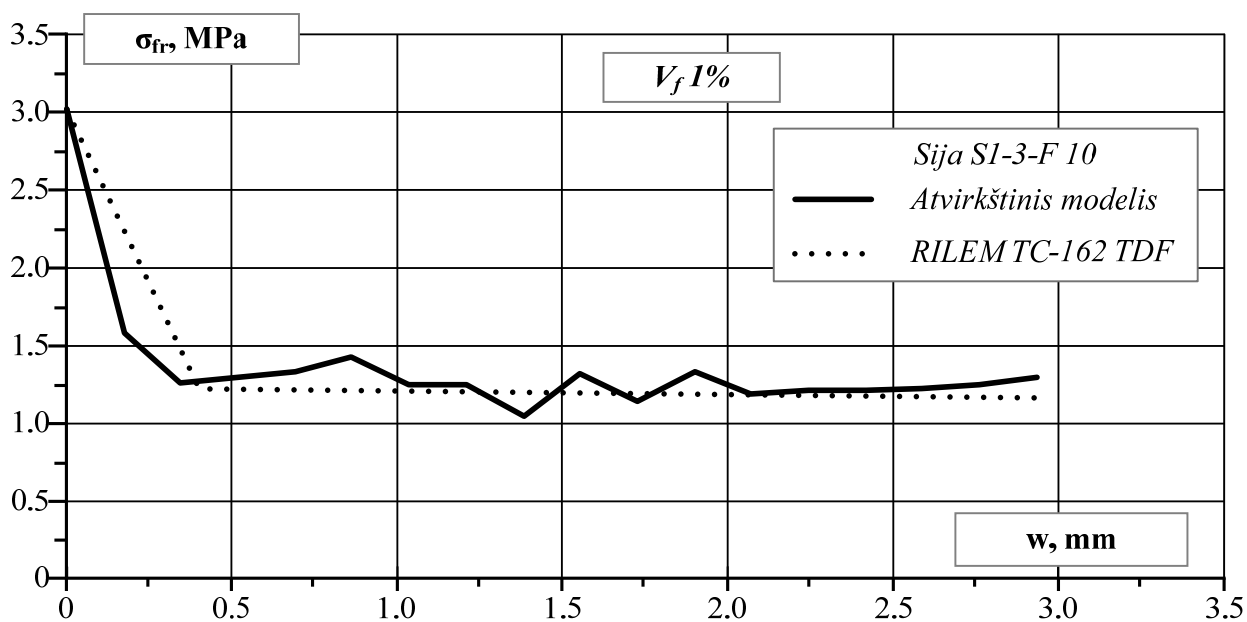
B.13 pav. Sijos S2-3-F 05 liekamųjų įtempių priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinį ir Rilem metodus, palyginimoji diagrama



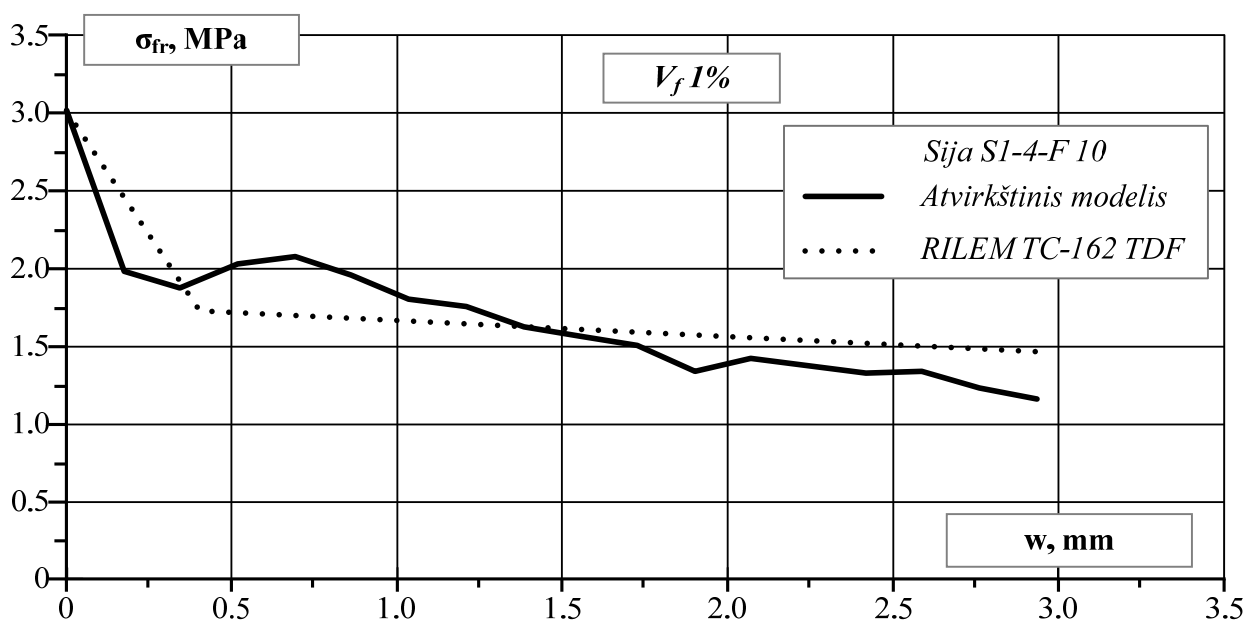
B.14 pav. Sijos S2-4-F 05 liekamųjų įtempių priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinį ir Rilem metodus, palyginimoji diagrama



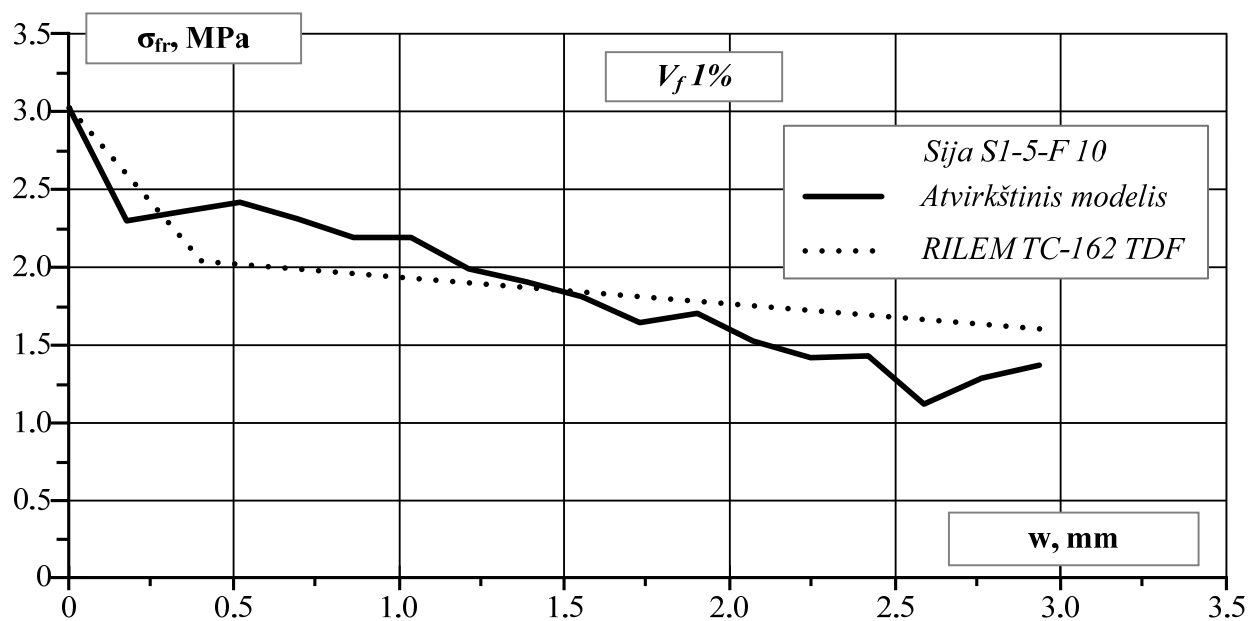
B.15 pav. Sijos S2-5-F 05 liekamųjų įtempių priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinį ir Rilem metodus, palyginimoji diagrama



B.16 pav. Sijos S1-3-F 10 liekamųjų įtempių priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinį ir Rilem metodus, palyginimoji diagrama



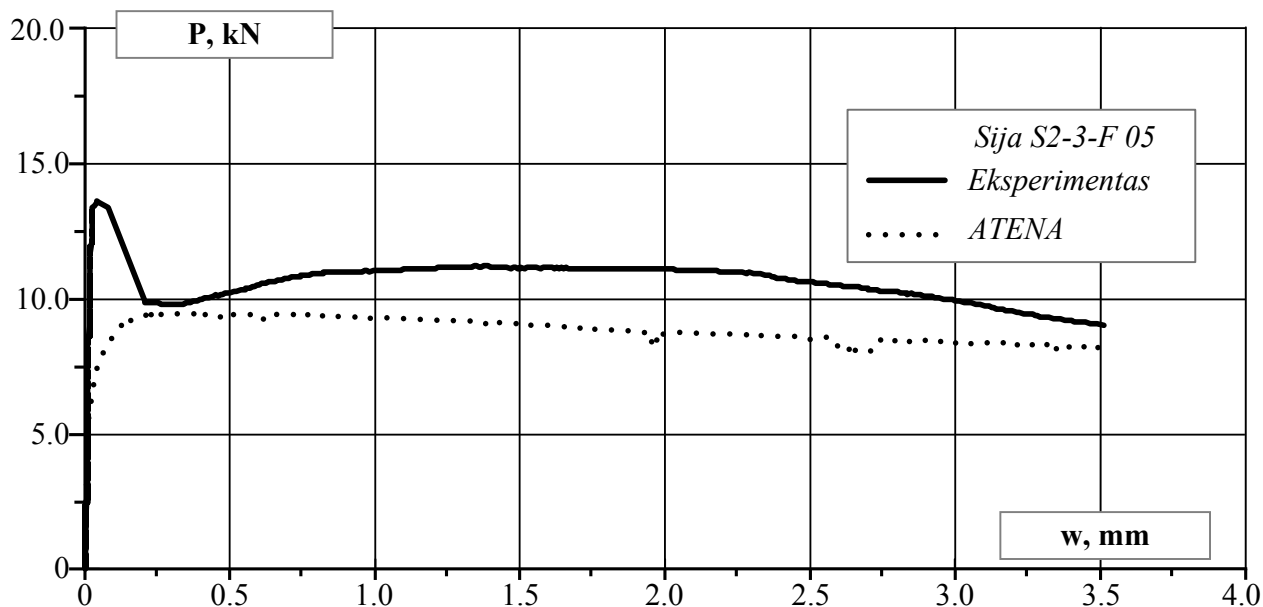
B.17 pav. Sijos S1-4-F 10 liekamųjų įtempių priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinį ir Rilem metodus, palyginimoji diagrama



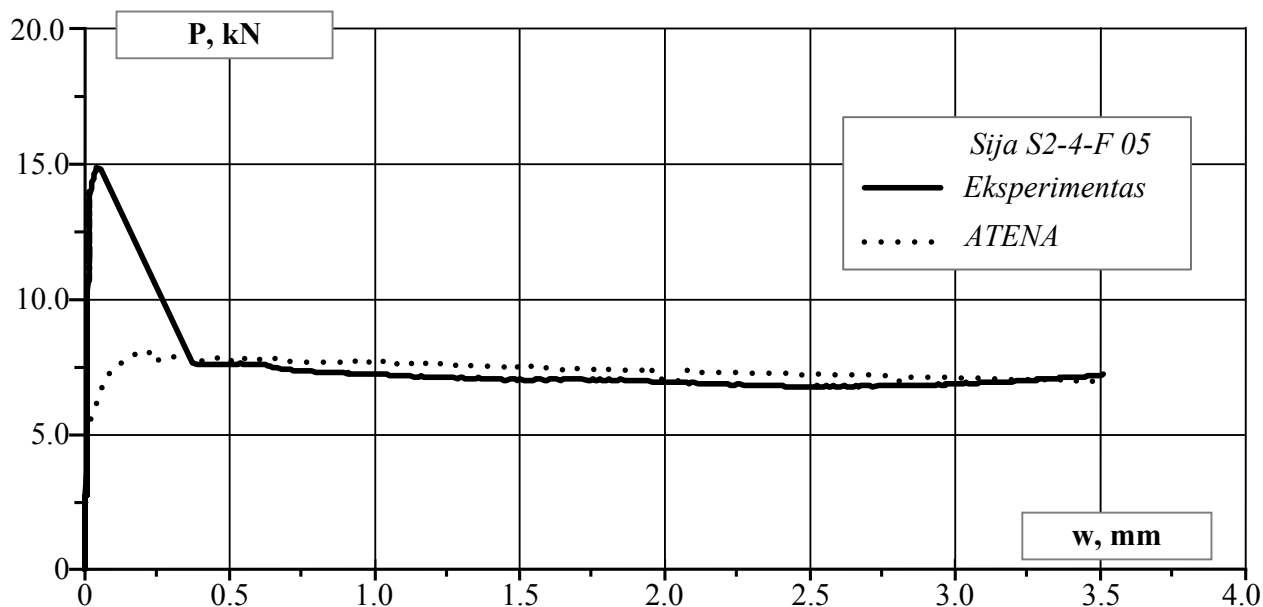
B.18 pav. Sijos S1-5-F 10 liekamųjų įtempių priklausomybės, nustatytos taikant atvirkštinį ir Rilem metodus, palyginimoji diagrama

B.4 Eksperimentinių ir apskaičiuotų „ATENA“ apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės diagramų palyginimas

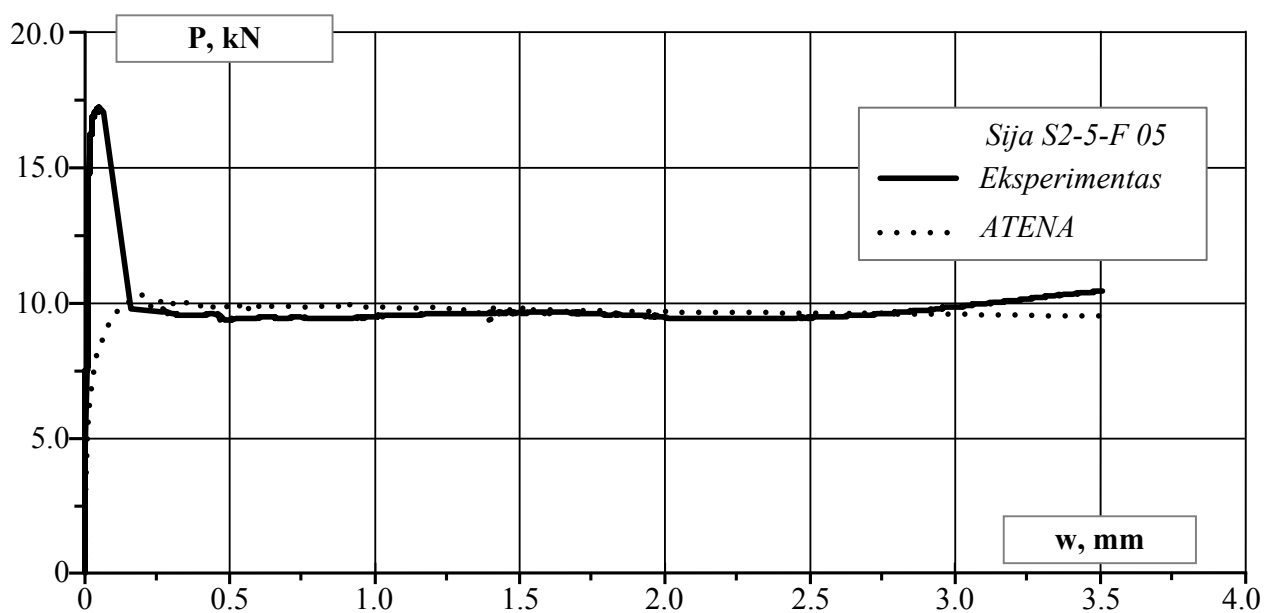
Šiame poskyryje pateikiamos eksperimentinių apkrovos ir plyšio pločio priklausomybės palyginimas su rezultatais, gautų taikant BE programą „ATENA“.



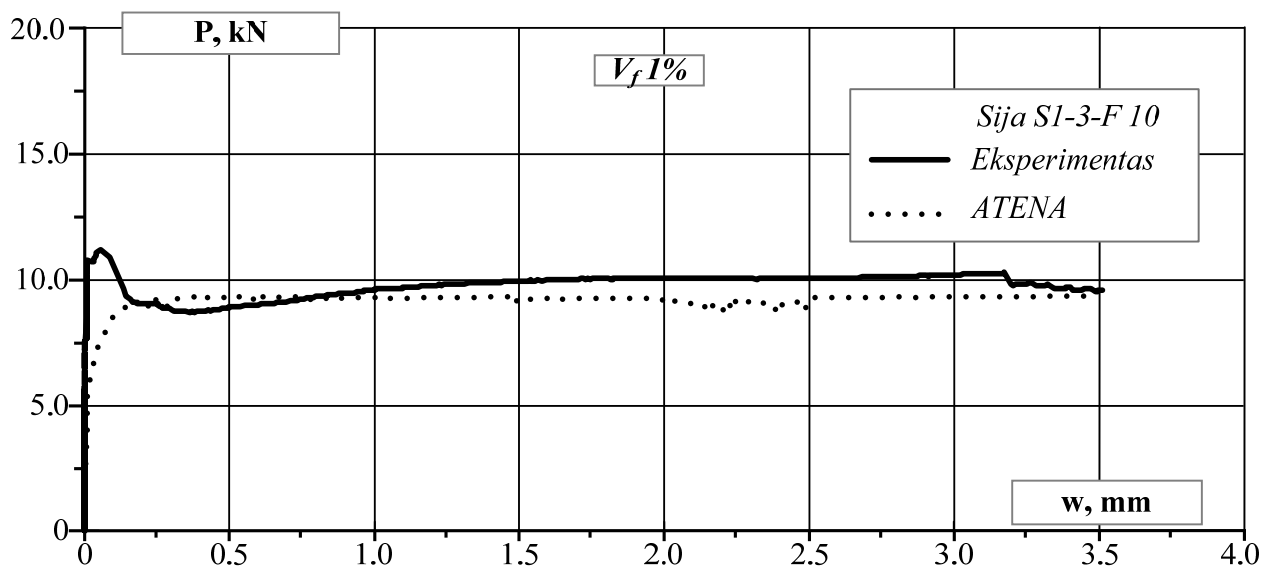
B.19 pav. Sijos S2-3-F 05 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagrama



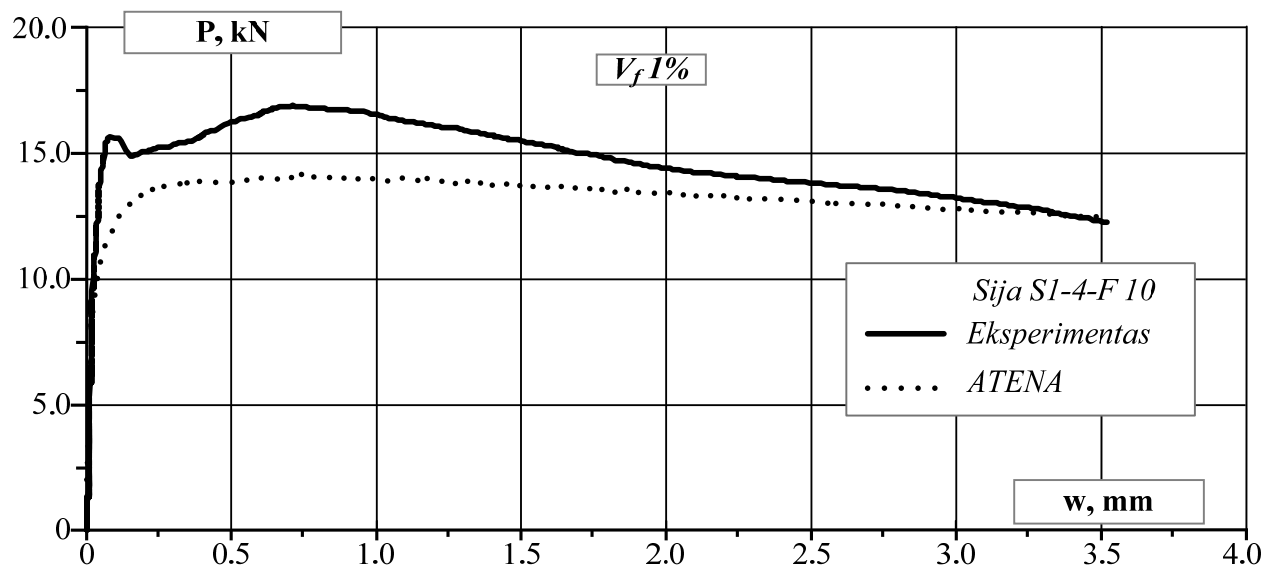
B.20 pav. Sijos S2-4-F 05 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagrama



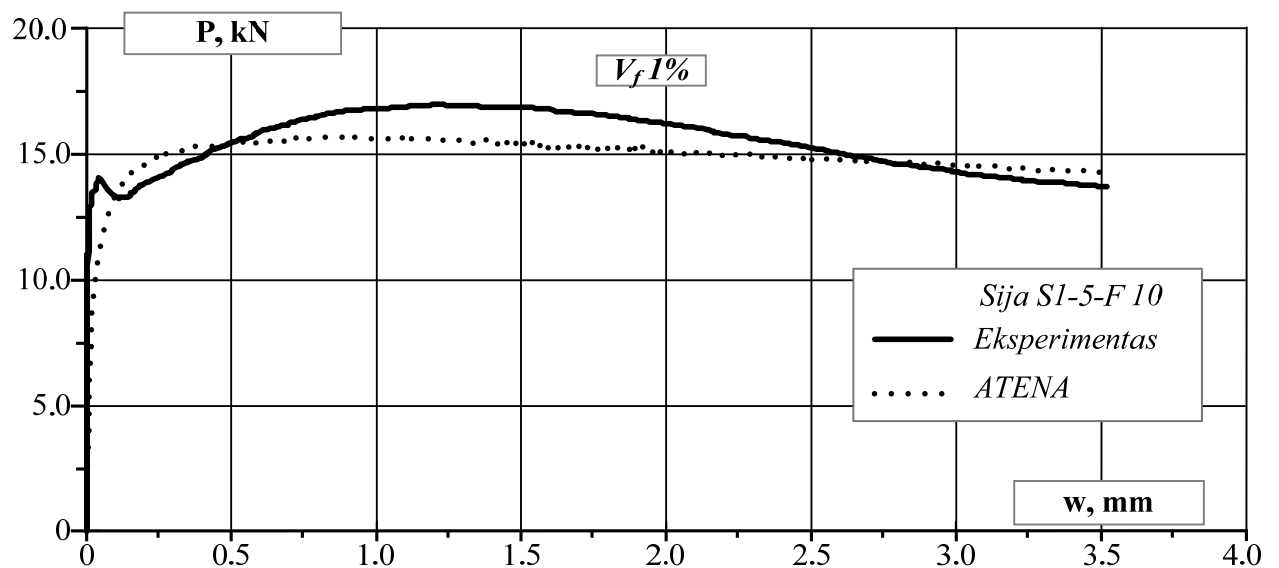
B.21 pav. Sijos S2-5-F 05 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagrama



B.22 pav. Sijos S1-3-F 10 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagrama



B.23 pav. Sijos S1-4-F 10 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagrama



B.24 pav. Sijos S1-5-F 10 eksperimento ir „ATENA“ gautų rezultatų diagrama