

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Darius ULBINAS

PLIENO PLAUSŲ ARMUOTŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PLEIŠĖTUMO IR STANDUMO ANALIZĖ

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo vadovas

Prof. habil. dr. Gintaris KAKLAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VG TU leidyklos TECHNIKA 2092-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-609-457-389-7

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2012

© Darius Ulbinas, 2012

darius.ulbinas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Darius ULBINAS

CRACKING AND STIFFNESS ANALYSIS OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE MEMBERS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2012.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Gintaris KAKLAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Reziumė

Jau kelis dešimtmečius plieno plaušas visame pasaulyje plačiai taikomas kaip priedas betono ir cementinio skiedinio mišiniams, naudojamiems statybinių konstrukcijų gamybai. Lietuvoje dispersinis armavimas dažniausiai naudojamas betonuojant įvairios paskirties pastatų grindis. Tuo tarpu, kitose pasaulio šalyse (JAV, Japonijoje, Vokietijoje ir kt.) dispersinė armatūra naudojama daug plačiau, pvz.: tiltų perdangoms, plonasienėms specialiujų statinių (tunelių, rezervuarų ir t. t.) konstrukcijoms, kelių dangoms, oro uostų pakilimo takams, vamzdynams, poliniams pamatams ir t. t. Dispersinės armatūros taikymas visame pasaulyje laikoma viena iš prioritetinių statybinių konstrukcijų vystymosi sričių.

Dispersinis armavimas neturi didesnės įtakos gniuždomajam betono stipriui, tačiau lemia visiškai skirtingą tempiamojo betono suirimo pobūdį. Nearmuoto tempiamojo betono suirimas yra trapus, tuo tarpu dispersiškai armuoto – plastinis. Tai lemia dispersiškai pasiskirsčiusio plaušo sukeliamas tempimo deformacijų suvaržymas. Dispersinio armavimo poveikis betoniniam elementui yra daug efektyvesnis nei strypinės armatūros, kadangi tempimo deformacijos varžomos visame tempiamosios zonos tūryje. Tuo tarpu klasikiniame gelžbetoniniame elemente tempimo deformacijos varžomos tik tam tikrame armatūros ir betono sąveikos plote. Lėtesnis plyšių vystymasis, didesnis atsparumas smūgiams ir nuovargiui bei plastiškumas yra pagrindiniai veiksniai, lemiantys dispersiškai armuotų gelžbetoninių konstrukcijų pranašumą prieš įprastąsias.

Disertaciniame darbe nagrinėjama statine trumpalaikė apkrova veikiamų, plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų būvis bei pleišėjimas. Aprašomi dispersiškai ir strypais armuotų gelžbetoninių elementų deformacijų ir pleišėtimo eksperimentiniai tyrimai.

Šiame darbe pasiūlytas naujas dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymo metodas. Sukurtas metodas leidžia pagal eksperimentinius dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų duomenis nustatyti tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas bei įvertinti supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius. Taikant pasiūlytąjį modeliavimo būdą, pirmą kartą pagal eksperimentinių lenkiamųjų dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramas, gautos tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos. Šie modeliai gali būti tiesiogiai taikomi baigtinių elementų programose.

Darbe nustatyta, kad liekamieji įtempiai turi įtakos apskaičiuojant plyšių pločius. Pasiūlytas plyšių pločių nustatymo metodas, įvertinantis supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius. Atlikta skaičiutinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių palyginamoji analizė.

Abstract

In last decades, fibre reinforcement is widely used in many countries as additive for concrete and cement mortar mixture for production of structures. Fibre reinforcement applications in Lithuania are often restricted to production of concrete floor for different purposes. Whereas, in other countries (USA, Japan, Germany and other) application area of fibre reinforcement is much wider, for example: bridge deck, thin-walled structures for special constructions (tunnels, reservoirs, etc), covering of roadway, airport landing strip, pipelines, pile foundation. Application of fibre reinforcement is considered as one of the most important development area of structural construction in the world.

Fibre reinforcement significantly improves service properties of concrete. Fibre reinforcement does not have considerable influence on concrete compressive strength, however it significantly changes fracture characteristics of tensile concrete. Fracture of non-reinforced tensile concrete is brittle, whereas with fibre reinforcement—plastic. This is due to restraining of tensile deformations by distributed fibres. Fibre reinforcement influence on concrete member is more effective than bar reinforcement, as tensile deformations are restrained in the whole volume of tensile zone. Whereas, tensile deformations in a RC member are restrained in the specific interaction area of reinforcement and concrete. Main advantages of fibre reinforcement are slow crack propagation, greater tensile and bending strengths, greater impact and fatigue resistance, and plasticity.

The stress-strain state and cracking of steel fiber reinforced concrete subjected to short-term static loading has been investigated in this dissertation work. Experimental research on deformation and cracking of RC elements reinforced with fiber and bar reinforcement was performed.

In this dissertation a new method for residual stress determination of steel fiber reinforced tensile concrete has been proposed. The proposed methodology allows to determine stress-strain diagrams of tensile concrete and to evaluate residual stresses from experimental data of SFRC elements. The average stress-strain diagrams of tensile concrete has been the first time obtained from experimental moment-curvature relationship of bending reinforced concrete beams reinforced with steel fiber and bar reinforcement, using proposed methodology. These models can be directly applied to finite element programs.

In this work was determined that the residual stresses have a significant influence on the calculation of crack widths. The proposed method of determining crack widths, evaluates residual stresses of the cracked steel fiber reinforced tensile concrete. The comparative analysis was carried out on the calculated and experimentally obtained crack widths.

Žymėjimai

Simboliai

- $A_{ct,eff}$ – efektyvusis tempiamojo betono plotas;
 A_{s1} – apatinės armatūros skerspjūvio plotas;
 A_{s2} – viršutinės armatūros skerspjūvio plotas;
 D_{fb} – plieno plaušo kiekis elemente;
 E_c – gniuždomojo betono tamprumo modulis;
 $E_{c,eff}$ – efektyvusis betono tamprumo modulis;
 E_{ct} – tempiamojo betono tamprumo modulis;
 E_{fb} – plieno plaušo tamprumo modulis;
 E_{fbc} – plieno plaušu armuoto betono tamprumo modulis;
 E_s – armatūros tamprumo modulis;
 I_c – betoninio skerspjūvio inercijos momentas;
 M – lenkiamasis momentas;
 M_{cr} – pleišėjimo momentas;
 M_{ext} – išorinis lenkiamasis momentas;
 M_{ser} – norminis lenkiamasis momentas;
 M_u – ribinis lenkimo momentas;
 M_y – momentas prie armatūros takumo ribos;
 P – apkrova;
 P_{cr} – pleišėjimo apkrova;
 P_u – ribinė apkrova;
 RI – plieno plaušo faktorius;

- V_c – betono tūrio dalis;
- V_{fb} – plieno plaušo tūrio dalis betono mišinyje;
- W_I, W_{II} – energija, apibrėžiama plotu po apkrovos ir įlinkių diagrama;
- a_{s1} – tempiamosios armatūros apsauginis sluoksnis;
- a_{s2} – gniuždomosios armatūros apsauginis sluoksnis;
- b – elemento plotis;
- c – betono apsauginio sluoksnio storis;
- d – naudingasis skerspjūvio aukštis;
- d_{fb} – plaušo skersmuo;
- e_u – atstumas nuo gniuždomosios zonos viršaus iki plyšio viršūnės, elementui suyrant;
- e_y – atstumas nuo gniuždomosios zonos viršaus iki plyšio viršūnės, kai pasiekama armatūros takumo riba;
- f_c – betono cilindrinis gniuždomasis stipris bandymo dieną;
- f_{cc} – įprastojo betono gniuždomasis stipris;
- f_{cd} – skaičiuotinis betono stipris;
- f_{ct} – tempiamasis betono stipris;
- f_{fbc} – plieno plaušu armuoto betono gniuždomasis stipris;
- $f_{fb,r}$ – liekamasis stipris;
- f_y – armatūros takumo įtempiai;
- h – elemento aukštis;
- h_{fb} – plaušo užlenkimo aukštis;
- h_{sp} – bandinio aukštis ties įpjova;
- k – mastelio faktorius priklausantis nuo analizuojamojo bandinio matmenų;
- k_1 – koeficientas, kuriuo įvertinama armatūros sukibimo su betonu kokybė;
- k_2 – koeficientas, kuriuo įvertinama deformacijų pasiskirstymo skerspjūvyje forma;
- k_3, k_4 – šalyje taikytinos koeficientų reikšmės, nurodytos nacionaliniame priede;
- k_t – koeficientas įvertinantis apkrovimo trukmę;
- l – sijos ilgis;
- l_0 – skaičiuotinis sijos tarpatramio ilgis;
- $l_{cr,max}$ – didžiausias atstumas tarp plyšių;
- l_{fb} – plaušo ilgis;
- l_{fbh} – plaušo užlenkimo ilgis;
- s – skersinės armatūros išdėstymo žingsnis;
- w – plyšio plotis;
- w_c – ribinis plyšio plotis;
- w_{max} – maksimalus plyšio plotis;

- w_{Naam} – plyšio plotis, nustatytas skaičiavimuose naudojant liekamuosius įtempius, nustatytus pagal supaprastintą (Naaman) metodą;
- w_{obs} – eksperimentinė plyšio pločio reikšmė;
- w_{prop} – plyšio plotis, nustatytas skaičiavimuose naudojant liekamuosius įtempius, nustatytus pagal autoriaus pasiūlytą metodiką;
- x_{cu} – betono gniuždomosios zonos aukštis elementui suyrant;
- x_{cy} – betono gniuždomosios zonos aukštis ties armatūros takumo riba;
- x_{fbc} – nesupleišėjusio dispersiškai armuoto skerspjuvio gniuždomosios zonos aukštis;
- $x_{fbc,cr}$ – supleišėjusio dispersiškai armuoto skerspjuvio gniuždomosios zonos aukštis;
- $\Delta\varepsilon$ – armatūros ir betono vidutinių deformacijų skirtumas;
- α_e – tamprumo modulių santykis;
- β – plaušo ir betono sukibimą apibūdinantis koeficientas;
- δ – įlinkis;
- ε_0 – gniuždomoji betono deformacija, kai yra didžiausias įtempis f_{cc} ;
- ε_{0fb} – plieno plaušu armuoto betono gniuždomoji deformacija, kai yra didžiausias įtempis f_{fbc} ;
- ε_c – gniuždomojo betono deformacija;
- ε_{cm} – vidutinė betono deformacija;
- ε_{cr} – pleišėjimo deformacija;
- $\varepsilon_{ct,u}$ – tempiamojo sustandėjimo ribinė deformacija;
- ε_{cu} – ribinė betono deformacija;
- ε_{el} – tamprioji betono deformacijų dalis;
- ε_{fs} – plieno plaušu armuoto betono laisvojo traukumo deformacija;
- ε_{pl} – plastinė betono deformacijų dalis;
- ε_{sh} – betono laisvojo traukumo deformacija;
- ε_{sm} – vidutinės tempiamosios armatūros deformacijos;
- ε_y – armatūros takumo deformacija;
- η_1 – veiksmingumo koeficientas priklausantis nuo plaušo išsidėstymo;
- η_2 – veiksmingumo koeficientas priklausantis nuo plaušo ilgio;
- κ – elemento kreivis;
- κ_{cr} – elemento kreivis veikiant pleišėjimo momentui;
- κ_y – elemento kreivis, kai pasiekama armatūros takumo riba;
- κ_u – elemento kreivis, jam suyrant;
- λ_1 – koeficientas įvertinantis plaušo inkaravimo ilgį;
- λ_2 – koeficientas įvertinantis plaušo orientaciją plyšyje;
- λ_3 – koeficientas įvertinantis plaušo tarpusavio sąveiką;
- μ – trinties koeficientas tarp plaušo ir betono;

ρ	– betono tankis;
ρ_{eff}	– efektyvus armavimo koeficientas;
ρ_{fb}	– plieno plaušo tankis;
ρ_l	– išilginės armatūros armavimo koeficientas;
σ_c	– betono įtempiai;
σ_{cc}	– gniuždomojo betono įtempiai;
σ_{ct}	– vidutiniai tempiamojo betono įtempiai;
$\sigma_{fb,r}$	– liekamieji tempimo įtempiai;
$\sigma_{fb,rNaam}$	– pagal supaprastintą (Naaman) metodą nustatyti liekamieji įtempiai;
$\sigma_{fb,rprop}$	– pagal autoriaus pasiūlytą metodą nustatyti liekamieji įtempiai;
σ_s	– tempiamosios armatūros įtempiai plyšyje;
σ_{sr}	– tempiamosios armatūros įtempiai plyšyje pleišėjimo momentu;
τ	– vidutiniai sukibimo įtempiai;
ϕ	– strypinės armatūros skersmuo.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas ir darbo aktualumas	1
Tyrimo objektas	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Dalyvavimas tyrimo projektuose.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
Padėka	6
 1. BETONINIŲ IR GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ARMAVIMAS PLIENO PLAUŠU	 7
1.1. Dispersiškai armuotas betonas	7
1.2. Dispersiškai armuoto betono gamybai naudojamos medžiagos	11
1.3. Dispersiškai armuoto betono taikymo sritys	17
1.4. Dispersiškai armuoto betono fizikinių ir mechaninių savybių nustatymas	21
1.4.1. Gniuždomojo betono diagrama.....	22
1.4.2. Tamprumo modulis.....	24

1.4.3. Tempiamojo betono diagrama	25
1.4.4. Traukumas ir valkšnumas	28
1.5. Liekamajo stiprio nustatymas	30
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	36
2. EKSPERIMENTINIAI DISPERSIŠKAI ARMUOTŲ SIJŲ TYRIMAI	39
2.1. Eksperimentiniai bandiniai	40
2.1.1. Plieno plaušu armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių sijų eksperimentiniai tyrimai	40
2.1.2. Dispersiškai armuotų betoninių sijų eksperimentiniai tyrimai	42
2.2. Tyrimams naudojamos medžiagos	42
2.3. Bandymų metodika ir prietaisų išdėstymas	44
2.3.1. Bandymų metodika ir prietaisų išdėstymas bandant dispersiškai armuotas gelžbetonines sijas	44
2.3.2. Bandymų metodika ir prietaisų išdėstymas bandant dispersiškai armuotas betonines sijas	46
2.4. Eksperimentiniai duomenys	46
2.4.1. Dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų įlinkių ir deformacijų matavimo rezultatai	46
2.4.2. Dispersiškai armuotų betoninių sijų apkrovos ir įlinkių diagramos	48
2.5. Antrojo skyriaus išvados	49
3. DISPERSIŠKAI ARMUOTO TEMPIAMOJO BETONO ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ DIAGRAMŲ GAVIMAS	51
3.1. Autoriaus siūloma metodika. Liekamųjų įtempių nustatymas iš įtempių ir deformacijų priklausomybių	52
3.1.1. Tiesioginis uždavinys: Momentų ir kreivių analizė	52
3.1.2. Atvirkštinis uždavinys	53
3.1.3. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų gavimas	55
3.2. Supaprastintas Naaman modelis (įtempių ir deformacijų diagramos nustatymas)	56
3.3. Dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamųjų įtempių palyginimas	58
3.4. Liekamųjų įtempių nustatymas taikant Rilem TC162-TDF metodą	60
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	65
4. EKSPERIMENTINIŲ SIJŲ ĮLINKIŲ IR PLYŠIŲ PLOČIŲ SKAIČIAVIMAS	67
4.1. Įlinkių (kreivių) analizė taikant supaprastintą metodą	68
4.2. Įlinkių analizė taikant baigtinių elementų programą ATENA	72
4.2.1. Modeliavimas taikant autoriaus gautas įtempių ir deformacijų diagramas ..	73
4.2.2. Modeliavimas taikant Naaman įtempių ir deformacijų diagramas	76
4.3. Plyšių pločių analizė	77
4.3.1. Dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų plyšių pločių skaičiavimas ..	78
4.3.2. Plyšių pločių skaičiavimas taikant liekamuosius įtempius.	83
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados	85

BENDROSIOŠ IŠVADOS	87
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	89
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	97

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem and topicality of the work	1
Research object	2
Main objective.....	2
Main tasks	2
Research methods.....	3
Scientific novelty	3
Practical value	4
Defended propositions.....	4
Participation in research projects	4
Reporting results at scientific conferences	5
The scope of the scientific work.....	5
Acknowledgements	6
1. STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE ELEMENTS	7
1.1. Fiber reinforced concrete.....	7
1.2. Materials used for fabrication of steel fiber reinforced concrete	11
1.3. Field of application of fiber reinforced concrete	17
1.4. Determination of physical and mechanical properties of fiber reinforced concrete.....	21
1.4.1. The compressive concrete diagram.....	22

1.4.2. Modulus of elasticity	24
1.4.3. The tensile concrete diagram	25
1.4.4. Shrinkage and creep of concrete	28
1.5. Determination of residual strength	30
1.6. Conclusions for Chapter 1 and formulating tasks for the dissertation	36
 2. EXPERIMENTAL STUDY OF FIBER REINFORCED BEAMS	 39
2.1. Experimental specimens	40
2.1.1. Experimental investigations of steel fiber reinforced concrete beams	40
2.1.2. Experimental investigations of steel fiber concrete beams	42
2.2. Materials used in research	42
2.3. The methodology of the test and instrumentation layout	44
2.3.1. The test methodology and instrumentation layout of reinforced concrete beams reinforced with steel fiber	44
2.3.2. The test methodology and instrumentation layout of concrete beams reinforced with steel fiber	46
2.4. Experimental data	46
2.4.1. Results of deflection and strain measurements of steel fiber reinforced concrete beams	46
2.4.2. Load-deflection diagrams of steel fiber reinforced concrete beams	48
2.5. Conclusions for Chapter 2	49
 3. DERIVATION OF STRESS-STRAIN RELATIONSHIPS OF TENSILE CONCRETE REINFORCED WITH STEEL FIBER	 51
3.1. The methodology proposed by author. Determination of residual stress from stress-strain relationships	52
3.1.1. Direct problem: Analysis of moment and curvature	52
3.1.2. Inverse problem	53
3.1.3. Derivation of stress-strain relationships of tensile concrete	55
3.2. A simplified Naaman model (determination of stress-strain diagrams)	56
3.3. Comparison of residual stresses of steel fiber reinforced tensile concrete	58
3.4. Determination of residual stresses according Rilem TC162-TDF methodology	60
3.5. Conclusions for Chapter 3	65
 4. CALCULATION OF DEFLECTION AND CRACK WIDTH OF EXPERIMENTAL BEAMS	 67
4.1. Deflection analysis using a simplified method	68
4.2. Deflection analysis using finite element software ATENA	72
4.2.1. Modelling using proposed stress-strain relationship	73
4.2.2. Modelling using Naaman the stress-strain diagrams	76
4.3. Crack width analysis	77
4.3.1. Crack width calculation of fiber reinforced RC elements	78
4.3.2. Crack width calculation using experimentally obtained residual stresses ...	83
4.4. Conclusions for Chapter 4	85

GENERAL CONCLUSIONS	87
REFERENCES	89
LIST OF PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	97

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Tipinės tempiamojo betono ir dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos.....	8
1.2 pav. Elementų suirimas: a) betoninio; b) dispersiškai armuoto betoninio	9
1.3 pav. Pleišėjimo pobūdis tempiamo: a) įprastojo; b) dispersiškai armuoto elemento	10
1.4 pav. Plaušo išsidėstymas plyšyje: a) idealus pasiskirstymas; b) esamas pasiskirstymas	11
1.5 pav. Dažniausiai naudojamos plieno plaušo formos	12
1.6 pav. Plieno plaušo rūšys ir jų gamybos technologija: a) plaušas iš plieninės vielos; b) plaušas iš plieno drožlių; c) plaušas iš plieninės skardos.....	14
1.7 pav. Banguotas plieno plaušas iš plieninės vielos.....	14
1.8 pav. Banguotos formos plieno plaušo ir plaušo su užlenktais galais geometriniai parametrai	15
1.9 pav. Plieno plaušas iš plieno drožlių	15
1.10 pav. Gofruotas plieno plaušas iš plieninės skardos.	16
1.11 pav. Plieno ir polipropileno plaušu armuotų segmentų naudojimas tiesiant tunelius	18
1.12 pav. Dispersinės armatūros naudojimas armuojant tiltų perdangų segmentus	19
1.13 pav. Šlaitų ir tunelio sienų torkretavimas dispersiškai armuotu betonu	20
1.14 pav. Plieno plaušu armuoto betono σ - ϵ ir σ - w diagrama	21
1.15 pav. Gniuždomojo betono deformavimosi stadijos	22

1.16 pav. Gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybė nuo plieno plaušo kiekio	23
1.17 pav. Betono įtempių ir deformacijų priklausomybė	25
1.18 pav. Tempiamojo betono deformavimosi stadijos: a) be plieno plaušo; b) su plieno plaušu	26
1.19 pav. Tempiamojo betono įtempių ir plyšio pločio priklausomybė nuo plieno plaušo kiekio	27
1.20 pav. Tempiamojo betono apkrovos ir plyšio pločio diagrama	28
1.21 pav. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų bei įtempių ir plyšio pločio diagrama	28
1.22 pav. Armavimo banguotu plieno plaušu ir savaiminio traukumo priklausomybė ...	29
1.23 pav. Plaušo įtaka: a) maksimaliam plyšio pločiui; b) bendram plyšio pločiui	30
1.24 pav. Liekamojo stiprio nustatymas iš tempiamojo betono įtempių ir plyšio pločio diagramos	31
1.25 pav. Dispersiškai armuoto betoninio elemento ašinio tempimo bandymas	32
1.26 pav. Lenkimo bandymo dviem centruotomis apkrovomis schema	33
1.27 pav. Įtempių ir deformacijų diagrama	33
1.28 pav. Apkrovos ir įlinkių diagramos	34
1.29 pav. Mastelio faktoriaus k nustatymas DBV Merkblatt įtempių ir deformacijų diagramai	35
2.1 pav. Eksperimentinių sių skerspjūviai	40
2.2 pav. a) sių apkrovimas; b) armavimo schema; c) sių skerspjūvis	41
2.3 pav. Apkrovimo schema pagal Rilem TC162-TDF	42
2.4 pav. Dispersiniam armavimui naudotas plieno plaušas	43
2.5 pav. Armatūros strypų bandymas	44
2.6 pav. Matavimo prietaisų išdėstymo schema	45
2.7 pav. Eksperimentinės sijos fragmentas	45
2.8 pav. Plieno plaušu armuoto betoninio elemento: a) apkrovimas; b) skerspjūvis po suirimo	46
2.9 pav. Momentų ir kreivių diagramos iš įlinkių ir deformacijų	47
2.10 pav. Eksperimentiškai nustatytos momentų ir kreivių diagramos	48
2.11 pav. Eksperimentiškai nustatytos apkrovos ir įlinkių diagramos	48
2.12 pav. Apkrovos ir plyšio pločio diagramos	49
3.1 pav. a)–e) sluoksnių modelis; f) plieno įtempių ir deformacijų diagrama; g) dispersiškai armuoto gniuždomo betono diagrama; h) dispersiškai armuoto tempiamojo betono diagrama	53
3.2 pav. Atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmas	54
3.3 pav. Dispersiškai armuoto tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos	56
3.4 pav. Įtempių ir deformacijų diagramos gautos taikant Naaman metodą	58
3.5 pav. Supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamieji įtempiai	59
3.6 pav. Lenkimo bandymo viena centruota apkrova schema	60
3.7 pav. Rilem įtempių ir deformacijų diagrama	61

3.8 pav. Eksperimentiškai nustatyta apkrovos ir įlinkio diagrama.....	62
3.9 pav. Mastelio faktoriaus k nustatymas Rilem įtempių ir deformacijų diagramai	62
3.10 pav. Įtempių ir deformacijų diagramos nustatytos iš eksperimentinių apkrovos ir įlinkių duomenų	63
3.11 pav. Eksperimentinės sijos sudalinimas į baigtinius elementus	64
3.12 pav. Eksperimentiškai ir taikant baigtinių elementų programą ATENA nustatytos sijų ($P-w$) diagramos	65
4.1 pav. Supaprastintas plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų kreivių (įlinkių) apskaičiavimo metodas	68
4.2 pav. Momentų ir kreivių diagramos, gautos taikant supaprastintą metodą	72
4.3 pav. Gelžbetoninės sijos S3-1-F05 baigtinių elementų programos ATENA modelis.....	73
4.4 pav. Modeliuojamos betono charakteristikos.....	73
4.5 pav. Modeliuojamos armatūros charakteristikos.....	74
4.6 pav. Aproximuotos tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos.....	75
4.7 pav. Supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono diagrama	75
4.8 pav. Eksperimentiškai ir taikant baigtinių elementų programą ATENA, nustatytos momentų ir kreivių diagramos.....	76
4.9 pav. Eksperimentiškai ir taikant baigtinių elementų programą ATENA, nustatytos momentų ir kreivių diagramos (pagal Naaman)	77
4.10 pav. Įtempių pasiskirstymas supleišėjusiame elemente: a) gelžbetoniniame elemente; b) plieno plaušu armuotame gelžbetoniniame elemente	79
4.11 pav. Efektyvusis tempiamasis gelžbetoninės sijos betono zonos plotas	80
4.12 pav. Lenkiamojo elemento plyšio pločio betono paviršiuje priklausomybė nuo atstumo iki armatūros strypo	81
4.13 pav. Plieno plaušu armuoto gelžbetoninio elemento deformacijų ir įtempių pasiskirstymas bei elementą veikiančios išorinės ir vidinės jėgos	82
4.14 pav. Skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių palyginimas.....	84

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Plieno plaušo formos įtaka savybėms.....	16
2.1 lentelė. Eksperimentinių sijų pagrindinės charakteristikos.	41
3.1 lentelė. Pagrindiniai parametrai, įtempių ir deformacijų diagramų sudarymui pagal Naaman metodą.	57
3.2 lentelė. Pagal du skirtingus metodus nustatytų liekamųjų įtempių palyginimas.	59
3.3 lentelė. Pagrindiniai parametrai, įtempių ir deformacijų diagramų sudarymui.	63
4.1 lentelė. Eksperimentinių ir skaičiuotinių plyšių pločių reikšmių palyginimas.....	84

Ivadas

Problemos formulavimas ir darbo aktualumas

Gera suprojektuotos ir tinkamai pagamintos gelžbetoninės konstrukcijos turėtų tarnauti šimtmečius, tačiau dėl betono trapumo ir mažo tempiamojo stiprio eksploatuojamose konstrukcijose neretai atsiveria neleistino pločio plyšiai: plieninė armatūra intensyviai rūdija, o susidarę korozijos produktai toliau ardo betono struktūrą. Nesiimant apsaugos ar stiprinimo veiksmų, konstrukcija greitai tampa netinkama eksploatuoti. Nenuostabu, kad visame pasaulyje didžiulės finansinės investicijos ir mokslininkų bei inžinierių pajėgos skiriamos šių problemų sprendimui. Pasiūlyta daug modernių sprendimų leidžiančių užtikrinti gelžbetoninių konstrukcijų tinkamą eksploataciją. Vienas jų – dispersinio armavimo taikymas betono pleišėjimo deformacijų suvaržymui. Armavimas plieno plaušu iš esmės pakeičia tempiamojo betono suirimo pobūdį – plaušas aktyviai varžo plyšių atsirimą, kartu perimdamas tempimo įtempius plyšyje. Labai padidėja medžiagos plastiškumas, o liekamieji įtempiai didėja, priklausomai nuo plaušo kiekio ir tipo. Tai yra efektyvus sprendimas, leidžiantis optimizuoti konstrukcijų matmenis bei sumažinti medžiagų sąnaudas.

Dėl didelės plaušo tipų ir formų įvairovės, taip pat dėl sunkumų nustatant plaušo ir betono tarpusavio sąveiką, iki šiol nėra pasiūlyta patikimų dispersiškai armuoto betono įtempių ir deformacijų modelių. Kiekvienu atveju atliekami spe-

cifiniai, pakankamai sudėtingi bandymai, kurių metu gaunamos liekamųjų įtempių ir deformacijų priklausomybės retai atspindi realių matmenų konstrukcinių elementų elgseną. Dėl skirtingų plieno plaušo ir betono sąveikos charakteristikų, supleišėjusio dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymas yra vienas sudėtingiausių modeliavimo uždavinių. Šiuo metu yra žinomi vos keli analitiniai liekamųjų įtempių modeliai.

Tyrimo objektas

Darbe nagrinėtas statine trumpalaikė apkrova veikiamų, plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų būvis bei pleišėjimas. Dispersiškai armuotą betoną nagrinėjant kaip homogeninę medžiagą, sprendžiamas supleišėjusio tempiamojo betono fizikinio modeliavimo uždavinys.

Darbo tikslas

Disertacinio darbo tikslas yra teoriškai ir eksperimentiškai ištirti plieno plaušu armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų pleišetumą ir standumą bei pasiūlyti naują dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamųjų įtempių nustatymo metodą.

Darbo uždaviniai

1. Apžvelgti literatūroje paskelbtų lenkiamųjų dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų eksperimentinių tyrimų duomenis.
2. Teoriškai ištirti plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų pleišetumą ir standumą.
3. Atlikti plieno plaušu ir strypais armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų plyšių pločių skaitinę analizę.
4. Iš dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų nustatyti liekamuosius tempiamojo betono įtempius, susidarančius dėl dispersinio armavimo įtakos.
5. Atlikti trumpalaikė apkrova veikiamų, dispersine ir strypine armatūra armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių sijų pleišetumo ir standumo eksperimentinius tyrimus.
6. Taikant atvirkštinį uždavinį gauti dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas iš lenkiamųjų plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų eksperimentinių duomenų.

7. Iš dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų nustatyti liekamuosius įtempius.
8. Taikant baigtinių elementų programą ATENA, iš skirtingų eksperimentinių tyrimų duomenų nustatytas įtempių ir deformacijų diagramas panaudoti elementų įlinkių nustatymui.
9. Taikant dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius, atlikti plyšių pločių nustatymo skaitinį eksperimentą.
10. Atlikti skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių palyginamąją analizę.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti teoriniai, skaitiniai ir eksperimentiniai metodai. Trumpalaikė apkrova veikiamų, dispersiškai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų diagramos gaunamos taikant atvirkštinį uždavinį, iš eksperimentinių momentų ir kreivių priklausomybių. Iš gautųjų įtempių ir deformacijų priklausomybių nustatomi liekamieji įtempiei.

Taikant skirtingus fizikinius medžiagų modelius (įtempių ir deformacijų priklausomybes), baigtinių elementų programa ATENA nustatyti dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų kreiviai.

Eksperimentiškai ir teoriškai nustatyti dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų betone atsiveriančių plyšių pločiai. Atlikta skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių palyginamoji analizė.

Darbo mokslinis naujumas

1. Sukurta dispersiškai armuoto betono fizikinio modeliavimo metodologija leidžia pagal eksperimentinius plaušu ir strypais armuotų sijų duomenis nustatyti tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas.
2. Kaip alternatyva praktikoje taikomiems fizikinio modeliavimo metodom, pasiūlytas naujas tempiamojo dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymo būdas. Skirtingai nei tradiciniuose metoduose, modeliavimas gali būti atliekamas pagal skirtingų dydžių elementų (taip pat ir natūrinių) bandymų rezultatus, o modeliavimo rezultatai pasižymi itin maža sklaida.
3. Gauti nauji trumpalaikė apkrova veikiamų dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų eksperimentinių tyrimų duomenys.
4. Taikant pasiūlytąjį modeliavimo būdą, pirmą kartą pagal eksperimentinių lenkiamųjų plieno plaušu ir strypais armuotų gelžbetoninių elementų

momentų ir kreivių diagramas gautos tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos. Nustatyti liekamieji įtempiai panaudoti eksperimentinių sijų kreivių ir plyšių pločių skaičiavimui.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Gauti tyrimų rezultatai praplečia fizikinių modelių kūrimo metodo, paremto atvirkštinio gelžbetoninių elementų deformacijų uždavinio sprendimu, taikymo ribas. Taikant pasiūlytuoju būdu nustatytus liekamuosius įtempius, galima tiksliai apskaičiuoti dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų deformacijas ir plyšių pločius. Pasiūlytojo fizikinio modeliavimo būdo privalumas yra tas, kad gauti tempiamojo betono modeliai gali būti tiesiogiai taikomi baigtinių elementų programose.

Ginamieji teiginiai

1. Atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmas gali būti taikomas dispersiškai armuoto tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramų sudarymui bei liekamųjų įtempių nustatymui.
2. Supleišėjusio tempiamojo betono vidutinius įtempius sudaro įtempiai dėl tempiamojo sustandėjimo bei liekamųjų įtempių, atsirandančių dėl plieno plaušo ir betono sąveikos.
3. Liekamieji įtempiai apskaičiuojami kaip suminių ir tempiamojo sustandėjimo įtempių skirtumas, kai vidutinė deformacija pasiekia $2,0 \cdot 10^{-3}$.
4. Pasiūlytuoju būdu nustačius tempiamojo dispersiškai armuoto betono liekamuosius įtempius, gelžbetoninių elementų kreiviai bei plyšių pločiai apskaičiuojami tiksliau nei taikant literatūroje žinomus medžiagų modelius.
5. Vidutinių deformacijų ir įlinkių analizei turi būti naudojamos suminių įtempių diagramos, o plyšio pločio skaičiavimams, atliekamiems elemento pjūvyje, naudojami tik liekamieji įtempiai.

Dalyvavimas tyrimo projektuose

Autorius dalyvavo dviejuose tyrimo projektuose:

- 2010–2011: Armatūros ir betono sąveikos zonos modeliavimo vieningos koncepcijos kūrimas. Projektą rėmė *Lietuvos mokslo tarybos fondas*. Dalyvis buvo tyrėjas.

- 2012: Armuoto betono diskretaus pleišėjimo daugiaparametrio fizinio modelio kūrimas. Projektą rėmė *Lietuvos mokslo tarybos fondas*. Dalyvis buvo tyrėjas.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacinio darbo autorius 2010 metais stažavosi Liuvono universitete (Belgija). Stažuotei vadovavo prof. L. Vandewalle – pasaulyje pripažinta dispersiškai armuoto betono konstrukcijų analizės ekspertė. Ji yra tarptautinės organizacijos Rilem plieno plaušu armuotų elementų darbo tyrimo grupės vadovė.

Disertacijos tema yra paskelbti keturi moksliniai straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose, iš kurių du – žurnaluose, įtraukuose į *ISI Web of Science* sąrašą ir du straipsniai kituose leidiniuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti septyniose mokslinėse konferencijose:

11-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija *Mokslas – Lietuvos ateitis*, Vilnius, Lietuva, 2008;

12-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija *Mokslas – Lietuvos ateitis*, Vilnius, Lietuva, 2009;

14-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija *Mokslas – Lietuvos ateitis*, Vilnius, Lietuva, 2011;

16th International Conference *Mechanika* 2011, Kaunas, Lietuva, 2011;

Respublikinė – praktinė konferencija *Inžinerijos specialistų kompetencijų kaita – teorinis ir praktinis mokymas*, Vilnius, Lietuva, 2011;

1-oji jaunųjų mokslininkų konferencija *Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai*, Vilnius, Lietuva, 2011;

2-oji jaunųjų mokslininkų konferencija *Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai*, Vilnius, Lietuva, 2012.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir bendrosios išvados.

Darbo apimtis yra 98 puslapiai, tekste panaudota 38 numeruotos formulės, 67 paveikslai ir 6 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 104 literatūros šaltiniai.

Padėka

Disertacinio darbo autorius išreiškia nuoširdžią padėką savo vadovui, Tiltų ir specialiųjų statinių katedros vedėjui prof. habil. dr. *Gintariui Kaklauskui* už rekomendacijas ir pagalbą rengiant disertaciją.

Autorius taip pat dėkoja *Švietimo mainų ir paramos fondui* už suteiktą galimybę stažuotis Liuvono universitete (Belgija) bei stažuotės vadovei prof. *Lucie Vandewalle* už vertingas pastabas ir patarimus stažuotės metu.

Už pagalbą ir draugiškumą, doktorantūros studijų metu, darbo autorius išreiškia didelę padėką Tiltų ir specialiųjų statinių katedros darbuotojams: tyrėjui dr. *Viktor Gribniak*, mokslo darbuotojui dr. *Aleksandr Sokolov*, doc. dr. *Dariui Bačinskui* bei *Tiltų ir specialiųjų statinių katedros doktorantams*.

Disertacinio darbo autorius išreiškia didelę padėką *Lietuvos mokslo tarybos fondui*, už finansinę paramą eksperimentinių tyrimų metu.

Už nuolatinę paramą ir palaikymą darbo autorius labai dėkoja savo tėvams *Aldonai* ir *Algiui* bei sesei *Astai*, kuriems ši disertacija ir yra skiriama.

Betoninių ir gelžbetoninių elementų armavimas plieno plaušu

Šiame skyriuje aptariami dispersiniam armavimui naudojamo plieno plaušo gamybos būdai, rūšys bei dispersiškai armuoto betono taikymo sritys. Akcentuojama dispersinio armavimo įtaka betono fizikinėms bei mechaninėms savybėms.

Pagrindinis dėmesys skiriamas dispersiškai armuotam betono gebėjimui atlaikyti liekamuosius įtempius, elementui pleišėjant. Toks gebėjimas vadinamas liekamuoju elemento stipriu. Ši dispersiškai armuoto betono savybė atskiria jį nuo įprastojo betono.

Šiame skyriuje taip pat apžvelgiami dispersiškai armuoto betono medžiagų modeliai (įtempių ir deformacijų diagramų gavimas), nustatomi taikant eksperimentinius bei empirinius metodus.

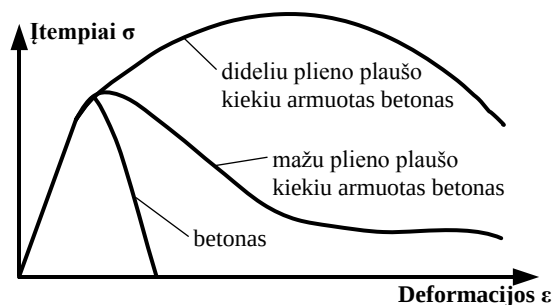
Skyriaus tematika paskelbti keturi straipsniai (Ulbinas ir Kaklauskas 2009, Meskenas ir Ulbinas 2011, Gribniak ir kt. 2011a, Gribniak ir kt. 2012).

1.1. Dispersiškai armuotas betonas

Dispersinis armavimas visame pasaulyje plačiai taikomas armuojant betonines ir gelžbetonines konstrukcijas. Pagrindinis armavimo plaušine armatūra privalu-

mas – tempimo deformacijų suvaržymas elemento skerspjūvyje, kas įtakoja mažesnę plyšių plotį, tolygesnį jų išsidėstymą ir plastiškesnį elemento suirimo pobūdį. Dispersiškai armuojant betoninius elementus taip pat padidinamas ir jų atsparumas dinaminėms apkrovoms (Strack 2007) (smūgiams, sproginams, žemės drebėjimams ir pan.). Siekiant pagerinti smūgio energijos absorbciją, plaušas naudojamas armavimui kartu su strypine armatūra. Dispersiškai armuotų betoninių ir gelžbetoninių elementų atsparumą dinaminėms apkrovoms tyrė: Shah ir Rangan (1971); Kormeling ir kt. (1980); Paskova ir Meyer (1997); Jun ir Stang (1998); Plizzari ir kt. (2000); Bindiganavile ir Banthia (2005); Perumal ir Thanukumuri (2010); Campione ir kt. (2010) ir daugelis kitų autorių.

Armavimas plieno plaušu labai pagerina eksploatacines betono savybes. Jis neturi didesnės įtakos gniuždomojo betono stipriui ir deformacijų moduliui, tačiau visiškai pakeičia tempiamojo betono suirimo pobūdį (Shah ir Rangan 1971, Wafa ir Ashour 1992, Bentur ir Mindess 2007). Nearmuoto tempiamojo betono suirimas yra trapus, o dispersiškai armuoto – plastinis. Tai lemia dispersiškai pasiskirsčiusio plaušo sukeltas tempimo deformacijų suvaržymas. Dispersinio armavimo poveikis betoniniam elementui yra daug efektyvesnis nei strypinės armatūros (Ahmad ir Lagoudas 1991, Balaguru ir Shah 1992), kadangi tempimo deformacijos varžomos visame tempiamosios zonos tūryje (Mindess 1993). Tuo tarpu klasikiniame gelžbetoniniame elemente, tempimo deformacijos varžomos tik tam tikrame armatūros ir betono sąveikos plote (Salys ir kt. 2010). Tipinės tempiamojo betono ir dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos pateiktos 1.1 paveiksle (Bentur ir Mindess 2007).



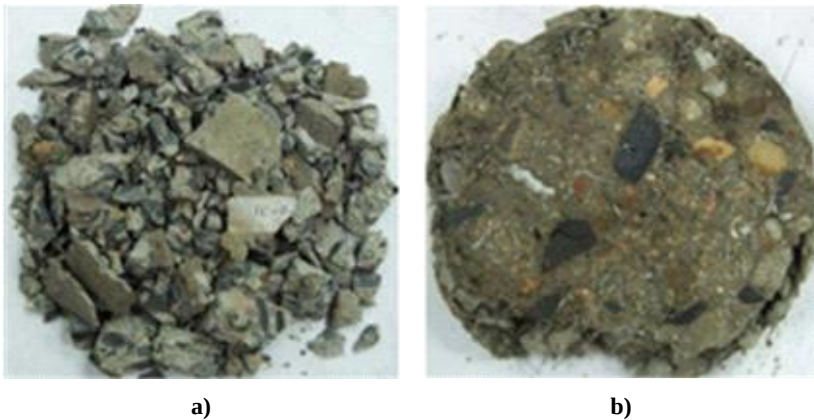
1.1 pav. Tipinės tempiamojo betono ir dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos

Fig. 1.1. Typical stress-strain diagram in tension of concrete and steel fiber reinforced concrete

Skirtingas betoninio ir dispersiškai armuoto betoninio elementų suirimo pobūdis pateiktas 1.2 paveiksle. Apkrautas betoninis elementas suirdamas visiškai

sutrupa (1.2a pav.). Plaušu armuotas bandinys, dėl dispersiškai pasiskirsčiusio plaušo sukeliama tempimo deformacijų suvaržymo, suyra plastiškai (1.2b pav.).

Pleišėjant dispersiškai armuotam betonui, plaušas suvaržo atsiveriančius plyšius ir perima elemento tempiamosioje zonoje veikiančius tempimo įtempius. Dispersiškai armuoto betono pleišetumą nagrinėjo Kaar ir Mattock (1963), Al-Ta'an ir Al-Feel (1989), Stang ir kt. (1993), Mindess (1993), Tan ir kt. (1995), Frosch (1999, 2002), Vandewalle (2000), Dupont (2003), Bindiganavile ir Banthia (2005), Richardson ir Fallow (2006), Gribniak ir kt. (2012) bei kiti autoriai. Reikia pažymėti, kad šių autorių atliekama analizė buvo paremta skirtingų matmenų bandinių eksperimentiniais tyrimais, o dispersiniam jų armavimui naudojamas nevienodos formos plieno plaušas.



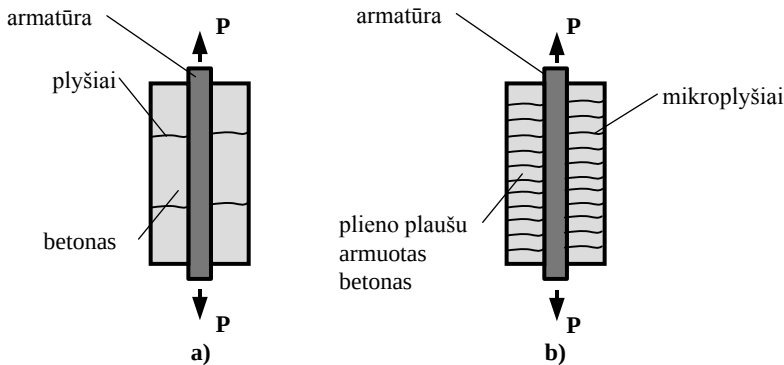
1.2 pav. Elementų suirimas: a) betoninio; b) dispersiškai armuoto betoninio
Fig. 1.2. Failure of the elements: a) concrete; b) steel fiber reinforced concrete

Betoną armuojant plieno plaušu taip pat padidinamas elementų ilgaamžiškumas ir atsparumas dėvėjimuisi bei nuovargiui. Atlikę dispersiškai armuotų betoninių elementų tyrimus, tokias išvadas padarė: Morris ir Garrett (1981); Yin ir Hsu (1995); Jun ir Stang (1998); Plizzari ir kt. (2000); Cachim ir kt. (2002); Bentur ir Mindess (2007) bei daugelis kitų mokslininkų. Dėl plaušo įtakos gautami du pagrindiniai efektai: pirma, suvaržomas plyšys ir padidėja betoninio elemento plastiškumas; antra, padidėja pasipriešinimas tempimo jėgoms.

Lėtesnis plyšių vystymasis, didesnis tempiamasis stipris, atsparumas smūgiams ir nuovargiui bei plastinis suirimas yra pagrindiniai veiksniai, lemiantys dispersiškai armuotų betoninių konstrukcijų pranašumą, lyginant su įprastomis betoninėmis konstrukcijomis. Dispersiškai armuojant konstrukcinius elementus, galima gaminti plonesnes konstrukcijas. Tokias išvadas padarė Rollings (1993) išnagrinėjęs lėktuvų kilimo ir tūpimo takų tiesybai naudojamą dispersiškai ar-

muoto betono elgseną, nustatė, kad betonines dangas armuojant nuo 1 iki 2 % plieno plaušo kiekiu, galima perpus sumažinti jų storį. Sumažėjus dangos storiui, sumažėja konstrukcijos svoris ir žmoniškųjų bei medžiagų išteklių sąnaudos.

Pažymėtina, kad chaotiškas plieno plaušo išsidėstymas geba suvaržyti plyšių vystymąsi skirtingomis kryptimis (Vandewalle 2000). Kaip matyti iš 1.3a paveikslėlio, apkrovus elementą tempimo jėga P (pridedant ją prie strypinės armatūros galų), iki elemento suirimo susidaro tik keletas plyšių, tarp kurių gana didelis atstumas, o naudojant dispersiškai armuotą elementą (1.3b pav.) plaušinės armatūros varžomi mikroplyšiai toliau nebesivysto.

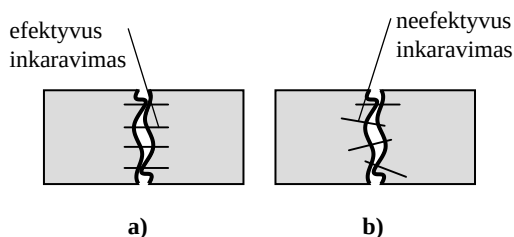


1.3 pav. Pleišėjimo pobūdis tempiamo: a) įprastojo; b) dispersiškai armuoto elemento

Fig. 1.3. Cracking nature of tension element: a) concrete; b) steel fiber reinforced concrete

Dėl plaušo chaotiško išsidėstymo konstrukcijos tūryje galima veiksmingai naudoti plaušinę armatūrą dėl betono traukimosi atsirandančiam plyšių vystymuisi suvaržyti (Mangat ir Azari 1988, Bentur ir Mindess 2007). Toks dispersinio armavimo taikymas vyrauja šiuolaikinių konstrukcijų gamyboje.

Dėl visų minėtų pranašumų dispersinis armavimas turėtų būti ypač racionalus ir dažnas betoninių konstrukcijų gamyboje, tačiau toks armavimas turi ir trūkumų. Kaip vieną pagrindinių dispersinio armavimo trūkumų galima įvardinti problemas, kylančias maišant ir liejant dispersiškai armuotą betoną. Standartinė maišymo metodika leidžia pagaminti betono mišinį su gana mažu plieno plaušo kiekiu (skirtingų šaltinių duomenimis, nuo 1 iki 1,5 % pagal tūrį) (Beaudoin 1990, Balaguru ir Shah 1992, ASTM A 820 2004, Bentur ir Mindess 2007). Be to, plaušo kiekio ribojimų atsiranda, jeigu betono mišinys tiekiamas siurbliu. Taip pumpuojant dispersiškai armuotą betoną plaušas gali sukristi į gniužulus, o šie – užkimšti pumpavimo sistemą. Todėl siurbliu galima tiekti tik betoną, armuotą ne didesniu kaip 1 % plaušo kiekiu. Ši problema aktuali ne tik sunkiajam betonui, bet ir lengvajam, armuotam plieno plaušu (Hoy ir Bartos 1999).



1.4 pav. Plaušo išsidėstymas plyšyje: a) idealus pasiskirstymas; b) esamas pasiskirstymas

Fig. 1.4. Fiber arrangement in the crack: a) an ideal distribution; b) the current distribution

Dispersiškai armuojant betoninius elementus, plaušas visada pasiskirsto viename elemento skerspjūvyje, todėl dėl netolygaus tempimo įtempių susidarymo betoniniame elemente didelė plaušo dalis yra neveiksminga. Kai kurie plaušai plyšių atžvilgiu išsidėsto netinkamai (inkaravimo ilgis nepakankamas), kad būtų užtikrintas tinkamas plaušo sukibimas su betono mišiniu (1.4 pav.). Veiksmingiausias plaušo išsidėstymas pateiktas 1.4a paveiksle. Kaip parodyta 1.4b paveiksle, nemaža plaušo dalis pasiskirsto ne statmenai atsivėrusiam plyšiui, todėl tik dalis plaušo yra veiksminga suvaržant pleišėjimo deformacijas.

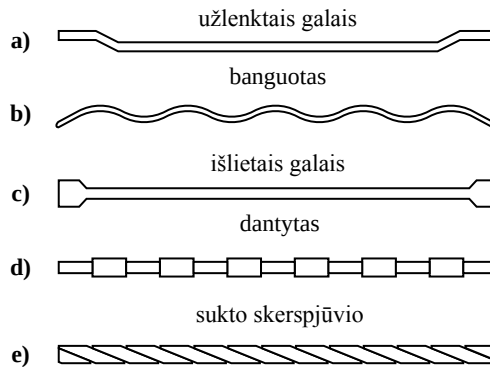
1.2. Dispersiškai armuoto betono gamybai naudojamos medžiagos

Pirmasis plieno plaušas buvo gaminamas karpant apskritojo skerspjūvio vielą. Tiesus ir lygus plaušas statyboje dabar beveik nebenaudojamas. Dabartinis plaušas turi šiurkštų paviršių, užlenktus galus arba banguotą formą (1.5 pav.) (Naaman 2003b, Sujivorakul ir Naaman 2003, Bentur ir Mindess 2007). Kaip minėta, šiulaikinis plieno plaušas gaminamas iš iš plieninės vielos, skardos arba kitokių metalo ruošinių, juos atitinkamai apdirbant. Standartinis plieno plaušo skersmuo (arba skerspjūvio pločio atitikmuo), būna nuo 0,5 iki 2 mm, o ilgis – nuo 7 iki 75 mm. Plieno plaušas turi didelį tempiamąjį stiprį (0,5–2 GPa) ir tamprumo modulį (apie 200 GPa) (Bentur ir Mindess 2007). Pagrindinis plaušo efektyvumo rodiklis – jo ilgio ir skersmens santykis, kuris dažniausiai siekia nuo 20 iki 100 (Naaman 2003b). Plaušo veiksmingumas labai priklauso nuo pasiskirstymo mišinyje – kuo tolygiau plaušas pasiskirsto betone, tuo efektyviau jis varžo pleišėjimą. Plaušo pasiskirstymas mišinyje taip pat priklauso nuo mišinio užpildų dydžio. Betone su labai smulkiais užpildais plieno plaušas išskaidomas – gali laisvai pasiskirstyti tarp užpildo dalelių.

Plaušinė armatūra dažnai gaminama iš anglinio plieno, tačiau galima rasti ir plaušo pagaminto iš korozijai atsparaus metalo. Nerūdijančiu plieno plaušu armuojamos agresyviosios aplinkos veikiamos konstrukcijos.

Šiuolaikinėms konstrukcijoms armuoti naudojamas kelių tipų plieno plaušas, kuris gali būti gaminamas pjaustant vielą (Nemegeer 1996, Strack 2007), karpant skardos lakštus arba frezuojant. Seniausiai taikomos apvalios formos plieno plaušas gaminamas pjaustant vielą į nedidelio ilgio plaušus. Tam dažniausiai naudojama 0,25–0,75 mm skersmens viela. Stačiakampio skerspjūvio formos plaušas gaminamas pjaustant 0,25 mm storio lakštus.

Siekiant pagerinti sukibimą tarp plaušo ir betono mišinio, buvo pasiūlytos skirtingos plieno plaušo formos (1.5 pav.). Šiuo metu labiausiai paplitę užlenktais galais (1.5a pav.), banguotas (1.5b pav.), dantytas (1.5d pav.) ir sukto skerspjūvio (1.5e pav.) plieno plaušas (Sujivorakul ir Naaman 2003).



1.5 pav. Dažniausiai naudojamos plieno plaušo formos (Sujivorakul ir Naaman 2003)

Fig. 1.5. The most commonly used shapes of steel fiber (Sujivorakul and Naaman 2003)

Plaušo tipas ir kiekis mišinyje lemia betono gamybos proceso ypatumus. Kalbant apie santykinai mažus plaušo kiekius (mažiau nei 1,5 % tūrio), dispersiškai armuoto betono gamybos procesas yra panašus į ir įprastojo betono. Tačiau gaminant dispersiškai armuotą betono mišinį turi būti atsižvelgta į kelis veiksnius: įsitikinta, kad maišymo metu plaušas tolygiai pasiskirstė betone ir bus išvengta jo susisluoksniavimo bei sukritimo į gniužulus; betono mišinys turi būti paruoštas taip, kad jį būtų galima lengvai išpilti, formuoti ir apdirbti jo paviršių.

Taip yra todėl, kad didesnis plaušo kiekis maišant sukuria į gniužulus ir netolygiai pasiskirsto betono mišinyje (Bentur ir Mindess 2007). Visgi, esant didesniam rišamosios medžiagos kiekiui arba smulkiagrūdžiam betonui (užpildo dalelių dydis neviršija 10 mm), galimas ir didesnis nei 1,5 % plieno plaušo tūris, tačiau mišinio gamybai turi būti naudojamos specialios technologijos (specialios maišyklės, plaušo paskirstymo įranga ir pan.) (Hoy ir Bartos 1999).

Dispersinis armavimas gali turėti ir neigiamą poveikį mechaninėms mišinio savybėms, nes plaušui sukritus į gniužulus, betone susidaro struktūros defektų, todėl gaminant dispersiškai armuoto betono mišinius ribojamas plaušo kiekis. Pagrindiniai sunkumai su kuriais susiduriama, siekiant, kad plaušas vienodai pasiskirstytų betono mišinyje:

- didelis plaušo kiekis, vienu metu sudėtas į maišyklę, gali nespėti joje išsiskirstyti;
- plaušo kiekis mišinyje viršija 1,5 % jo tūrio;
- maišyklė nepajėgi veiksmingai išskirstyti plaušo;
- nesilaikoma gamybos technologijos – plaušas į maišyklę gali būti sudėtas prieš sudedant kitus betono mišinio komponentus.

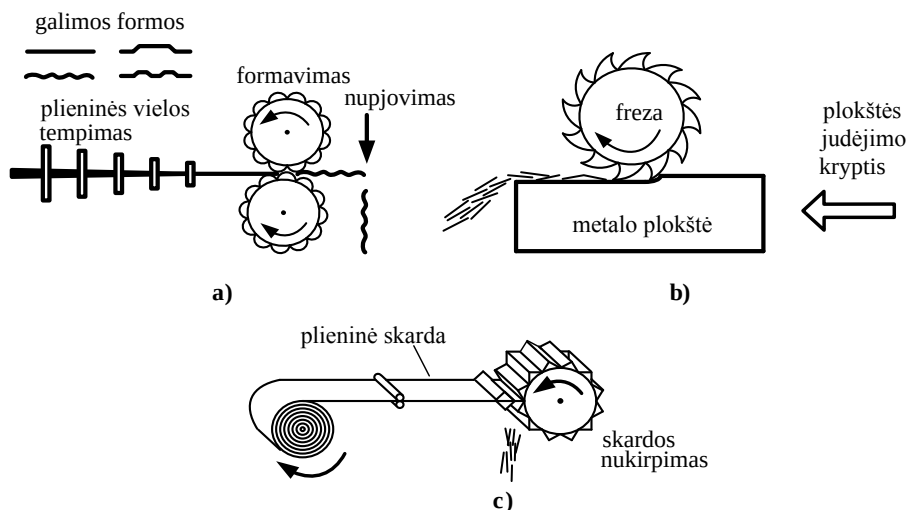
Atsižvelgiant į tai, maišymo metu reikia imtis atsargumo priemonių. Dažniausiai, maišant betonvežėje ar būgninėje maišyklėje, plaušas į drėgną betoną turi būti sudedamas paskutinis, iš visų mišinio komponentų. Plaušas į mišinį turėtų būti dedamas nesulipęs, prieš tai jį praleidžiant pro specialų sieta. Kai visas plaušas sudėtas į mišinį, tinkamas jo pasiskirstymas turi būti užtikrintas betono maišyklei apsisukus 30–40 kartų. Plieno plaušu armuotas betonas gali būti tiekiamas kaip ir įprastas betonas (Balaguru ir Shah 1992, Hoy ir Bartos 1999, Bentur ir Mindess 2007). Dispersiškai armuotas betonas lengvai klojamas į formas, kai tiekiant mišinį vibruojama.

Sudėtinga užtikrinti plaušų išsidėstymo vientisumą mišinyje, išlaikyti pakankamą mišinio veiksmingumą jį gaminant, transportuojant ir naudojant. Plaušai, kurių ilgio ir skersmens santykis yra didesnis, sudaro tvirtesnius tarpusavio ryšius ir veiksmingiau varžo betono pleišėjimą. Kita vertus, didelis plaušo ilgio ir skersmens santykis apsunkina betono maišymą. Būtent šie prieštaračiai ir tapo pagrindine priežastimi, lėmusia lankstytų, suktų ir kitokių plaušo formų vystymąsi. Sukibimas tarp lankstytų formų plieno plaušo ir betono yra daug geresnis nei mišinio sukibimas su lygiu plieno plaušu (ASTM A 820 2004).

Šiuo metu rinkoje gausu įvairių plieno plaušo rūšių, kurios viena nuo kitos skiriasi fizikinėmis savybėmis, matmenimis ir forma. Visa tai lemia skirtingą plaušo kainą. Dispersiniam armavimui skirtu plaušo forma priklauso nuo gamybos būdo ir naudojamos žaliavos. 1.6 paveiksle pateikiami plieno plaušo gamybos būdai.

Dažniausiai dispersiniam armavimui naudojamas plieno plaušas, kirptas iš šaltaitemptos vielos, kuri gaminama iš įvairių plieno atliekų. Toks plaušas gaminamas vielą leidžiant tarp dviejų skirtingomis kryptimis besisukančių volų (1.6a pav.). Atsižvelgiant į volų paviršiaus profilį formuojamas lygus arba lankstytas plieno plaušas, kuris gali būti papildomai apdorojamas, užlenkiant jo galus, darant įspaudus ir t.t. Plaušo, pagaminto iš plieninės vielos (1.7 pav.), tempiamasis stipris kinta nuo 1 iki 1,5 GPa. Plaušas gali būti gaminamas iš cinkuotos arba

nerūdijančio plieno vielos. Tokios dispersinės armatūros skersmuo (d_{fb}) yra 0,1–1,3 mm, o ilgis (l_{fb}) siekia 6–100 mm.



1.6 pav. Plieno plaušo rūšys ir jų gamybos technologija: a) plaušas iš plieninės vielos; b) plaušas iš plieno drožlių; c) plaušas iš plieninės skardos

Fig. 1.6. Types and manufacturing technology of steel fiber: a) fiber from steel wire; b) fiber from steel shavings; c) fiber from steel sheet

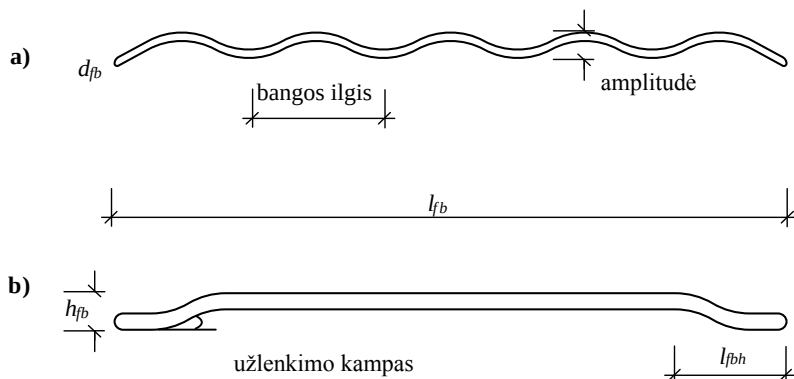


1.7 pav. Banguotas plieno plaušas iš plieninės vielos

Fig. 1.7. Wavy steel fiber from steel wire

Pagrindiniai geometriniai parametrai, kuriais apibūdinamas iš vielos pagamintas plieno plaušas ir kurie turi įtakos dispersinio armavimo veiksmingumui,

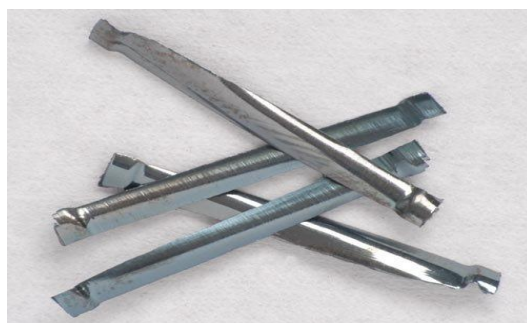
pateikti 1.8a paveiksle. Šiuo metu labiausiai paplitusio plieno plaušo su užlenktais galais efektyvumas priklauso nuo jo skersmens, ilgio, užlenkimo kampo bei užlenkimo ilgio ir aukščio santykio (l_{fbh}/h_{fb}) (1.8b pav.).



1.8 pav. Banguotos formos plieno plaušo ir plaušo su užlenktais galais geometriniai parametrai

Fig. 1.8. Geometric parameters of wavy shaped steel fibers and fiber with crimped ends

Dažnai naudojamas ir plieno plaušas, pagamintas frezuojant plieno plokštes (1.6b pav.). Tokio plaušo (1.9 pav.) tempiamasis stipris siekia 0,8 GPa. Frezuota dispersinė armatūra yra nevienodos struktūros, o jos matmenys kinta: ilgis – 15–60 mm, plotis – 1–6 mm. Dėl gamybos metu tarp frezavimo disko ir metalo plokštės susidaranti aukšta temperatūra plieno plaušas pasidengia melsva oksidacine plėvele, kuri apsaugo jį nuo korozijos.



1.9 pav. Plieno plaušas iš plieno drožlių

Fig. 1.9. Steel fiber from steel shavings

Rečiausiai naudojamas plaušas, pagamintas karpant plieno lakštus (1.6c pav.). Tokio plaušo (1.10 pav.) tempiamasis stipris siekia 0,4–0,8 GPa. Iš plieno lakštų iškarpytos dispersinės armatūros ilgis siekia 20–60 mm, o plotis – 1,5–2,5 mm. Sukarpytas plaušas gali būti apdorojamas papildomai, užlenkiant jo galus ir pan. Šio tipo plieno plaušas naudojamas grindų išlyginamajam sluoksniui armuoti.



1.10 pav. Gofruotas plieno plaušas iš plieninės skardos

Fig. 1.10. Corrugated steel fiber from steel sheet

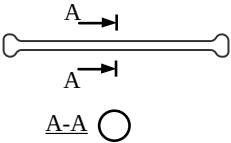
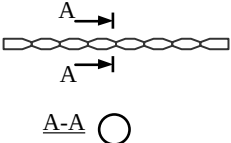
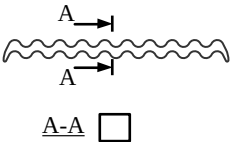
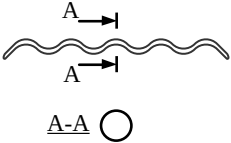
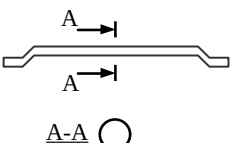
Gaminant dispersinę armatūrą, taikoma skirtinga plieno plaušo gamybos technologija. Kuo sudėtingesnė plaušo forma, tuo sudėtingesnė ir jo gamybos technologija (Bentur ir Mindess 2007). Kita vertus, sudėtingesnės formos plieno plaušas geriau sukimba su betonu. Pagrindinės savybės, susiję su plaušo forma, pateiktos 1.1 lentelėje (Rabinovich 2004, Ulbinas ir Kaklauskas 2009).

1.1 lentelė. Plieno plaušo formos įtaka savybėms

Table 1.1. Influence of steel fiber shape on the properties

Plaušo forma	Eskizas	Savybės
Tiesi – lygi (viela)		Nesudėtinga gamyba, tačiau nepakankamas sukibimas su betonu
Tiesi – lygi, su suplotais galais		Plaušas gerai sukimba su betonu, tačiau sudėtinga gamybos technologija

1.1 lentelės tęsinys. Plieno plaušo formos įtaka savybėms**Continue of table 1.1.** Influence of steel fiber shape on the properties

Plaušo forma	Eskizas	Savybės
Tiesi – lygi, su išlietais galais		Geras sukibimas su betonu, tačiau sudėtinga gamybos technologija
Tiesi – su įspaudais		Plaušas gerai sukimba su betonu. Gaminant tokių plaušą, yra tikimybė perspausti
Banguota (lakštas)		Geras sukibimas, tačiau didesnės plieno sąnaudos nei kitų formų plaušų
Banguota (iš naudotų lynų gijų vielos)		Geras sukibimas ir nedidelės medžiagų sąnaudos. Nuo tokio plieno plaušo būtina nuvalyti tepalines medžiagas
Su užlenktais galais		Plaušas gerai susimaišo su betonu, tačiau jis veiksmingas tik su aukštos klasės betonu

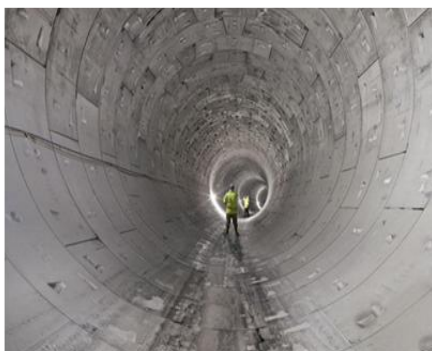
Reikia pabrėžti, kad ir kokia būtų plieno plaušo forma ir gamybos technologija, betoniniams elementams armuoti skirtas plaušas turi būti pakankamai stiprus. Labai svarbu, kad maišant betoną, plieno plaušas nebūtų deformuojamas (lankstomas, laužomas ir pan.), t. y. jis turi būti standus. Šios sąlygos užtikrina, kad plaušas gerai sukibs su betonu ir varžys jame atsiveriančius plyšius.

1.3. Dispersiškai armuoto betono taikymo sritys

Pirmą kartą metalinė armatūra (plieno plaušas ir armatūros strypai) buvo panaudotas 1848 m. Prancūzijoje, gaminant sodo inventorių (vazonus, tvoras ir pan.). Kiek vėliau, šimtmečio pabaigoje, Kalifornijoje, o dar vėliau Vokietijoje gelžbe-

tonio gamybai buvo naudota strypinė armatūra. Gelžbetoniui paplitus po pasaulį, Prancūzijoje pradėtas gaminti betonas su plaušine armatūra. Šiandienis plieno plaušas buvo užpatentuotas A. Bernardo Kalifornijoje 1874 m. Po 10 metų toks plieno plaušas buvo pradėtas naudoti Europoje – Vokietijoje ir Prancūzijoje.

Pirmieji betono armavimo plieno plaušu moksliniai tyrimai buvo atlikti XX a. 7-ajame dešimtmetyje. Dispersiškai armuoto betono tyrimus atliko ir aprašė Romualdi ir Baison (1963), Romualdi ir Mandel (1964). Eksperimentuose buvo naudojamas tik tiesus plieninis pluoštas. Pradedant nuo 8-ojo dešimtmečio plieno plaušas buvo naudojamas eksperimentiškai tiriant betoninius grindinius.



1.11 pav. Plieno ir polipropileno plaušu armuotų segmentų naudojimas tiesiant tunelius
Fig. 1.11. The usage of steel and polypropylene fiber reinforced segments for the construction of tunnels

Šiuo metu plieno plaušas tai viena dažniausiai naudojamų kompozitinių statybinių medžiagų. Plieno plaušu armuoti mišiniai dažniausiai naudojami klojant lėktuvų kilimo ir tūpimo takus, betonuojant pramoninių pastatų grindis, tiesiant tunelius (Rose 1986) (1.11 pav.), perdengiant susisiekimo statinių angas (1.12 pav.), klojant jų paklotą, gaminant surenkamąsias betonines konstrukcijas, betonuojant monolitines perdangas, remontuojant tiltų perdangų plokštes, torkretuojant uolų šlaitus, įrengiant daugiaaukštes automobilių stovėjimo aikšteles. Jis taip pat naudojamas konstrukciniais tikslais, visiškai pakeičiant skersinę armatūrą iš anksto įtemptose konstrukcijose ir armatūros strypynus, tunelių segmentuose (Zollo 1997, Burgers ir kt. 2007) bei pamatų plokštėse.

Dispersiškai armuoto betono naudojimas pastaruosius trisdešimt metų buvo toks įvairus ir taip plačiai paplitęs, kad net sunku suskirstyti jį į grupes. Dispersiškai armuoto betono naudojimo sritis nesibaigianti ir apribota tik inžinierių išradingumu (Beaudoin 1990, Zheng ir Feldman 1995, Zollo 1997).



1.12 pav. Dispersinės armatūros naudojimas armuojant tiltų perdangų segmentus
Fig. 1.12. The usage of fiber reinforcement in the bridge slab segments

Plieno plaušu armuotas betonas gali būti naudojamas:

- kelių dangoms;
- hidrotechniniams statiniams;
- torkretavimui;
- surenkamojo betono konstrukcijoms;
- statybinėms konstrukcijoms ir jų stiprinimui.

Dispersinis armavimas dėl skirtingų elementų apkrovimo tipų, poveikių, eksploatacijos sąlygų ir konstrukcinių sprendimų įvairovės turi savų ypatybių, kurios toliau aptariamos.

Plieno plaušu armuoto betono dangos. Dispersinio armavimo taikymas betoninėms dangoms tapo vienu geriausių sprendimų svarbiuose ir dideliuose projektuose dėl keturių pagrindinių priežasčių:

- didelis atsparumas tempiamajam stipriui lenkiant (palyginti su įprastuoju betonu) leidžia sumažinti pakloto dangos storį nustatytai eksploataavimo trukmei arba didesnį ilgaamžiškumą tokio pat storio dangoms. Jeigu plieno plaušu armuoto betono atsparumas tempiamajam stipriui lenkiant yra dvigubai didesnis negu įprastojo betono, tuomet dispersiškai armuoto betono dangos storis turėtų būti apie 70 % įprastojo betono dangos storio;
- didesnis atsparumas smūgiams ir kintamoms apkrovoms;
- plaušine armatūra armuoto betono maišymas, liejimas ir kietėjimas yra panašūs kaip ir įprastojo betono.

Hidrotechniniai statiniai. Pagrindinė plieno plaušu armuoto betono naudojimo priežastis hidrotechninių statinių projektuose – jo atsparumas erozijai / kavitacijai, kai statinio sienelės veikia dideli vandens srautai. Šis atsparumas patvirtintas laboratoriniais bandymais, kai dispersiškai armuotas betonas buvo

naudojamas tris kartus ilgiau nei įprastasis, jo paviršių veikiant vandens tėkmei, kurios greitis – 37 m/s.

Torkretavimas. Plaušinis torkretavimas taikomas uoliniams šlaitams stabilizuoti, vidiniams tunelių paviršiams (Henager 1981, Morgan ir McAskill 1984) (1.13 pav.) ir tiltų perdangoms remontuoti (Bernard 2002). Plona įprastojo torkretbetonio danga, užpurkšta ant plaušu armuoto torkretbetonio, gali būti naudojama siekiant apsaugoti plieno plaušą nuo korozijos.



1.13 pav. Šlaitų ir tunelio sienų torkretavimas dispersiškai armuotu betonu
Fig. 1.13. The filling of the slopes and tunnel walls of steel fiber reinforced concrete

Kadangi torkretuotas betonas yra trapus, norint užtikrinti tinkamą plastiškumą ir plyšių suvaržymą, reikalingas papildomas armavimas. Anksčiau, siekiant užtikrinti reikiamą torkretbetonio plastiškumą, buvo naudojami armatūros tinklai. Pagrindinis šio stiprinimo metodo trūkumas buvo tas, kad dažnai sunku ir pavojinga įrengti armatūros tinklus, nes torkretbetonis naudojamas nestabiliose aplinkose – torkretuojant tunelius, atramines sienutes ir t. t. Sustiprinimo būtinumas padidina darbų kainas ir kelia potencialų sužeidimų ar mirties pavojų, jeigu įrengiamas tunelis įgriūtų ar torkretuojamas žemės šlaitas nušliuoztų.

Tam tikrais atvejais torkretuojamo betono armavimas plaušine armatūra gali būti pateisinamas ir kaip ekonominė alternatyva tradicinei statybai dėl šių priežasčių:

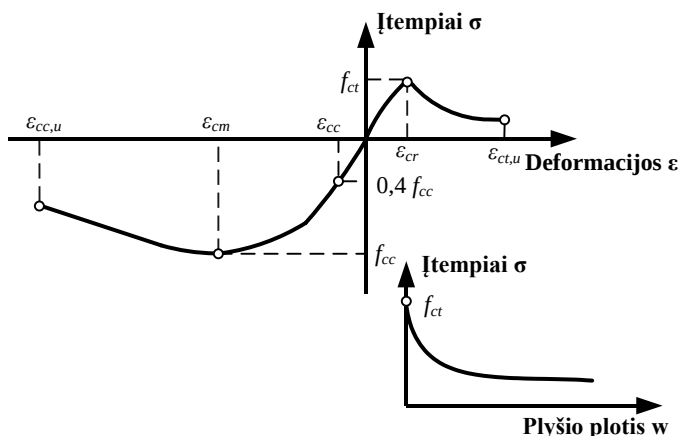
- išvengiama armatūros kirpimo, lenkimo ir tvirtinimo, dėl to kyla sunkumų įprastai armuojant kreivus ir šurkščius paviršius;
- neapsaugotą uolos paviršių reikia greitai užsandarinti. Be to, taip sutaupomas laikas, reikalingas klojiniams sumontuoti;
- medžiaga klojama plonu sluoksniu, pagal paviršiaus kontūrą, taip sutaupant nemažą torkretbetonio kiekį.

Torkretuojant plieno plaušu armuotu betonu, armavimo efektas gali būti ne mažiau veiksmingas, nei naudojant įprastą plaušo išdėstymo techniką. Taip yra

todėl, kad plieno plaušas lengvai pasiskirsto palyginti ploname torkretbetonio sluoksnyje. Taikant šį torkretavimo būdą, mažas vandens ir cemento santykis gali padidinti betono stiprį (Zollo 1997).

1.4. Dispersiškai armuoto betono fizikinių ir mechaninių savybių nustatymas

Betono armavimas plieno plaušu pasižymi itin didele veiksmų, nuo kurių priklauso betono fizikinės ir mechaninės savybės, gausa. Dėl sudėtingos betono elgsenos, įvairiapusės betono ir plaušo sąveikos, dar nėra pasiūlyta visiems priimtino plieno plaušu armuoto gniuždomojo ir tempiamojo betono medžiagų modelio. Tempiamojo betono elgsena iki pleišėjimo gali būti modeliuojama kaip ir gniuždomojo betono – netiesinė įtempių ir deformacijų diagrama. (1.14 pav.) Diagramos posvyrio kampą bei įtempių ir deformacijų santykį tampriojoje stadijoje apibūdina vienas pagrindinių medžiagų įtempių ir deformacijų modelio parametru – tamprumo modulis. Supleišėjusio tempiamojo betono elgsena gali būti aprašoma dviem skirtingais būdais: įtempių ir deformacijų arba įtempių ir plyšio pločio diagrama (1.14 pav.). Taikyti įtempių ir deformacijų diagramą patogiu, nes tokiu pat būdu apibūdinamas ir supleišėjęs gniuždomasis betonas. Tačiau, aprašant supleišėjusio tempiamojo betono elgseną įtempių ir plyšio pločio diagrama, aiškiau suprantama fizikinė plieno plaušo įtaka tempiamajam betonui.



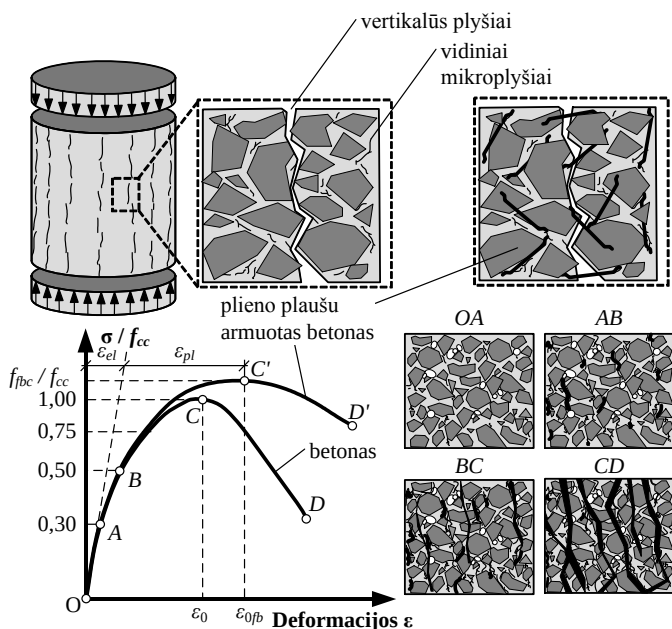
1.14 pav. Plieno plaušu armuoto betono σ – ϵ ir σ – w diagrama

Fig. 1.14. σ – ϵ and σ – w diagram of steel fiber reinforced concrete

1.4.1. Gniuždomojo betono diagrama

Gniuždomasis stipris – viena iš svarbiausių, gerai ištirtų betono mechaninių savybių. Plieno plaušu armuoto betono gniuždomasis stipris nustatomas tokiu pačiu būdu, kaip ir įprastojo betono. Bandymo metu matuojama apkrovimo jėga ir dispersiškai armuoto bandinio deformacijos. Dispersinio armavimo įtaką betono gniuždomajam stipriui tyrinėjo: Chen ir Carson (1971); Dixon ir Mayfield (1971); Kar ir Pal (1972); Williamson (1974); Atepegba ir Regan (1981); Morris ir Garrett (1981); Fanella ir Naaman (1985); Shah ir Ouyang (1991); Wafa, Ashour (1992); Nataraja ir kt. (1999); Bentur ir Mindess (2007) bei daugelis kitų mokslininkų. Šių mokslininkų atliktais tyrimais nustatyta, kad plieno plaušas beveik neturi įtakos gniuždomajam betono stipriui. Geriausiu atveju gniuždomasis stipris gali padidėti iki 15 %, kai elementas armuojamas apie 1,5 % plieno plaušo kiekiu. Šis padidėjimas gali būti siejamas su plieno plaušo savybe varžyti mikroplyšių vystymąsi, betono mikrostruktūros lygmenyje (Beaudoin 1990, Ahmad ir Lagoudas 1991, Cachim ir kt. 2002, Altun ir kt. 2007).

Gniuždant tiek įprastąjį, tiek plieno plaušu armuotą betoną, galima išskirti keturias charakteringas deformavimosi stadijas, kurios susijusios su medžiagos struktūroje vykstančiais pokyčiais. Tipinė betono, veikiamo vienašio gniuždy-mo, įtempių ir deformacijų diagrama parodyta 1.15 paveiksle.



1.15 pav. Gniuždomojo betono deformavimosi stadijos

Fig. 1.15. Deformation stages of compressive concrete

Kiekvienoje apkrovimo stadijoje bendra gniuždomoji betono deformacija aprašoma:

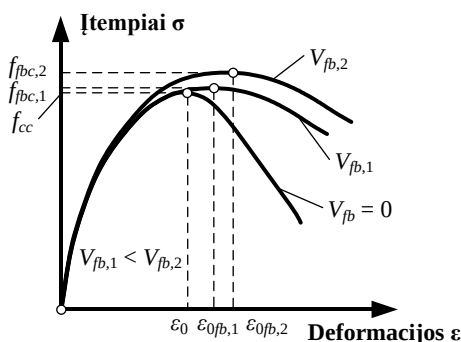
$$\varepsilon_c = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (1.1)$$

Čia ε_{el} – tamprioji betono deformacijų dalis; ε_{pl} – plastinė deformacijų dalis.

Apžvelgus gniuždomojo betono deformavimosi stadijas, galima įvertinti plieno plaušo įtaką kiekvienoje iš jų. 1.15 paveiksle parodyta, kad pirmosios trys apkrovos stadijos (OA, AB, BC) tiek įprastajam, tiek plieno plaušu armuotam betonui, praktiškai sutampa – plieno plaušu armuoto betono atveju gali nežymiai padidėti tamprumo modulis ir gniuždomasis stipris f_{fb} . Tai galima paaiškinti tuo, kad plieno plaušas negali suvaržyti elemento tūryje besiplečiančių mikroplyšių ir elemento deformavimasis vyksta kaip ir įprastojo betono. Plaušas šiose trijose apkrovos stadijose nėra veiksmingas (Bentur ir Mindess 2007).

Dispersinis armavimas tampa efektyvus, kai pasiekama ketvirtoji – irimo stadija (CD) ir pradeda vertis makroplyšiai. Betono struktūroje atsitiktinai išsیدstęs plieno plaušas kerta atsiveriančius plyšius ir suvaržo jų plitimą (1.15 pav.). Betono irimas tampa plastiškesnis, bandiniui suardyti sueikvojamas didesnis energijos kiekis, apibūdinamas kaip įtempių ir deformacijų diagramos plotas irimo stadijoje CD. Plieno plaušas yra ypač efektyvus, armuojant didelio stiprio betono konstrukcijas (Özcan ir kt. 2009), kurių suirimas, didėjant betono stipriui, tampa vis trapesnis.

Kaip minėta, gniuždomojo įprastojo ir plieno plaušu armuoto betono įtempių ir deformacijų ryšys skiriasi labai nežymiai. Didėjant plieno plaušo kiekiui, pastebimos didesnės elemento deformacijos prie jo stiprumo ribos, tai susiję su plastiškesnėmis elemento savybėmis elementui supleišėjus (1.16 pav.). Elemento įtempių ir deformacijų diagramos krentančioji dalis priklauso nuo plieno plaušo kiekio (1.16 pav.).



1.16 pav. Gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybė nuo plieno plaušo kiekio

Fig. 1.16. Compressive concrete stress-strain relationship from steel fiber content

Plieno plaušo įtaka betono stipriui ir jį atitinkančiai deformacijai priklauso nuo plaušo tūrio dalies betono mišinyje, plaušo formos, išsidėstymo elemento tūryje ir sukibimo su betonu. Šiems parametrams įvertinti taikomas plieno plaušo faktorius:

$$RI = V_{fb} \cdot \frac{l_{fb}}{d_{fb}} \cdot \beta, \quad (1.2)$$

čia V_{fb} – plieno plaušo tūrio dalis betono mišinyje; l_{fb} ir d_{fb} – atitinkamai plieno plaušo ilgis ir skersmuo; β – plaušo ir betono sukibimą apibūdinantis koeficientas, imamas $\beta = 0,5$ tiesiam, $\beta = 0,75$ lankstytam, $\beta = 1,0$ plaušui užlenktais galais.

Vieną iš būdų, kaip įvertinti plieno plaušu armuoto gniuždomojo betono stiprio padidėjimą, pasiūlė Nataraja ir kt. (1999). Dispersiškai armuoto betono gniuždomasis stipris tiesiškai siejamas su plieno plaušo faktoriumi:

$$f_{fbc} = f_{cc} + 6,913 \cdot RI, \quad (1.3)$$

čia f_{fbc} – plieno plaušu armuoto betono gniuždomasis stipris; f_{cc} – įprastojo betono gniuždomasis stipris, MPa.

Plieno plaušu armuoto betono stiprį atitinkančios deformacijos padidėjimas taip pat tiesiškai susiejamas su plieno plaušo faktoriumi:

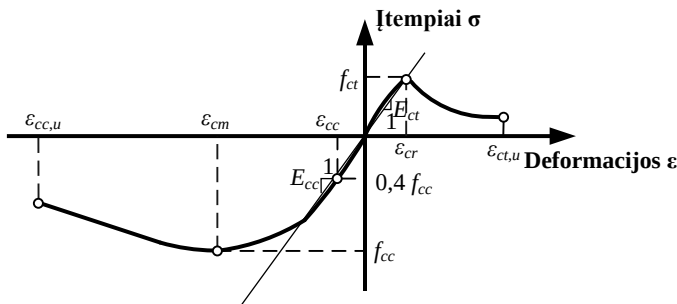
$$\varepsilon_{0fb} = \varepsilon_0 + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot RI. \quad (1.4)$$

Čia ε_{0fb} – plieno plaušu armuoto betono gniuždomoji deformacija, kai yra didžiausias įtempis f_{fbc} ; ε_0 – gniuždomoji betono deformacija, kai yra didžiausias įtempis f_{cc} .

1.4.2. Tamprumo modulis

Betono tamprumo modulis apibūdinamas kaip normalinių įtempių σ_c ir gniuždomojo betono deformacijų ε_c santykis elastinėje diagramos dalyje (1.17 pav.). Laikoma, kad tempiamojo betono tamprumo modulis E_{ct} mažai skiriasi nuo gniuždomojo betono E_c , t.y. $E_{ct} \approx E_c$. Dažniausiai taikomas, taip vadinamas, kirstinis (vidutinis) betono tamprumo modulis, kuriam apibrėžti pagal LST EN 1992-1-1:2005 (2007) taikoma $0,4f_{cc}$ reikšmė. Betono įtempių ir deformacijų priklausomybė, esant nedideliems (iki $0,4f_{cc}$) įtempiams apytiksliai gali būti aprašyta Huko dėsnio:

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c. \quad (1.5)$$



1.17 pav. Betono įtempių ir deformacijų diagrama

Fig. 1.17. Concrete stress-strain relationship

Nustatyta, kad dispersinis armavimas neturi didesnės teigiamos įtakos betono tamprumo moduliui. Taip pat reikėtų paminėti, kad dėl netobulos dispersiškai armuoto betono mišinio gamybos technologijos (blogo išmaišymo ir dėl betono struktūroje atsiradusių defektų) tamprumo modulis gali ir sumažėti.

Literatūroje (Balaguru ir Shah 1992) galima rasti siūlymų plieno plaušu armuoto betono tamprumo modulį skaičiuoti pagal kompozitinės medžiagos dėsnį:

$$E_{fb} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot E_{fb} \cdot V_{fb} + E_c \cdot V_c. \quad (1.6)$$

Čia E_{fb} – plieno plaušo tamprumo modulis; V_{fb} – plieno plaušo tūrio dalis betono mišinyje; E_c – betono tamprumo modulis; V_c – betono tūrio dalis; η_1 ir η_2 – veiksmingumo koeficientai atitinkamai priklausantys, nuo plaušo išsidėstymo ir jo ilgio. Plaušui išdėstytam veikiančiųjų įrašų kryptimi $\eta_1 = \eta_2 = 1$. Plokščiame elemente atsitiktinai orientuotam plaušui $\eta_1 \approx 1/3$. Tūriniame elemente $\eta_1 \approx 1/6$.

Nustatant tamprumo modulį pagal 1.6 išraišką, galima pastebėti, kad elemento standumas nebus ženkliai padidintas, lyginant su įprastuoju betonu, todėl, kad V_{fb} yra mažas dydis lyginant su V_c .

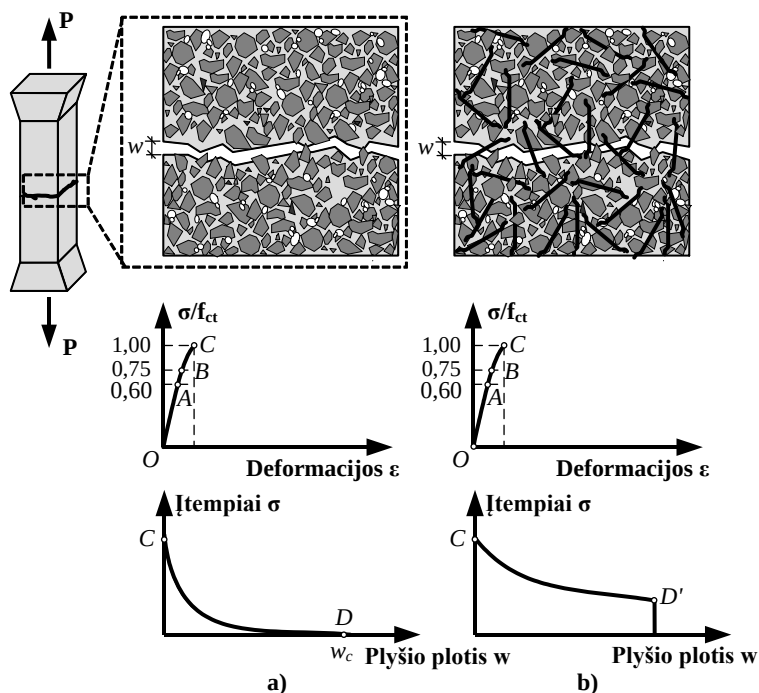
1.4.3. Tempiamojo betono diagrama

Tempiamas betonas dažnai laikomas idealiai tampria medžiaga, kuri trapiai suyra pasiekus tempiamąjį stiprį. Ši prielaida nėra visiškai tiksli, nes kaip ir gniuždymo atveju, pasireiškia tiek netiesinė medžiagos elgsena (plastinės deformacijos), tiek laipsniškas įtempių mažėjimas didėjant deformacijoms (krentančioji įtempių ir deformacijų diagramos dalis).

1.18 paveiksle parodytas vienašio tempimo bandymas. Kaip ir gniuždymo atveju, tempiamo betono deformavimosi procesą galima suskirstyti į keturias charakteringas stadijas. Kai tempimo įtempiai sudaro iki 60 % tempiamojo stiprio f_{ct} , nauji mikroplyšiai betone nesusidaro ir deformavimosi procesas praktiškai

yra tiesinis (OA diagramos dalis). Analogiškai gniuždymui, diagramos taškas A žymi žemutinę mikropleišėjimo ribą.

Įtempiams viršijus $0,6f_{ct}$ ribą, pasiekiamas deformavimo energijos kiekis, pakankamas naujų mikroplyšių plitimui. Tempimo atveju mikroplyšių plitimas nėra varžomas, todėl greitai pasiekama nestabilaus plyšių plitimo stadija (diagramos dalis BC). Ši stadija prasideda iš karto, kai viršijama viršutinė mikropleišėjimo riba, kaip ir gniuždymo atveju sudaranti apie tempimo 75 % (stiprio diagramos taškas B).



1.18 pav. Tempimojo betono deformavimosi stadijos: a) be plieno plaušo; b) su plieno plaušu

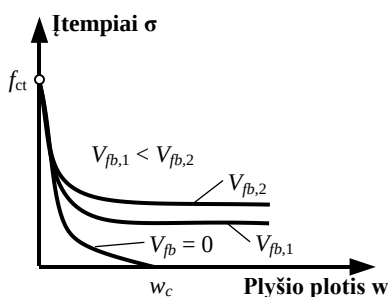
Fig. 1.18. Deformation stages of tensile concrete: a) without steel fibers; b) with steel fiber

Plyšiai betone formuojasi statmenai tempimo įtempių veikimo kryptims. Kiekvienas naujai susiformavęs mikroplyšys sumažina įrašą atlaikančio betono plotą, kartu padidėja įtempiai dar nepažeistoje medžiagoje. Skirtingai nei gniuždymo atveju, suirimas įvyksta staigiai, susijungus keliems mikroplyšiams. Dėl tokio staigaus suirimo sunku nustatyti tempimo įtempių ir deformacijų diagramos krentančiąją dalį (CD) ir dažnai ji apskritai ignoruojama. Iš tiesų, krentan-

čiosios diagramos dalies egzistavimas paaiškinamas tuo, kad stambesnės užpildo frakcijos kerta atsiverianti plyšį ir gali perduoti įtempius tarp dviejų besiformuojančių plokštumų.

Plieno plaušo įtaka pirmosiose trijose apkrovos stadijose tempiamiesiems elementams yra nežymi – keliais procentais gali padidėti betono tamprumo modulis ir tempiamasis stipris. Plieno plaušas pradeda efektyviai veikti tuomet, kai veriasi makroplyšiai. Kaip ir gniuždymo atveju, plieno plaušas kerta atsiveriančius plyšius, suvaržo jų plitimą ir perima tempimo įtempius. 1.18 paveiksle parodyta plyšio pločio ir įtempių plyšyje priklausomybė įprastam ir plieno plaušu armuotam betonui. Plyšio pločiui pasiekus ribinę reikšmę w_c , tempiamas įprastasis betonas pilnai suyra. Kai betono mišinyje yra plieno plaušo, irimo pobūdis tampa žymiai plastiškesnis (Zhanga ir Li 2004, Altun ir kt. 2007, Campione 2008, Gribniak ir kt. 2011b, Cunha ir kt. 2011, Gribniak ir kt. 2012).

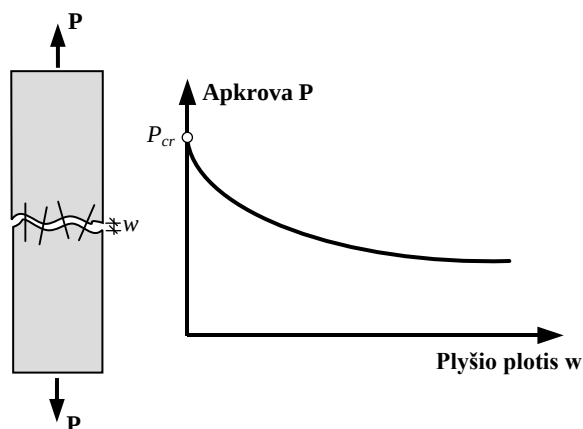
Įtempių ir plyšio pločio diagramos ($\sigma-w$) plotas išreiškia tempiamajam elementui suardyti reikiamą energijos kiekį. Didėjant energijos kiekiui (atitinkamai ir plotui, apibrėžtam krentančiąja diagramos ($\sigma-w$) dalimi), medžiagos irimo pobūdis tampa plastiškesnis. Kaip parodyta 1.19 paveiksle, betono plastiškumas išauga, padidinus plaušo kiekį mišinyje.



1.19 pav. Tempimojo betono įtempių ir plyšio pločio priklausomybė nuo plieno plaušo kiekio

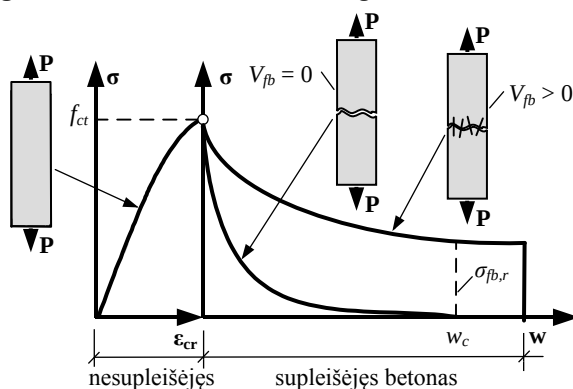
Fig. 1.19. Tensile concrete stress and crack width relationship from steel fiber content

Supleišėjusio betono atlaikomi įtempiai vadinami liekamaisiais. Liekamuosius įtempius galima įvertinti pagal eksperimentinę plyšio pločio w nuo apkrovos P priklausomybę (1.20 pav.), kuri dažniausiai pateikiama įtempių ir plyšio pločio diagrama, parodyta 1.21 paveiksle. Nagrinėjant dispersiškai armuotą betoną kaip vienalytę medžiagą, jos gebėjimas atlaikyti liekamuosius įtempius charakterizuojamas liekamuoju stipriu $f_{fb,r}$. Norint apskaičiuoti dispersiškai armuoto elemento laikomąją galią, plyšio plotį ar deformacijas, būtina žinoti liekamojo stiprio reikšmę.



1.20 pav. Tempiamojo betono apkrovos ir plyšio pločio diagrama

Fig. 1.20. Load and crack width diagram of tensile concrete



1.21 pav. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų bei įtempių ir plyšio pločio diagrama

Fig. 1.21. Stress-strain and stress-crack width diagrams of tensile concrete

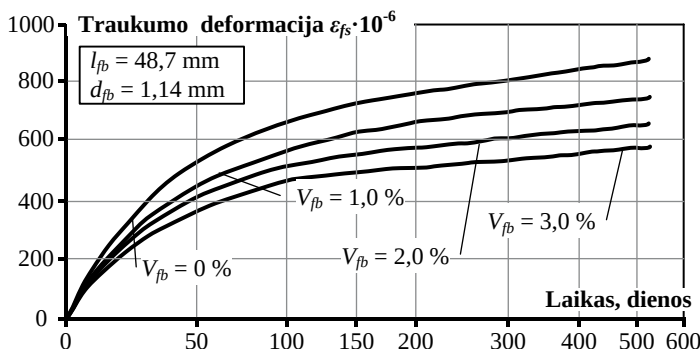
1.4.4. Traukumas ir valkšnumas

Betono traukumu vadinamas laisvas jo tūrio mažėjimas, dėl kietėjimo metu vykstančios cemento hidratacijos bei drėgnumo kaitos. Betonai laikui bėgant traukiasi arba plečiasi neveikiant jokioms išorinėms apkrovoms, o jo traukumo deformacijos didėja palaipsniui ir tęsiasi ilgą laiką.

Atlikta gausybė eksperimentinių tyrimų nagrinėjant įprasto betono traukumą ir valkšnumą, tačiau tokie rezultatai negali būti tiesiogiai taikomi analizuojant plieno plaušu armuoto betono savybes.

Dispersinio armavimo įtaką betono traukumui nagrinėjo: Malmberg ir Skarendahl (1978); Mangat ir Azari (1988); Bentur ir Mindess (2007); Kaklauskas ir kt. (2009); Kaklauskas ir Gribniak (2011) bei daugelis kitų mokslininkų. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad betono traukumo efektui įtakos turi plieno plaušo geometriniai parametrai. Didėjant plaušo ilgio ir skersmens santykiui (l_{fb}/d_{fb}) mažėja betono kietėjimo metu pasireiškiantis traukumas. Įdomu tai, kad lankstytos formos plieno plaušas daug veiksmingesnis už tiesų ir lygų plaušą (Malmberg ir Skarendahl 1978, Bentur ir Mindess 2007). Dispersiniam armavimui naudojant nelygios formos plieno plaušą (Gribniak ir kt. 2011a), jis gali sumažinti traukumo deformacijas iki 40 %. Mangat ir Azari (1988) nustatė, kad laisvojo traukumo deformacijos mažėja didėjant plaušo kiekiui elemente. Tą galima pamatyti iš 1.22 paveikslu.

Pažymėtina tai, kad betono valkšnumui plieno plaušas turės mažesnę įtaką nei traukumui, kadangi valkšnumo efektas nėra susijęs su elemento makropleišėjimu.



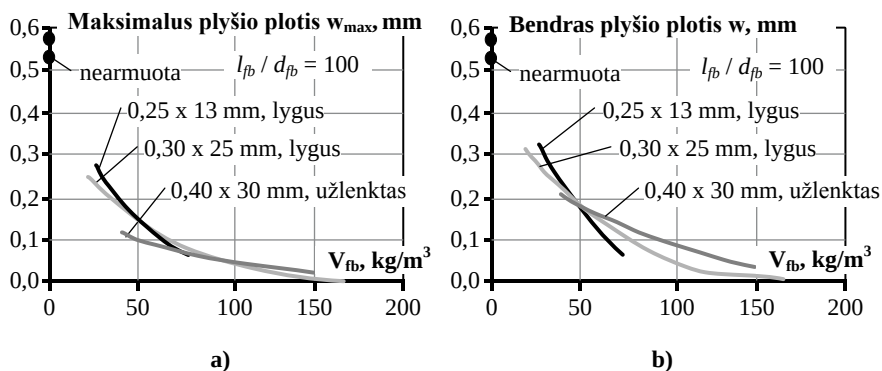
1.22 pav. Armavimo banguotu plieno plaušu ir savaiminio traukumo priklausomybė

Fig. 1.22. Wavy steel fiber reinforcement and shrinkage relationship

Siekiant nustatyti dispersiškai armuoto betono traukumo deformacijas, Mangat ir Azari (1988) pasiūlė išraišką, susietą su nearmuoto betono traukumu:

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{sh} (1 - 2,45 \cdot \mu \cdot V_{fb} \cdot l_{fb} / d_{fb}). \quad (1.7)$$

Čia ε_{fs} – plieno plaušu armuoto betono laisvojo traukumo deformacija; ε_{sh} – įprastojo betono laisvojo traukumo deformacija; μ – trinties koeficientas tarp plaušo ir betono ($\mu = 0,04$ – tiesiam ir lygiam plaušui; $\mu = 0,12$ – nelygiam plaušui); V_{fb} – plieno plaušo tūrio dalis betono mišinyje; l_{fb} – plaušo ilgis; d_{fb} – plaušo skersmuo.



1.23 pav. Plaušo įtaka: a) maksimaliam plyšio pločiui; b) bendram plyšio pločiui (Malmberg ir Skarendahl 1978)

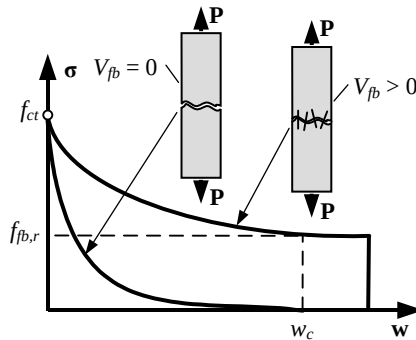
Fig. 1.23. Influence of fiber on: a) the maximum width of the crack; b) the overall width of the crack (Malmberg ir Skarendahl 1978)

Traukumo deformacijų sumažėjimas, panaudojus plieno plaušą, visgi nėra esminis dalykas, parodantis plaušo veiksmingumą. Tikslas yra suvaržyti ne laisvąjį traukumą, bet plyšių atsivėrimą, elementui traukiantis. Aiškiai matomas plieno plaušo poveikis, tiek maksimaliam plyšio pločiui, tiek bendram plyšių pločiui, yra pateiktame 1.23 paveiksle. Shah ir Rangan (1971) eksperimentiškai įrodė, kad betoną armuojant 0,5 % plieno plaušu, maksimalus, laisvojo traukimosi metu atsivėrusio plyšio plotis sumažėja iki 80 %, o vidutinis plyšio plotis iki 90 %, lyginant su įprastojo betono.

1.5. Liekamojo stiprio nustatymas

Taikant skaitinius metodus didelę įtaką skaičiavimo rezultatams turi taikomi fiziniai medžiagų modeliai. Vienas iš jų yra supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų (σ - ϵ) diagrama, kuri iki šiol yra mažai ištirta. Šios diagramos turi kylančiąją ir krentančiąją dalis. Kylančioji dalis atspindi tampriąją, o krentančioji – supleišėjusio dispersiškai armuoto betono elgseną. Tokie įtempių ir deformacijų modeliai yra labai plačiai taikomi kompiuterinio modeliavimo programose. Šiuose modeliuose dispersinio armavimo įtaka, elementui supleišėjus – įvertinama per supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius (liekamąjį stiprį). Tikslaus liekamojo stiprio dėsno nustatymas supleišėjusiam tempiamajam plieno plaušu armuotam betonui yra sudėtingas uždavinys. Autoriaus nuomone, paprasčiausias būdas –

liekamuoju stipriu $f_{fb,r}$ laikyti tempimo įtempių reikšmę $\sigma_{fb,r}$, atitinkančią ribinį plyšio plotį w_c . Tokia idealizacija pavaizduota 1.24 paveiksle.



1.24 pav. Liekamojo stiprio nustatymas iš tempiamojo betono įtempių ir plyšio pločio diagramos

Fig. 1.24. Determination of residual strength of tensile concrete from stress-crack width diagram

Supleišėjusio tempiamojo betono liekamųjų įtempių nustatymo metodus yra pasiūlę: Naaman (2003a); Rilem TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002); DBV (2001). Šiuos metodus savo moksliniuose darbuose plačiai aprašė: Vandewalle (2000), Dupont (2003), Bentur ir Mindess (2007) bei kiti mokslininkai.

Naaman (2003a) pasiūlė empirinį būdą įvertinti liekamąjį stiprį. Taikant šį metodą priimama pastovi liekamojo stiprio reikšmė $f_{fb,r}$, susiejama su plieno plaušo faktoriumi RI (žr. 1.2 formulę), plaušo ir betono vidutiniais sukibimo įtempiais τ , bei trimis papildomais koeficientais:

$$f_{fb,r} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \tau \cdot RI. \quad (1.8)$$

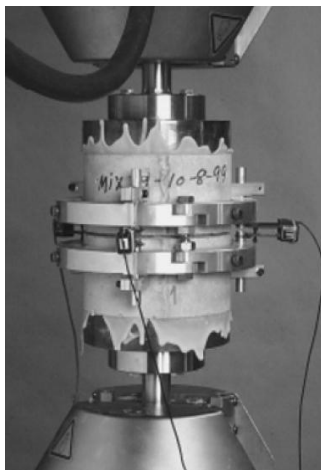
Šioje formulėje koeficientas λ_1 įvertina plaušo inkaravimo ilgį, λ_2 – plaušo orientaciją plyšyje, λ_3 – plaušo tarpusavio sąveiką. Siūlomos šių koeficientų reikšmės plaušui, kurio ilgio ir skersmens santykis $l_{fb} / d_{fb} \leq 100$, yra: $\lambda_1 = 0,25$; $\lambda_2 = 1,2$; $\lambda_3 = 1,0$. Priimama, kad vidutiniai sukibimo įtempiai yra du kartus didesni už betono tempiamąjį stiprį: $\tau = 2f_{ct}$.

Šio empirinio būdo taikymas liekamojo stiprio nustatymui nėra tikslus. Norint tiksliai nustatyti dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamąjį stiprį, būtina taikyti eksperimentinius metodus. Tiesiogiai liekamąjį stiprį galima nustatyti atliekant ašinį tempimo bandymą, kurio metu gaunamos eksperimentinės įtempių ir plyšio pločio diagramos.

Tarptautinės betono ir gelžbetonio mokslo asociacijos Rilem darbo grupė Rilem TC162-TDF (2001) pasiūlė vieną iš plieno plaušu armuoto betono ašinio tempimo bandymo būdų (1.25 pav.). Eksperimentui atlikti naudojami cilindro formos bandiniai, su įpjova viduryje, skirta pleišėjimo procesui lokalizuoti. Bandymo metu nustatomi tempimo įtempiai betone, poslinkio davikliais matuojamas atsiveriančio plyšio plotis. Tokio tipo bandymo atlikimui reikalinga ypač tiksli matavimo įranga ir sudėtingas bandinių paruošimas, todėl ašinio tempimo bandymas praktiškai nėra taikomas.

Pagrindinis metodas, kuriuo remiantis galima nustatyti tempiamojo plieno plaušu armuoto betono liekamąjį stiprį, yra prizmės lenkimo bandymas. Praktikoje dažniausiai taikomi du metodai: Rilem TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002) grupės pasiūlytas bandymas viena koncentruota apkrova ir DBV (2001) lenkimo bandymas dviem koncentruotomis apkrovomis. Abu šie metodai yra skirti sudaryti liekamojo stiprio nuo vidutinių betono deformacijų priklausomybę.

Atliekant lenkimo bandymą pagal Rilem TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002) grupės pasiūlytą metodą, prie tam tikro sijos įlinkio, arba plyšio pločio fiksuojama apkrova, kuri taikoma nustatant plieno plaušu armuoto betono liekamąjį tempimo stiprį. Šis metodas detaliau nagrinėjamas 3.4 poskyryje.



1.25 pav. Dispersiškai armuoto betoninio elemento ašinio tempimo bandymas

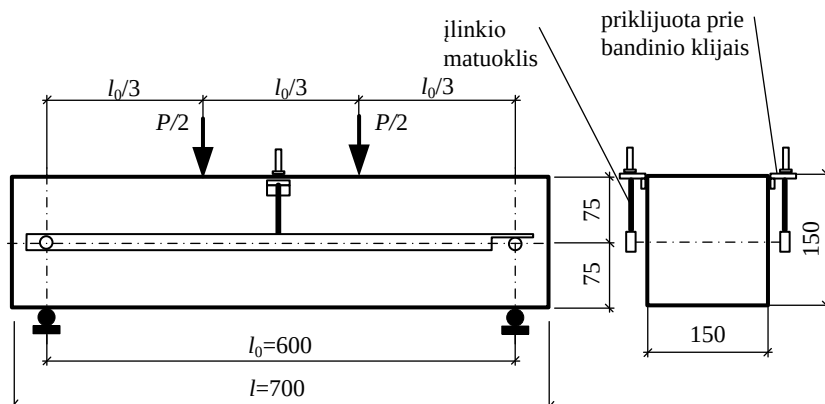
Fig. 1.25. Axial tensile test of steel fiber reinforced concrete element

Tokiems bandymams yra būtina moderni ir sąlygiškai brangi eksperimentinė įranga. Be to, didelė eksperimentinių rezultatų sklaida mažina šių metodų tikslumą.

Taikant DBV (2001) metodą, liekamasis tempimo stipris yra nustatomas pagal lenkimo bandymais gautas apkrovos ir įlinkio diagramas. Tempiamojo

betono liekamojo stiprio ir deformacijų diagramos sudaromos pagal tam tikrus charakteringuosius taškus.

Bandymo metu dviem koncentruotomis jėgomis apkraunama laisvai atremta plieno plaušu armuota betoninė sija ($700 \times 150 \times 150$ mm) (1.26 pav.). Sijos tarpatramio ilgis $l_0 = 600$ mm. Bandymui naudojamas presas su deformacijų kontrole, apkraunant siją $0,2$ mm/min greičiu.

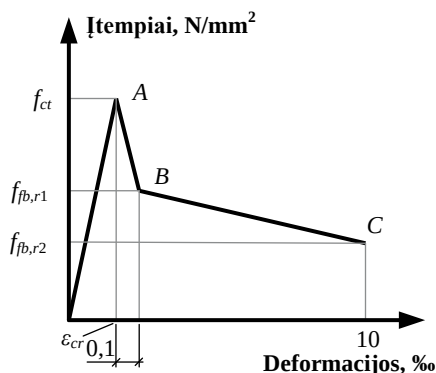


1.26 pav. Lenkimo bandymo dviem koncentruotomis apkrovomis schema

Fig. 1.26. Loading scheme of bending test

Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagrama (1.27 pav.) sudaroma pagal tris charakteringuosius taškus (A, B, C):

- Tašką A apibūdina tempiamasis betono stipris f_{ct} ir jį atitinkanti pleišėjimo deformacija ε_{cr} .



1.27 pav. Įtempių ir deformacijų diagrama

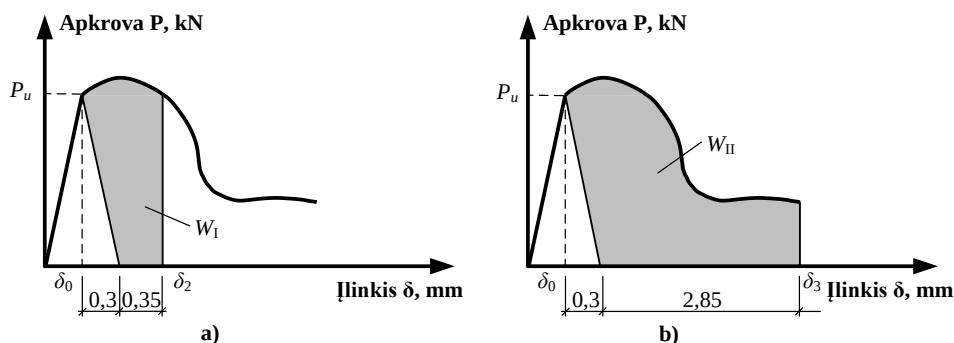
Fig. 1.27. Stress-strain diagram

- Taškas *B* aprašomas supleišėjusio tempiamojų betono liekamojo stiprio reikšmę $f_{fb,r1}$ bei ją atitinkančią deformaciją. Liekamasis stipris $f_{fb,r1}$ nustatomas pagal eksperimentinę apkrovos ir įlinkio ($P-\delta$) diagramą (1.28a pav.), taikant išraišką:

$$f_{fb,r1} = 540k \frac{W_I}{b \cdot h^2}, \quad (1.9)$$

čia W_I – energija, apibrėžiama plotu po apkrovos ir įlinkių diagrama (1.28a pav.); k – mastelio faktorius priklausantis nuo analizuojamo bandinio matmenų ir nustatomas pagal 1.29 paveikslą.

Sudarant įtempių ir deformacijų diagramą, liekamojo stiprio reikšmę $f_{fb,r1}$ atitinkanti betono deformacija, priimama lygi $\varepsilon_{cr} + 0,1 \times 10^{-3}$.



1.28 pav. Apkrovos ir įlinkių diagramos

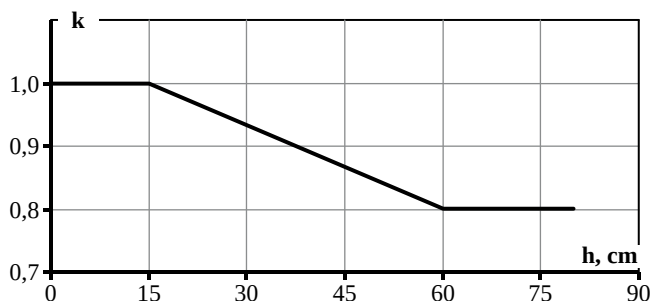
Fig. 1.28. Load-deflection diagram

- Taškas *C* aprašomas analogiškai kaip ir taškas *B*, tik liekamojo stiprio reikšmę $f_{fb,r2}$ nustatoma pagal eksperimentinę apkrovos ir įlinkio ($P-\delta$) diagramą (1.28b pav.), taikant išraišką:

$$f_{fb,r2} = 74k \frac{W_{II}}{b \cdot h^2}. \quad (1.10)$$

Čia W_{II} – energija, apibrėžiama plotu po apkrovos ir įlinkių diagrama (1.28b pav.).

Sudarant įtempių ir deformacijų diagramą, liekamojo stiprio reikšmę $f_{fb,r2}$ atitinka ribinė betono deformacija $\varepsilon_{cu} = 10 \times 10^{-3}$.



1.29 pav. Mastelio faktoriaus k nustatymas DBV Merkblatt įtempių ir deformacijų diagramai

Fig. 1.29. Determination of scaling factor k for DBV Merkblatt stress-strain diagram

Kaip pagrindinį skirtumą tarp šių metodų galima įvardinti tai, kad taikant Rilem TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002) pasiūlytą metodą, padarius įpjovą dirbtinai lokalizuojamas irimo procesas. DBV (2001) siūloma metodika užtikrina, kad suirimas vyks natūraliai silpniausiam elemento skerspjūvyje. Šis skirtumas gali lemti tai, kad tempiamojo betono liekamasis stipris, nustatytas pagal Rilem metodiką bus didesnis, už nustatytą remiantis DBV (2001) metodika.

Apibendrinant aptartus liekamojo tempiamojo stiprio nustatymo metodus, galima pažymėti, kad Naaman (2003a) pasiūlytas empirinis būdas įvertinti supleišėjusio tempiamojo betono liekamuosius įtempius (liekamąjį stiprį) yra netikslus, nes taikant šį metodą yra priimama pastovi liekamojo stiprio reikšmė, priklausanti vos nuo kelių plaušo parametrų: kiekio, formos ir matmenų.

Supleišėjusio tempiamojo betono liekamųjų įtempių nustatymui naudojant Rilem TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002) pasiūlytą metodą, tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos gaunamos taikant eksperimentinius įlinkio arba plyšio pločio duomenis. Pagal DBV (2001) metodą naudojamos tik bandymo metu nustatytos įlinkio reikšmės. Todėl galima teigti, kad Rilem metodas yra patikimesnis už DBV (2001), nes įtempių ir deformacijų diagramos gali būti sudaromos dviem būdais (kilus abejonėms dėl matavimų tikslumo, eksperimentiniai rezultatai gali būti tarpusavyje palyginti).

Taikant DBV (2001) metodą, ribinė tempiamojo dispersiškai armuoto betono deformacija priimama lygi 10 %, o pagal Rilem TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002) metodą, ši reikšmė siekia 25 %. Tai riboja DBV (2001) metodo taikymą skaitinio modeliavimo uždaviniuose.

Pažymėtina, kad visi aptarti liekamųjų įtempių nustatymo metodai dėl didelės plieno plaušo tipų ir formų įvairovės, taip pat dėl liekamųjų įtempių nustatymui taikomų bandymų specifiškumo, retai atspindi realių matmenų konstrukcinių elementų elgseną, todėl yra pakankamai netikslūs.

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Atlikta literatūros analizė parodė, kad armavimas plieno plaušu iš esmės pakeičia tempiamojo betono suirimo pobūdį – plaušas aktyviai varžo plyšių atsivėrimą, kartu perimdamas tempimo įtempius plyšyje. Dėl dispersinio armavimo padidėja medžiagos plastiškumas, o liekamieji įtempiai didėja, priklausomai nuo plaušo kiekio ir tipo.
2. Liekamųjų įtempių įvertinimas – vienas sudėtingiausių uždavinių tempiamojo plieno plaušu armuoto gelžbetonio analizėje. Dėl didelės plieno plaušo geometrinių parametrų įvairovės bei dėl kintančių plieno plaušo ir betono sąveikos sukibimo charakteristikų, kol kas nėra pasiūlyta patikimų ir visuotinai priimtinių tempiamojo plieno plaušu armuoto betono fizikinių modelių.
3. Supleišėjusio tempiamojo dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymui dažniausiai taikomi trys metodai: a) Naaman empirinis metodas; b) DBV metodas; arba c) Rilem TC162-TDF pasiūlytas metodas. Pagrindinis pirmojo metodo trūkumas slypi jo paprastume, kadangi taikant šį metodą priimama pastovi liekamųjų įtempių (liekamojo stiprio reikšmė), todėl šis metodas – apytikslis. Kitais dviem atvejais atliekami specifiniai ir pakankamai sudėtingi bandymai, kurių metu gaunamos liekamųjų įtempių ir deformacijų priklausomybės retai atspindi realių matmenų konstrukcinių elementų elgseną, o rezultatams būdinga itin didelė sklaida.

Apžvalga parodė, kad dispersiškai armuotų gelžbetoninių konstrukcijų analizei taikant skaitinius metodus, didelę įtaką turi fizikiniai medžiagų modeliai. Tokie įtempių ir deformacijų modeliai yra labai plačiai taikomi kompiuterinio modeliavimo programose. Šiuose modeliuose dispersinio armavimo įtaka, elementui supleišėjus – įvertinama per supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius. Todėl labai svarbu pasiūlyti modelį, pagal kurį būtų galima tiksliai nustatyti liekamuosius įtempius, o modeliavimo rezultatai pasižymėtų itin maža sklaida.

Norint tai pasiekti, reikia:

- a) atlikti trumpalaikę apkrova veikiamų, mažai armuotų gelžbetoninių ir dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų eksperimentinius tyrimus;
- b) pritaikyti atvirkštinio uždavinio algoritmą dispersiškai armuoto tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų gavimui, naudojant eksperimentines, lenkiamųjų plieno plaušu ir strypais armuotų gelžbetoninių elementų, momentų ir kreivių diagramas;

- c) iš gautų vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramų nustatyti supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius;
- d) atlikti lenkiamųjų dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų skaitinį modeliavimą baigtinių elementų programa, skaičiavimams taikant gautas vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramas;
- e) atlikti trumpalaikę apkrova veikiamų, nedidelio tarpatramio dispersiškai armuotų betoninių sijų eksperimentinius tyrimus bei šių sijų skaitinį modeliavimą, skaičiavimams taikant eksperimentines apkrovos ir įlinkių diagramas;
- f) atlikti plieno plaušu ir strypais armuotų gelžbetoninių elementų plyšių pločių skaitinę analizę, skaičiavimams taikant nustatytus liekamuosius įtempius.

Eksperimentiniai dispersiškai armuotų sijų tyrimai

Šiame skyriuje eksperimentiškai tiriama dispersinio armavimo įtaka betoninių ir gelžbetoninių, plieno plaušu armuotų sijų deformatyvumui. Pateikiami trumpalaikė apkrova išbandytų mažai armuotų ($\rho_l \approx 0,3 \%$) gelžbetoninių ir dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų eksperimentinių tyrimų rezultatai. Taip pat pateikiami trumpalaikė apkrova veikiamų, dispersiškai armuotų nedidelio ilgio sijų, su įpjova viduryje eksperimentiniai tyrimai.

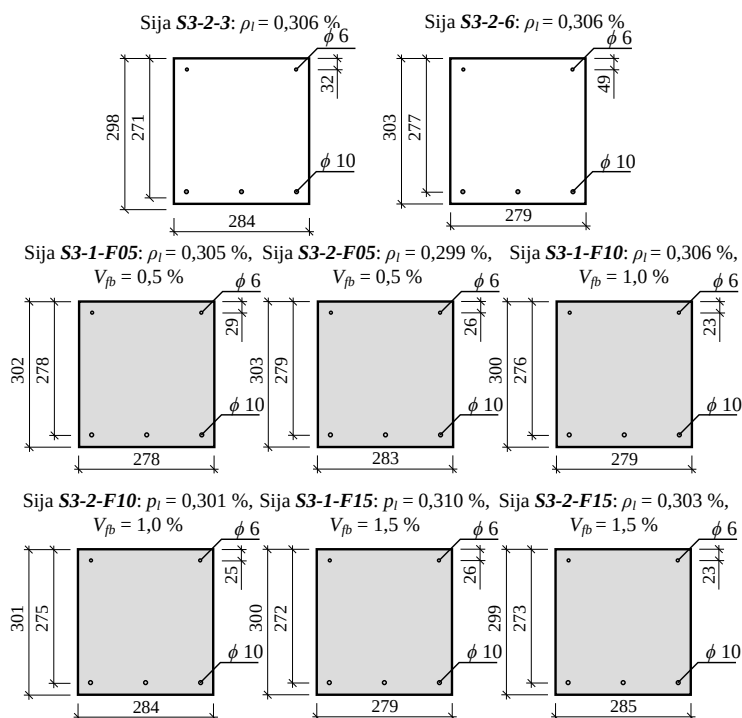
Skyriuje pateikiamas trumpas bandymų programos, medžiagų (betono, armatūros, plieno plaušo) charakteristikų, bandymų įrangos bei tyrimų rezultatų aprašymas. Pagrindinis šių tyrimų tikslas – eksperimentiškai nustatyti dispersinio armavimo įtaką trumpalaikė apkrova veikiamų silpnai armuotų gelžbetoninių sijų įtempių ir deformacijų būviui.

Skyriaus tematika paskelbti keturi straipsniai (Meskenas ir Ulbinas 2011, Gribniak ir kt. 2011a, Gribniak ir kt. 2011b, Gribniak ir kt. 2012).

2.1. Eksperimentiniai bandiniai

2.1.1. Plieno plaušu armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių sijų eksperimentiniai tyrimai

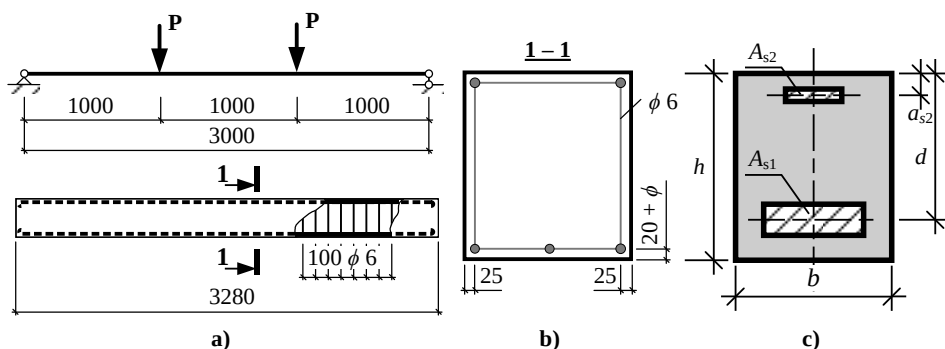
Eksperimentinių tyrimų metu pagamintos ir trumpalaikė apkrova išbandytos dvi gelžbetoninės sijos armuotos tik plieno strypais: S3-2-3 ir S3-2-6 bei šešios gelžbetoninės sijos armuotos strypais ir plieno plaušu: S3-1-F05; S3-2-F05; S3-1-F10, S3-2-F10, S3-1-F15, S3-2-F15. Visos sijos buvo mažai armuotos strypine armatūra ($\rho_l \approx 0,3\%$). Nominalus visų sijų ilgis buvo vienodas: $l = 3280$ mm. Eksperimentams naudotų sijų skerspjūviai pateikti 2.1 paveiksle, o pagrindinės charakteristikos 2.1 lentelėje. Visos sijos skersinės jėgos veikimo zonoje armuotos $2\phi 6$ skersiniais strypais, kurių žingsnis $s = 100$ mm (2.2a pav.). Šios armatūros plotas bei žingsnis parinkti užtikrinant sijos stiprumą įstrižajame pjūvyje. Skirtingų serijų sijos tarpusavyje skyrėsi dispersinio armavimo procentu bei betono stipriu. Dispersinės armatūros kiekis skirtingose betonavimo serijose sudarė $V_{fb} \approx 0,5; 1,0$ ir $1,5\%$ nuo betono tūrio.



2.1 pav. Eksperimentinių sijų skerspjūviai
Fig. 2.1. Cross-sections of experimental beams

Sijos betonuotos po 4 metaliniuose klojiniuose ant vibrostalo. Pagamintos sijos kietėjo natūraliomis sąlygomis, esant 56,0–87,5 % drėgniui bei 13,1–25,9 °C temperatūrai.

Laisvai atremtos sijos apkrautos dvejomis koncentruotomis jėgomis išdėstytomis tarpatramio trečdaliuose. Skačiuotinas visų sijų tarpatramio ilgis $l_0 = 3,0$ m.



2.2 pav. a) sijų apkrovimas; b) armavimo schema; c) sijų skerspjūvis
Fig. 2.2. a) loading of the beams; b) scheme of reinforcement; c) cross-section of the beams

2.1 lentelė. Eksperimentinių sijų pagrindinės charakteristikos

Table 2.1. Main characteristics of experimental beams

Sija	A_{s1}	A_{s2}	ρ_l	V_{fb}	f_c	f_y	E_s	E_c
	mm^2		%		MPa			
S3-2-3	232,0	57,30	0,30	–	50,90	578,0	210000	37584
S3-2-6	232,0	57,30	0,30	–	50,90	578,0	210000	37584
S3-1-F05	235,4	55,88	0,30	0,5	55,62	559,9	203000	36516
S3-2-F05	235,4	55,88	0,30	0,5	55,62	559,9	203000	36516
S3-1-F10	235,4	55,88	0,30	1,0	47,95	559,9	203000	34984
S3-2-F10	235,4	55,88	0,30	1,0	47,95	559,9	203000	34984
S3-1-F15	235,4	55,88	0,30	1,5	52,15	559,9	203000	35938
S3-2-F15	235,4	55,88	0,30	1,5	52,15	559,9	203000	35938

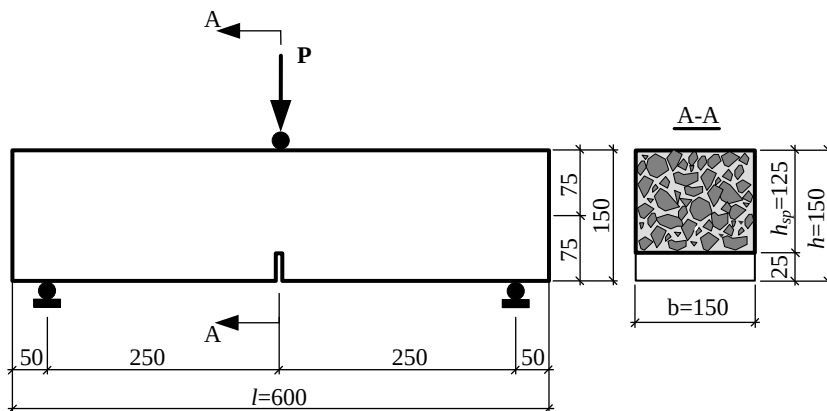
2.1 lentelėje A_{s1} ir A_{s2} – atitinkamai, apatinės ir viršutinės armatūrų skerspjūvių plotai; ρ_l – pagrindinės armatūros armavimo procentas; V_{fb} – dispersinės armatūros armavimo procentas (pagal tūrį); f_c – betono cilindrinis gniuždomasis stipris bandymo dieną; f_y – armatūros takumo įtempiai; E_s – armatūros tamprumo modulis.

2.1.2. Dispersiškai armuotų betoninių sijų eksperimentiniai tyrimai

Šiame poskyryje aprašomi trumpalaikė apkrova veikiamų, dispersiškai armuotų betoninių sijų su dirbtine įpjova, eksperimentiniai tyrimai. Pagrindinis šių bandymų tikslas – eksperimentiškai gauti apkrovos ir įlinkių ($P-\delta$) bei apkrovos ir plyšio pločio ($P-w$) diagramas.

Eksperimentinių tyrimų metu pagamintos ir trumpalaikė apkrova išbandytos keturios nedidelio tarpatramio sijos su įpjova, armuotos plieno plaušu: *S1-1-F10*, *S1-2-F10*, *S1-3-F10* ir *S1-4-F10*. Visos keturios sijos buvo armuotos vienodu kiekiu plieno plaušu ($V_{fb} = 1,0\%$ nuo betono tūrio).

Taikant Rilem TC162-TDF grupės (2000a, 2000b, 2002) pasiūlytą metodą bandymas atliekamas viena koncentruota apkrova, veikiant laisvai atremtą, plieno plaušu armuotą mažo tarpatramio betoninę siją ($600 \times 150 \times 150$ mm). Lenkiamojo elemento apkrovimo schema pateikta 2.3 paveiksle. Bandinio skerspjūvio apatinės dalies viduryje padaroma 25 mm aukščio įpjova. Taip lokalizuojamas elemento pleišėjimas ir užtikrinama, kad elementas suirs būtent susilpnintame skerspjūvyje.



2.3 pav. Apkrovimo schema pagal Rilem TC162-TDF
Fig. 2.3. Loading scheme according Rilem TC162-TDF

2.2. Tyrimams naudojamos medžiagos

Betonas

Eksperimentiniams bandiniams panaudotas C35/45 betono klasės mišinys. Plieno plaušas į mišinio sudėtį buvo įmaišomas gaminant betoną. Tam, kad skirtingų betonavimų metu pagamintas betonas turėtų skirtingą plaušo armavimo kiekį V_{fb} ,

į jo sudėtį buvo įmaišyta: 36,66; 79,24 ir 114,18 kg/m³ plieno plaušo, atitinkamai, pirmo, antro ir trečio betonavimų metu.

Gniuždomasis betono stipris buvo nustatytas bandant 100×100×100 mm ir 150×150×150 mm kubelius bei 150 mm skersmens cilindrus. Betono tamprumo modulis nustatytas gniuždant 150 mm skersmens cilindrus, o tempiamasis stipris – lenkiant 400×100×100 mm matmenų prizmes. Kiekvienos serijos bandiniai išbandyti iškart išėmus sijas iš klojinių (2–3 dienų bėgyje), 28 dienos po betonavimo ir bandymų dieną. Vidutinės gniuždomojo betono cilindrinio stiprio eksperimentiškai nustatytos reikšmės bandymo dieną pateiktos 2.1 lentelėje.

Plieno plaušas

Betono dispersiniam armavimui panaudotas Vokietijos kompanijos *IFT* 55 mm ilgio ir 1 mm skersmens *DUOLOC* metalinės vielos plaušas, pateiktas 2.4 paveiksle. *IFT* yra vienas iš pagrindinių dispersinės armatūros gamintojų pasaulyje. Šios kompanijos gaminimas plaušas turi dvigubo sukibimo sistemą: užlenkiami galuose ir papildomi įspaudai per visą plaušo ilgį. Dispersiniam sijų armavimui naudoto plaušo tempiamasis stipris – 1020 MPa.

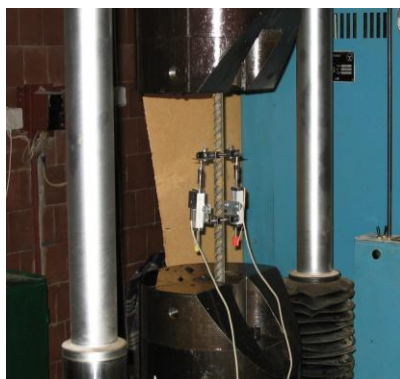


2.4 pav. Dispersiniam armavimui naudotas plieno plaušas

Fig. 2.4. Used in steel fiber for dispersive reinforcement

Armatūra

Strypynų gamybai skirtos armatūros charakteristikoms nustatyti buvo išbandyta trys plieniniai strypai. Armatūra buvo bandoma tempimo mašinoje, didinant apkrovą pastoviu greičiu. Deformacijos buvo fiksuojamos poslinkių matuokliais *ALMEMO T50*, o gautieji rezultatai apdorojami naudojant signalo apdorojimo prietaisą *ALMEMO 25 90-9*, pavaizduotą 2.5 paveiksle, sujungtą su personaliniu kompiuteriu. Buvo eksperimentiškai nustatytos pagrindinės armatūros charakteristikos: takumo riba f_y bei tamprumo modulis E_s . Šių parametrų reikšmės pateiktos 2.1 lentelėje.



2.5 pav. Armatūros strypų bandymas

Fig. 2.5. Test of reinforcement

2.3. Bandymų metodika ir prietaisų išdėstymas

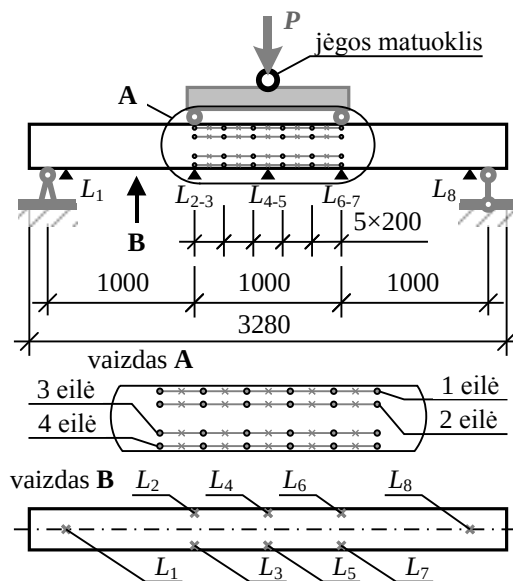
2.3.1. Bandymų metodika ir prietaisų išdėstymas bandant dispersiškai armuotas gelžbetonines sijas

Gelžbetoninės sijos tirtos bandymų stende, naudojant IIP-1000 presą (100 kN galios). Apkrova buvo keliama pakopomis po 2 kN su dviejų minučių išlaikymu, skirtu užrašyti deformacijų ir plyšių pločių rodmenims. Apkrovos dydis fiksuotas skaitmeniniu 500 kN dinamometru. Vidutiniškai vienos sijos bandymas truko 2–2,5 valandos (apie 40 apkrovos žingsnių). 2.6 paveiksle pavaizduota apkrovimo ir įlinkių bei deformacijų matavimo schema.

Sijų įlinkiai buvo matuoti 8 įlinkiomačiais (indukciniais tiesinių poslinkių matuokliais, tikslumas – $\pm 0,15\%$), išdėstytais tokia seka: po vieną prie kiekvienos atramos, po du koncentruotų apkrovų pridėjimo taškuose (1,0 m nuo atramų) ir du tarpatramio viduryje, pavaizduotas (2.6 pav., vaizdas B).

Indukciniai indikatoriai kartu su dinamometru buvo sujungti su kompiuteriu, o jų rodmenys buvo nuskaitomi kas vieną sekundę. Išdėstyta matavimo įranga, matoma 2.6 paveiksle.

Apkrautų sijų vidutinės deformacijos matuotos grynojo lenkimo zonoje keturiuose skirtinguose lygiuose bei penkiuose kiekvieno lygio ruožuose (2.6 ir 2.7 pav.). Indikatorių rodmenys buvo nuskaitomi kiekvienoje apkrovos pakopoje. Sijų deformacijoms matuoti panaudoti 20 mechaninių mikrometrų su apskritimine skale (indikatoriai), kurių tikslumas – $\pm 0,003$ mm. Matavimų bazė – 200 mm. Bandymai atlikti VGTU Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedros mokslo laboratorijoje.



2.6 pav. Matavimo prietaisų išdėstymo schema

Fig. 2.6. Structural system and arrangement of the measurements

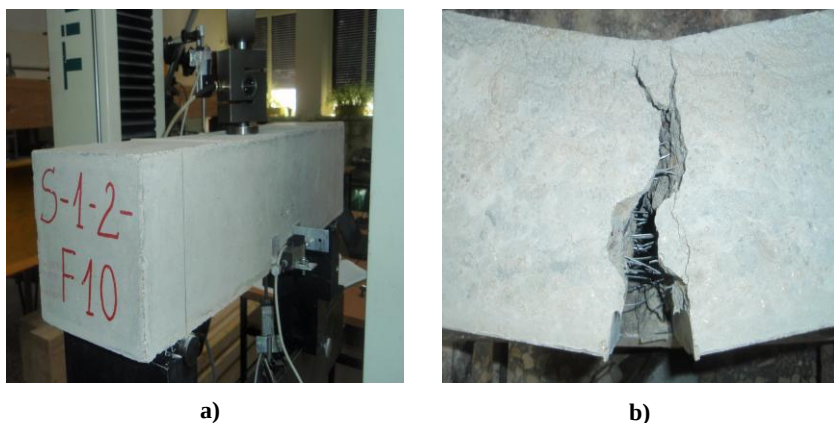


2.7 pav. Eksperimentinės sijos fragmentas

Fig. 2.7. Experimental set-up of the beam

2.3.2. Bandymų metodika ir prietaisų išdėstymas bandant dispersiškai armuotas betonines sijas

Nedidelio tarpatramio dispersiškai armuotų betoninių sijų bandymui buvo naudojamas presas su deformacijų kontrole, apkraunant siją 0,2 mm/min greičiu. Naudojant poslinkio daviklius (LVDT) buvo fiksuojamos apkrovos ir elemento vidurio taško įlinkio bei plyšio pločio ties įpjova reikšmės (2.8a pav.). Eksperimentas buvo atliekamas iki kol elemento įlinkis pasiekia 3,0 mm, arba plyšio plotis – 3,5 mm. Pasiekus šią ribą, nuėmus įlinkių matuoklius elementai buvo išbandomi iki suirimo. Suiręs elemento skerspjūvis pateiktas 2.8b paveiksle.



2.8 pav. a) plieno plaušu armuoto betoninio elemento apkrovimas b) sijos skerspjūvis po suirimo

Fig. 2.8. a) Loading of steel fiber reinforced concrete element and b) the beam cross-section after failure

Iš 2.8b paveikslo matyti, kad plieno plaušas suirusios sijos skerspjūvyje išsidėstė statmenai atsivėrusiam plyšiui. Kaip minėta, toks plaušo išsidėstymas yra veiksmingiausias, dispersiškai armuojant betonines konstrukcijas, kadangi tokiu atveju užtikrinamas tinkamiausias plaušo inkaravimo ilgis.

2.4. Eksperimentiniai duomenys

2.4.1. Dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų įlinkių ir deformacijų matavimo rezultatai

Atliekant eksperimentą, kaip minėta buvo matuojamos sijų deformacijos bei įlinkiai. Eksperimentinių sijų kreiviai buvo apskaičiuoti dviem būdais:

- iš deformacijų, išmatuotų skirtinguose sijos skerspjūvio lygiuose;
- iš įlinkiomačių parodymų.

Sijų deformacijoms matuoti panaudoti 20 mechaninių mikrometrų. Apkrautų sijų vidutinės deformacijos matuotos grynojo lenkimo zonoje keturiuose skirtinguose lygiuose bei penkiuose kiekvieno lygio ruožuose. Apskaičiuoti kreivį prie kiekvieno momento, pateikiama formulė:

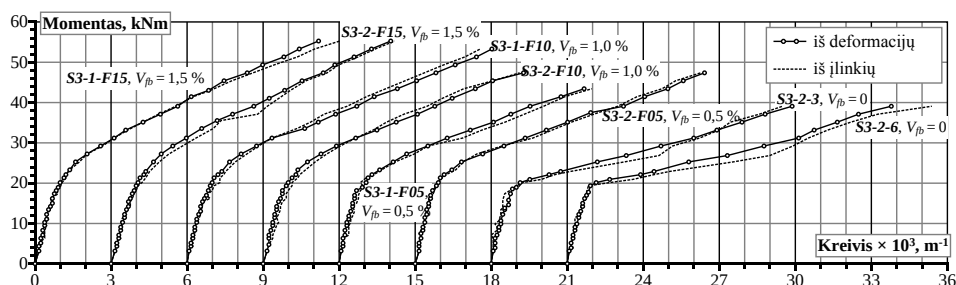
$$\Delta\kappa = \sum_{k < m} (\Delta D_k - \Delta D_m) / (6 \cdot h_{k,m}), \quad k = 1; 2; 3, \quad (2.1)$$

čia ΔD_k ir ΔD_m yra atitinkamai vidutinės deformacijos tarp k ir m skerspjūvio lygių; $h_{k,m}$ yra atstumas tarp šių skerspjūvio lygių. Kiekvienos sijos įlinkiai matuoti 8 įlinkiomačiais (L 1–L 8, 2.6 pav. vaizdas B). Prie kiekvieno momento reikšmės kreivis apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$\Delta\kappa = 2(\Delta\delta) / \left[(0,5 \cdot a)^2 + (\Delta\delta)^2 \right], \quad a = 1,0 \text{ m}. \quad (2.2)$$

Čia $\Delta\delta$ yra grynosios lenkimo zonos įlinkis; a yra grynosios lenkimo zonos ilgis.

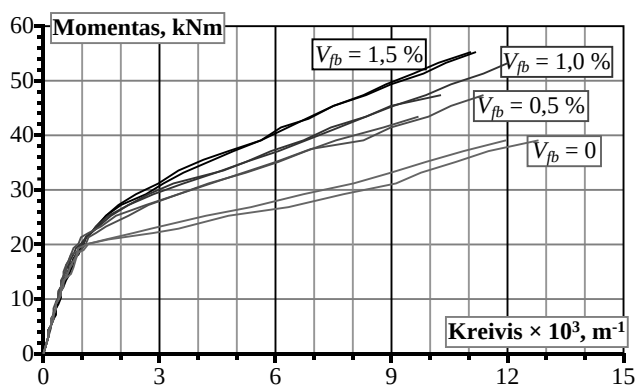
Kaip parodė tyrimai, kreiviai, gauti naudojant deformacijų ir įlinkių duomenis, sutapo (2.9. pav.). 2.10 paveiksle pateiktos momentų ir kreivių diagramos ($M-\kappa$), gautos naudojant eksperimentiškai išmatuotų deformacijų reikšmes.



2.9 pav. Momentų ir kreivių diagramos iš įlinkių ir deformacijų

Fig. 2.9. Moment-curvature relationships of experimental beams derived from mid-span deflections and surface deformations

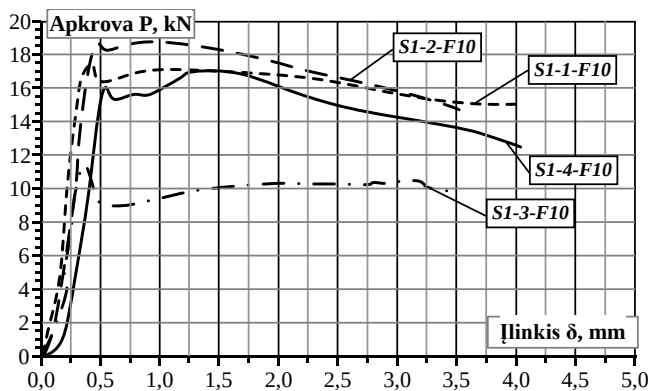
Kaip matyti iš 2.9 paveikslo, eksperimentinių sijų elgsena, esant vienodam armatūros strypų skersmeniui (armavimo koeficientui ρ_l), priklauso dar ir nuo dispersinio armavimo kiekio (armavimo procento V_{fb}).



2.10 pav. Eksperimentiškai nustatytos momentų ir kreivių diagramos
Fig. 2.10. Influence of fibre content on deformation response of the test beams

2.4.2. Dispersiškai armuotų betoninių sijų apkrovos ir įlinkių diagramos

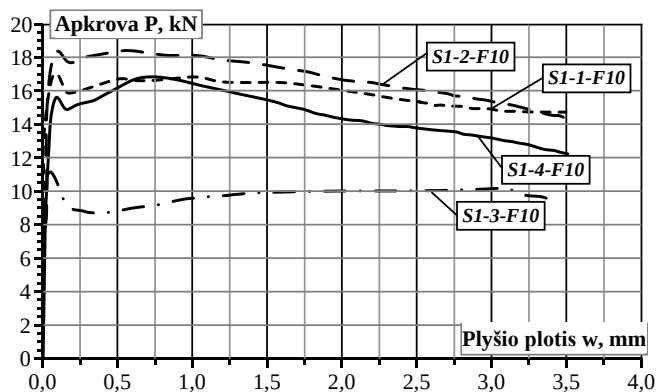
Atlikus nedidelio tarpatramio sijų eksperimentinius tyrimus buvo gautos apkrovos ir elemento vidurio įlinkių ($P-\delta$) diagramos, pateiktos 2.11 paveiksle. Kaip matyti iš diagramų, eksperimentiniams duomenims būdinga sklaida, kaip manoma susidaranti dėl netolygaus plaušo pasiskirstymo betono mišinyje, jį maišant.



2.11 pav. Eksperimentiškai nustatytos apkrovos ir įlinkių diagramos
Fig. 2.11. Experimentally obtained load-deflection diagrams

Atliekant eksperimentinius tyrimus, taip pat buvo matuojamas ir bandomų nedidelio tarpatramio sijų dirbtinės įpjovos viršuje atsiveriančio plyšio plotis bei

sudaromos eksperimentinės apkrovos ir plyšio pločio ($P-w$) diagramos, pateikiamos 2.12 paveiksle.



2.12 pav. Apkrovos ir plyšio pločio diagramos

Fig. 2.12. Load and crack width diagram

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Gauti nauji dispersiškai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų eksperimentinių tyrimų rezultatai. Atlikti 8 mažai armuotų gelžbetoninių sijų deformacijų eksperimentiniai tyrimai. 6 sijos buvo papildomai armuotos skirtingu plieno plaušo kiekiu (0,5, 1,0 ir 1,5 % betono tūrio). Eksperimentiniai kreiviai nustatyti dviem būdais: pagal deformacijų, išmatuotų skirtinguose sijos skerspjūvio lygiuose ir pagal įlinkiomačių parodymus. Skirtingais būdais nustatytos momentų ir kreivių diagramos sutapo. Šių stebėjimų duomenys panaudoti sudarant eksperimentines momentų ir kreivių diagramas.
2. Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami didinant apkrovą mažomis pakopomis (2 kN), tai leido gauti pakankamai daug eksperimentinių taškų (apie 40). Šie taškai bus taikomi tolimesniems įtempių ir deformacijų būvio analizės etapams (atvirkštinio uždavinio sprendimui).
3. Atlikti plieno plaušu armuotų ($V_f \approx 1,0\%$) betoninių sijų su įpjova eksperimentiniai tyrimai. Gauti nauji eksperimentiniai duomenys. Sudarytos keturių dispersiškai armuotų sijų apkrovos ir įlinkių bei apkrovos ir plyšių pločių diagramos. Gauti eksperimentiniai rezultatai bus naudojami tolimesniems skaičiavimams.

Dispersiškai armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų gavimas

Šiame skyriuje, kaip alternatyva praktikoje taikomiems fizinio modeliavimo metodams, pasiūlomas naujas dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymo būdas. Taikant pasiūlytąjį modeliavimo metodą, iš eksperimentinių dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramų gaunamos tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos.

Šiame skyriuje taip pat pateikiami du kiti literatūroje žinomi dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamųjų įtempių nustatymo būdai: supaprastintas Naaman (2003a) – empirinis liekamųjų įtempių nustatymo metodas bei Rilem TC162-TDF metodas, kuris remiasi eksperimentiniais duomenimis. Atliekama pagal skirtingus metodus gautų liekamųjų įtempių lyginamoji analizė.

Skyriaus tematika paskelbti trys straipsniai (Gribniak ir kt. 2011a, Gribniak ir kt. 2011b, Gribniak ir kt. 2012).

3.1. Autoriaus siūloma metodika. Liekamųjų įtempių nustatymas iš įtempių ir deformacijų priklausomybių

Šiame poskyryje pateikiamas Kaklauskas ir Ghaboussi (2001) pasiūlytas integralinis metodas supleišėjusio tempiamo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramoms nustatyti iš lenkiamųjų gelžbetonių elementų eksperimentinių duomenų. Atvirkstinio uždavinio algoritmas yra paremtas tiesioginio uždavinio sprendimu, sluoksnių metodu (Kaklauskas 2004) bei šiomis prielaidomis:

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

3.1.1. Tiesioginis uždavinys: Momentų ir kreivių analizė

3.1a paveiksle parodytas išorės lenkimo momentu M_{ext} apkrauto stačiakampio gelžbetoninio elemento skerspjūvis. Kaip parodyta 3.1b paveiksle, skerspjūvis sudalinamas į n horizontalių betono bei armatūros sluoksnių. Armatūros strypai pakeičiami ekvivalentinio skerspjūvio armatūros sluoksniu. Metodas paremtas iteraciniu skaičiavimu, medžiagų atsparumo formulėmis bei armatūros (3.1f pav.), gniuždomojo (3.1g pav.) ir tempiamojo (3.1h pav.) betono diagramų taikymu.

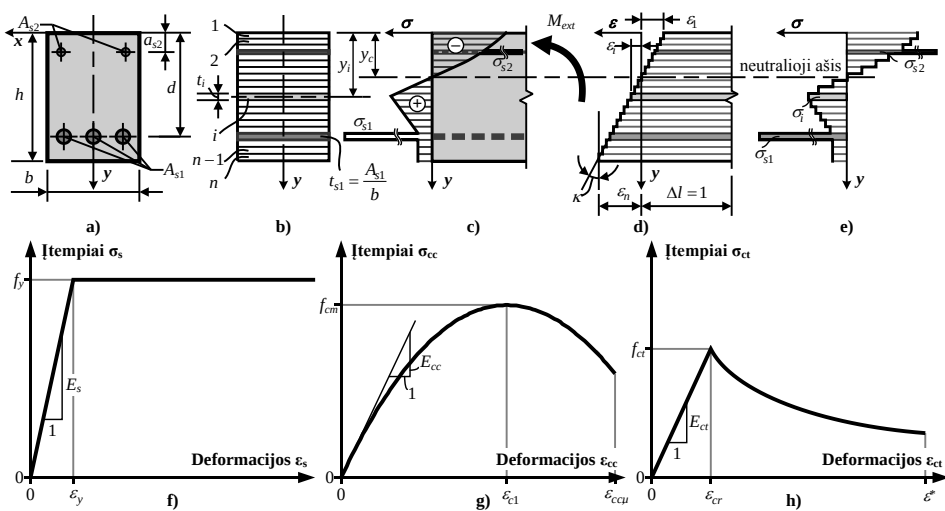
Skerspjūvio kreivis κ ir deformacijos ε_i kiekviename sluoksnyje i apskaičiuojami pagal klasikines medžiagų mechanikos formules:

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

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

Kai žinomos armatūros, gniuždomojo ir tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos (3.1f, g, h pav.), galime nustatyti kiekviename skerspjūvio sluoksnyje susidarancius įtempius: apskaičiuotos deformacijos reikšmę ε_i , atitinka įtempiai σ_i . Apskaičiuojamas kirstinis deformacijų modulis $E_{i,sec} = \sigma_i / \varepsilon_i$. ($i = 1, 2 \dots n$). Kiekvienam sluoksniui gauta kirstinio deformacijų modulio reikšmė

palyginama su ankstesnėje iteracijoje imta arba apskaičiuota reikšme. Skaičiavimai atliekami tol, kol pasiekiamas užsiduotas tikslumas. 3.1d ir e paveiksluose pavaizduotas deformacijų ir įtempių pasiskirstymas elemento skerspjūvyje, taikant sluoksnių metodą.



3.1 pav. a)–e) sluoksnių modelis; f) plieno įtempių ir deformacijų diagrama; g) dispersiškai armuoto gniuždomojo betono diagrama; h) dispersiškai armuoto tempiamojo betono diagrama

Fig. 3.1. a)–e) layer section model; f) constitutive laws for reinforcement steel; g) fibrous concrete in compression; h) fibrous concrete in tension

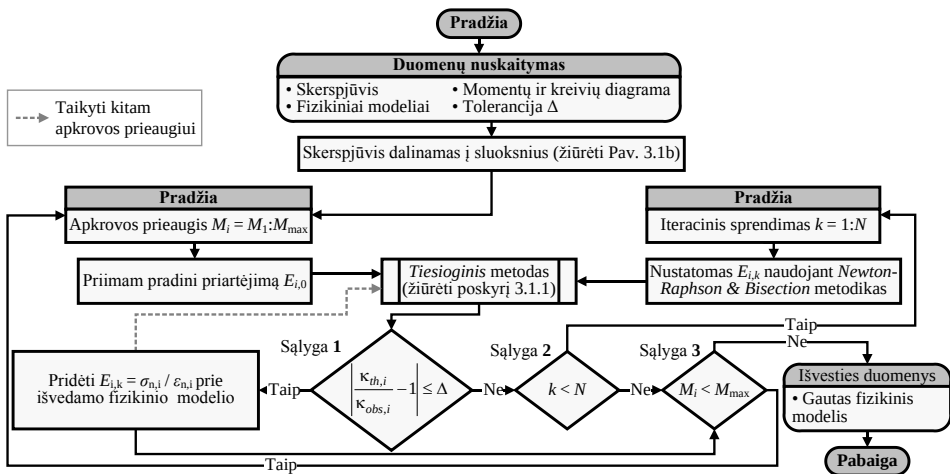
3.1.2. Atvirkštinis uždavinys

Kaip minėta, tiesioginis uždavinys yra toks, kai iš žinomų medžiagų įtempių ir deformacijų diagramų gaunamos konstrukcijos deformacijos. Tiesioginis uždavinys yra įprastas statybinių konstrukcijų projektavimo praktikoje. Atvirkštinio uždavinio sprendimo tikslas yra gauti patikimas medžiagų įtempių ir deformacijų diagramas, kurias vėliau galima pritaikyti projektuojant konstrukcijas. Šiame darbe atvirkštinis uždavinys taikomas gauti tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramai iš eksperimentinių plieno plaušu armuotų gelžbetoninių sijų momentų ir kreivių duomenų.

Darbo vadovas kartu su Ghaboussi (Kaklauskas ir Ghaboussi 2001) pasiūlė originalų ir naują pasaulyje metodą, kuriuo remiantis tempiamojo betono diagramas galima gauti išbandžius lenkiamuosius gelžbetoninius elementus. Atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmas remiasi sluoksnių modeliu (žr. 3.1 pav.) bei įtempių ir deformacijų diagramos nustatymu skerspjūvio kraštiniam tempia-

mojo betono sluoksniui. Skaičiuojamam apkrovimo žingsniui priimama tempia-
mojo plieno plaušu armuoto betono kraštinio sluoksnio pradinė kirstinio defor-
macijų modulio reikšmė. Skerspjūvio kreivis apskaičiuojamas taikant tiesioginį
uždavinį. Jeigu apskaičiuotas ir eksperimentinis kreiviai nesutampa, taikant ite-
racijų metodą patikslinama kirstinio deformacijų modulio reikšmė.

Reikia pažymėti priimtas sluoksnių skaičius n gali turėti įtakos skaičiavimų
rezultatams. Efektyviam ir tiksliam skaičiavimui užtikrinti rekomenduojamas
sluoksnių skaičius $n = 200$ (Kaklauskas 2001, Kaklauskas ir Gribniak 2011).



3.2 pav. Atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmas

Fig. 3.2. Flow chart of the inverse problem

3.2 paveiksle pateikiama atvirkštinio uždavinio algoritmo, blokinė schema. Gelžbetoninio elemento skerspjūvis pagal užduotus parametrus sudalinamas į horizontalius armatūros ir betono sluoksnius. Priimamos gniuždomojo betono bei armatūros įtempių ir deformacijų diagramos. Skaičiavimai atliekami iteracijomis, didėjant išoriniam lenkimo momentui. Kiekvienam lenkimo momento prieaugiui i , ieškomos įtempių ir deformacijų diagramos pradinė kirstinio modulio reikšmė yra priimama lygi 0 ($E_{i,0} = 0$). Kreivis $\kappa_{calc,i}$ nustatomas sprendžiant tiesioginį uždavinį. Jeigu skirtumas tarp apskaičiuoto ir eksperimentinio kreivio $\kappa_{obs,i}$ viršija užduotą paklaidą Δ , t. y. netenkinama 1 sąlyga (žr. 3.2 pav.), skaičiavimai kartojami taikant kompleksinį Niutono – Rafsono ir bisekcijos metodą (Gribniak 2009) tol, kol tenkinama 2 sąlyga. Kiekvienoje iteracijoje k apskaičiuojamas kirstinis deformacijų modulis $E_{i,k}$. Jei randamas sprendinys (tenkinama 1 sąlyga), gautoji $E_{i,k}$ reikšmė fiksuojama ir taikoma kitiems apkrovimo žingsniams. Jeigu iteracijų skaičius viršija 30 ($k > N = 30$), apskaičiuotas $E_{i,30}$ atmetamas, t. y. momento prieaugiui i kirstinis deformacijų mo-

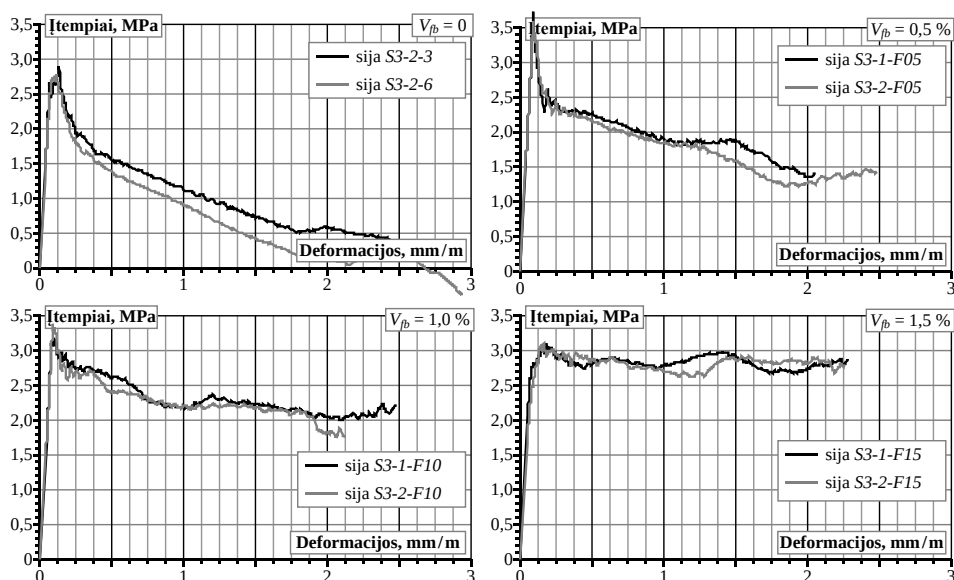
dulis E_i nenustatomas, ir skaičiavimai atliekami kitam apkrovimo žingsniui. Pasiekus maksimalią momento reikšmę, skaičiavimai baigiami (netenkinama 3 sąlyga). Tokiu būdu randami visi tempiamojo plieno plaušu armuoto betono suminių vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos taškai.

3.1.3. Tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų gavimas

Tempiamojo plieno plaušu armuoto betono suminių vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos gaunamos iš eksperimentinių momentų ir kreivių duomenų, pateiktų (2.10 pav.), taikant atvirkštinį uždavinį, aprašytą 3.1.2 poskyryje. Skaičiavimuose priimamos įtempių ir deformacijų diagramos pateiktos 3.1f ir g paveiksluose. Armatūros elgsenai apibūdinti taikoma idealiai elastingė – plastinė diagrama, gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų kreivė aprašoma La Mendola ir Papia (2002) pasiūlyta išraiška. Dispersiškai armuoto betono tamprumo modulis nustatomas pagal Euronormų rekomendacijas (Eurocode 2 2004), kaip ir įprastam betonui.

Gautos tempiamojo dispersiškai armuoto betono suminių vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos pateiktos 3.3 paveiksle. Atskirai pateikiamos dvynių sijų diagramos, armuotos vienodu plieno plaušo kiekiu. Reikia pažymėti, kad tokių sijų vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos sutampa. Diagramos susideda iš kylančios ir krentančios dalių. Didžiausia įtempių reikšmė atitinka pleišėjimo tašką momentų ir kreivių diagramoje. Kadangi plieno plaušas tampa efektyvus tik elementui supleišėjus, dispersinio armavimo įtaka maksimaliai įtempių reikšmei (tempiamajam stipriui) praktiškai nepastebima. Reikia paminėti tai, kad dėl pakankamai mažos eksperimentinės programos apimties bei stochastinės betono tempiamojo stiprio rezultatų prigimties, neįmanoma nustatyti maksimalių tempiamojo betono įtempių priklausomybės nuo plieno plaušo kiekio dėsnių. Kaip matyti iš 3.3 paveikslo, vidutiniai įtempiai krentančioje diagramos dalyje (supleišėjęs betonas) skiriasi priklausomai nuo dispersinio armavimo kiekio: kuo didesnis plieno plaušo kiekis, tuo didesni įtempiai.

Nors disertaciniame darbe nagrinėjamas vienas išilginio armavimo procento atvejis ($\rho_l = 0,3\%$), reikia paminėti, kad armavimo procentas ρ_l turi įtakos vidutinių suminių įtempių ir deformacijų diagramos formai. Supleišėjusio tempiamojo betono suminius įtempius sudaro įtempiai dėl tempiamojo sustandėjimo bei liekamųjų įtempių, atsirandančių dėl plieno plaušo ir betono sąveikos.



3.3 pav. Dispersiškai armuoto tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos

Fig. 3.3. Average stress-average strain relationships of steel fiber reinforced concrete in tension

Išanalizavus gautas dispersiškai armuoto tempiamojo betono vidutinių įtempių ir deformacijų (σ – ϵ) diagramas, galima pastebėti, kad didėjant plieno plaušo kiekiui gelžbetoniniame elemente, supleišėjusio betono krentančioji diagramos dalis kyla aukštyr ir tampa vis horizontalesnė (žr. 3.3 pav.). Tokia jos kitimo priklausomybė nuo plieno plaušo kiekio rodo, kad didėjant dispersinės armatūros kiekiui, supleišėjęs tempiamosios zonos betonas perima didesnius įtempius.

3.2. Supaprastintas Naaman modelis (įtempių ir deformacijų diagramos nustatymas)

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

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

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

Nustatoma plieno plaušo tūrio dalis betono mišinyje:

$$V_{fb} = \frac{D_{fb}}{\rho_{fb} + D_{fb}}, \quad (3.3)$$

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

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

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

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

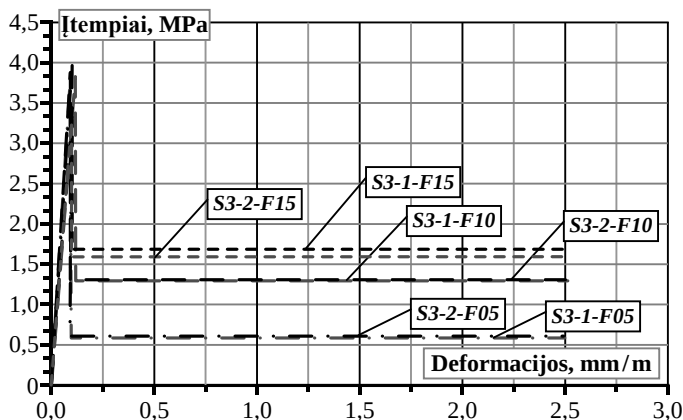
Pagrindiniai parametrai įtempių ir deformacijų diagramų sudarymui pagal Naaman metodą pateikti 3.1 lentelėje. Šioje lentelėje pateikiami ir visų dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų liekamieji įtempiai $\sigma_{fb,rNaam}$, nustatyti pagal supaprastintą metodą.

3.1 lentelė. Pagrindiniai parametrai, įtempių ir deformacijų diagramų sudarymui pagal Naaman metodą

Table 3.1. The main parameters for formation of stress-strain diagram according to Naaman method

Sija	f_{ct}	ρ_{fb}	V_{fb}	RI	τ	$\sigma_{fb,rNaam}$	ε_{cr}
	MPa	kg/m ³	%	-	MPa		-
S3-1-F05	3,76	7850	0,5	0,26	7,51	0,58	$9,25 \cdot 10^{-5}$
S3-2-F05	3,99	7850	0,5	0,26	7,99	0,62	$10,1 \cdot 10^{-4}$
S3-1-F10	3,78	7850	1,0	0,56	7,57	1,27	$10,1 \cdot 10^{-4}$
S3-2-F10	3,82	7850	1,0	0,56	7,65	1,28	$9,86 \cdot 10^{-5}$
S3-1-F15	3,42	7850	1,5	0,80	6,84	1,65	$10,1 \cdot 10^{-4}$
S3-2-F15	3,26	7850	1,5	0,80	6,51	1,57	$9,91 \cdot 10^{-5}$

Nustačius dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius (liekamąjį stiprį), pagal Naaman metodą, sudaromos trilinijinės tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos, pateiktos 3.4 paveiksle.



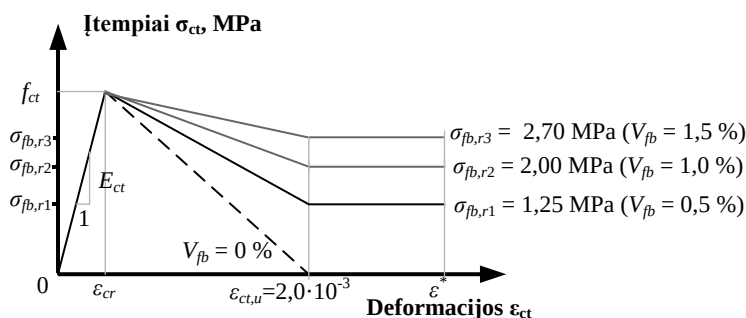
3.4 pav. Įtempių ir deformacijų diagramos gautos taikant Naaman metodą

Fig. 3.4. Stress-strain diagram obtained by the Naaman method

Kaip matyti iš 3.4 paveikslo, taikant šį metodą, vienodu plaušo kiekiu armuotų bandinių tempiamojo betono liekamųjų įtempių reikšmių sklaida yra labai nedidelė, tačiau šis metodas, elementui supleišėjus apsiriboja tik viena, pastovia, liekamųjų įtempių reikšme. Dėl šios priežasties empirinis Naaman (2003a) metodas yra labai apytikslis, o jo pritaikymas – ribotas.

3.3. Dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamųjų įtempių palyginimas

Šiame poskyryje atliekamas liekamųjų įtempių, nustatytų pagal du skirtingus metodus palyginimas. Pagal autoriaus siūlomą metodiką, supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamieji įtempiai nustatomi iš 3.3 paveiksle pateiktų įtempių ir deformacijų diagramų. Ankstesni gelžbetoninių elementų tyrimai (Kaklauskas ir kt. 2009, Gribniak 2009, Gribniak ir kt. 2010, Gribniak ir kt. 2012) parodė, kad tempiamojo sustandėjimo efektas beveik išnyksta prie tempiamojo sustandėjimo ribinės deformacijos $\epsilon_{ct,u} = 2,0 \cdot 10^{-3}$. Liekamųjų įtempių reikšmės prie ribinės deformacijos (žr. 3.3 pav.), priklausomai nuo dispersinio armavimo kiekio pateiktos 3.5 paveiksle.



3.5 pav. Supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamieji įtempiai
Fig. 3.5. The residual stresses of cracked steel fiber reinforced tensile concrete

3.2 lentelėje pateikiamas supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamųjų įtempių, nustatytų pagal autoriaus siūlomą metodiką $\sigma_{fb,rprop}$ ir pagal supaprastintą (Naaman 2003a) metodą $\sigma_{fb,rNaam}$, palyginimas. Šioje lentelėje taip pat aprašoma kokią dalį tempiamojo betono stiprio sudaro pagal skirtingus metodus nustatyti liekamieji įtempiai ($\sigma_{fb,r}/f_{ct}$).

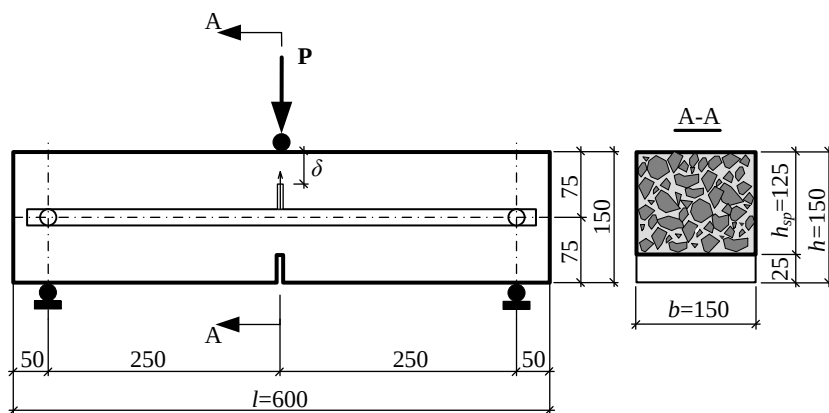
3.2 lentelė. Pagal du skirtingus metodus nustatytų liekamųjų įtempių palyginimas
Table 3.2. Comparison of the residual stresses according two different methods

Sija	f_{ct} MPa	Liekamieji įtempiai, MPa		$\sigma_{fb,rprop}/$ $\sigma_{fb,rNaam}$	$\sigma_{fb,r}/f_{ct}$ %	
		Siūlomas metodas, $\sigma_{fb,rprop}$	Naaman, $\sigma_{fb,rNaam}$		Siūlomas metodas $\sigma_{fb,rprop}/f_{ct}$	Naaman, $\sigma_{fb,rNaam}/f_{ct}$
S3-1-F05	3,76	1,25	0,58	2,16	33,3	15,4
S3-2-F05	3,99	1,25	0,62	2,02	31,3	15,5
S3-1-F10	3,78	2,00	1,27	1,57	52,9	33,6
S3-2-F10	3,82	2,00	1,28	1,56	52,3	33,5
S3-1-F15	3,42	2,70	1,65	1,64	79,0	48,3
S3-2-F15	3,26	2,70	1,57	1,72	83,0	48,2

Pagal autoriaus pasiūlytą metodiką gauti liekamieji įtempiai priklauso nuo plaušo kiekio ir sudaro 31–83 % tempiamojo stiprio. Pagal supaprastintą metodą nustatyti liekamieji įtempiai sudaro nuo 15 iki 48% tempiamojo stiprio. Tai leidžia teigti, kad supaprastintas Naaman (2003a) metodas, nepakankamai įvertina plieno plaušo įtaką, skaičiuojant dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius.

3.4. Liekamųjų įtempių nustatymas taikant Rilem TC162-TDF metodą

Taikant Rilem TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002) grupės pasiūlytą metodą, lenkimo bandymas atliekamas viena koncentruota apkrova veikiant laisvai atremtą, plieno plaušu armuotą betoninę siją ($600 \times 150 \times 150$ mm). Bandinio apatinės dalies viduryje padaroma 25 mm aukščio įpjova (3.6 pav.). Taip lokalizuojamas elemento pleišėjimas ir užtikrinama, kad elementas suirs būtent susilpnintame skerspjūvyje.



3.6 pav. Lenkimo bandymo viena koncentruota apkrova schema

Fig. 3.6. Scheme of bending test with one concentrated load

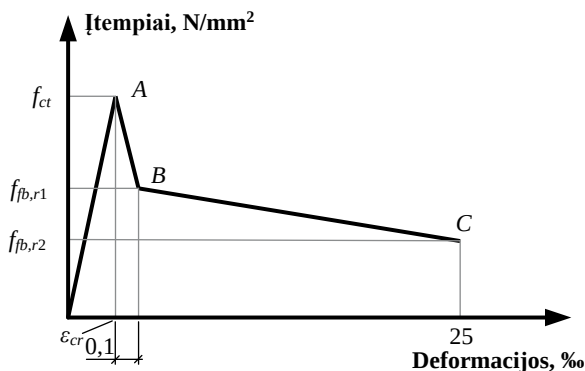
Bandymui naudojamas presas su deformacijų kontrole, apkraunant siją 0,2 mm/min greičiu. Naudojant poslinkio daviklius, fiksuojamos apkrovos ir elemento vidurio taško įlinkio bei plyšio pločio, ties įpjova, reikšmės. Eksperimentas atliekamas iki elemento įlinkis pasiekia 3,0 mm, arba plyšio plotis – 3,5 mm.

Tarptautinės betono ir gelžbetonio mokslo asociacijos Rilem darbo grupė TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002) atlikus eksperimentinius tyrimus projekto BRPR-CT98-0813 (Brite-Euram 2002 b, c, d, e) metu pasiūlė vieną iš tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos sudarymo metodų, liekamajam supleišėjusio tempiamojo betono stipriui nustatyti. Taikant šį metodą naudojami eksperimentiniai duomenys, gauti bandant dispersiškai armuotas lenkiamas sijas. Kaip minėta 1.5 poskyryje liekamojo stiprio nustatymo būdai, atliekant lenkimo bandymą pagal Rilem TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002) grupės pasiūlytą metodą, prie tam tikro sijos įlinkio, arba plyšio pločio fiksuojama apkrova, kuri taikoma nustatant plieno plaušu armuoto tempiamojo betono liekamąjį stiprį.

Metodo pritaikymui buvo naudojami keturių dispersiškai armuotų betoninių sijų, aprašytų 2.1.2 poskyryje, eksperimentiniai duomenys.

Plieno plaušu armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagrama (3.7 pav.) sudaroma pagal tris charakteringuosius taškus (A, B, C) (Rilem TC162-TDF 2003):

- Tašką A apibūdina tempiamasis betono stipris f_{ct} ir jį atitinkanti betono pleišėjimo deformacija ϵ_{cr} .



3.7 pav. Rilem įtempių ir deformacijų diagrama (Rilem TC162-TDF 2003)

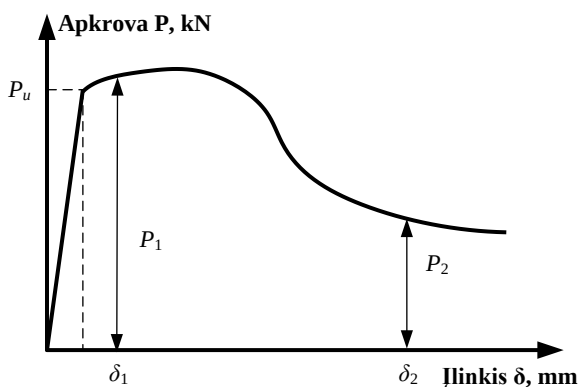
Fig. 3.7. Stress-strain diagram according Rilem (Rilem TC162-TDF 2003)

- Taškas B aprašomas liekamojo stiprio reikšme $f_{fb,r1}$ bei ją atitinkančia deformacija. Pagal eksperimentiškai gautas apkrovos ir plyšio pločio ($P-w$) arba apkrovos ir įlinkių ($P-\delta$) diagramas (3.8 pav.), atitinkamai prie elemento įlinkio $\delta_1 = 0,46$ mm arba plyšio pločio $w_1 = 0,5$ mm, nustatoma liekamojo stiprio reikšmė $f_{fb,r1}$:

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

čia P_1 – apkrova, esant elemento įlinkiui $\delta_1 = 0,46$ mm arba plyšio pločiui $w_1 = 0,5$ mm; l – bandinio ilgis; b – elemento plotis; h_{sp} – bandinio aukštis ties įpjova; k – mastelio faktorius, priklausantis nuo analizuojamo bandinio matmenų ir nustatomas pagal 3.9 paveikslą.

Sudarant įtempių ir deformacijų diagramą, liekamojo stiprio reikšmę $f_{fb,r1}$ atitinkanti betono deformacija, priimama lygi $\epsilon_{cr} + 0,1 \times 10^{-3}$.



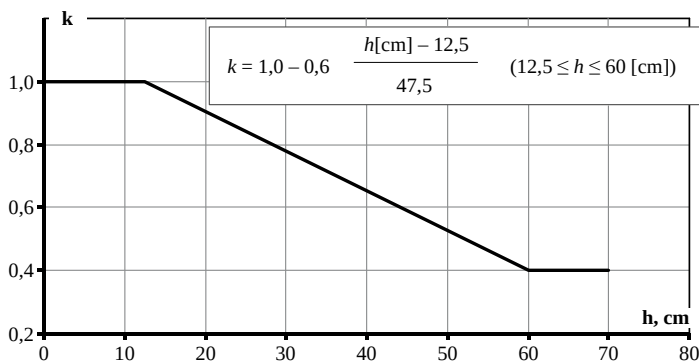
3.8 pav. Eksperimentiškai nustatyta apkrovos ir įlinkio diagrama

Fig. 3.8. Experimentally obtained load and deflection diagram

- Taškas *C* aprašomas analogiškai kaip ir taškas *B*, tik liekamojo stiprio reikšmė $f_{fb,r2}$ nustatoma prie elemento įlinkio $\delta_2 = 3,0$ mm arba plyšio pločio $w_2 = 3,5$ mm (3.8 pav.), taikant išraišką:

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

Šią liekamojo stiprio reikšmę atitinka ribinė betono deformacijos reikšmė $\varepsilon_{cu} = 25 \times 10^{-3}$.



3.9 pav. Mastelio faktoriaus *k* nustatymas Rilem įtempių ir deformacijų diagramai (Rilem TC162-TDF 2003)

Fig. 3.9. Determination of scaling factor *k* for Rilem stress-strain diagram (Rilem TC162-TDF 2003)

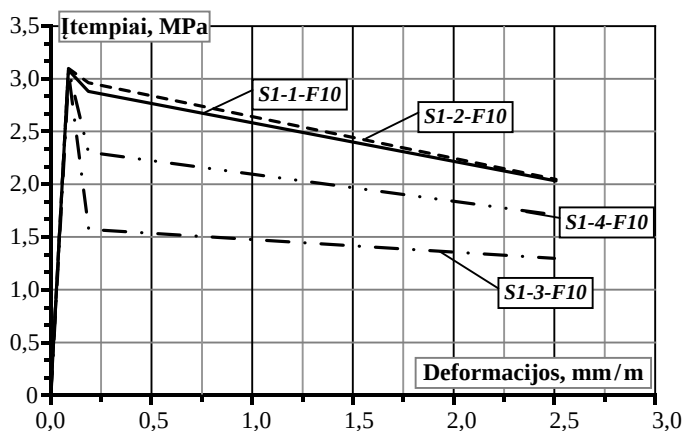
Nustatytos visų sijų liekamojo stiprio (liekamųjų įtempių) reikšmės $f_{fb,r1}$ ir $f_{fb,r2}$, reikalingos įtempių ir deformacijų diagramos (σ - ϵ) sudarymui, pateiktos 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Pagrindiniai parametrai, įtempių ir deformacijų diagramų sudarymui

Table 3.3. The main parameters for the stress-strain diagrams

Nr.	Sija	P_1	P_2	f_{ct}	$f_{fb,r1}$	$f_{fb,r2}$	ϵ_{cr}
		kN		MPa			-
1	S1-1-F10	17,16	15,20	3,07	2,87	2,09	$8,57 \cdot 10^{-5}$
2	S1-2-F10	17,51	15,07	3,07	2,93	2,07	$8,57 \cdot 10^{-5}$
3	S1-3-F10	9,27	9,28	3,07	1,55	1,28	$8,57 \cdot 10^{-5}$
4	S1-4-F10	13,77	12,69	3,07	2,30	1,75	$8,57 \cdot 10^{-5}$

Nustačius supleišėjusio tempiamojo betono liekamąjį stiprį (liekamuosius įtempius), pagal Rilem TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002) metodą, yra sudaromos trilinijinės tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos (žr. 3.10 pav.).



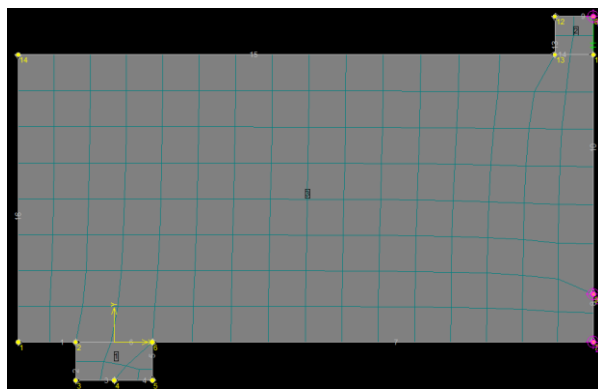
3.10 pav. Įtempių ir deformacijų diagramos nustatytos iš eksperimentinių apkrovos ir įlinkių duomenų

Fig. 3.10. Stress-strain diagram obtained from experimental load and deflection data

Kaip matyti iš 3.10 paveikslo ir 3.3 lentelės, nors visos eksperimentiniams tyrimams naudotos sijos buvo pagamintos iš to paties betono mišinio, dispersiniam armavimui naudojant vienodą kiekį ($V_b = 1,0 \%$), tačiau iš tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų galima pastebėti, kad sijos S1-3-F10

liekamasis tempimo stipris yra žymiai mažesnis už kitų bandytų elementų. Manoma, kad maišant dispersiškai armuotą betono mišinį ir formuojant šį elementą, plaušas galėjo pasiskirstyti netolygiai arba sukristi į gniužulus, dėl to šio elemento liekamasis stipris – 1,5–2 kartus mažesnis, lyginant su kitais tos pačios serijos elementais.

Rilem TC162-TDF (2000a, 2000b, 2002) grupės projektavimo metodas yra vienas iš dažniausiai taikomų plieno plaušu armuotiems elementams projektuoti. Tačiau būtina pabrėžti, kad šiame metode plieno plaušo įtaka pleišėjimui įvertinama remiantis mažų standartinių sijų bandymo rezultatais, t.y. netiesiogiai, todėl galima didelė eksperimentinių rezultatų sklaida mažina šio metodo tikslumą. Gautos plieno plaušu armuoto betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų priklausomybės (žr. 3.10 pav.) buvo panaudotos sudarant eksperimentinių, dispersiškai armuotų betoninių sijų, apkrovos ir plyšio pločio ($P-w$) diagramas, taikant baigtinių elementų programą ATENA. Baigtinio elemento dydis buvo priimtas lygus 2,0 cm. Eksperimentinės sijos sudalinimas į baigtinius elementus, taikant programą ATENA, parodytas 3.11 paveiksle.

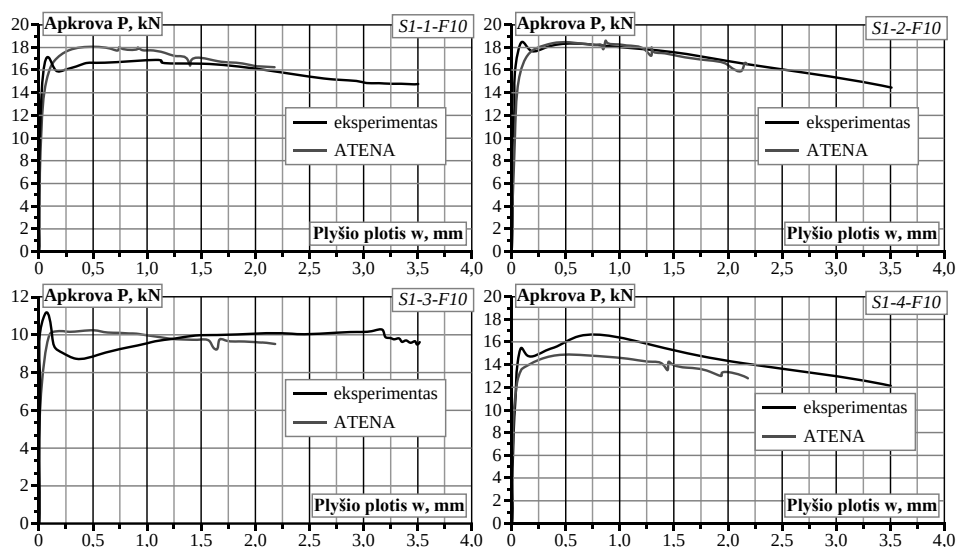


3.11 pav. Eksperimentinės sijos sudalinimas į baigtinius elementus

Fig. 3.11. Finite element meshing of experimental beam

Atlikus skaičiavimus su baigtinių elementų programa ATENA buvo gautos apkrovos ir plyšio pločio diagramos. 3.12 paveiksle pateiktas skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšio pločio reikšmių grafinis palyginimas. Kaip matyti iš 3.12 paveikslo, šios diagramos pakankamai gerai sutapo.

Pažymėtina tai, kad analizuojant *S1-3-F10* elementą pastebėta, kad šio elemento ribinė apkrova, nustatyta eksperimento metu yra mažesnė ir siekia $P_u \approx 10\text{--}11$ kN, lyginant su kitų elementų $P_u \approx 14\text{--}18$ kN. Kaip minėta, tokia rezultatų sklaida galimai susidarė dėl netolygaus plaušo pasiskirstymo betono mišinyje.



3.12 pav. Eksperimentiškai ir taikant baiginių elementų programą ATENA nustatytos sių ($P-w$) diagramos

Fig. 3.12. ($P-w$) diagrams obtained from experiment and finite element program ATENA

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Taikant skaitinius metodus didelę įtaką skaičiavimo rezultatams turi taikomi fiziniai medžiagų modeliai. Vienas iš jų yra supleišėjusio tempiamo betono (betono armuoto plieno plaušu) įtempių ir deformacijų ($\sigma-\varepsilon$) priklausomybė, kuri iki šiol yra mažai ištirta.
2. Kaip alternatyva praktikoje taikomiems fizikinio modeliavimo metodom, pasiūlytas naujas tempiamojo dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymo būdas. Skirtingai nei tradiciniuose metoduose, modeliavimas gali būti atliekamas pagal skirtingų dydžių elementų (taip pat ir natūrinių) bandymų rezultatus, o modeliavimo rezultatai pasižymi itin maža sklaida.
3. Gauti tyrimo rezultatai praplečia atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmo taikymo ribas. Taikant pasiūlytąjį modeliavimo būdą, pirmą kartą pagal eksperimentinių lenkiamųjų plieno plaušu ir strypais armuotų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramas gautos tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos. Tokios diagramos turi kylančiąją ir krentančiąją dalis. Kylančioji dalis atspindi tampriąją, o krentančioji – supleišėjusio dispersiškai armuoto betono

elgseną. Nustatyta, kad krentančiosios diagramos dalies forma labiausiai priklauso nuo dispersinio armavimo kiekio.

4. Supleišėjusio tempiamojo betono suminius įtempius sudaro įtempiai dėl tempiamojo sustandėjimo bei liekamųjų įtempių, atsirandančių dėl plieno plaušo ir betono sąveikos. Pasiūlyta liekamuosius įtempius apskaičiuoti kaip suminių ir tempiamojo sustandėjimo įtempių skirtumą. Kadangi tempiamojo sustandėjimo efektas lenkiamuose elementuose praktiškai išnyksta kai vidutinė deformacija pasiekia $2,0 \cdot 10^{-3}$ reikšmę, todėl liekamuosius įtempius siūloma nustatyti kaip šią deformaciją atitinkančius suminius betono tempimo įtempius.
5. Skirtingai nei tradiciniuose metoduose, modeliavimas gali būti atliekamas pagal skirtingų dydžių elementų (taip pat ir natūrinių) bandymų rezultatus, o modeliavimo rezultatai pasižymi itin maža sklaida.
6. Gauti dispersiškai armuoto tempiamojo betono modeliai gali būti tiesiogiai taikomi baigtinių elementų programose. Vidutinių deformacijų ir įlinkių analizei turi būti naudojamos suminių įtempių diagramos, o plyšio pločio skaičiavimams, atliekamiems elemento pjūvyje, naudojami tik liekamieji įtempiai.
7. Pagal autoriaus pasiūlytą metodiką gauti liekamieji įtempiai priklauso nuo plaušo kiekio ir betono klasės C35/45 mišiniui yra lygūs: 1,25 MPa ($V_{fb} = 0,5 \%$); 2,0 MPa ($V_{fb} = 1,0 \%$); 2,7 MPa ($V_{fb} = 1,5 \%$), ir sudaro 31–83 % tempiamojo stiprio. Pagal supaprastintą (Naaman) metodą nustatyti liekamieji įtempiai lygūs: 0,62 MPa ($V_{fb} = 0,5 \%$); 1,28 MPa ($V_{fb} = 1,0 \%$); 1,65 MPa ($V_{fb} = 1,5 \%$), tai sudaro 15–48 % tempiamojo stiprio. Tai leidžia teigti, kad supaprastintas metodas, nepakankamai įvertina plieno plaušo įtaką, skaičiuojant dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius.

Eksperimentinių sijų įlinkių ir plyšių pločių skaičiavimas

Šiame skyriuje pateikiama momentų ir kreivių diagramų sudarymas taikant supaprastintą metodą ir taikant baigtinių elementų programą ATENA. Apskaičiuojant elementų kreivius pagal supaprastintą metodą, naudojami supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamieji įtempiai, nustatyti pagal empirinį (Naaman) metodą. Nustatant momentų ir kreivių diagramas baigtinių elementų programa ATENA, vertinami 3.1 poskyryje pagal autoriaus pasiūlytą metodą nustatyti liekamieji įtempiai.

Šiame skyriuje empiriškai nustatomi 2.1.1 poskyryje aprašytų sijų betone atsivėriančių plyšių pločiai. Atliekama skaičiuotinių ir eksperimentiškai nustatytų plyšių pločių reikšmių palyginamoji analizė.

Skyriaus tematika paskelbti keturi straipsniai (Ulbinas ir Kaklauskas 2009, Meskenas ir Ulbinas 2011, Gribniak ir kt. 2011b, Gribniak ir kt. 2012).

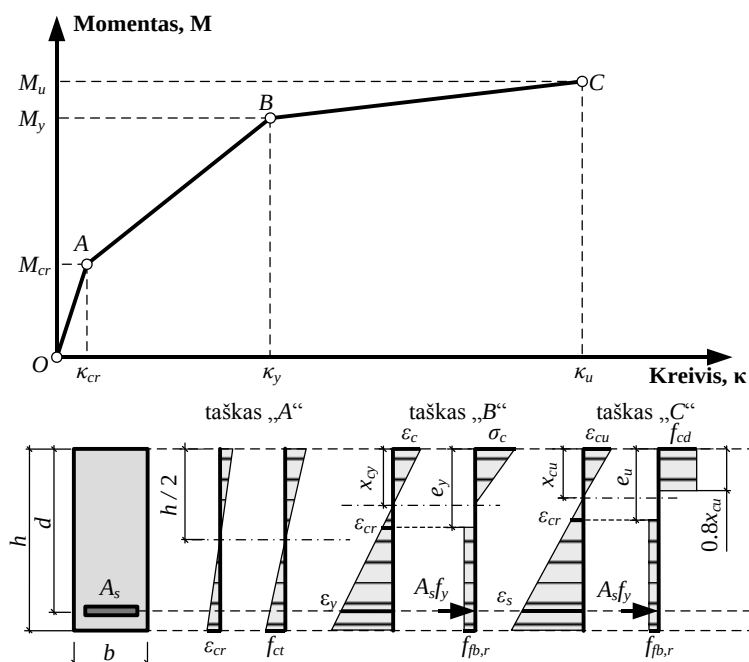
4.1. Įlinkių (kreivių) analizė taikant supaprastintą metodą

Šiame poskyryje pateikiamas supaprastintasis (Campione 2008) metodas, skirtas plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramoms sudaryti.

Atliekant skaičiavimus remiamasi tokiomis prielaidomis:

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

Taikant supaprastintąjį metodą, tarpinės momentų ir juos atitinkančių kreivių reikšmės gaunamos tiesiškai interpoliuojant tarp charakteringųjų momentų ir kreivių diagramos taškų (4.1 pav.). Toliau pateikiamos išraiškos šioms taškams nustatyti.



4.1 pav. Supaprastintas plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų kreivių (įlinkių) apskaičiavimo metodas

Fig. 4.1. Simplified curvatures (deflections) calculation method of steel fiber reinforced concrete elements

Pirmasis taškas (4.1 pav. taškas A) nustatomas elementui pradėjus pleišėti. Šiuo atveju teigiama, kad iki plyšio atsivėrimo plieno plaušas betono tempiamajam stipriui įtakos neturės, todėl plieno plaušo įtaka betono tempiamajam stipriui ir išilginės armatūros įtaka elemento standumui nevertinami.

Pleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal tokią išraišką (Gribniak ir kt. 2012):

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

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

Elemento kreivis, veikiant pleišėjimo momentui, nustatomas pagal išraišką:

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

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

Kai plieno plaušu armuotame elemente strypinė armatūra pradeda tekėti, joje tempimo įtempiai pasiekia plieno takumo ribą f_y , o dispersiškai armuotame betone pasiekiamas liekamasis tempiamasis stipris $f_{fb,r}$. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas supleišėjusiam skerspjūvyje, kai pasiekama armatūros takumo riba, parodytas 4.1 paveiksle (taškas B). Šioje stadijoje gniuždomas betonas dar nėra pasiekęs irimo deformacijos, todėl taikoma trikampė gniuždomojo betono įtempių diagramą. Remiantis trečiąja prielaida taria, kad liekamieji tempimojo betono įtempiai plyšyje yra pastovūs.

Pagal priimtą schemą žinomais dydžiais laikomi armatūros deformacija ε_y , tempiamoji betono pleišėjimo deformacija ε_{cr} ir liekamieji įtempiai plyšyje $\sigma_{fb,r}$. Nežinomaisiais laikomi betono gniuždomosios zonos aukštis y_c , atstumas nuo gniuždomosios zonos viršaus iki plyšio viršūnės e_y ir betono įtempiai σ_c . Toliau eliminuojami du nežinomieji (e_y ir σ_c), juos išreiškiant gniuždomosios zonos aukščiu x_{cy} ir žinomaisiais dydžiais (ε_y , ε_{cr}).

Remiantis prielaida apie tiesinį deformacijų pasiskirstymą skerspjūvyje ir iš to gaunamu trikampių panašumu, nežinomąjį e_y galima išreikšti taip (4.1 pav.):

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

čia ε_{cr} – betono pleišėjimo deformacija ($\varepsilon_{cr} = f_{ct} / E_c$); ε_y – armatūros takumo deformacija ($\varepsilon_y = f_y / E_s$); d – naudingasis skerspjūvio aukštis.

Įtempiai betone σ_c taip pat išreiškiami žinomu dydžiu ε_y ir gniuždomosios zonos aukščiu x_{cy} (vėl pasinaudojant 4.1 paveiksle parodyto charakteringojo B taško deformacijų pasiskirstymu ir trikampių panašumu):

$$\begin{aligned}\frac{\varepsilon_c}{x_{cy}} &= \frac{\varepsilon_y}{d - x_{cy}} \Rightarrow \varepsilon_c = \varepsilon_y \frac{x_{cy}}{d - x_{cy}}, \\ \sigma_c &= E_c \cdot \varepsilon_c \Rightarrow \sigma_c = E_c \left(\varepsilon_y \frac{x_{cy}}{d - x_{cy}} \right).\end{aligned}\quad (4.4)$$

Gautose 4.3 ir 4.4 formulėse lieka vienas nežinomas dydis – x_{cy} . Jis randamas išsprendus horizontaliųjų jėgų pusiausvyros lygtį:

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_{cy} \cdot \sigma_c - f_{fb,r} \cdot b(h - e_y) - A_s \cdot f_y &= 0, \\ \frac{1}{2} \cdot b \cdot x_{cy} \cdot E_c \left(\varepsilon_y \frac{x_{cy}}{d - x_{cy}} \right) - f_{fb,r} \cdot & \\ \cdot b \left[h - \frac{\varepsilon_{cr}(d - x_{cy}) + \varepsilon_y \cdot x_{cy}}{\varepsilon_y} \right] - A_s \cdot f_y &= 0.\end{aligned}\quad (4.5)$$

Skerspjūvyje veikiantis lenkimo momentas randamas gniuždomojo betono įtempių atstojamosios atžvilgiu:

$$M_y = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{x_{cy}}{3} \right) + f_{fb,r} \cdot b(h - e_y) \left(\frac{h - e_y}{2} + \frac{2}{3} \cdot x_{cy} + e_y - x_{cy} \right), \quad (4.6)$$

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

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

$$\kappa_y = \frac{1}{r_i} = \frac{\varepsilon_y}{d - x_{cy}} = \frac{\varepsilon_c}{x_{cy}}. \quad (4.7)$$

Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje irimo stadijoje, parodytas 4.1 paveiksle (taškas C). Irimo metu betono deformacija ε_{cu} pasiekia ribinę reikšmę. Remiantis ketvirtąja prielaida laikoma, kad plieno plaušu armuoto betono ribinė irimo deformacija ε_{cu} tokia pati kaip ir įprastojo betono (šiuo atveju $\varepsilon_{cu} = 2500 \cdot 10^{-6}$). Armatūros deformacija irimo stadijoje neribojama (nes jau pasiekta takumo riba). Tariaama, kad betono gniuždomojoje zonoje veikia pastovūs įtempiai f_{cd} (skaičiuotinis betono stipris). Įtempių diagrama imama stačiakampė, jos aukštis sudaro 80 % gniuždomosios zonos aukščio. Nežinomaisiais

laikomi betono gniuždomosios zonos aukštis x_{cu} ir atstumas nuo gniuždomosios zonos viršaus iki plyšio viršūnės e_u . Analogiškai kaip ir prieš tai, remiantis trikampių panašumu, galima eliminuoti nežinomąjį e_u :

$$\frac{\varepsilon_{cr}}{e_u - x_{cu}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_{cu}} \Rightarrow e_u = \frac{x_{cu}(\varepsilon_{cr} + \varepsilon_{cu})}{\varepsilon_{cu}}. \quad (4.8)$$

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

$$\begin{aligned} b \cdot 0,8x_{cu} \cdot f_{cd} - f_{fb,r} \cdot b[h - e_u] - A_s \cdot f_y &= 0, \\ b \cdot 0,8x_{cu} \cdot f_{cd} - f_{fb,r} \cdot b \left[h - \frac{x_{cu}(\varepsilon_{cr} + \varepsilon_u)}{\varepsilon_u} \right] - A_s \cdot f_y &= 0. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Skerspjuvyje veikiantis lenkimo momentas gali būti nustatytas gniuždomojo betono atžvilgiu:

$$\begin{aligned} M_u &= A_s \cdot f_y \left(d - \frac{0,8 \cdot x_{cu}}{2} \right) + f_{fb,r} \cdot b(h - e_u) \cdot \\ &\cdot \left(\frac{h - e_u}{2} + \frac{0,8 \cdot x_{cu}}{2} + e_u - 0,8 \cdot x_{cu} \right). \end{aligned} \quad (4.10)$$

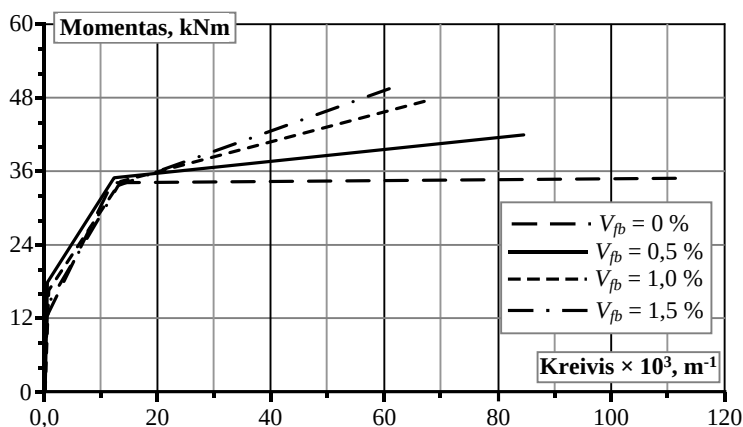
Skerspjuvio kreivis apskaičiuojamas remiantis išraiška:

$$\kappa_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_{cu}}. \quad (4.11)$$

Taikant supaprastintą metodą ir skaičiavimams naudojant supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamųjų įtempių nustatymo 3.2 išraišką (Naaman 2003), priklausomai nuo dispersiniam armavimui naudojamo plaušo kiekio (0,5–1,0%), empiriškai nustatomos momentų ir kreivių diagramos, pateiktos 4.2 paveiksle.

Kaip matyti iš 4.2 paveikslo, gelžbetoninių ir dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų kreivis, iki strypinės armatūros įtempių takumo ribos beveik nesiskiria. Pasiekus šią ribą, strypinė armatūra pradeda tekėti, o dispersiškai armuotuose elementuose – pasiekiami liekamieji elemento įtempiai plyšyje.

Iš 4.2 paveikslo galima matoma, kad kuo didesniu plaušo kiekiu armuotas elementas, tuo mažesnis jo kreivis prie tam tikro lenkiamojo momento poveikio. Taip yra todėl, kad elementui supleišėjus, dėl didesnio plaušo kiekio susidaro didesni tempiamojo betono liekamieji įtempiai.



4.2 pav. Momentų ir kreivių diagramos, gautos taikant supaprastintą metodą
Fig. 4.2. Moments and curvatures diagrams obtained from simplified method

Kaip matyti iš 4.2 paveikslo, elementų armuotų tik strypais momentų ir kreivių grafikai yra beveik horizontalūs. Šiuo atveju pasiekus armatūros takumo ribą elemento kreivis didėja nedidinant apkrovos, nes įprastajam betonui supleišėjus ir tekant armatūrai, skirtingai nei dispersiškai armuotuose elementuose, plyšio vietoje niekas neperima tempiamuose sluoksniuose veikiančių įtempių, o elementas suyra.

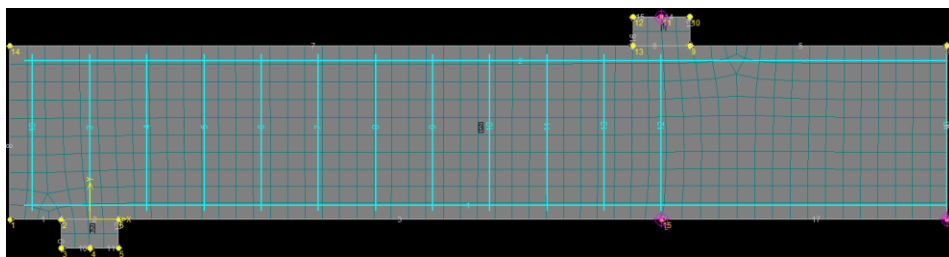
4.2. Įlinkių analizė baigtinių elementų programa ATENA

Šiuo metu statybinių konstrukcijų analizei dažniausiai naudojamos kompiuterinės baigtinių elementų programos, kuriomis galima įvertinti netiesines medžiagų savybes, sudėtingą konstrukcijos geometriją ar apkrovimo schemą. Pastebėtina tai, kad kompiuterinės analizės metu gaunamų rezultatų tikslumas priklauso nuo skaičiavimams naudojamų medžiagų modelių. Netinkamai aprašius medžiagų elgseną, kompiuterinės analizės rezultatai gali būti mažiau tikslūs nei gauti taikant supaprastintą metodą. Todėl svarbu skaitiškai paanalizuoti taikant fizikinius medžiagų modelius.

Šiame poskyryje yra sprendžiamas tiesioginis uždavinys, kai žinomos tempiamojo dispersiškai armuoto betono įtempių ir deformacijų diagramos, o reikia apskaičiuoti dispersiškai armuoto gelžbetoninio lenkiamojo elemento kreivius. Pasaulyje nėra universalių analizinių metodų, leidžiančių išspręsti šį uždavinį, todėl tiesioginio uždavinio sprendimui buvo pasirinktos skaitinė metodika: komercinė baigtinių elementų programa ATENA.

4.2.1. Modeliavimas taikant autoriaus gautas įtempių ir deformacijų diagramas

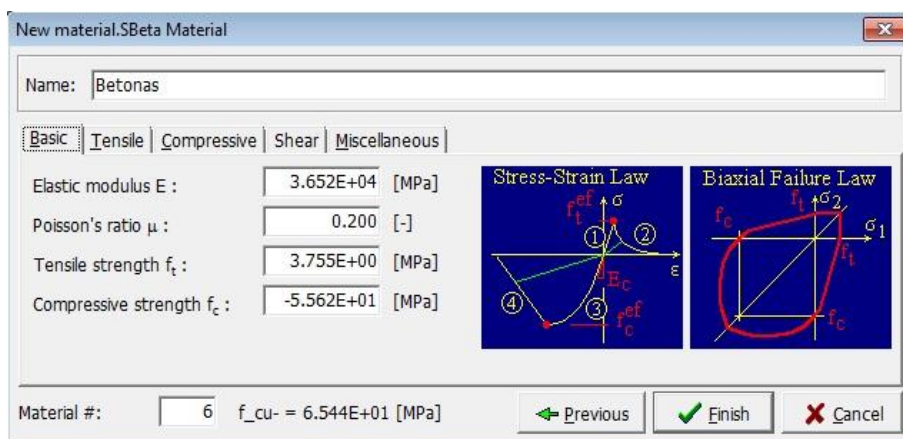
Tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos (žr. 3.3 pav.) buvo panaudotos apskaičiuojant eksperimentinių sijų kreivius, taikant baigtinių elementų programą ATENA. Baigtinio elemento dydis buvo priimtas lygus 2,0 cm. Vienos iš eksperimentinių sijų (S3-1-F05) sudalinimas į baigtinius elementus, taikant programą ATENA, parodytas 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Gelžbetoninės sijos S3-1-F05 baigtinių elementų programos ATENA modelis

Fig. 4.3. ATENA finite element model of experimental reinforced concrete beam S3-1-F05

Sukuriamas plieno plaušu ir strypais armuotos dviatramės gelžbetoninės sijos modelis. Siją veikia dvi koncentruotos jėgos, viduriniame ruože sukeliančios pastovų lenkiamąjį momentą. Sija ir veikiančios išorinės jėgos yra simetrinės, todėl modeliuojama tik pusė sijos.

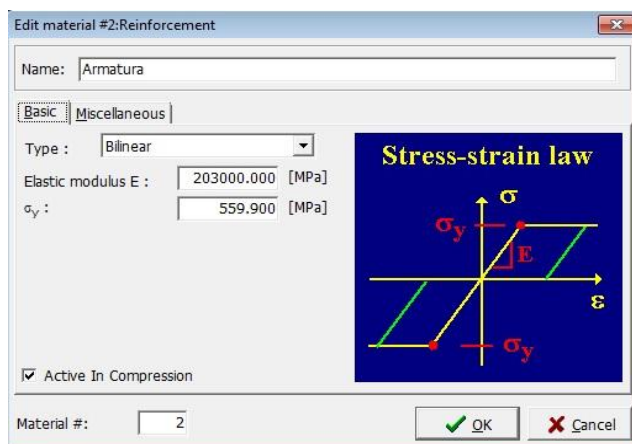


4.4 pav. Modeliuojamos betono charakteristikos

Fig. 4.4. Modelling concrete characteristics

Sukūrus sijos modelį – užduodamos medžiagos. Šiame modelyje pasirenkamos dvi skirtingos medžiagos: plieno plaušu armuotas betonas ir armatūra. Betono modeliavimui užduodami analizei reikalingi parametrai: tamprumo modulis, tempiamasis stipris ir gniuždomasis stipris. Sumodeliuotai sijai užduotos betono charakteristikos pateiktos 4.4 paveiksle.

Strypinės armatūros modeliavimui pasirenkamos tampriai plastinės medžiagos savybės ir užduodamas strypinės armatūros tamprumo modulis bei armatūros takumo įtempiai. 4.3 paveiksle pateiktai sumodeliuotai sijai – užduodamos strypinės armatūros charakteristikos (žr. 4.5 pav.).

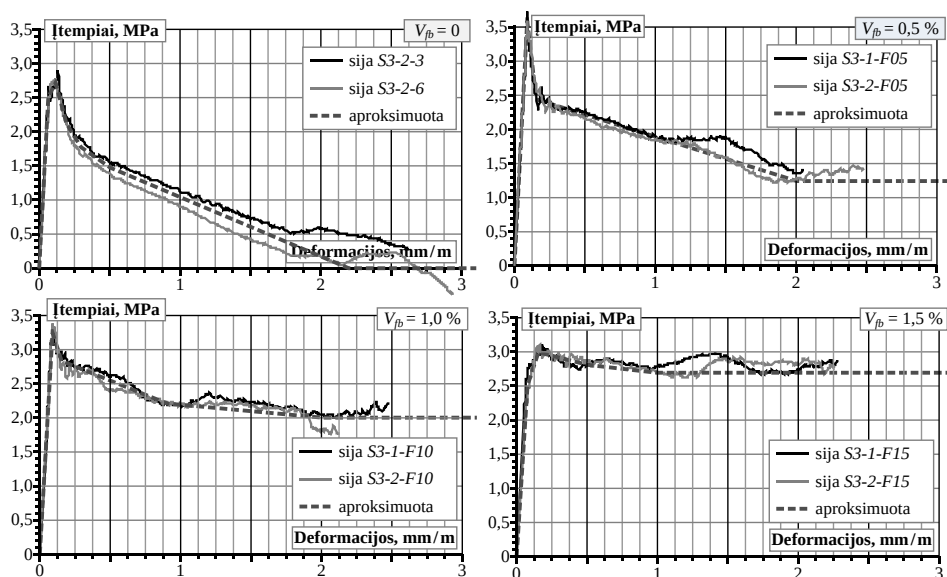


4.5 pav. Modeliuojamos armatūros charakteristikos

Fig. 4.5. Modelling reinforcement characteristics

Kaip minėta, įtempiai 3.1.3 poskyryje autoriaus gautose vidutinių suminių įtempių ir deformacijų diagramose susideda iš įtempių dėl tempiamojo sustandėjimo bei liekamųjų įtempių, atsirandančių dėl plieno plaušo ir betono sąveikos. Deformacijų ir įlinkių analizei pagal vidutinių plyšių metodą naudojami suminiai vidutiniai įtempiai, o plyšio pločio skaičiavimams pjūvyje naudojami liekamieji įtempiai.

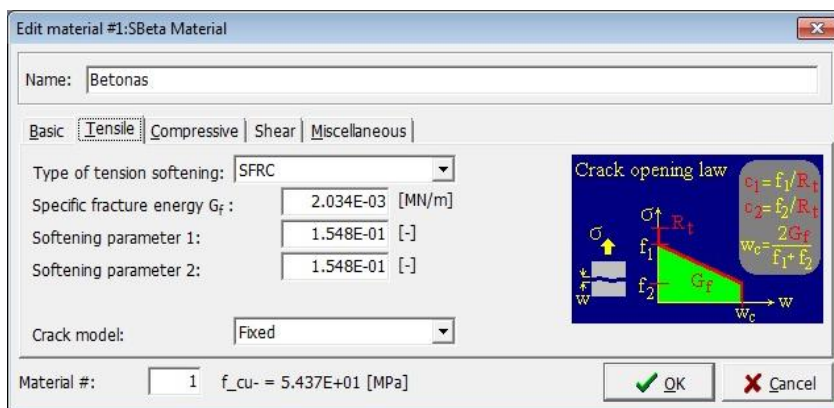
3.1.3 poskyryje gautos supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos (žr. 3.3 pav.) aproksimuojamos. Aproksimuotos diagramos pateiktos 4.6 paveiksle.



4.6 pav. Aproximuotos tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos

Fig. 4.6. Approximated average stress-strain diagram of tensile concrete

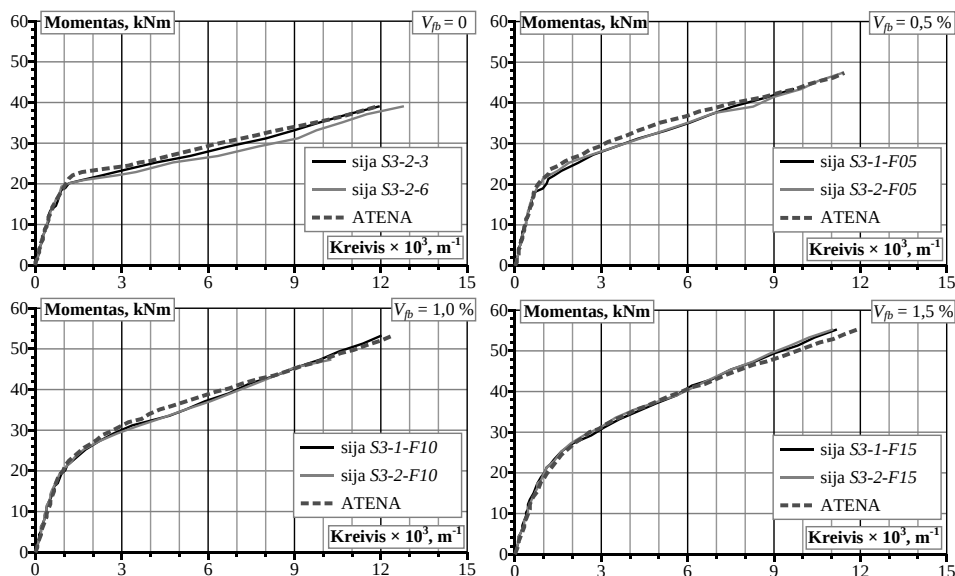
Dispersiškai armuotas betonas įvertinamas užduodant supleišėjusio tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas. Kadangi kaip minėta, plieno plaušo efektyvumas pasireiškia tik atsivėrus plyšiams, todėl skaičiavimams užduodama 4.6 paveiksle pateiktų įtempių ir deformacijų krentančioji diagramos dalis. Krentančiosios diagramos dalies apibrėžimo parametrai pateikiami 4.7 paveiksle.



4.7 pav. Supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono diagrama

Fig. 4.7. Steel fiber reinforced cracked tensile concrete diagram

Taikant aproksimuotas vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramas (žr. 4.6 pav.) ir baigtinių elementų programa sprendžiant tiesioginį uždavinį buvo gautos dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų momentų ir kreivių diagramos (4.8 pav.) (Kaklauskas 2001, Bischoff 2003, Gribniak ir kt. 2012). Galima pasitebėti, kad visų sijų eksperimentiniai ir ATENA skaičiavimo rezultatai praktiškai sutapo.

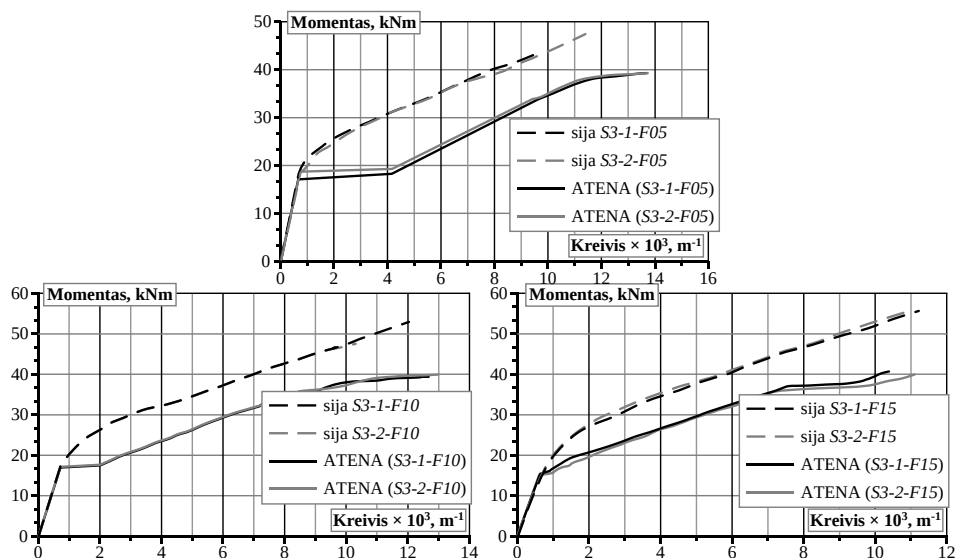


4.8 pav. Eksperimentiškai ir taikant baigtinių elementų programą ATENA, nustatytos momentų ir kreivių diagramos

Fig. 4.8. Moment-curvature diagrams obtained from experiment and finite element program ATENA

4.2.2. Modeliavimas taikant Naaman įtempių ir deformacijų diagramas

Taikant 3.2 poskyryje, pagal supaprastintą (Naaman 2003a) metodą nustatytas įtempių ir deformacijų diagramas (žr. 3.4 pav.) ir baigtinių elementų programa ATENA sprendžiant tiesioginį uždavinį, buvo gautos dispersiškai armuotų gelžbetoninių sijų momentų ir kreivių diagramos (žr. 4.9 pav.).



4.9 pav. Eksperimentiškai ir taikant baigtinių elementų programą ATENA, nustatytos momentų ir kreivių diagramos (pagal Naaman)

Fig. 4.9. Moment-curvature diagrams obtained from experiment and finite element program ATENA (according Naaman)

Kaip matyti iš 4.9 paveikslė pateiktų momentų ir kreivių diagramų, pastebimas gana didelis skirtumas, tarp eksperimentiškai nustatytų ir taikant baigtinių elementų programą ATENA apskaičiuotų elementų kreivių reikšmių. Šį skirtumą galima paaiškinti tuo, kad remiantis supaprastintu (Naaman) metodu, dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamieji įtempiai yra nustatomi apytiksliai ir priimama, kad jie nekinta nuo pirmojo plyšio atsivėrimo iki elemento suirimo. Taikant apytiksles įtempių ir deformacijų diagramas ir netiksliai įvertinant supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamųjų įtempių reikšmes, gaunamos gana didelės paklaidos tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių kreivių reikšmių (žr. 4.9 pav.).

4.3. Plyšių pločių analizė

Plyšio pločio apribojimas – viena pagrindinių sąlygų, užtikrinančių tinkamumo ribinį būvį. Didelis plyšių plotis neleistinas ne tik estetiniu požiūriu, bet ir todėl, kad tai gali sukelti ilgalaikių neigiamų pasekmių ar net konstrukcijos suirtį. Agresyvosios aplinkos veikiamų konstrukcijų ilgaamžiškumą gali padidinti papild-

domas jų armavimas plieno plaušu. Todėl yra reikalingi adekvatūs plyšio pločio skaičiavimo metodai, leidžiantys projektuoti optimalias statybines konstrukcijas. Šiuo metu pasaulyje nėra universalaus metodo, taikomo plyšių pločiui apskaičiuoti dispersiškai armuotuose elementuose. Literatūroje galima rasti pusiau empirinių plyšio pločio skaičiavimo metodų (Kaar ir Mattock 1963, Nemegeer 1996, Frosch 1999, Rilem TC162-TDF 2000b ir kitus), tačiau dėl didelio parametru skaičiaus, lemiančių plyšių susidarymą, jų pritaikymas ribojamas.

Šiame poskyryje pateikiamas empirinis plyšių pločių skaičiavimo metodas, pritaikytas dispersiškai armuotų elementų analizei. Skaičiuojant dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų plyšių pločius – įvertinami supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamieji įtempiai.

4.3.1. Dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų plyšių pločių skaičiavimas

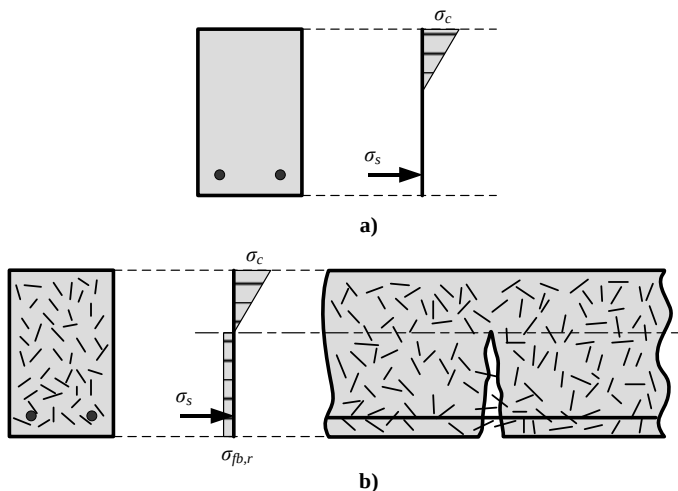
Plieno plaušu armuotuose gelžbetoniniuose elementuose plyšio plotis priklauso nuo daugelio parametru, tokių kaip betono stipris, plieno plaušo kiekis ir forma, strypinės armatūros skersmuo, jos išdėstymas elemento skerspjūvyje ir pan. (Dupont 2003, Salys ir kt. 2010). Šiuo metu plieno plaušo forma ir jo gamybos procesas nėra standartizuoti, o tai apsunkina universalaus metodo, plyšio pločiui apskaičiuoti, sukūrimą. Pasaulyje yra sukurta nemažai skirtingų, pusiau empirinių plyšio pločio skaičiavimo metodų, tačiau jie tinkami tik tam tikroms plieno plaušo rūšims. Projektuojant statybines konstrukcijas būtina mokėti tiksliai įvertinti plieno plaušo įtaką pleišėjimui (Dupont 2003, Meskenas ir Ulbinas 2011, Gribniak ir kt. 2012).

Betoną armuojant strypine armatūra, atsiradus plyšiams, tempimo įtempius plyšyje perima armatūra (4.10a pav.), o dispersiškai armuotame gelžbetoniniame elemente dalį įtempių perima plieno plaušas (4.10b pav.) (Dupont 2003).

Euronormose (LST EN-1992-1-1:2005 2007) maksimalus plyšio plotis apskaičiuojamas pagal tokią išraišką:

$$w_{\max} = l_{cr, \max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (4.12)$$

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



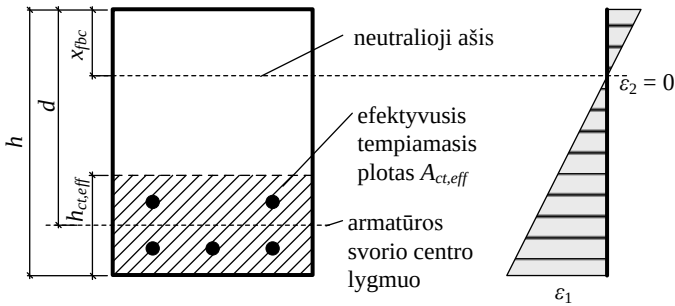
4.10 pav. Įtempių pasiskirstymas supleišėjusiame elemente: a) gelžbetoniniame elemente; b) plieno plaušu armuotame gelžbetoniniame elemente (Dupont 2003)

Fig. 4.10. Stress distribution in the cracked element: a) a reinforced concrete element; b) steel fiber reinforced concrete element (Dupont 2003)

Skirtumas $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ gali būti apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff})}{\rho_{eff}}}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (4.13)$$

čia σ_s – tempiamosios armatūros įtempiai plyšyje; k_t – koeficientas, įvertinantis apkrovimo trukmę ($k_t = 0,6$, 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 $h_{ct,eff} = 2,5(h-d)$ (4.11 pav.).



4.11 pav. Efektyvusis tempiamasis gelžbetoninės sijos betono zonos plotas

Fig. 4.11. Effective area tensile zone of reinforced concrete beam

Kai atstumas tarp armatūros strypų (4.12 pav.) neviršija $5 \cdot (c + 0,5 \cdot \phi)$, tai atstumas tarp plyšių lenkiamuosiuose arba tempiamuosiuose gelžbetoniniuose elementuose apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$l_{cr,max} = k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{eff}}, \quad (4.14)$$

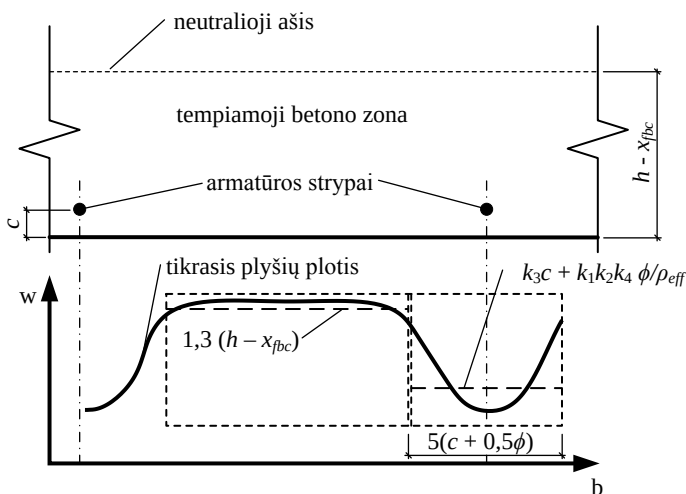
čia c – betono apsauginio sluoksnio storis; ϕ – armatūros strypo skersmuo; k_1 – koeficientas, kuriuo įvertinama armatūros sukibimo su betonu kokybė: $k_1 = 0,8$ – rumbuotųjų strypų ir $k_1 = 1,6$ – lygių strypų; k_2 – koeficientas, kuriuo įvertinama deformacijų pasiskirstymo skerspjūvyje forma: $k_2 = 0,5$ – lenkiamiesiems elementams ir $k_2 = 1,0$ – tempiamiesiems elementams; Šalyje taikytinos k_3 ir k_4 reikšmės gali būti nurodytos jos nacionaliniame priede. Euronormų rekomenduojamos reikšmės atitinkamai lygios 3,4 ir 0,425.

Kai atstumas tarp armatūros strypų didesnis kaip $5 \cdot (c + \phi/2)$ (4.12 pav.), tai didžiausias atstumas tarp plyšių nustatomas pagal išraišką:

$$l_{cr,max} = 1,3(h - x_{fbc}), \quad (4.15)$$

čia x_{fbc} – nesupleišėjusio skerspjūvio gniuždomos zonos aukštis.

Euronormų (LST EN-1992-1-1:2005 2007) plyšio pločio skaičiavimo metode nėra tiesiogiai atsižvelgiama į plieno plaušo įtaką gelžbetoniniams elementams. Dėl šios priežasties Rilem grupė TC162-TDF (2002) patobulino Euronormų pasiūlytą metodą. Taikant šiuos pakeitimus gaunamos mažesnės vidutinės armatūros deformacijos ε_{sm} , todėl gaunama ir mažesnė plyšio pločio reikšmė.



4.12 pav. Lenkiamojo elemento plyšio pločio betono paviršiuje priklausomybė nuo atstumo iki armatūros strypo

Fig. 4.12. Crack width relationship on the distance to the reinforcement bar of flexural elements

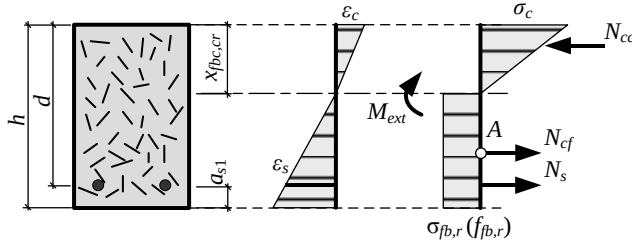
Atstumo tarp plyšių nustatymui Rilem TC162-TDF (2002) siūloma taikyti tokia išraiška (Vandewalle 2000, Dupont 2003, Ulbinas ir Kaklauskas 2009):

$$l_{cr, \max} = \left(k_3 \cdot c + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi}{\rho_{eff}} \right) \cdot \left(50 \left(\frac{d_{fb}}{l_{fb}} \right) \right). \quad (4.16)$$

Čia l_{fb} – plieno plaušo ilgis; d_{fb} – plieno plaušo skersmuo.

Skaičiuojant plieno plaušu armuoto gelžbetoninio elemento plyšių plotį, buvo pasiūlyta skaičiuoti armatūros įtempius σ_{sr} ir σ_{sr} (čia σ_{sr} – armatūros įtempiai pleišėjimo momentu), atsižvelgiant į tai, kad plieno plaušas plyšyje perima dalį tempimo įtempių (4.10b pav.).

Įtempiiai σ_s arba σ_{sr} skaičiuojami panašiai kaip ir įprastiems gelžbetoniniams elementams – panaudojant išorinių ir vidinių jėgų pusiausvyros sąlygas (4.13 pav.), priimant supaprastintą stačiakampę plieno plaušo atlaikomųjų įtempių $\sigma_{fb,r}$ diagramą (4.13 pav.).



4.13 pav. Plieno plaušu armuoto gelžbetoninio elemento deformacijų ir įtempių pasiskirstymas bei elementą veikiančios išorinės ir vidinės jėgos

Fig. 4.13. Stress and strain distribution of steel fiber reinforced concrete element and the acting external and internal forces on the element

Pagal veikiančias išorines jėgas ir vidines įrašas (4.13 pav.) sudaroma pusiausvyros sąlygas tenkinanti ašinių jėgų ir momentų lygčių sistema (Ulbinas ir Kaklauskas 2009):

$$\begin{cases} \sum N = N_{cc} - N_{cf} - N_s, \\ \sum M = M_{cc} + M_s - M_{ext}, \end{cases} \quad (4.17)$$

čia:

$$\begin{cases} N_{cc} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot b \cdot x_{fb,cr}, \\ N_{cf} = \sigma_{fb,r} \cdot b \cdot (h - x_{fb,cr}), \\ N_s = E_s \cdot \epsilon_s \cdot A_s. \end{cases} \quad (4.18)$$

ir

$$\begin{cases} M_{cc} = N_{cc} \left(\frac{2}{3} \cdot x_{fb,cr} + \frac{h - x_{fb,cr}}{2} \right), \\ M_s = N_s \left(d - x_{fb,cr} - \frac{h - x_{fb,cr}}{2} \right). \end{cases} \quad (4.19)$$

Čia E_c – betono tamprumo modulis; E_s – armatūros tamprumo modulis; $x_{fb,cr}$ – supleišėjusio skerspjūvio gniuždomosios zonos aukštis; d – naudingasis elemento aukštis; A_s – armatūros skerspjūvio plotas, tempiamoje elemento zonoje; h – aukštis, sijos; b – sijos plotis; M_{ext} – išorinis lenkiamasis momentas; $\sigma_{fb,r}$ – liekamieji įtempiai plyšyje; σ_s – strypinės armatūros tempimo įtempiai, kai $M_{ext} > M_{cr}$, kur M_{cr} – pleišėjimo momentas. Kai $M_{ext} = M_{cr}$, tai $\sigma_s = \sigma_{sr}$.

Detalizuojama pusiausvyros sąlygas tenkinanti lygčių sistema:

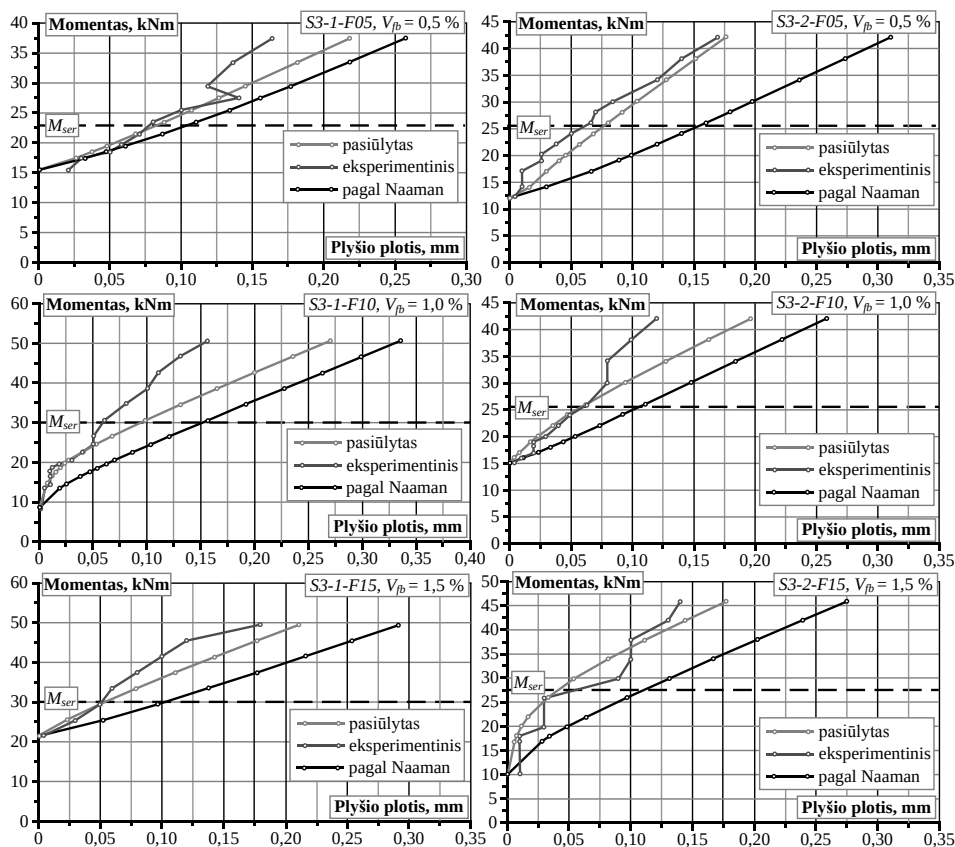
$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c \cdot \sigma_s}{E_s} \cdot \frac{x_{fb,cr}}{d - x_{fb,cr}} \cdot b \cdot x_{fb,cr} - \sigma_s \cdot A_s - \sigma_{fb,r} \cdot b \left(h - x_{fb,cr} \right) = 0, \\ \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{E_c \cdot \sigma_s}{E_s} \cdot \frac{x_{fb,cr}}{d - x_{fb,cr}} \cdot b \cdot x_{fb,cr} \left(\frac{2}{3} \cdot x_{fb,cr} + \frac{(h - x_{fb,cr})}{2} \right) \right) + \\ + \sigma_s \cdot A_s \left(d - x_{fb,cr} - \frac{(h - x_{fb,cr})}{2} \right) - M_{ext} = 0. \end{cases} \quad (4.20)$$

Išsprendus šias lygtis yra gaunami du nežinomieji: įtempiai strypinėje armatūroje σ_s ir supleišėjusio dispersiškai armuoto gelžbetoninio elemento gniuždomosios zonos aukštis $x_{fb,cr}$ (Ulbinas ir Kaklauskas 2009). Turint šiuos nežinomuosius apskaičiuojamas plyšių plotis.

4.3.2. Plyšių pločių skaičiavimas taikant liekamuosius įtempius

Šiame poskyryje pateikiamos dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų momentų ir plyšių pločių priklausomybės, nustatytos taikant 4.3.1 poskyryje pateiktą plyšių pločių nustatymo metodiką. Plyšių pločių skaičiavimai atliekami taikant pagal du skirtingus metodus nustatytus supleišėjusio dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius: pagal autoriaus pasiūlytą metodą; pagal supaprastintą Naaman (2003a) metodą. 4.14 paveiksle pateikta skaičiuotinių ir eksperimentiškai nustatytų plyšių pločių reikšmių grafinė analizė. Plyšių pločių reikšmės lyginamos prie norminės apkrovos M_{ser} .

4.1 lentelėje pateikiamas eksperimentinių ir skaičiuotinių plyšių pločių reikšmių palyginimas bei apskaičiuojami santykiai tarp šių reikšmių. Šioje lentelėje: w_{obs} – eksperimentinė plyšio pločio reikšmė; w_{prop} – plyšio plotis, nustatytas skaičiavimuose naudojant liekamuosius įtempius, nustatytus pagal autoriaus pasiūlytą metodiką; w_{Naam} – plyšio plotis, nustatytas skaičiavimuose naudojant liekamuosius įtempius, nustatytus pagal supaprastintą (Naaman) metodą. Liekamieji įtempiai turi didelę įtaką apskaičiuojant plyšių pločius. Pagal autoriaus pasiūlytą metodą, norminei apkrovai apskaičiuoti plyšio pločiai vidutiniškai 10 % viršija eksperimentines reikšmes. Tuo tarpu liekamuosius įtempius skaičiuojant supaprastintu būdu, eksperimentiniai plyšių pločiai vidutiniškai viršijami 2 kartus.



4.14 pav. Skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių palyginimas
Fig. 4.14. Comparison of calculated and experimental values of crack widths

4.1 lentelė. Eksperimentinių ir skaičiuotinių plyšių pločių reikšmių palyginimas
Table 4.1. Comparison of calculated and experimental values of crack widths

Sija	Plyšio plotis, mm			Plyšio pločių santykis	
	w_{obs}	w_{prop}	w_{Naam}	w_{prop}/w_{obs}	w_{Naam}/w_{prop}
S3-1-F05	0,070	0,069	0,087	0,98	1,24
S3-2-F05	0,058	0,074	0,150	1,28	2,59
S3-1-F10	0,060	0,098	0,156	1,64	2,60
S3-2-F10	0,057	0,056	0,102	0,99	1,79
S3-1-F15	0,050	0,050	0,097	1,00	1,94
S3-2-F15	0,060	0,043	0,114	0,72	1,90
				$\Sigma_{vid}=1,10$	$\Sigma_{vid}=2,01$

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Plieno plaušu armuotų elementų įlinkių skaičiavimas skiriasi nuo įprastų gelžbetoninių tuo, kad vertinami liekamieji įtempiai plyšyje. Norint atlikti tikslius skaičiavimus, būtina turėti konkretaus betono mišinio eksperimentiškai nustatytą liekamųjų įtempių reikšmę.
2. Liekamieji įtempiai turi didelę įtaką apskaičiuojant plyšių pločius. Pagal autoriaus pasiūlytąjį metodą norminei apkrovai apskaičiuoti plyšio pločiai vidutiniškai 10 % viršija eksperimentines reikšmes. Tuo tarpu liekamuosius įtempius skaičiuojant supaprastintu būdu, eksperimentiniai plyšių pločiai vidutiniškai viršijami 2 kartus.

Bendrosios išvados

1. Liekamųjų įtempių įvertinimas – vienas sudėtingiausių uždavinių tempiamojo plieno plaušu armuoto gelžbetonio analizėje. Atlikta literatūros analizė parodė, kad dėl didelės plieno plaušo geometrinių parametrų įvairovės bei dėl to kintančių plieno plaušo ir betono sąveikos sukibimo charakteristikų, kol kas nėra pasiūlyta patikimų ir visuotinai priimtinių tempiamojo plieno plaušu armuoto betono fizikinių modelių.
2. Kaip alternatyva praktikoje taikomiems fizikinio modeliavimo metodams, pasiūlytas naujas tempiamojo dispersiškai armuoto betono liekamųjų įtempių nustatymo būdas. Sukurta fizikinio modeliavimo metodologija leidžia pagal eksperimentinius dispersiškai armuotų gelžbetoninių elementų duomenis nustatyti tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas bei įvertinti liekamuosius įtempius.
3. Gauti tyrimo rezultatai praplečia atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmo taikymo ribas. Taikant pasiūlytąjį modeliavimo būdą, pirmą kartą pagal eksperimentinių lenkiamųjų plieno plaušu ir strypais armuotų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių diagramas, gautos tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramos. Tokios diagramos turi kylančiąją ir krentančiąją dalis. Kylančioji dalis atspindi tampriąją, o krentančioji – supleišėjusio dispersiškai armuoto

betono elgseną. Nustatyta, kad krentančiosios diagramos dalies forma labiausiai priklauso nuo dispersinio armavimo kiekio.

4. Supleišėjusio tempiamojo betono suminius įtempius sudaro įtempiai dėl tempiamojo sustandėjimo bei liekamųjų įtempių, atsirandančių dėl plieno plaušo ir betono sąveikos. Darbe pasiūlyta liekamuosius įtempius apskaičiuoti kaip suminių ir tempiamojo sustandėjimo įtempių skirtumą. Tempiamojo sustandėjimo efektas lenkiamuose elementuose praktiškai išnyksta kai vidutinė deformacija pasiekia $2,0 \cdot 10^{-3}$, todėl liekamuosius įtempius siūloma nustatyti kaip šią deformaciją atitinkančius suminius betono tempimo įtempius.
5. Vidutinių deformacijų ir įlinkių analizei turi būti naudojamos suminių įtempių diagramos, o plyšio pločio skaičiavimams, atliekamiems elemento pjūvyje, naudojami tik liekamieji įtempiai.
6. Atlikus analizę paaiškėjo, kad skirtingai nei tradiciniuose metoduose, modeliavimas gali būti atliekamas pagal skirtingų dydžių elementų (taip pat ir natūrinių) bandymų rezultatus, o modeliavimo rezultatai pasižymi itin maža sklaida.
7. Pagal autoriaus pasiūlytą metodiką gauti liekamieji įtempiai priklauso nuo plaušo kiekio ir betono klasės C35/45 mišiniui sudaro 31–83 % tempiamojo stiprio. Pagal supaprastintą (Naaman) metodą nustatyti liekamieji įtempiai sudaro 15–48 % tempiamojo stiprio. Tai leidžia teigti, kad supaprastintas metodas nepakankamai įvertina plieno plaušo įtaką, skaičiuojant dispersiškai armuoto tempiamojo betono liekamuosius įtempius.
8. Liekamieji įtempiai turi didelę įtaką apskaičiuojant plyšių pločius. Pagal pasiūlytąjį metodą norminei apkrovai apskaičiuoti plyšių pločiai vidutiniškai 10 % viršija eksperimentines reikšmes. Tuo tarpu liekamuosius įtempius skaičiuojant supaprastintu būdu, eksperimentiniai plyšių pločiai vidutiniškai viršijami 2 kartus.

Literatūra ir šaltiniai

Ahmad, H.; Lagoudas, D. C. 1991. Effective elastic properties of fiber-reinforced concrete with random fibers, *Journal of Engineering Mechanics*, 117: 2931–2938.

Al-Ta'an, S. A.; Al-Feel, J. R. 1989. Prediction of crack widths in fibrous reinforced concrete members. Proc. of an International Conference, *Fiber reinforced cement and concrete: Recent developments*: 209–218.

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.

Ashour, S. A.; Wafa, F. F.; Kamal, M. I. 2000. Effect of the concrete compressive strength and tensile reinforcement ratio on the flexural behavior of fibrous concrete beams. *Engineering Structures*, 22(9): 1145–1158.

Atepegba, D.; Regan, P. E. 1981. Performance of steel fibre reinforced concrete in axially loaded short columns, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3: 255–259.

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.

Beaudoin, J. J. 1990. *Handbook of Fiber-Reinforced Concrete: Principles, Properties, Developments and Applications*. Park Ridge, New Jersey, USA: Noyes Publications. 332p.

Bentur, A.; Mindess, S. 2007. *Fibre Reinforced Cementitious Composites* 2nd edition, Taylor and Francis, London and New York, 237–268.

Bernard, E. S. 2002. Correlations in the behaviour of fibre reinforced shotcrete beam and panel specimens, *Materials and Structures*, 35: 156–164.

Bindiganavile, V.; Banthia, N. 2005. Generating dynamic crack growth resistance curves for fiber-reinforced concrete, *Society for Experimental Mechanics*, 45(2): 112–122.

Bischoff, P. H. 2003. Tension stiffening and cracking of steel fiber-reinforced concrete. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(2): 174–182.

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.

Buratti, N.; Mazzotti, C.; Savoia, M. 2011. Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 25: 2713–2722.

Burgers, R.; Walraven, J.; Plizzari, G. A.; Tiberti, G. 2007. Structural behaviour of SFRC tunnel segments during TBM operations. *World Tunnel Congress ITA-AITES*. Prague; 1461–1467.

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.

Campione, G.; La Mendola, L.; Zingone, G. 2010. Seismic behaviour of fibre reinforced concrete frames. *12WCEE*, 1–8.

- Campione, G.; Mangiavillano, M. L. 2008. Fibrous reinforced concrete beams in flexure: Experimental investigation, analytical modelling and design considerations. *Engineering Structures*, 30(11): 2970–2980.
- CEN (Comite Europeen de Normalisation). Eurocode 2: design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings, EN 1992-1-1:2004. Brussels: CEN; 2004.
- Chan, Y. W.; Li, V.C. 1997. Effects of transition zone densification on fiber/cement paste bond strength improvement, *Advanced Cement Based Materials* 5(1): 8–17.
- Chen, W.; Carson, J. L. 1971. Stress-Strain Properties of Random Wire Reinforced Concrete, *ACI Journal*, Proceedings, 68 (12): 933–936.
- 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.
- Cunha V. M. C. F, Barros J. A. O, Sena-Cruz J. M. 2011. An integrated approach for modelling the tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 41: 64–76.
- DBV (German Concrete and Construction Technology Association). DBV-Steel Fiber Reinforced Concrete. Deutscher Beton-und Bautechnik-Verein EV. 2001. (in German).
- Denneman, E.; Wua, R.; Kearsley, E. P.; Visser, A.T. 2011. Discrete fracture in high performance fibre reinforced concrete materials, *Engineering Fracture Mechanics*, 78: 2235–2245.
- Ding, Y. 2011. Investigations into the relationship between deflection and crack mouth opening displacement of SFRC beam. *Construction and Building Materials*, 25: 2432–2440.
- Dixon, J.; Mayfield, B. 1971. Concrete Reinforced with Fibrous Wire, *Journal of the Concrete Society*, Concrete 5(3): 73–76.
- 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.
- Dupont, D.; Vandewalle, L. 2005. Distribution of steel fibres in rectangular sections, *Cement and Concrete Composites* 27(3): 391–398.
- Fanella, D.; Naaman A. E. 1985. Stress-strain properties of fiber reinforced concrete in compression. *J. American Concrete institute*, 82: 475–483.
- Foster, S. J. 2009. The application of steel-fibres as concrete reinforcement in Australia: From material to structure, *Materials and Structures* (Rilem), 42(9): 1209–1220.
- Frosch, R. J. 1999. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete, *ACI Structural Journal*, 96: 437–442.
- 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>).

Henager, C. H. 1981. Steel Fibrous Shotcrete: A Summary of the State-of-the-Art. *Concrete International: Design and Construction*, 3(1). 50–58.

Holschemacher, K.; Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Bacinskas, D. 2010. Numerical analysis of concrete beams reinforced with steel fibers. Proc. of the Fourth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC 2010): 849–852.

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.

Hughes, B. P. 1981. Experimental test results for flexure and direct tension of fibre cement composites, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3: 13–18.

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. 2004. Flexural layered deformational model of reinforced concrete members. *Magazine of Concrete Research*, 56 (10): 575–584.

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.; Holschemacher, K.; Gribniak, V.; Bacinskas, D.; Sokolov, A. 2009. A stress-strain constitutive relationship of steel fiber reinforced concrete. Final Report No. T-101/09. Vilnius Gediminas Technical University; (in Lithuanian).

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.

Kaar, P. H.; Mattock A. H. 1963. High-strength bars as concrete reinforcement-part 4: control of cracking, *Journal PCA Research and Development Laboratories*, 4(5): 46–63.

Kar, N. J.; Pal, A. K. 1972. Strength of Fiber Reinforced Concrete, *Journal of the Structural Division*, Proceedings 98(5): 1053–1068.

Kormeling, H. A.; Reinhardt, H. W.; Shah, S. P. 1980. Static and fatigue properties of concrete beams reinforced with continuous bars and with fibers, *Journal of American Concrete Society*, 77: 36–43.

La Mendola, L.; Papia, M. 2002. General stress-strain model for concrete or masonry response under uniaxial cyclic compression. *Structural Engineering and Mechanics*, 14: 435–454.

Lee, M. K.; Barr, B. I. 2004. A four-exponential model to describe the behaviour of fibre reinforced concrete. *Materials and Structures (Rilem)*, 37(7): 464–471.

Lietuvos standartas LST EN-1992-1-1:2005. 2007. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis: Bendrosios ir pastatų taisyklės. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas.

Lin, Z.; Kanda, T.; Li, V.C. 1999. On interface property characterization and performance of fiber-reinforced cementitious composites, *Concrete Science and Engineering* 1: 173–185.

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.

Malmberg, B.; Skarendahl, A. 1978. Method of studying the cracking of fibre concrete under restrained shrinkage. The Construction press, Lancaster, 173–179.

Mangat, P. S.; Azari, M. M. 1985. Influence of steel fibre and stirrup reinforcement on the properties of concrete in compression members, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 7: 183–192.

Mangat, P. S.; Azari, M. M. 1988. Shrinkage of steel fibre reinforced cement composites, *Materials Structures* (Rilem). 21: 163–171.

Manolis, G.; Gareis, P.; Tsonos, A.; Neal, J. 1997. Dynamic properties of polypropylene fibre-reinforced concrete slabs, *Cement and Concrete Composites* 19(4): 341–349.

Mansur, M. A.; Ong K. C. G.; Paramasivam, P. 1986. Shear strength of fibrous concrete beams without stirrups. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 112: 2066–2079.

Mindess, S. 1993. Fibre-Reinforced Cementitious Materials: A Personal View, *ASCE Journal of materials in Civil Engineering*, 5(3): 289–292.

Morgan, D. R.; McAskill, N. 1984 “Rocky Mountain Tunnels Lined with Steel Fiber Reinforced Shotcrete,” *Concrete International: Design and Construction*, 6(12): 33–38.

Morris, A. D.; Garrett. 1981. A comparative study of the static and fatigue behavior of plain and steel fibre reinforced mortar in compression and direct tension, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3: 73–91.

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.

Rabinovich, F. N. 2004. *Композиты на основе дисперсно армированных бетонов*. Москва ISBN 9785930938548. 646 p. (in Russian).

Radtke, F. K. F.; Simone A.; Sluys L. J. 2010. A computational model for failure analysis of fibre reinforced concrete with discrete treatment of fibres. *Engineering Fracture Mechanics*, 77: 597–620.

Richardson, A.; Fallow, C. 2006. Crack control in screed using A142 steel fabric or mixed structural polypropylene fibres with regard to toughness and residual strength. *Structural survey*, 24(4): 319–331.

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.

Rollings, R. 1993. Curling Failures of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Slabs, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 7(1): 3–19.

Romualdi, J. P.; Baisson, G. B. 1963. Mechanisms of crack arrest in concrete, *Journal of Engineering Mechanics*: 89: 147–168.

Romualdi, J. P.; Mandel, J. A. 1964. Tensile strength of concrete affected by uniformly dispersed and closely spaced short lengths of wire reinforcement, *Journal of the American Concrete Institute* 61: 657–672.

Rose, D. 1986. Steel Fibers Reinforce Accelerator Tunnel Lining, *Concrete International: Design and Construction*, 8(7): 42 p.

Shah, S. P.; Ouyang, C. 1991. Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, *Journal of American Ceramic Society*, 74 (11): 2727–2953.

Shah, S. P.; Rangan, V. B. 1971. Fiber reinforced concrete properties, *J. American Concrete institute*, 68: 126–135.

Soroushian, P.; Lee, C. 1990. Distribution and orientation of fibers in steel fibers reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 87(5), 433–439.

Stang, H.; Li, V. C.; Krenchel, H. 1993. Design and structural applications of stress-crack width relations in fibre reinforced concrete. *Materials and Structures* (Rilem), 28: 210–219.

Strack, M. 2007. Modellbildung zum rissbreitenabhängigen Tragverhalten von Stahlfaserbeton unter Biegebeanspruchung: Doktor Dissertation. Lehrstuhl und Institut für Stahlbeton-und Spannbetonbau, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruh-Universität Bochum. Germany: Shaker. ISBN 9783832265496, 156 p.

Sujivorakul, C.; Naaman, A. E. 2003. Modeling bond components of deformed steel fibers in FRC composites. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, Rilem Proceedings PRO 30, Rilem publications, Bagneaux, 35–48.

Tan, K. H.; Paramasivam, P.; Tan, K. C. 1995. Cracking characteristics of reinforced steel fiber concrete beams under short and long-term loadings. *Journal of Advanced Cement Based Materials*, 2(4): 127–137.

Wafa, F. F.; Ashour, S. A. 1992. Mechanical properties of high-strength fiber reinforced concrete, *ACI Mater. J.* 89: 449–455.

Walraven J. C. 2009. High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes. *Materials and Structures* (Rilem), 42: 1247–1260.

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.

Williamson, G. R. 1974. The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete, SP-44: Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 195–207.

Wu, H. Q.; Gilbert, R. I. 2009. Modeling short-term tension stiffening in reinforced concrete prisms using continuum-based finite element model, *Engineering Structures*, 31: 2380–2391.

Xu, B. W.; Shi, H. S. 2009. Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 23(12): 3468–3474.

Yin, W.; Hsu, T. T. C. 1995. Fatigue behavior of steel fiber reinforced concrete in uniaxial and biaxial compression, *ACI Mater. J.* 92: 71–81.

Zhanga, J.; Li, V. C. 2004. Simulation of crack propagation in fiber-reinforced concrete by fracture mechanics. *Cement and Concrete Research*, 34: 333–339.

Zheng, Z.; Feldman, D. 1995. Synthetic Fibre-Reinforced Concrete, *Progress in Polymer Science* 20(2): 185–210.

Zollo, R. F. 1997. Fiber – reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development, *Cement and Concrete Composites* 19(2): 107–122.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

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)

Gribniak, V.; Kaklauskas, G.; Bacinskas, D.; Sung, W-P.; Sokolov, A.; Ulbinas, D. 2011a. Investigation of shrinkage of concrete mixtures used for bridge construction in Lithuania. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(2): 77–83. ISSN 1822-427X (print), ISSN 1822-4288 (online). (ISI Web of Science)

Salys, D.; Kaklauskas, G.; Timinskas, E.; Gribniak, V.; Ulbinas, D.; Gudonis, E. 2010. Tempiamųjų gelžbetoninių elementų diskrečiųjų plyšių modelio analizė, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* 2(4): 146–154. ISSN 2029-2317 (print), ISSN 2029-2325 (online). (ICONDA)

Ulbinas, D.; Kaklauskas, G. 2009. Plieno pluoštu armuotų gelžbetoninių elementų pleištumų analizė. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Statyba* 1(5): 56–62. ISSN 2029-2341. (IndexCopernicus)

Straipsniai kituose leidiniuose

Gribniak, V.; Holschemacher, K.; Kaklauskas, G.; Bacinskas, D.; Ulbinas, D.; Sokolov, A.; Meskenas, A. 2011b. Experimental Analysis of Reinforced Fibre – Concrete Beams, in *Proc. of the Sixteenth International Conference "Mechanika - 2011"*, Kaunas, Lithuania: 93–97. ISSN 1822-2951.

Meskenas, A.; Ulbinas, D. 2011. Discrete crack model of steel fibre reinforced concrete members subjected to tension, 14-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“: 1–7. ISSN 2029-7149 (online), ISBN 978-9955-28-929-6.

Darius ULBINAS
PLIENO PLAUSŲ ARMUOTŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ
PLEIŠĖTUMO IR STANDUMO ANALIZĖ

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (02T)

Darius ULBINAS
CRACKING AND STIFFNESS ANALYSIS OF STEEL FIBER
REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (02T)

2012 12 21. 12,25 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius