VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas SKUTURNA

LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ, SUSTIPRINTŲ ANGLIES PLUOŠTU, TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Disertacija rengta 2004–2009 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

prof. dr. Povilas VAINIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

http://leidykla.vgtu.lt
VGTU leidyklos TECHNIKA 1647-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-464-2

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2009
© Tomas, Skuturna, 2009
tomas.skuturna@st.vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tomas SKUTURNA

RESEARCH OF FLEXURAL REINFORCED CONCRETE MEMBERS STRENGTHENED WITH EXTERNAL CARBON FIBRE

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2004–2009.
The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Prof Dr Povilas VAINIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Reziumė

Šio darbo tikslas – trumpalaikiais eksperimentiniais tyrimais nustatyti išorinės anglies pluošto armatūros bei jos papildomo inkaravimo būdo įtaką lenkiamųjų gelžbetoninių elementų laikomajai galiai ir įlinkiams; pritaikyti sudėtinių strypų teoriją lenkiamųjų gelžbetoninių elementų su išorine armatūra laikomosios galios ir įlinkių skaičiavimui.

Disertaciją sudaro įvadinis ir keturi pagrindiniai skyriai bei išvados ir rezultatai.

Įvadiniame skyriuje aprašomas darbo aktualumas. Suformuluoti ir aprašyti tyrimų tikslai, uždaviniai ir metodai. Pristatomas darbo mokslinis naujumas ir ginamieji teiginiai. Taip pat pateikiamas autoriaus publikacijų sąrašas ir disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikiami lenkiamųjų gelžbetonių elementų stiprinimo būdai ir tyrimo metodai. Aprašomos sustiprintų konstrukcijų įlinkių ir laikomosios galios skaičiavimo metodikos. Taip pat pateikti kitų autorių atliktų tyrimų rezultatai.

Antrajame skyriuje pateikiama siūloma skaičiavimo metodika lenkiamųjų gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų išorine armatūra, laikomajai galiai ir įlinkiams apskaičiuoti. Šis skaičiavimo metodas leidžia įvertinti išorinės armatūros ir betono jungties standumą.

Trečiajame skyriuje aprašomi eksperimentiniams tyrimams paruošti bandiniai bei bandimų schemos, pateikti gauti eksperimentinio tyrimo rezultatai. Nagrinėjamos eksperimentinių įlinkių, laikomosios galios, suirties pobūdžio priklausomybės nuo išorinės armatūros papildomo inkaravimo. Analizuojama šlyties deformacijų ir įtempimų pasiskirstymas jungtyje tarp betono ir anglies pluošto.

Ketvirtajame skyriuje palygintos eksperimentinių tyrimų metu nustatytos ir teoriškai apskaičiuotos laikomosios galios ir įlinkių reikšmės pagal siūlomą skaičiavimo metodiką. Palyginimui atlikti skaičiavimai pagal ACI 440.2R–02 ir *FIB biulletin 14* rekomendacijas.

Darbo pabaigoje pateikti pagrindiniai rezultatai ir išvados.

Disertacijos tema išspausdinti keturi moksliniai straipsniai: vienas straipsnis žurnale, referuojamame *ISI Web of Science* duomenų bazėje; vienas straipsnis mokslo žurnale, referuojamame tarptautinėse duomenų bazėse, kurių sąrašą sudarė Lietuvos mokslo taryba; vienas straipsnis konferencijos straipsnių rinkinyje, referuotame *THOMSON ISI Proceedings* duomenų bazėje; vienas straipsnis recenzuojamame konferencijos straipsnių rinkinyje. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti trijose konferencijose: tarptautinėje mokslinėje ir respublikinėse mokslinėse konferencijose.

Abstract

The objective of this work is through short-term experimental research to determine the dependances of the load-carrying capacity and deflections of reinforced concrete members under flexure on the strengthening of the members with external carbon fibre as well as its additional anchorage; to apply the built-up-bar theory in calculation of the load-carrying capacity and deflections of reinforced concrete members under flexure with external reinforcement.

The thesis consists of introduction, general four main chapters, the results and conclusions.

Introduction describes the topicality of the work. It presents the aims, objectives and methods of the research, the scientific novelty and the defended propositions. A list of publications of the author and the structure of the thesis are presented in this chapter.

The first chapter reviews the methods of strengthening reinforced concrete flexural members as well as research methods. It describes the methodologies for calculation of deflections and load-carrying capacity of strengthened structures. Research results achieved by other authors are presented in this chapter.

The second chapter introduces the proposed calculation method for calculating the load-carrying capacity and deflections of flexural reinforced concrete structures strengthened externally. This method of calculation allows to evaluate the stiffness of the bond between external reinforcement and concrete.

Chapter three describes specimens and schemes of specimens prepared for experimental research. Also this chapter presents experimental research results of load-carrying capacity, deflections and failure mode of reinforced concrete flexural members strengthened with external carbon fibre. The influence of different types of anchorage of external reinforcement on the performance of strengthened members is defined. Also the distribution of strains and stresses in the bond between the external reinforcement and concrete is presented.

In chapter four the comparison of experimental and theoretical results of proposed calculation method are presented. For comparison calculations were carried out according to the methods provided in recommendations of ACI 440.2R–02 and *FIB bulletin 14*.

At the end the results and conclusions are presented.

4 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: one article - in *ISI Web of Science* register, one article – in the journal in data bases which list is presented by Lithuanian science council; one article - in conference material and scientific papers in *THOMSON ISI Proceedings* data base, one article – in reviewed conference material. 3 presentations on the subject have been given in conferences at national and international level.

Žymėjimai

A – skerspjūvio plotas;
$A_{c,eff}$ – efektyviojo gelžbetoninio skerspjūvio plotas;
A_f – anglies pluošto armatūros skerspjūvio plotas;
A_{s1} – tempiamosios plieninės strypinės armatūros skerspjūvio plotas;
A_{s2} – gniuždomosios plieninės strypinės armatūros skerspjūvio plotas;
E – tamprumo modulis;
E_{cm} – betono tamprumo modulis;
E_f – anglies pluošto tamprumo modulis;
E_{s1} – tempiamosios plieninės strypinės armatūros tamprumo modulis;
E_{s2} – gniuždomosios plieninės strypinės armatūros tamprumo modulis;
F_c – gniuždomojo betono įtempių atstojamoji;
F_f – anglies pluošto armatūros įtempių atstojamoji;
F_{s1} – tempiamosios plieninės strypinės armatūros įtempių atstojamoji;
F_{s2} – gniuždomosios plieninės strypinės armatūros įtempių atstojamoji;
$G_{w,eff}$ – jungties šlyties charakteristika;
I – inercijos momentas;
$I_{c,eff}$ – efektyviojo gelžbetoninio skerspjūvio inercijos momentas;
M – veikiantis lenkiamasis momentas;
M_{cr} – plyšių susidarymo momentas;
M_R – laikomoji galia;
M_u – didžiausias lenkiamasis momentas;
R – kreivio spindulys;

S – statinis momentas;
T – poslinkio jėga;
a – atstumas; atstumas tarp gelžbetoninio elemento ir anglies pluošto svorio centrų;
b – plotis;
b_c – gelžbetoninio skerspjūvio plotis;
b_f – anglies pluošto skerspjūvio plotis;
d – elemento įlinkis; skerspjūvio naudingasis aukštis;
d_1 – elemento įlinkis iki plyšių susidarymo;
d_2 – elemento įlinkis po plyšių susidarymo;
f_c – betono gniuždomasis stipris;
f_f – anglies pluošto stipris;
f_y – tempiamosios plieninės strypinės armatūros stipris;
f_{sc} – gniuždomosios plieninės strypinės armatūros stipris;
h – sustiprinto gelžbetoninio elemento skerspjūvio aukštis;
h_c –gelžbetoninio elemento skerspjūvio aukštis;
h_f – anglies pluošto storis;
l – sijos tarpatramis;
l_a – atstumas nuo atramos iki sutelktosios jėgos;
p – apkrova;
u – poslinkis;
x_{eff} – gniuždomosios zonos aukštis;
α_f – išorinės armatūros ir betono tamprumo modulių santykis;
α_{s1}– tempiamosios strypinės armatūros ir betono tamprumo modulių santykis;
α_{s2} – gniuždomosios strypinės armatūros ir betono tamprumo modulių santykis;
ε – deformacija;
ε_0 – deformacijos betone, kai įtempiai didžiausieji;
ε_c – betono deformacijos;
ε_{ce} – didžiausiosios betono deformacijos;
ε_f – anglies pluošto deformacijos;
ε_y – strypinės armatūros takumo deformacijos;
ε_s – strypinės armatūros deformacijos;
ρ_f – išorinės armatūros armavimo koeficientas;
ρ_{s1} – tempiamosios strypinės armatūros armavimo koeficientas;
ρ_{s2} – gniuždomosios strypinės armavimo koeficientas;
σ_c – gniuždomojo betono įtempiai;
σ_f – anglies pluošto įtempiai;

σ_y – armatūros takumo įtempiai;

σ_{s1} – tempiamosios plieninės strypinės armatūros įtempiai;

σ_{s2} – gniuždomosios plieninės strypinės armatūros įtempiai;

ψ – vidutinių įtempių koeficientas.

$\frac{1}{R}$ – kreivis;

$\frac{1}{R_a}$ – sijos kreivis;

$\frac{1}{R_{cr}}$ – sijos kreivis plyšių susidarymo momentu;

$\frac{1}{R_y}$ – sijos kreivis, kai strypinė armatūra pasiekia takumo įtempius;

$\frac{1}{R_u}$ – didžiausiasis sijos kreivis.

Turinys

ĮVADAS.....1
Tiriamoji problema.....1
Tyrimų objektas.....2
Tyrimų metodika.....2
Darbo tikslas.....2
Darbo uždaviniai.....3
Darbo mokslinis naujumas.....3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė.....4
Ginamieji teiginiai.....4
Darbo rezultatų aprobavimas.....4
Disertacijos struktūra.....4

1. LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ, SUSTIPRINTŲ IŠORINE ANGLIES PLUOŠTO ARMATŪRA, EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ IR SKAIČIAVIMO METODŲ ANALIZĖ.....5
1.1. Lenkiamųjų gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimo išorine anglies pluošto armatūra privalumai ir trūkumai.....5
1.2. Lenkiamųjų gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų tempiamojoje zonoje, tyrimai.....7
1.3. Lenkiamųjų gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų tempiamojoje zonoje, skaičiavimo metodai.....18

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas 28

2. LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ SU IŠORINE ANGLIES PLUOŠTO ARMATŪRA SKAIČIAVIMO METODIKA 31
2.1. Skaičiavimo modelis lenkiamiesiems gelžbetoniniams elementams su išorine anglies pluošto armatūra skaičiuoti 31
2.2. Gelžbetoninių elementų su išorine anglies pluošto armatūra įlinkių ir laikomosios galios skaičiavimo metodas 39
2.3. Antrojo skyriaus išvados 41

3. LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ SU IŠORINE ANGLIES PLUOŠTO ARMATŪRA EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI .43
3.1. Bandinių medžiagos 43
3.2. Bandinių ruošimo ir bandymo metodika 45
3.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai 58
3.3.1. Anglies pluoštu sustiprintų gelžbetoninių elementų darbo modelis 58
3.3.2. Gelžbetoninių sijų su išorine anglies pluošto armatūra eksperimentiniai įlinkiai ir šlyties deformacijos 62
3.3.3. Anglies pluoštu sustiprintų gelžbetoninių elementų laikomoji galia ir suirimo pobūdis 78
3.3.4. Armatūrų santykio ir betono stiprio įtaka gelžbetoniniams elementams, sustiprintiems anglies pluošto armatūra 83
3.3.5. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas HB sijų anglies pluošto ir betono jungtyje 87
3.4. Trečiojo skyriaus išvados 95

4. EKSPERIMENTINIŲ IR TEORINIŲ TYRIMŲ VERTINIMAS 99
4.1. Eksperimentiniai ir teoriniai sustiprintų sijų laikomosios galios rezultatai 99
4.2. Eksperimentiniai ir teoriniai sustiprintų sijų įlinkių rezultatai 104
4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados 107

PAGRINDINIAI DARBO REZULTATAI IR IŠVADOS 109

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI 111

AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA 123

Contents

INTRODUCTION 1
Topicality of the problem 1
Subject of research 2
Methodology of research 2
Main objective 2
Main tasks 3
Scientific novelty 3
Practical value 4
Defended propositions 4
Approval of the Results 4
The scope of the scientific work 4

1. THE ANALYSIS OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH OF FLEXURAL REINFORCED CONCRETE MEMBERS STRENGTHENED WITH EXTERNAL CARBON FIBRE REINFORCEMENT 5
1.1. Advantages and disadvantages of flexural reinforced concrete members strengthening with external carbon fibre reinforcement 5
1.2. Researches of flexural reinforced concrete members strengthened on tension zone 7

1.3. Calculation methods of flexural reinforced concrete members strengthened on tension zone 18
1.4. Conclusions for chapter 1 and allocating tasks for the dissertation 28

2. CALCULATION METHOD FOR FLEXURAL REINFORCED CONCRETE MEMBERS WITH EXTERNAL CARBON FIBRE REINFORCEMENT 31
2.1. Calculation model for flexural reinforced concrete members with external carbon fibre reinforcement 31
2.2. Calculation method of deflections and load-carrying capacity for flexural reinforced concrete members with external carbon fibre reinforcement 39
2.3. Conclusions for chapter 2 41

3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF REINFORCED CONCRETE FLEXURAL MEMBERS WITH EXTERNAL CARBON FIBRE REINFORCEMENT 43
3.1. Materials of specimens 43
3.2. Preparing of specimens and test setup 45
3.3. Results of experimental research 58
3.3.1. Performance of strengthened reinforced concrete flexural structures 58
3.3.2. Experimental deflections and bond shear deformations of reinforced concrete beams with external carbon fibre reinforcement 62
3.3.3. Deflections and load-carrying capacity for flexural reinforced concrete members with external carbon fibre reinforcement 78
3.3.4. The influence of the ratio of reinforcement and strength of concrete on reinforced concrete elements strengthened with carbon fibre 83
3.3.5. Distribution of bond stresses and strains in HB beams 87
3.4. Conclusions for chapter 3 95

4. EVALUATION OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH 99
4.1. Experimental and theoretical load-carrying capacity results of strengthened beams 99
4.2. Experimental and theoretical deflection results of strengthened beams 104
4.3. Conclusions for chapter 4 107

MAIN RESULTS AND CONCLUSIONS 109

REFERENCES 111

LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION 123

Įvadas

Tiriamoji problema

Gelžbetonines konstrukcijas remontuoti ir stiprinti būtina dėl elementų mechaninių pažaidų, plieninės strypinės armatūros korozijos, siekiant padidinti laikomąją galią.

Gelžbetoninių konstrukcijų tradiciniai stiprinimo būdai yra betono apvalkalai ir papildomi plieniniai elementai. Naudojant betoną gerokai padidėja konstrukcijų matmenys bei svoris. Todėl šis stiprinimo metodas nėra visada tinkamas. Stiprinimui naudojant plieninius elementus agresyviojoje aplinkoje, dažnai tenka plieną padengti antikorozine danga, be to, įprasto plieno stipris yra palyginti nedidelis.

Gelžbetoninių elementų stiprinimas anglies pluoštu yra pakankamai plačiai taikomas ir laikomas efektyviu bei patogiu stiprinimo metodu. Toks stiprinimo metodas turi daug privalumų, lyginant su įprastiniais metodais, dėl puikių šio pluošto savybių: didelio tempiamojo stiprio, atsparumo agresyviajai aplinkai, nedidelio svorio.

Išorine armatūra sustiprintos gelžbetoninės konstrukcijos, jei anglies pluošto armatūra papildomai neinkaruota, suyra staiga horizontaliame pjūvyje, atplėšiant išorinės armatūros juostą su betono sluoksniu. Toks suirimo pobūdis yra nepageidaujamas, nes neišnaudojamos mechaninės anglies pluošto savybės. Lenkia-

mųjų elementų, sustiprintų išorine armatūra, darbą ir suirties pobūdį galima pakeisti papildomai inkaravus pluoštą. Elementai, kurių išorinė armatūra papildomai inkaruota, suyra statmenajame pjūvyje trūkstant pluoštui, pasiekus išorinės armatūros tempiamąjį stiprį.

Efektyvų išorinės armatūros naudojimą gali užtikrinti tik bendras jos darbas su stiprinama konstrukcija. Jungčiai tarp anglies pluošto armatūros ir betono poveikį daro keletas faktorių, tokių kaip betoninio elemento ir pluošto matmenys, betono, pluošto ir klijų savybės, papildomo inkaravimo būdai. Siekiant padidinti sustiprintų konstrukcijų laikomąją galią ir sumažinti įlinkius, būtina nustatyti išorinės armatūros papildomo inkaravimo įtaką sustiprintų elementų elgsenai.

Sustiprintų konstrukcijų jungtis tarp išorinės armatūros ir betono nėra standi. Veikiant apkrovai, dėl šlyties deformacijų jungtyje išorinė armatūra pasislenka betono atžvilgiu. Dėl to sumažėja sustiprinimo efektyvumas, padidėja įlinkiai ir sumažėja laikomoji galia. Daugelyje skaičiavimo metodikų daroma prielaida, kad jungtis tarp betono ir išorinės armatūros yra standi. Tačiau, siekiant tikslesnių skaičiavimo rezultatų, būtina įvertinti betono ir anglies pluošto jungties standumą.

Tyrimų objektas

Tyrimo objektas – lenkiamieji gelžbetoniniai elementai, sustiprinti išorine anglies pluošto armatūra.

Tyrimų metodika

Atlikti gelžbetoninių sijų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra, trumpalaikiai eksperimentiniai tyrimai. Sustiprintų elementų teoriniai laikomosios galios ir įlinkių skaičiavimai atlikti remiantis metodika, pagrįsta sudėtinių strypų teorija.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – trumpalaikiais eksperimentiniais tyrimais nustatyti išorinės anglies pluošto armatūros bei jos papildomo inkaravimo būdo įtaką lenkiamųjų gelžbetoninių elementų laikomajai galiai ir įlinkiams; pritaikyti sudėtinių strypų teoriją lenkiamųjų gelžbetoninių elementų su išorine armatūra laikomosios galios ir įlinkių skaičiavimui.

Darbo uždaviniai

Tikslams pasiekti spręstini šie uždaviniai:

1. Atlikti literatūroje pateikiamų sustiprintų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų eksperimentinių ir teorinių tyrimų rezultatų bei skaičiavimo metodų analizę.
2. Trumpalaikiais eksperimentiniais tyrimais nustatyti gelžbetoninių sijų įlinkius ir laikomąją galią.
3. Eksperimentiniais tyrimais parinkti racionaliausią išorinės armatūros inkaravimo būdą.
4. Nustatyti deformacijų ir įtempių pasiskirstymą išorinės armatūros ir betono jungtyje.
5. Palyginti eksperimentinių tyrimų rezultatus su teoriniais ir jais remiantis patikslinti skaičiavimo metodiką.

Darbo mokslinis naujumas

1. Įrodyta, kad sustiprinant gelžbetonines sijas išorine armatūra, racionalu ją inkaruoti metalinėmis apkabomis.
2. Siūloma sustiprintų konstrukcijų išorinę armatūrą papildomai inkaruoti metalinėmis apkabomis, keičiant pluošto apspaudimo lygį ir plotą.
3. Pasiūlytas naujo tipo papildomas išorinės armatūros inkaravimo būdas – metalinėmis T formos jungėmis.
4. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta išorinės armatūros papildomo inkaravimo įtaka sustiprintoms konstrukcijoms.
5. Gauti išorine anglies pluošto armatūra sustiprintų lenkiamųjų elementų elgsenos nauji eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad jungtis tarp stiprinamo elemento ir anglies pluošto nėra standi.
6. Pasiūlyta anglies pluoštu sustiprintų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų laikomosios galios ir įlinkių skaičiavimo metodika, leidžianti įvertinti jungties tarp betono ir išorinės armatūros standumą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Gauti nauji lenkiamųjų gelžbetonių elementų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra, laikomosios galios ir įlinkių trumpalaikių eksperimentinių tyrimų rezultatai. Nustatyta skirtingų išorinės armatūros inkaravimo būdų įtaka sustiprintų elementų darbui.

Ginamieji teiginiai

1. Išorinės anglies pluošto armatūros papildomo inkaravimo būdas turi įtakos sustiprintų konstrukcijų įlinkiams, laikomajai galiai ir suirimo pobūdžiui.
2. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra, laikomosios galios ir įlinkių skaičiavimo metodas, įvertinantis betono ir išorinės armatūros jungties standumą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema išspausdinti keturi moksliniai straipsniai: vienas straipsnis *ISI Web of Science* duomenų bazėje; vienas straipsnis mokslo žurnale, referuojamame tarptautinėse duomenų bazėse, kurių sąrašą sudarė Lietuvos mokslo taryba; vienas straipsnis konferencijos straipsnių rinkinyje, referuotame *THOMSON ISI Proceedings* duomenų bazėje; vienas straipsnis recenzuojamame konferencijos straipsnių rinkinyje. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti trijose konferencijose: tarptautinėje mokslinėje ir respublikinėse mokslinėse konferencijose.

Disertacijos struktūra

Disertacija sudaro: įvadas, keturi skyriai, pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados, 97 paveikslai, 7 lentelės, 154 pavadinimų literatūros sąrašas. Viso 138 puslapiai.

1

Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra, eksperimentinių tyrimų ir skaičiavimo metodų analizė

1.1. Lenkiamųjų gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimo išorine anglies pluošto armatūra privalumai ir trūkumai

Gelžbetoninės konstrukcijos yra stiprinamos:

- siekiant padidinti konstrukcinių elementų laikomąją galią padidėjus apkrovoms;
- dėl konstrukcijų elementų pažaidų;
- klaidingai suprojektavus ar įrengus konstrukcijas;
- įrengiant papildomas angas perdangose ar sienose.

Vienas iš konstrukcijų stiprinimo būdų yra stiprinimas naudojant išorinę anglies pluošto armatūrą. Šis stiprinimo būdas pradėtas taikyti praėjusio amžiaus 9-ojo dešimtmečio pradžioje ir plačiai paplitęs visame pasaulyje.

Konstrukcijų stiprinimo anglies pluoštu būdai yra:

- išorinės armatūros priklijavimas tempiamojoje zonoje, siekiant padidinti laikomąją galią sijose ir perdangose;
- išorinės armatūros klijavimas sijų šonuose, padidinant įstrižojo pjūvio laikomąją galią;
- gniuždomųjų elementų laikomosios galios padidinimas, apvyniojant juos išorine armatūra visu perimetru.

Stiprinimo anglies pluoštu metodo pranašumą, lyginant su tradiciniu laikomu stiprinimo plieniniais elementais būdu, lemia (Hollaway, Leeming 2000; TR55 2000; Van Den Einde *et al* 2003; GangaRao *et al* 2007***;*** Balaguru *et al* 2008; Bakis *et al* 2002) šios priežastys:

- stiprio ir svorio santykis yra geresnis nei plieno. To paties stiprio išorinė armatūra tesudaro 10 % plieno svorio. Dėl to sustiprintų konstrukcijų savasis svoris padidėja labai nedaug. Plieniniams stiprinimo elementams pakelti naudojama speciali įranga, o tai yra sudėtinga ir nepatogu ankštose patalpose;
- anglies pluoštas yra gerokai plonesnis nei plieniniai elementai. Sustiprintos tokia armatūra konstrukcijos matmenys nepadidėja. Be to, anglies pluošto armatūra gali būti klijuojama sluoksniais. Pluoštas yra plonas, tad jis gali persidengti, o tai ypač aktualu, kai stiprinti reikia dviem kryptimis;
- anglies pluošto armatūra geriau priglunda prie nelygaus betono paviršiaus ar sudėtingos formos konstrukcijos;
- stiprinimo laikas yra trumpesnis nei naudojant plieninius elementus. Išorinę anglies pluošto armatūrą paprasta transportuoti dėl nedidelio svorio;
- anglies pluošto atsparumas agresyviajai aplinkai.

Eksperimentiniais tyrimais nustatyti agresyviosios aplinkos poveikiai išorinei anglies pluošto armatūrai (Karbhari *et al* 2003; Grace 2004; Grace, Singh 2005; Toutanji, Gomez 1997; Green *et al* 2000; Silva, Biscaia 2008; Au, Buyukozturk 2006; FIB 2001; Gheorghiu *et al* 2004):

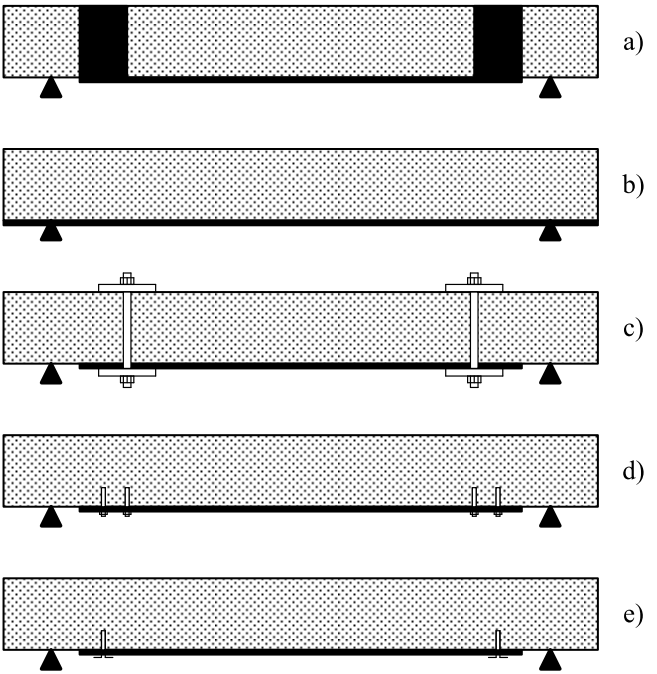
- atsparumas korozijai yra viena pagrindinių anglies pluošto savybių, dėl to ši medžiaga naudojama gelžbetoninėms konstrukcijoms stiprinti;
- anglies pluoštas atsparus šarminei/rūgštinei aplinkai;
- užšalimo/atšilimo ciklai neturi jokios įtakos anglies pluoštui.

Išorinės pluošto armatūros trūkumai:

- mažas atsparumas ugniai;
- konstrukcijos, sustiprintos pluošto armatūra, tampa mechaniškai pažeidžiamesnės nei sustiprintos plieniniais elementais;
- anglies pluošto kaina yra didesnė nei plieninių elementų;
- menkai ištirtas konstrukcijų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra, nuovargis.

1.2. Lenkiamųjų gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų tempiamojoje zonoje, tyrimai

Atlikta daug lenkiamųjų gelžbetoninių sijų, sustiprintų išorine pluošto armatūra tempiamojoje zonoje, eksperimentinių tyrimų (Saadatmanesh, Ehsani 1990; Gao *et al* 2006a; Lamanna *et al* 2004; Lamanna *et al* 2001; Bank, Arora 2007; Li *et al* 2008; Gao *et al* 2006b; Gheorghiu *et al* 2006; Malek, Patel 2002; David *et al* 2003; Almusallam, Al-Salloum 2001; Fanning, Kelly 2001; Bulavs *et al* 2005; Brena, Macri 2004; Duthinh, Starnes 2004; Chahrour, Soudki 2005; Ekenel *et al* 2006; Ferrier, Hamelin 2002; Ceroni, Pecce 2007; Marchukaitis *et al* 2007, Bareisis 2006, Marčiukaitis *et al* 2006, Valivonis *et al* 1993, Buyukozturk *et al* 2004; Taheri *et al* 2002; Gao *et al* 2007; Smith, Teng 2002a; Smith, Teng 2002b; Buyukozturk, Hearing 1998; Nguyen *et al* 2001; Heffernan, Erki 2004; Thomsen *et al* 2004; Norris *et al* 1997; Hsu *et al* 2003; Harries *et al* 2007).



1.1 pav. Išorinės armatūros papildomo inkaravimo būdai: a – inkaravimas U formos pluošto juostomis; b – užleidimas už atramų; c – inkaravimas metalinėmis apkabomis; d – inkaravimas varžtais; e – inkaravimas pluošto kaiščiais

Fig. 1.1. The anchoring of external reinforcement: a – with U wrapped carbon fibre strip; b – with carbon over supports; c – with metal clamps; d – with bolts; e – with fibre dowels

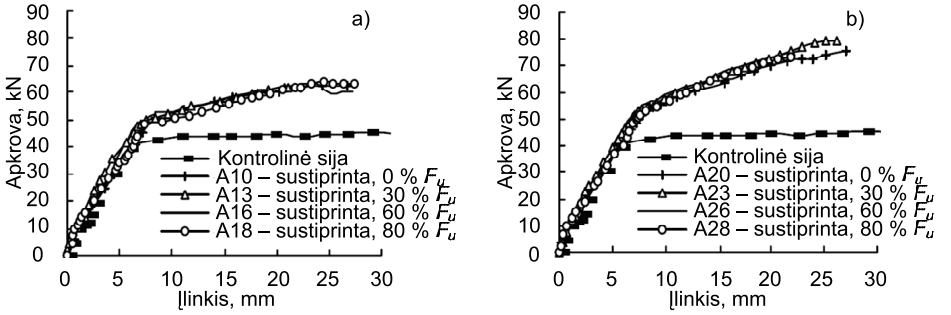
Rezultatai rodo, kad, stiprinimui naudojant išorinę armatūrą, padidėja gelžbetoninio elemento plyšių susidarymo momentas. Sustiprintų elementų plyšiai vystosi mažesnio aukščio ir pločio, bet tankiau išsidėstę, palyginti su nesustiprintomis sijomis. Be to, labai padidėja laikomoji galia, sumažėja sustiprintų sijų įlinkiai.

Iš tyrimų rezultatų galima spręsti, kad supleišėjusioms sijoms (prieš klijuojant pluoštą jau apkrautų tam tikra jėga) stiprinti naudojant anglies pluošto armatūrą, pasiekiami panašūs laikomosios galios ir standumo rodikliai kaip ir nepažeistų, bet sustiprintų sijų.

Veikiant apkrovai, išorinė armatūra pasislenka betono atžvilgiu dėl šlyties deformacijų jungtyje tarp elemento ir anglies pluošto. Tai daro didelę įtaką laikomajai galiai ir įlinkiams. Išorinę armatūrą būtina inkaruoti siekiant efektyviai išnaudoti anglies pluošto armatūros savybes, sumažinti jos pasislinkimą, išvengti pluošto juostos galo atplėšimo suirimo metu. Yra keli išorinės armatūros inkaravimo būdai: inkaravimas U formos juostomis; užleidimas už atramų; inkaravimas metalinėmis apkabomis; inkaravimas varžtais; inkaravimas pluošto kaiščiais (1.1 pav.). Sijų, kurių išorinė armatūra inkaruota papildomais inkarais, įlinkiai yra mažesni, laikomoji galia didesnė nei sijų, kurių pluoštas papildomai neinkaruotas. Tyrimais yra nustatyta, kad net nepriklijavus viso išorinės armatūros ploto, bet ją papildomai inkaravus, pasiekiama didesnė laikomoji galia ir mažesni įlinkiai nei sijų, kurių pluoštas visiškai priklijuotas, bet papildomai neinkaruotas.

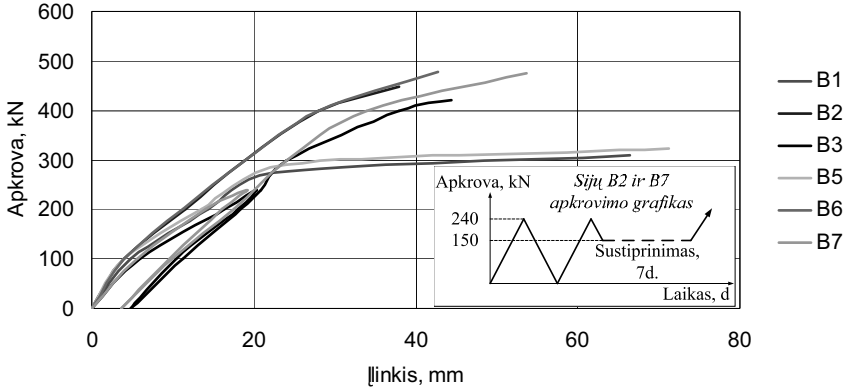
Benjeddou *et al* (2007) atliko tyrimus nustatyti anglies pluošto juostos pločio įtakos priklausomybes, lenkiamosioms gelžbetoninėms sijoms, sustiprintoms išorine anglies pluošto armatūra. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad sijų tempiamojoje zonoje priklijuoto anglies pluošto plotis turi įtakos suirimo pobūdžiui ir laikomajai galiai. Kai santykis $b_c/b_f = 1{,}2$ (b_c – gelžbetoninės sijos plotis; b_f – anglies pluošto juostos plotis), išorinės armatūros juostos galas atplėšiamas kartu su betono sluoksniu. Sijos suyra klijų sluoksnyje, atplėšiant pluošto juostos galą, kai santykis $b_c/b_f = 2{,}4$. Sijų laikomoji galia, kai santykis $b_c/b_f = 1{,}5$ ir $b_c/b_f = 2{,}4$, padidėja atitinkamai 50 % ir 40 %, lyginant su kontroliniais bandiniais.

Tyrimų (Zhang *et al* 2006) rezultatų analizė rodo, kad apkrovos dydis, prieš stiprinant gelžbetonines sijas, neturi įtakos bandinių įlinkiams ir laikomajai galiai (1.2 pav.). Prieš klijuojant anglies pluoštą sijos buvo apkrautos 30 %, 60 % ir 80 % nesustiprinto elemento laikomosios apkrovos. Gelžbetoninės sijos sustiprintos jų nenukraunant. Tyrimams naudotos dvi serijos sijų su skirtingu išorinės armatūros kiekiu (anglies pluoštas sudarė 6 % ir 12 % tempiamosios strypinės plieno armatūros ploto). Sijų, sustiprintų vienu anglies pluošto sluoksniu (1.2 pav., a), laikomoji galia, nepriklausomai nuo pradinės apkrovos lygio, yra 41 % didesnė nei nesustiprintų sijų. Sijų, sustiprintų dviem sluoksniais anglies pluošto (1.2 pav., b), laikomoji galia, nepriklausomai nuo pradinės apkrovos lygio, yra 77 % didesnė nei nesustiprintų sijų.



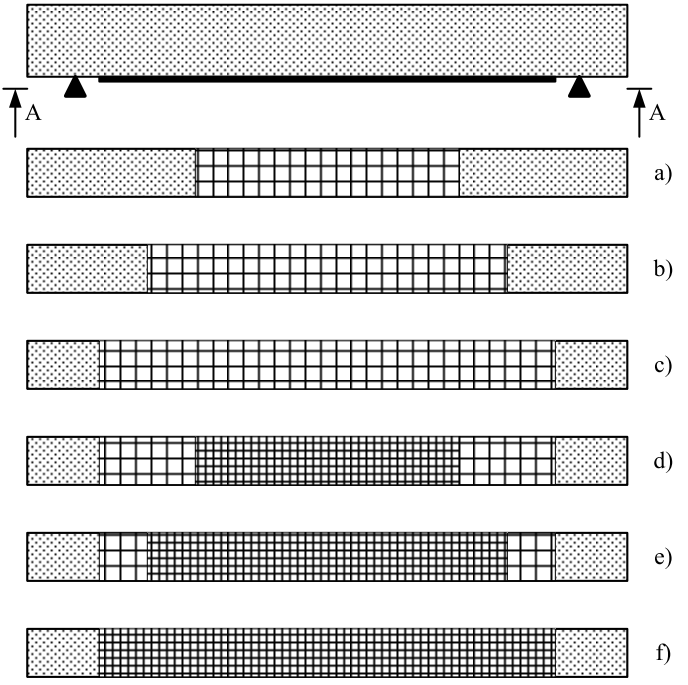
1.2 pav. Apkrovos ir įlinkių grafikas (Zhang et al 2006)
Fig. 1.2. Load-deflection curves (Zhang *et al* 2006)

Khomwan *et al* (2005) taip pat pateikia gelžbetoninių sijų, kurios prieš stiprinant anglies pluoštu buvo apkrautos, tyrimų rezultatus. Bandymams naudotos dvi serijos sijų (B1, B2, B3 ir B5, B6, B7). Bandiniai B3 ir B7 prieš stiprinant apkrauti 240 kN apkrova (80 % nesustiprintos sijos laikomosios galios), po to nukrauti ir vėl apkrauti iki 240 kN. Anglies pluoštas priklijuotas, kai apkrova siekė 150 kN (50 % nesustiprintos sijos laikomosios galios) (1.3 pav.). Bandiniai B2 ir B6 anglies pluoštu sustiprinti jų papildomai neapkraunant. Sijos B1 ir B5 – kontroliniai bandiniai, nesustiprinti anglies pluoštu. Tyrimų rezultatai parodė, kad sijų B2 ir B6 laikomoji galia padidėja atitinkamai 44 % ir 47 %, lyginant su nesustiprintais bandiniais. Sijų B3 ir B7, kurios prieš stiprinant buvo apkrautos, laikomoji galia padidėja 35 % ir 49 %, lyginant su kontroliniais bandiniais, nesustiprintais anglies pluošto armatūra. Gauti rezultatai rodo, kad bandinių apkrovimas prieš stiprinant turi nedidelę įtaką sustiprintų elementų laikomajai galiai.



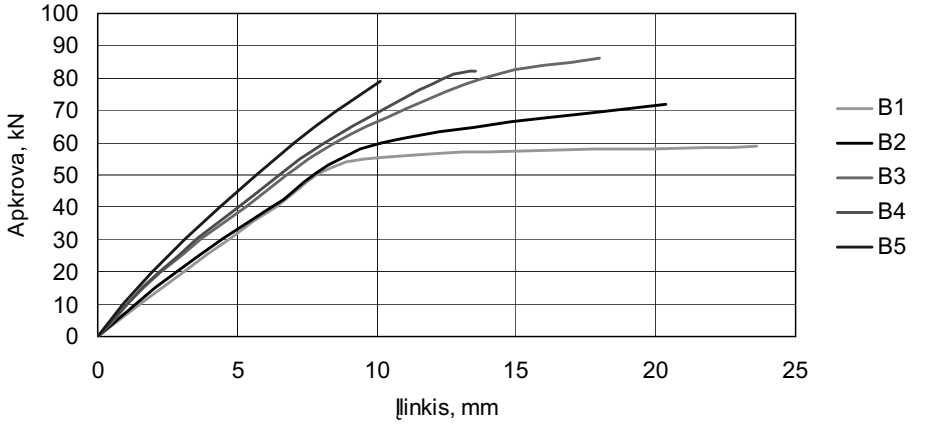
1.3 pav. Apkrovos ir įlinkių grafikas (Khomwan *et al* 2005)
Fig. 1.3. Load-deflection curves (Khomwan et al 2005)

Li *et al* (2006) atliko gelžbetoninių sijų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra, eksperimentinius tyrimus. Bandymų metu buvo siekiama nustatyti išorinės armatūros ilgio ir storio įtaką sustiprintiems elementams. Gelžbetoninių sijų sustiprinimas anglies pluoštu pateiktas 1.4 paveiksle.

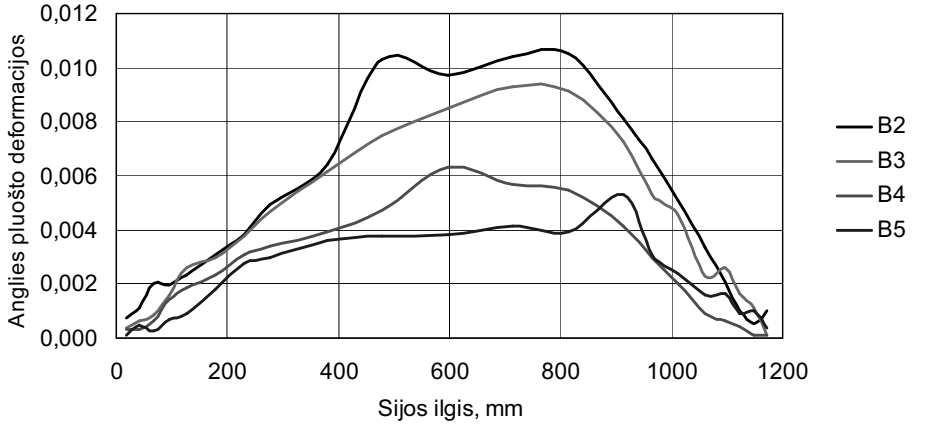


1.4 pav. Gelžbetoninių sijų armavimas išorine armatūra (Li et al 2006)
Fig. 1.4. Scheme of strengthening of reinforced concrete beams (Li *et al* 2006)

Gauti eksperimento rezultatai parodė, kad atstumas nuo išorinės armatūros juostos galo iki atramos turi įtakos įlinkiams ir laikomajai galiai. Eksperimentais nustatyta, kad pluošto juostos ilgio didinimas turi savo ribą, nuo kurios nekinta sijų įlinkiai ir laikomoji galia. Kai santykis $l/l_f = 3$ (l – gelžbetoninės sijos tarpatramio ilgis; l_f – anglies pluošto juostos ilgis), laikomoji galia padidėja 10 %, lyginant su kontroline nesustiprinta sija (1.4 pav., a). O kai santykis $l/l_f = 1{,}5$ ir $l/l_f = 1{,}125$ (1.4 pav., b, c), sijų laikomoji galia yra vienoda ir 70 % didesnė nei kontrolinių bandinių be išorinės armatūros. Tyrimų rezultatai rodo, kad didžiausias santykis yra l/l_f lygus 1,5, norint pasiekti didžiausią laikomosios galios padidėjimo apimtį. Tyrimais taip pat nustatyta, kad laikomoji galia padidėja tik 5 % esant tam pačiam išorinės armatūros ilgiui, bet dvigubai didesniam jos plotui (1.4 pav., c, f).



1.5 pav. Sijų B1, B2, B3, B4, B5 apkrovos ir įlinkių grafikai (Maalej, Bian 2001)
Fig. 1.5. Load-deflection curves of beams B1, B2, B3, B4, B5 (Maalej, Bian 2001)



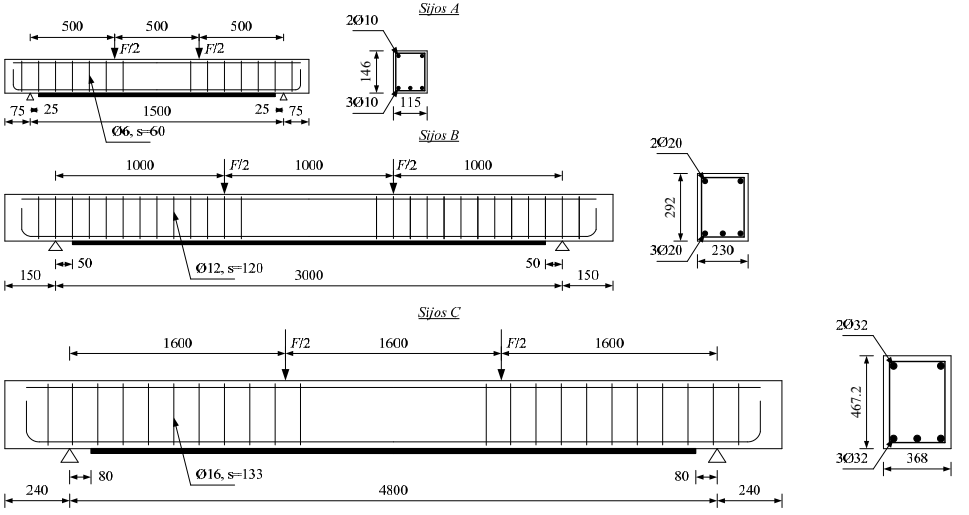
1.6 pav. Deformacijų pasiskirstymas sijose, kai apkrova didžiausia (Maalej, Bian 2001)
Fig. 1.6. Strain distribution in the CFRP sheet for different beams at peak load (Maalej, Bian 2001)

Tyrimams (Maalej, Bian 2001) naudotos sijos, sustiprintos tokio paties pločio 115 mm, bet skyrėsi anglies pluošto sluoksnių skaičiumi. Sijos B2 išorinės armatūros skerspjūvio aukštis – 0,111 mm (1 sluoksnis), sijos B3 – 0,222 mm (2 sluoksniai), B4 – 0,333 mm (3 sluoksniai), B5 – 0,444 mm (4 sluoksniai). Gauti rezultatai rodo, kad sijos su didesniu išorinės armatūros skerspjūvio plotu yra standesnės (1.5 pav.), kadangi, padidėjus anglies pluošto skerspjūvio plotui, su-

mažėja deformacijos tiek išorinėje armatūroje (1.6 pav.), tiek tempiamojoje ir gniuždomojoje lenkiamųjų elementų zonose.

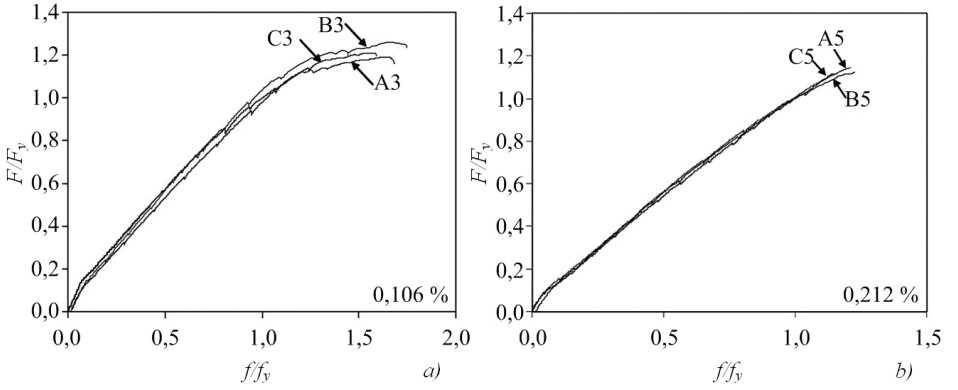
Bandymais nustatyta, kad didėjant anglies pluošto sluoksnių skaičiui, sustiprinimo efektas nedidėja. Sijų B2, B3, B4, B5 laikomoji galia yra 22 %, 45 %, 38 %, 33 % didesnė nei kontrolinio bandinio. Galima spręsti, kad yra ribinis išorinės armatūros kiekis, kurį toliau didinant sustiprinimo efektas nebedidėja. Tai aiškinama tuo, kad didėjant anglies pluošto kiekiui, pereinamojo betono sluoksnio, į kurį įsigėrę klijai, stipris bei jungties tarp gelžbetoninio elemento ir pluošto stipris nepadidėja. Bandymų rezultatai parodė, kad didžiausia laikomoji galia pasiekiama tada, kai sijos sustiprintos dviem išorinės armatūros sluoksniais (B3) (armavimo anglies pluoštu procentas – 0,15 %). Sijos, kurios sustiprintos dviem ir daugiau išorinės armatūros, suiro atplėšiant anglies pluošto armatūrą kartu su betonu.

Atlikti tyrimai (Maalej, Leong 2005) su trimis sijų, sustiprintų išorine armatūra tipais (1.7 pav.). Sijos skyrėsi bandinių skerspjūvio aukščiu ir pločiu bei tarpatramio ilgiu. Visų bandymams naudotų sijų betono, plieno armatūros ir anglies pluošto armatūros savybės buvo vienodos. Sijų armavimo procentai taip pat vienodi. Plieninės strypinės armatūros armavimo procentas tempiamojoje zonoje – 1,71 %; gniuždomojoje zonoje – 1,14 %; skersinės armatūros armavimo procentas – 0,82 %; pirmosios ir antrosios bandinių serijų armavimo anglies pluošto armatūra procentai – 0,106 % ir 0,212 %.



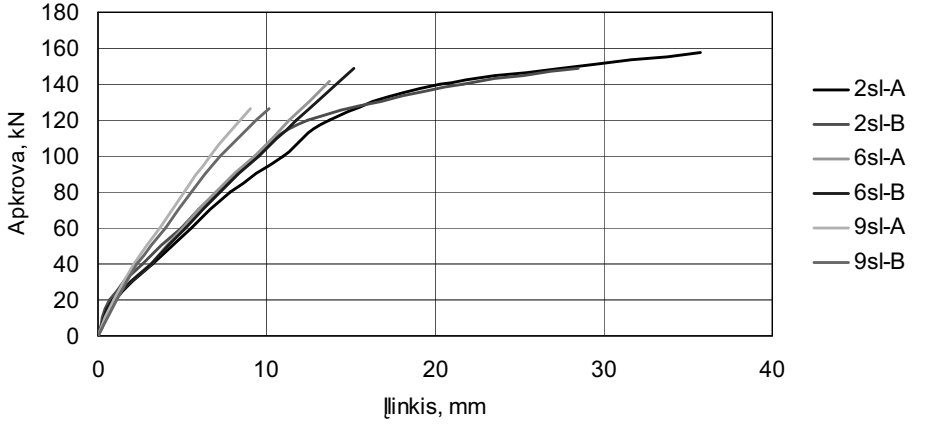
1.7 pav. Sijų A, B, C matmenys, armavimas ir bandymo schemos (Maalej, Leong 2005)
Fig. 1.7. Specimen dimensions, reinforcing and test details for series A, B and C beams (Maalej, Leong 2005)

Tyrimai parodė, kad A, B, C sijų laikomoji galia, kai išorinės armatūros procentas 0,106 % ir 0,212 %, padidėja atitinkamai 28 % ir 44 %, 30 % ir 40 %, 26 % ir 25 %, lyginant su kontroliniais nesustiprintais bandiniais. Gauti rezultatai rodo, kad sijų skerspjūvis ir tarpatramio ilgis neturi įtakos jų santykiniam standumui (1.8 pav.) ar suirties pobūdžiui. Visos sijos suiro vienodai, atplėšiant išorinės armatūros juostos galą su betono sluoksniu.



1.8 pav. Santykinis apkrovos ir įlinkių grafikas (Maalej, Leong 2005)
Fig. 1.8. Normalized load-deflection curves (Maalej, Leong 2005)

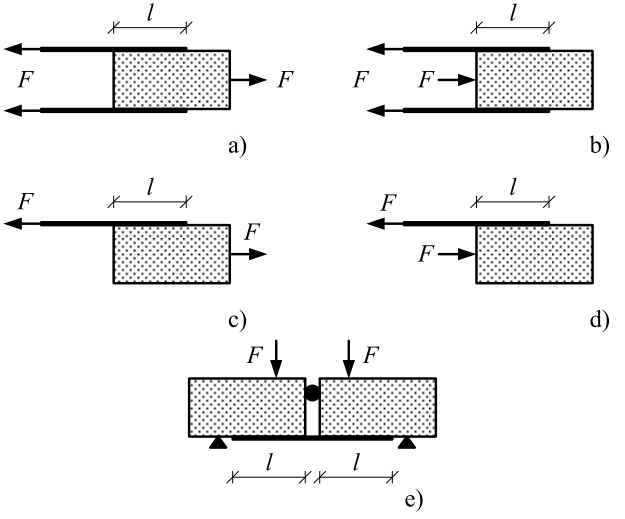
Atliekant eksperimentinius tyrimus (Pham, Al-Mahaidi 2004a) buvo nagrinėta betono apsauginio sluoksnio, išorinės armatūros sluoksnių skaičiaus įtaka sustiprintų sijų darbui.



1.9 pav. Apkrovos ir įlinkių grafikas (Pham, Al-Mahaidi 2004a)
Fig. 1.9. Load-deflection curves (Pham**,** Al-Mahaidi 2004a**)**

Sijų, sustiprintų dviem (anglies pluošto plotas sudarė A_e/A_{s1} = 7,7 % tempiamosios plieninės strypinės armatūros ploto), šešiais (A_e/A_{s1} = 23,0 %), devyniais (A_e/A_{s1} = 34,5 %) išorinės armatūros sluoksniais, laikomoji galia padidėja atitinkamai 37 %, 34 %, 17 %, lyginant su nesustiprinta kontroline sija. Tai rodo, kad, pasiekus tam tikrą išorinės armatūros plotą, laikomoji sustiprintų sijų galia mažėja. Tačiau didėjant pluošto sluoksnių skaičiui, sijų įlinkiai mažėja (1.9 pav.). Tyrimais taip pat nustatyta, kad betono apsauginio sluoksnio storis neturi įtakos laikomajai galiai ir suirimo pobūdžiui.

Anglies pluošto ir betono jungties stiprio ir deformatyvumo savybės yra vienas pagrindinių veiksnių, turinčių įtakos gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų išorine pluošto armatūra, darbui ir laikomajai galiai (Chen, Pan 2006; Pham, Al-Mahaidi 2007; Perera *et al* 2004; De Lorenzis *et al* 2001; Ueda, Jianguo 2005; Camli, Binici 2007; Lu *et al* 2006; Casas, Pascual 2007; Schilde, Seim 2007; Cho *et al* 2006; Toutanji, Ortiz 2001; Ferracuti *et al* 2007; Subramaniam *et al* 2007; Wang *et al* 2007; Freddi, Savoia 2008; Yuan *et al* 2004; Ramos *et al* 2004; Camata *et al* 2004; Dai *et al* 2005; Ramos *et al* 2006; Pan, Leung 2007a; Saxena *et al* 2008; Niu, Wu 2006; Xiao *et al* 2004; Neto *et al* 2004; Pham *et al* 2006; Gao *et al* 2003; Pan, Leung 2007b; Chen, Teng 2001; Ferrier *et al* 2006; Ferrier *et al* 2005; Nakaba *et al* 2001, Mazzotti *et al* 2008).



1.10 pav. Jungties tyrimo metodai: a, b – dvipusiai šlyties bandymai; c, d – vienpusiai šlyties bandymai; e – sijų bandymai

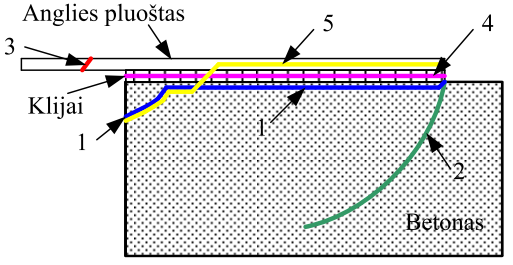
Fig. 1.10. Classification of bond tests: a, b – double-shear test; c, d – single-shear test; e – beam test

Pluošto ir betono jungties stiprio-deformatyvumo savybėms nustatyti taikomus metodus galima suskirstyti į tris grupes (1.10 pav.): dvipusis šlyties bandymas; vienpusis šlyties bandymas; sijų bandymas. Šlyties bandymų metodai, priklausomai nuo apkrovos suteikimo būdo, skiriami į stūmimo ir traukimo metodus.

Taikant vienpusį traukimo šlyties bandymo metodą (1.10 pav., c) reikalinga sudėtinga laboratorinė įranga, todėl tai yra daugiau teorinis metodas, rodantis, kad yra galimybė atlikti tokio tipo bandymus. Dažniausiai tyrimams taikomi bandymų metodai – dvipusis traukimo (1.10 pav., a) ir vienpusis stūmimo (1.10 pav., d). Pagrindinis dvipusio traukimo bandymo metodo privalumas, lyginant su vienpusiu stūmimo metodu, yra paprastesnis bandinio įtvirtinimas tyrimo metu. Be to, vienpusio šlyties bandymo metu tarp F jėgų yra ekscentricitetas. Todėl esant jėgų porai sukeliamas lenkiamasis momentas, dėl to statmenai anglies pluošto ir betono jungties atsiranda tempimo įtempių, kurie iškraipo tikrąjį jungties darbą. Tačiau bandant bandinius su dviguba jungtimi yra sudėtinga nustatyti jungties šlyties deformacijas, kadangi jungtys gali deformuotis skirtingai. Sijų bandymo metodas (1.10 pav., e) leidžia modeliuoti lenkiamųjų elementų betono ir pluošto jungties darbą (Chen 2001).

Tyrimais nustatyta, kad bandymo metodas turi įtakos gaunamiems bandymų rezultatams. Eksperimentai yra atliekami su kompozitine konstrukcija, kurioje nors ir maži pakeitimai gali turėti didelę įtaką įtempių ir deformacijų pasiskirstymui, suirimo pobūdžiui ir laikomajai galiai.

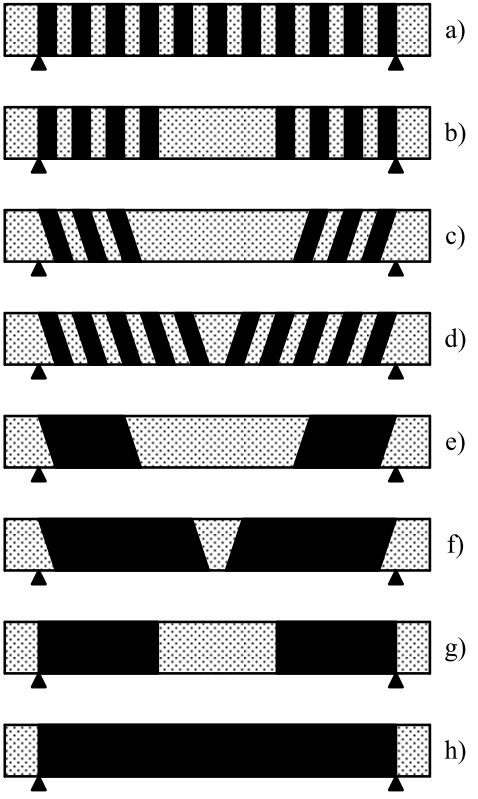
Atliekant šlyties bandymus bandinių suirimas gali įvykti: atplėšiant išorinės armatūros juostos galą su betono sluoksniu; įstrižajame pjūvyje; trūkstant pluoštui; suyrant klijų sluoksnyje; atšokant pluošto juostos galui, kai suirtis pereina į klijus ir betoną (1.11 pav.).



1.11 pav. Bandinių suirimo pobūdžiai, atliekant šlyties bandymus: 1 – paviršinis išorinės armatūros juostos galo atplėšimas su betono sluoksniu; 2 – suirtis įstrižajame pjūvyje; 3 – pluošto trūkimas; 4 – suirtis klijų sluoksnyje; 5 – pluošto juostos galo atšokimas, suirčiai pereinant į klijus ir betoną

Fig. 1.11. 1 – interfacial debond failure; 2 – shear failure; 3 – FRP rupture; 4 – failure through the adhesive; 5 – FRP delamination, where the delamination path bridge across the adhesive layer and penetrates into the concrete

Lenkiamieji gelžbetoniniai elementai gali būti stiprinami ir įstrižajame pjūvyje. Naudojamų konstrukcijų įstrižojo pjūvio laikomoji galia gali būti nepakankama dėl padidėjusių apkrovų, armatūros korozijos ar betono pažeidimų. Gelžbetoninių konstrukcijų suirimas įstrižajame pjūvyje įvyksta staiga, todėl daugelis autorių skiria nemažą dėmesį konstrukcijų įstrižojo pjūvio stiprinimui išorine anglies pluošto armatūra. Sustiprintų konstrukcijų tyrimų rezultatai rodo, kad išorinę armatūrą galima efektyviai naudoti įstrižajam pjūviui stiprinti (Labossiere *et al* 2000; Leung, Balendran 2003; Hag Elsafi *et al* 2001; Hag Elsafi *et al* 2004; Ghosh, Karbhari 2007; Wang *et al* 2007; Di Ludovico *et al* 2005; Bencardino *et al* 2005; Khalifa *et al* 1999; Khalifa, Nanni 2000; Li *et al* 2001a; Al-Amery, Al-Mahaidi 2005; Nanni, Khalifa 2002; Li *et al* 2001b; Taljsten 2003; Carolin 2003; Chen, Teng 2003a; Rizzo, De Lorenzis 2007; Kachlakev, McCurry 2000; Aprile, Benedetti 2004; Hadi 2003; Wang, Chen 2003; Monti, Liotta 2007; Chen, Teng 2003b; Abdel *et al* 2003; Pellegrino, Modena 2006; Pimanmas, Pornpongsaroj 2004).

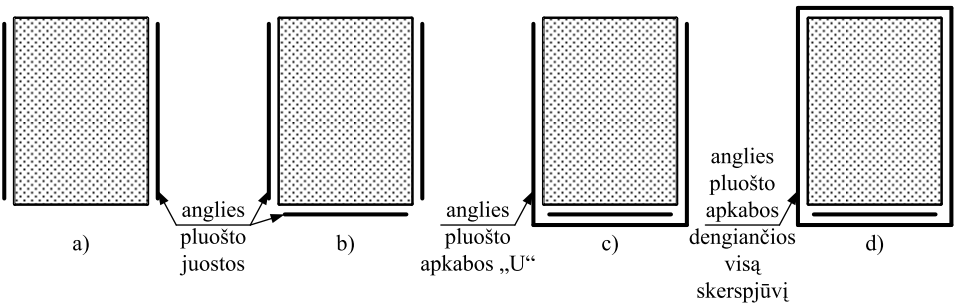


1.12 pav. Gelžbetoninių sijų įstrižojo pjūvio sustiprinimo būdai
Fig. 1.12. Shear strengthening of beams

Tyrimais nustatyta, kad stiprinant įstrižąjį pjūvį, būtina stiprinti ir statmenąjį pjūvį. Gelžbetonines konstrukcijas sustiprinus įstrižajame pjūvyje U formos apkabomis, pasiekiamas geresnis tempiamoje zonoje esančio pluošto sukibtis su betonu.

Tyrimų rezultatai rodo, kad įstrižojo pjūvio laikomoji galia priklauso nuo išorinės armatūros apkabos aukščio ir pločio, l_a/d santykio (l_a – atstumas nuo atramos iki sutelktosios jėgos; d – naudingasis skerspjūvio aukštis), pluošto savybių. Geriausi rezultatai pasiekiami padengus visą sijų skerspjūvį anglies pluoštu (1.13 pav., d). Pluošto klijavimas 45˚ kampu (1.12 pav., c, d, e, f, ir 1.13 pav., c), taip pat gerokai padidina įstrižojo pjūvio laikomąją galią. Iš tyrimų rezultatų galima spręsti, kad mažiausiai efektyvus stiprinimo būdas yra II juostų klijavimas (1.13 pav., a).

Atlikti tyrimai rodo, kad pasiekus tam tikrą išorinės armatūros kiekį stiprinimo efektas nedidėja arba didėja nedaug. Norint efektyviai išnaudoti išorinę armatūrą, būtina užtikrinti gerą pluošto sukibtį su betonu papildomai inkaruojant. Geresnis anglies pluošto ir betono jungties stipris pasiekiamas tinkamai paruošus konstrukcijų paviršių, prie kurio bus klijuojama išorinė armatūra. Papildomai inkaravus anglies pluošto armatūrą pasiekiami jos didžiausieji įtempiai, pasikeičia suirimo pobūdis.



1.13 pav. Gelžbetoninių sijų įstrižojo pjūvio sustiprinimas skerspjūvį padengiant: a – II formos juostomis; b – atskiromis juostomis; c – U formos apkabomis; d – viso skerspjūvio padengimas

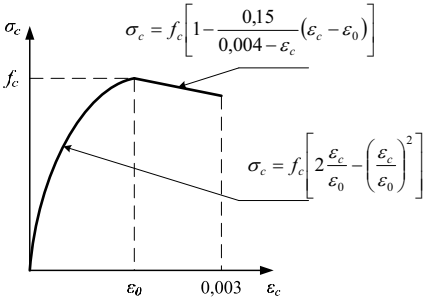
Fig. 1.13. Shear strengthening of beams: a – strips on beam sides only; b – strips in bending and on beam sides; c – U wrap; d – all section wrap

1.3. Lenkiamųjų gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų tempiamojoje zonoje, skaičiavimo metodai

Dažniausiai taikoma gelžbetoninių sijų, sustiprintų išorine pluošto armatūra, skaičiavimo metodika (An *et al* 1991; GangaRao, Vijay 1998; Toutanji, Zhao 2006; Alagusundaramoorthy *et al* 2003; Pham, Al-Mahaidi 2004b; Lu, Xie 2007; Bencardino *et al* 2007; Capozucca, Cerri 2002) remiasi prielaidomis:

- neįvertinamas betono tempiamasis stipris;
- galioja plokščių pjūvių hipotezė;
- standus ryšys tarp skirtingų medžiagų sluoksnių (neįvertinama betono ir anglies pluošto jungties šlyties deformacijos).

Betono įtempių ir deformacijų kreivė aprašoma dviem kreivių lygtimis (1.14 pav). Pirmoji yra parabolės lygtis, einanti iki didžiausiojo įtempio. Antroji lygtis yra tiesės, einančios nuo didžiausiojo įtempio iki didžiausiosios deformacijos. Skaičiuojant šiuo metodu, laikoma, kad didžiausioji betono deformacija – 0,003.



1.14 pav. Betono įtempių ir deformacijų diagrama
Fig. 1.14. Stress-strain curve for concrete in compression

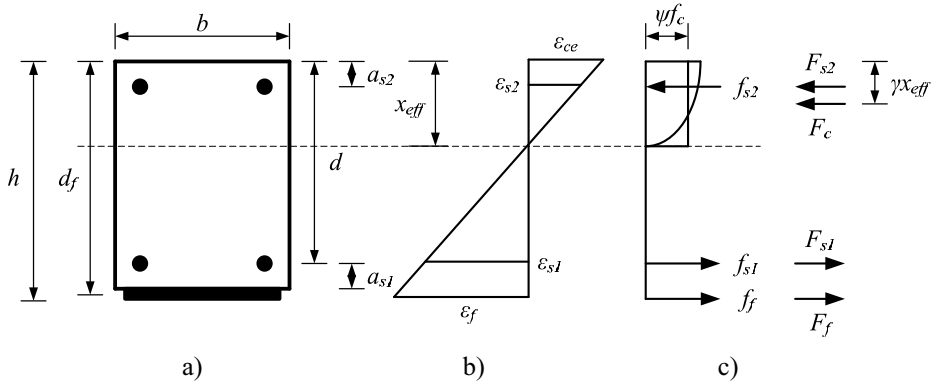
Plieninės strypinės armatūros ir anglies pluošto tikrasis įtempių deformacijų pasiskirstymas nustatomas eksperimentais.

Deformacijos anglies pluošto ε_f, tempiamosios plieninės strypinės armatūros ε_{s1} ir gniuždomosios plieninės strypinės armatūros ε_{s2} apskaičiuojamos pagal formules:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{ce}\left(\frac{d_f - x_{eff}}{x_{eff}}\right); \tag{1.1}$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ce}\left(\frac{d - x_{eff}}{x_{eff}}\right); \tag{1.2}$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{ce}\left(\frac{x_{eff} - a_{s2}}{x_{eff}}\right). \tag{1.3}$$



1.15 pav. Skerspjūvis (a); deformacijos (b); įtempiai (c)
Fig. 1.15. Strain (a) and stress (b) of cross section (c)

Anglies pluošto ir plieninės strypinės armatūros įtempiai apskaičiuojami pagal formules:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f; \tag{1.4}$$

$$\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{y,}\ \sigma_{s1} = E_{s1}\varepsilon_{s1},\ \text{jei ne,}\ \sigma_{s1} = \sigma_y; \tag{1.5}$$

$$\varepsilon_{s2} < \varepsilon_y,\ \sigma_{s2} = E_{s2}\varepsilon_{s2},\ \text{jei ne,}\ \sigma_{s2} = \sigma_y. \tag{1.6}$$

Vidinės jėgos apskaičiuojamos pagal šias formules:

$$F_f = \sigma_f A_f; \tag{1.7}$$

$$F_{s1} = \sigma_{s1} A_{s1}\,; \tag{1.8}$$

$$F_{s2} = \sigma_{s2} A_{s2}\,. \tag{1.9}$$

Betono gniuždymo įtempiai randami iš įtempių ir deformacijų diagramos, pateiktos 1.14 paveiksle, (1.10) ir (1.11) lygtimis aprašoma betono įtempių ir deformacijų kreivė.

$$0 \le \varepsilon_c < \varepsilon_0\,,\ \sigma_c = f_c\left[2\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2\right]; \tag{1.10}$$

$$\varepsilon_0 \le \varepsilon_c < 0{,}003\,,\ \sigma_c = f_c\left[1 - \frac{0{,}15}{0{,}004 - \varepsilon_c}\left(\varepsilon_c - \varepsilon_0\right)\right]. \tag{1.11}$$

Deformacijos betone, kai įtempiai didžiausieji, nustatomos pagal (1.12) formulę. Betono gniuždymo įtempių atstojamoji nustatoma pagal (1.13) formulę.

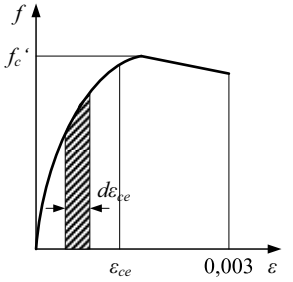
$$\varepsilon_0 = \frac{2 f_c}{E_c}\,; \tag{1.12}$$

$$F_c = \psi f_c b x_{eff}\,. \tag{1.13}$$

Koeficientas ψ naudojamas pakeisti tikrąją gniuždomojo betono diagramą į atitinkamą stačiakampę diagramą. Šis koeficientas apskaičiuojamas integruojant plotą, apribotą įtempių ir deformacijų kreive (1.16 pav.). Skaičiuojamas pagal (1.14) lygtį.

$$A = \int_0^{\varepsilon_{ce}} \sigma_c\, d\varepsilon_c = \psi f_c \varepsilon_{ce}\,; \tag{1.14}$$

$$\psi = \frac{\int_0^{\varepsilon_{ce}} \sigma_c d\varepsilon_c}{f_c \varepsilon_{ce}}. \tag{1.15}$$



1.16 pav. Betono įtempių ir deformacijų kreivės integravimas
Fig. 1.16. Integration of stress-strain curve of concrete

Išsprendus (1.15) lygtį, gaunamos (1.16) ir (1.17) formulės koeficientui ψ apskaičiuoti:

$$0 \le \varepsilon_{ce} < \varepsilon_0, \ \psi = \frac{\varepsilon_{ce}}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_{ce}^2}{3\varepsilon_0^2}; \tag{1.16}$$

$$\varepsilon_0 \le \varepsilon_{ce} < 0{,}003;$$

$$\psi = 1 + \frac{\varepsilon_{ce}}{\varepsilon_0}\left(1 - \frac{\varepsilon_{ce}}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_{ce}^2}\right) - \frac{0{,}15}{0{,}004 - \varepsilon_0}\left(\frac{\varepsilon_{ce}}{2} - \varepsilon_0\right) - \frac{0{,}075}{0{,}004 - \varepsilon_0}\left(\frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_{ce}}\right). \tag{1.17}$$

Koeficientas γ yra randamas remiantis (1.18) ir (1.19) lygtimis.

$$S = \int_0^{\varepsilon_{ce}} \varepsilon_c \sigma_c d\varepsilon_c; \tag{1.18}$$

$$S = (1 - \gamma) \cdot \varepsilon_{ce} \int_0^{\varepsilon_{ce}} \sigma_c d\varepsilon_c; \tag{1.19}$$

$$\gamma = 1 - \frac{\int_0^{\varepsilon_{ce}} \varepsilon_c \sigma_c d\varepsilon_c}{\varepsilon_{ce} \int_0^{\varepsilon_{ce}} \sigma_c d\varepsilon_c}, \tag{1.20}$$

čia S – statinis momentas ploto, apriboto įtempių ir deformacijų kreive.

Išsprendus (1.20) lygtį, gaunamos formulės (1.21) ir (1.22) koeficientui γ apskaičiuoti:

$$0 \le \varepsilon_{ce} < \varepsilon_0, \ \gamma = \frac{\frac{1}{3} - \frac{\varepsilon_{ce}}{12\varepsilon_0}}{1 - \frac{\varepsilon_{ce}}{3\varepsilon_0}}; \tag{1.21}$$

$$\varepsilon_0 \le \varepsilon_{ce} < 0{,}003;$$

$$\gamma = 1 - \frac{\varepsilon_{ce}^3 - 5{,}1\varepsilon_0\varepsilon_{ce}^2 - 0{,}004\varepsilon_0^2 + 0{,}024\varepsilon_{ce}^2}{\varepsilon_{ce}\left(3{,}925\varepsilon_0^2 - 10{,}2\varepsilon_0\varepsilon_{ce} - 0{,}9\varepsilon_{ce}^2 - 0{,}016\varepsilon_0 + 0{,}048\varepsilon_{ce}\right)}. \tag{1.22}$$

Gniuždymo jėgos yra lygios tempimo jėgoms:

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} + F_f. \tag{1.23}$$

Įstačius (1.7), (1.8), (1.9), (1.13) išraiškas į (1.23) lygtį gaunama lygtis:

$$\psi\sigma_c b x_{eff} + \sigma_{s2} A_{s2} = \sigma_s A_{s1} + \sigma_f A_f; \tag{1.24}$$

$$M = \psi\sigma_c b x_{eff}\left[\frac{h}{2} - \gamma x_{eff}\right] + \sigma_{s2} A_{s2}\left[\frac{h}{2} - a_{s2}\right] + \sigma_{s1} A_{s1}\left[d - \frac{h}{2}\right] + \sigma_f A_f\left[d_f - \frac{h}{2}\right]. \tag{1.25}$$

Neutraliosios ašies padėtis ir lenkiamojo elemento gniuždomosios zonos deformacija yra nustatomos sprendžiant (1.24) ir (1.25) lygtis priartėjimo būdu. Kai yra žinoma neutraliosios ašies padėtis, galima apskaičiuoti sijų įlinkius.

Laikomoji galia apskaičiuojama pagal (1.25) lygtį, iš (1.24) lygties nustačius neutraliosios ašies padėtį, kai į lygtis (1.24) ir (1.25) įrašoma betono, strypinės plieninės ir anglies pluošto armatūrų stipriai.

Šia skaičiavimo metodika remiasi daugelis autorių (An *et al* 1991; Ganga-Rao, Vijay 1998; Toutanji, Zhao 2006; Alagusundaramoorthy *et al* 2003; Pham Al-Mahaidi 2004b; Lu, Xie 2007; Bencardino *et al* 2007; Capozucca, Cerri 2002). Skaičiavimai skiriasi betono kreivių aprašymu ir koeficientais ψ, γ (žr. 1.16, 1.17, 1.21, 1.22).

Koeficientus ψ ir γ galima nustatyti pagal gelžbetoninių elementų, sustiprintų išorine pluošto armatūra, skaičiavimo rekomendacijose ACI 440.2R–08 ir *FIB biulletin 14* pateikiamus nurodymus. Siūloma imti $\psi = 0{,}85$ ir $\gamma = 0{,}65 - 0{,}85$, priklausomai nuo betono stiprio (ACI 440.2R–08, ACI 318–05). Pagal *FIB biulletin 14* ψ ir γ koeficientai taikomi dviem atvejams: kai suirtis įvyksta gniuždomoje zonoje arba trūkus išorinei armatūrai. Pirmuoju atveju $\psi = 0{,}8$ ir $\gamma = 0{,}4$. Antruoju atveju yra taikomos lygtys (1.26–1.29):

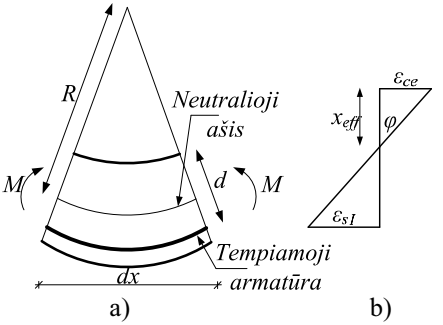
$$\psi = 1000\varepsilon_{ce}\left(0{,}5 - \frac{1000}{12}\varepsilon_{ce}\right), \text{ jei } \varepsilon_{ce} \le 0{,}002; \tag{1.26}$$

$$\psi = 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_{ce}}, \text{ jei } 0{,}002 \le \varepsilon_{ce} \le 0{,}0035; \tag{1.27}$$

$$\gamma = \frac{8 - 1000\varepsilon_{ce}}{4\left(6 - 1000\varepsilon_{ce}\right)}, \text{ jei } \varepsilon_{ce} \le 0{,}002; \tag{1.28}$$

$$\gamma = \frac{1000\varepsilon_{ce}\left(3000\varepsilon_{ce} - 4\right) + 2}{2000\varepsilon_{ce}\left(3000\varepsilon_{ce} - 2\right)}, \text{ jei } 0{,}002 \le \varepsilon_{ce} \le 0{,}0035. \tag{1.29}$$

Sijos kreivis apskaičiuojamas nagrinėjant mažą lenkiamosios sijos elementą (1.17 pav.).



1.17 pav. Lenkiamojo elemento deformacija (a); deformacijų pasiskirstymas (b)
Fig. 1.17. Flexural member (a), stain distribution (b)

$$\frac{dx}{R} = \frac{\varepsilon_{ce} dx}{x_{eff}} = \frac{\varepsilon_{s1} dx}{d - x_{eff}}; \tag{1.30}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\varepsilon_{ce}}{x_{eff}}. \tag{1.31}$$

Lenkiamojo gelžbetoninio elemento su išorine armatūra kreivį, įvertinant šlyties deformacijas jungtyje tarp betono ir išorinės armatūros, siūloma apskaičiuoti pagal formulę (Kamaitis 2000):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R^*}; \tag{1.32}$$

čia $\frac{1}{R_1}$ – kreivis apskaičiuojamas kaip įprasto gelžbetoninio elemento be išorinės armatūros; $\frac{1}{R^*}$ – papildomas kreivis, atsirandantis dėl šlyties deformacijų jungtyje tarp betono ir išorinės armatūros:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{\Delta}{ld}; \tag{1.33}$$

čia Δ – vidutinė šlyties deformacija išorinės armatūros ir betono jungtyje.

Lenkiamųjų gelžbetonių elementų, sustiprintų išorine armatūra, įlinkius pagal *FIB biulletin 14* apskaičiuoti galima taikant formulę:

$$d = d_1(1-\zeta_b) + d_2\zeta_b; \tag{1.34}$$

čia d_1 ir d_2 – gelžbetoninio elemento įlinkis iki ir po plyšių susidarymo:

$$d_1 = k_m \frac{M_{cr} \cdot l^2}{E_{cm} \cdot I_{gt}}; \tag{1.35}$$

$$d_2 = k_m \frac{M \cdot l^2}{E_{cm} \cdot I_{cr}}; \tag{1.36}$$

čia I_{gt} ir I_{cr} – gelžbetoninio elemento inercijos momentai iki ir po plyšių susidarymo; k_m – koeficientas, priklausantis nuo apkrovimo būdo.

Koeficientas ζ_b apskaičiuojamas pagal:

$$\zeta_b = 0, \text{kai } M < M_{cr}; \tag{1.37}$$

$$\zeta_b = 1 - \beta_1\beta_2 \frac{M_{cr}}{M}, \text{kai } M > M_{cr}; \tag{1.38}$$

čia $\beta_1 = 0{,}5$, kai strypinė plieno armatūra lygi; $\beta_1 = 1$, kai strypinė plieno armatūra rumbuota; $\beta_2 = 0{,}5$, kai apkrova ilgalaikė; $\beta_2 = 1$, kai apkrova trumpalaikė.

Lenkiamųjų gelžbetonių elementų, sustiprintų išorine armatūra, įlinkius po plyšių susidarymo pagal ACI 440.2R–08 ir ACI 318–05 apskaičiuoti galima taikant formulę:

$$d = k_m \frac{M \cdot l^2}{E_{cm} \cdot I_e}. \tag{1.39}$$

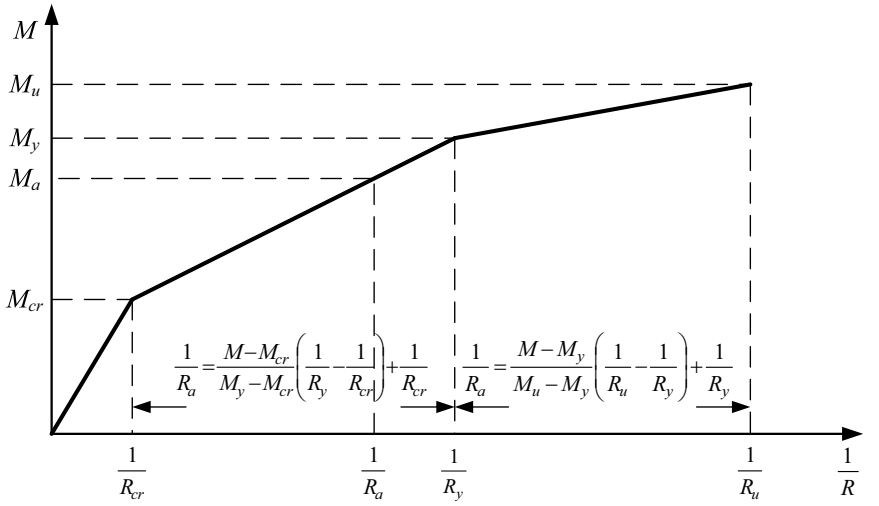
Inercijos momentas I_e apskaičiuojamas pagal formulę:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 I_{gt} + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right) I_{cr}; \tag{1.40}$$

čia I_{gt} –gelžbetoninio elemento su išorine armatūra inercijos momentas iki plyšių susidarymo; I_{cr} –gelžbetoninio elemento su išorine armatūra inercijos momentas po plyšių susidarymo.

Gelžbetoninių sijų, sustiprintų išorine pluošto armatūra, įlinkius siūloma apskaičiuoti išskiriant lenkiamojo elemento kreivius (1.18 pav.) pagal šias darbo stadijas (Rasheed *et al* 2004; Faruqi *et al* 2003; Charkas *et al* 2003):

- iki plyšių atsivėrimo;
- iki strypinė armatūra pasiekia takumo įtempius;
- iki suirimo.



1.18 pav. Lenkiamosios gelžbetoninės sijos kreivis pagal darbo stadijas
Fig. 1.18. Stages of moment–curvature relationships

Sijos kreivis bei įlinkis iki plyšių susidarymo ir jų susidarymo metu apskaičiuojami pagal formules:

$$\frac{1}{R_a} = \frac{1}{R_{cr}} = \frac{M}{E_c I_{eff}}; \tag{1.41}$$

$$d = \frac{1}{R_a}\frac{3l^2 - 4l_a^2}{24}; \tag{1.42}$$

$$M \le M_{cr}. \tag{1.43}$$

Iki strypinei armatūrai pasiekiant takumo įtempius, kreivis ir įlinkis apskaičiuojami pagal (1.44) ir (1.47) lygtis:

$$\frac{1}{R_a} = \frac{M - M_{cr}}{M_y - M_{cr}}\left(\frac{1}{R_y} - \frac{1}{R_{cr}}\right) + \frac{1}{R_{cr}}; \tag{1.44}$$

$$d = \frac{1}{R_a}\frac{3l^2 - 4l_a^2}{24} + \frac{l_g + l_a}{6}\left(\frac{1}{R_{cr}}l_a - \frac{1}{R_a}l_g\right); \tag{1.45}$$

$$\frac{1}{R_y} = \frac{\varepsilon_y}{d_{s1} - x_{eff}}; \tag{1.46}$$

$$l_g = \frac{2M_{cr}}{F}. \tag{1.47}$$

Iki suyrant sijai, kreivis ir įlinkis yra apskaičiuojami pagal (1.48) ir (1.50):

$$\frac{1}{R_a} = \frac{M - M_y}{M_u - M_y}\left(\frac{1}{R_u} - \frac{1}{R_y}\right) + \frac{1}{R_y}; \tag{1.48}$$

$$d = \frac{1}{R_a}\frac{3l^2 - 4l_a^2}{24} + \frac{L_y}{6}\left(\frac{1}{R_{cr}}\left(l_y + l_g\right) - \frac{1}{R_a}\left(l_y + l_a\right)\right) + \frac{1}{R_y}\frac{\left(l_a - l_g\right)\left(l_a + l_y + l_g\right)}{6}; \tag{1.49}$$

$$l_y = \frac{2M_y}{F}. \tag{1.50}$$

Didžiausiasis sijos kreivis $\frac{1}{R_u}$ apskaičiuojamas dviem suirimo atvejams, kai suyra gniuždomosios zonos betonas (1.51) arba trūksta išorinė armatūra (1.52):

$$\frac{1}{R_u} = \frac{\varepsilon_{ce}}{x_{eff}}; \tag{1.51}$$

$$\frac{1}{R_u} = \frac{\varepsilon_f}{d_f - x_{eff}}. \tag{1.52}$$

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Lenkiamuosius gelžbetoninius elementus sustiprinus anglies pluoštu, padidėja jų laikomoji galia ir sumažėja įlinkiai. Laikomoji galia, įlinkiai, suirties pobūdis tiesiogiai priklauso nuo anglies pluošto skerspjūvio ploto.
2. Gelžbetoninių sijų išankstinės apkrovos lygis, prieš stiprinant lenkiamuosius elementus, turi nedidelę įtaką sustiprintų konstrukcijų laikomajai galiai. Stiprinimo metu apkrautų elementų tyrimai rodo, kad įlinkiai priklauso nuo lenkiamųjų elementų pradinio standumo, o ne nuo apkrovos lygio prieš klijuojant pluoštą.
3. Nustatyta, kad esant tiems patiems plieninės strypinės ir anglies pluošto armatūros armavimo procentams, skirtingų matmenų bandinių, sustiprintų anglies pluoštu, santykinė laikomoji galia ir santykiniai įlinkiai nesiskiria.
4. Šlyties deformacijų dydis anglies pluošto ir stiprinamo gelžbetoninio elemento jungtyje priklauso nuo pluošto papildomo inkaravimo. Nuo to priklauso sustiprintų elementų standumas ir laikomoji galia.
5. Daugelio autorių eksperimentinių tyrimų analizė parodė, kad anglies pluošto ir stiprinamo gelžbetonio elemento jungtis nėra standi, tačiau ty-

rimų autoriai moksliniuose darbuose to neanalizuoja, jų siūlomuose skaičiavimo metoduose tai tiesiogiai nevertinama.

Remiantis gautų tyrimų rezultatais suplanuoti tyrimai, kurių tikslas – trumpalaikiais eksperimentiniais tyrimais nustatyti anglies pluošto papildomo inkaravimo būdo, pluošto inkaravimo zonos ploto ir apspaudimo jėgos įtaką sustiprintų elementų laikomajai galiai, įlinkiams ir suirties pobūdžiui, bei pasiūlyti metodiką leidžiančią atlikti sustiprintų konstrukcijų laikomosios galios ir įlinkių skaičiavimus įvertinant jungties tarp stiprinamo elemento ir anglies pluošto standumą.

2

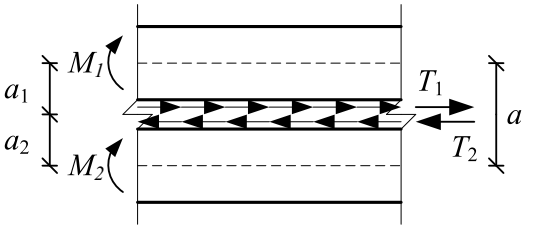
Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų su išorine anglies pluošto armatūra skaičiavimo metodika

2.1. Skaičiavimo modelis lenkiamiesiems gelžbetoniniams elementams su išorine anglies pluošto armatūra skaičiuoti

Dažniausiai sustiprintų lenkiamųjų elementų įlinkių ir laikomosios galios teoriniam skaičiavimui taikoma metodika pagrįsta prielaida, kad galioja plokščiųjų pjūvių hipotezė. Gniuždomojo betono ir tempiamosios išorinės pluošto armatūros deformacijos apskaičiuojamos sprendžiant dvi pusiausvyros lygtis – vidinių ašinių jėgų suma ir momentų suma. Šis skaičiavimo metodas pateikiamas ir rekomendacijose, skirtose išorine armatūra sustiprintoms konstrukcijoms skaičiuoti (ACI 440.2R–02 ir *FIB biulletin 14*). Metodika remiasi prielaida, kad jungtis tarp betono ir pluošto yra standi. Atliekant skaičiavimus, neįvertinamas išorinės armatūros poslinkis betono atžvilgiu. Tačiau atlikti eksperimentiniai tyrimai rodo, kad anglies pluošto ir betono jungties standumas turi įtakos lenkiamųjų elementų įlinkiams, laikomajai galiai ir suirties pobūdžiui. Be to, anglies pluoštą papildomai inkaravus, pasikeičia sustiprintų konstrukcijų darbas, nes sumažėja pluošto pasislinkimas betono atžvilgiu. Taikant šią metodiką negalima įvertinti

anglies pluošto ir betono jungties standumo įtakos sustiprintų konstrukcijų įlinkiams ir laikomajai galiai. Siekiant tikslesnių skaičiavimo rezultatų, reikia įvertinti betono ir anglies pluošto jungties standumą.

Siūloma skaičiavimo metodika lenkiamųjų gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų išorine armatūra, laikomajai galiai ir įlinkiams apskaičiuoti, pagrįsta sudėtinių strypų teorija (Ржаницын 1986). Šis skaičiavimo metodas leidžia įvertinti išorinės armatūros ir betono jungties standumą.



2.1 pav. Skaičiuojamoji schema
Fig. 2.1. Design scheme

Bendruoju atveju poslinkis jungtyje tarp dviejų strypų aprašomas šia lygtimi:

$$u = u_1 - u_2 ; \tag{2.1}$$

čia u_1 ir u_2 – poslinkiai viršutinio ir apatinio strypų paviršiuose.

Ryšys tarp poslinkių ir deformacijų nustatomas taip:

$$\varepsilon = \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x} . \tag{2.2}$$

Tokiu atveju, remiantis (2.1) ir (2.2) lygtimis, galima užrašyti poslinkio jungties zonoje ir deformacijų priklausomybę:

$$\frac{du}{dx} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 . \tag{2.3}$$

Bendras skerspjūvio iš dviejų strypų standumas:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = \sum EI \; ; \tag{2.4}$$

čia E_1, I_1, E_2, I_2 – pirmojo ir antrojo strypų tamprumo moduliai ir skerspjūvio inercijos momentai.

Skerspjūvyje veikiantis momentas:

$$M = M_0 - T_2 \cdot a_2 - T_1 \cdot a_1 \, . \tag{2.5}$$

čia M_0 – atskirų strypų momentų suma, neįvertinant jungties tarp strypų; T_1, T_2 – šlyties jėgos; a_1 ir a_2 – atstumai nuo strypo centro iki jungties tarp dviejų strypų centro (2.1 pav.).

Esant dviems strypams, kiekvieno strypo poslinkio jėgos yra lygios (2.7) bei $a_2 + a_1$ pažymėjus a – atstumu tarp strypų svorio centrų, gaunama skerspjūvyje veikiančio momento lygtis :

$$T_1 = T_2 = T \, . \tag{2.6}$$

$$M = M_0 - T \cdot a \, . \tag{2.7}$$

Šlyties jėgų priklausomybė nuo tangentinių įtempių:

$$T = \int_0^x \tau \cdot \mathrm{d}x \, . \tag{2.8}$$

Lenkiamojo momento sukeltas strypų ašies kreivis yra aprašomas tokia išraiška:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{\sum EI} \, . \tag{2.9}$$

Deformacijos jungties paviršiuje nustatomos pagal lygtis:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^0 + \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} \cdot a_1 \, ; \tag{2.10}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_2^0 - \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} \cdot a_2 , \tag{2.11}$$

čia ε_1^0 ir ε_2^0 – ašinės deformacijos strypuose, kurios aprašomos lygtimis:

$$\varepsilon_1^0 = \frac{T_1}{E_1 A_1} ; \tag{2.12}$$

$$\varepsilon_2^0 = \frac{-T_2}{E_2 A_2} . \tag{2.13}$$

Žinant ašinių deformacijų strypuose išraiškas, galima perrašyti deformacijų jungties paviršiuje priklausomybes:

$$\varepsilon_1 = \frac{T_1}{E_1 A_1} - \frac{M}{\sum EI} \cdot a_1 ; \tag{2.14}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-T_2}{E_2 A_2} + \frac{M}{\sum EI} \cdot a_2 . \tag{2.15}$$

Anksčiau gautą lygtį (2.3) galima užrašyti:

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x} = \frac{T_1}{E_1 A_1} - \frac{M}{\sum EI} \cdot a_1 + \frac{T_2}{E_2 A_2} - \frac{M}{\sum EI} \cdot a_2 . \tag{2.16}$$

Pertvarkius ir sutraukus gautosios lygties narius bei įstačius skerspjūvyje veikiančio momento lygtį, gaunama:

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x} = \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{a^2}{\sum EI} \right) \cdot T - \frac{M_0}{\sum EI} \cdot a . \tag{2.17}$$

Poslinkį jungties zonoje tarp strypų galima užrašyti ir taip:

$$u = \frac{\tau}{\mu} = \left(\frac{1}{\mu}\right) \cdot \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}. \tag{2.18}$$

Poslinkio jungties zonoje tarp dviejų strypų lygtis gali būti užrašyta, žinant poslinkio jėgų priklausomybę nuo tangentinių įtempių:

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x} = \left(\frac{1}{\mu}\right) \cdot \frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}x^2}; \tag{2.19}$$

$$\mu = \frac{b \cdot G}{a}. \tag{2.20}$$

Sulyginus abi poslinkio jungties zonoje tarp dviejų strypų lygtis:

$$\left(\frac{1}{\mu}\right) \cdot \frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}x^2} = \left(\frac{1}{E_1A_1} + \frac{1}{E_2A_2} + \frac{a^2}{\sum EI}\right) \cdot T - \frac{M_0}{\sum EI} \cdot a. \tag{2.21}$$

Gautosios lygties narius pažymėjus:

$$\gamma = \frac{1}{E_1A_1} + \frac{1}{E_2A_2} + \frac{a^2}{\sum EI}. \tag{2.22}$$

Išraišką (2.22) įstačius į (2.21) lygtį, gaunama (2.23) lygtis:

$$\left(\frac{1}{\mu}\right) \cdot \frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}x^2} = T \cdot \gamma - \frac{M_0}{\sum EI} \cdot a. \tag{2.23}$$

Išorinę apkrovą ir lenkiamąjį momentą sieja priklausomybė:

$$\frac{\mathrm{d}^2 M_0}{\mathrm{d}x^2} = -p\,. \tag{2.24}$$

Du kartus diferencijuojant (2.23) lygtį, gaunama išraiška:

$$\frac{\mathrm{d}^4 T}{\mathrm{d}x^4} - \mu \cdot \gamma \cdot \frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}x^2} - \frac{\mu \cdot a \cdot p}{\sum EI} = 0\,. \tag{2.25}$$

Išsprendus (2.25) lygtį, gaunama šlyties jėgos išraiška, kai išorinė veikianti apkrova yra dvi sutelktosios jėgos:

$$T = \frac{F \cdot x \cdot a}{\gamma \cdot \sum EI} \cdot \left[1 - \frac{ch\left(\lambda \cdot \left(0{,}5 \cdot l - x\right)\right)}{\lambda \cdot l_a \cdot ch\left(\lambda \cdot 0{,}5 \cdot l\right)} sh\left(\lambda \cdot l_a\right)\right]. \tag{2.26}$$

Gautosios lygties narius pažymėjus:

$$T_s = \frac{F \cdot x \cdot a}{\gamma \cdot \left(E_1 I_1 + E_2 I_2\right)}; \tag{2.27}$$

$$k(x) = 1 - \frac{ch\left(\lambda \cdot \left(0{,}5 \cdot l - x\right)\right)}{\lambda \cdot l_a \cdot ch\left(\lambda \cdot 0{,}5 \cdot l\right)} sh\left(\lambda \cdot l_a\right); \tag{2.28}$$

$$T = T_s \cdot k(x)\,. \tag{2.29}$$

čia T_s – šlyties jėga, kai strypai standžiai sujungti; $k(x)$ – koeficientas, įvertinantis standumą tarp dviejų strypų.

Žinant, kad lenkiamojo momento sukelto elemento ašies kreivis yra aprašomas lygtimi:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{\sum EI}\,. \tag{2.30}$$

Skerspjūvyje veikiančio momento lygtis yra:

$$M = M_0 - T \cdot a \,. \tag{2.31}$$

Strypų ašies kreivį galima užrašyti taip:

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} = \frac{T \cdot a - M_0}{\sum EI} \,. \tag{2.32}$$

Iš (2.32) galima išsireikšti (2.33) ir (2.34):

$$T = \frac{M_0}{a} + \frac{\sum EI}{a} \cdot \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} \,; \tag{2.33}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}x^2} = \frac{1}{a} \frac{\mathrm{d}^2 M_0}{\mathrm{d}x^2} + \frac{\sum EI}{a} \cdot \frac{\mathrm{d}^4 y}{\mathrm{d}x^4} \,. \tag{2.34}$$

Gautąsias išraiškas įstačius į (2.23), gaunama:

$$\frac{\mathrm{d}^2 M^0}{\mathrm{d}x^2} \cdot \frac{1}{\mu \cdot a} + \frac{\sum EI}{\mu \cdot a} \cdot \frac{\mathrm{d}^4 y}{\mathrm{d}x^4} = \frac{M_0 \gamma}{a} + \frac{\gamma \sum EI}{a} \cdot \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} - \frac{M_0}{\sum EI} \cdot a \,. \tag{2.35}$$

Sutraukus ir pertvarkius (2.35) lygties narius bei žinant (2.22) lygtį:

$$\frac{\mathrm{d}^4 y}{\mathrm{d}x^4} - \mu \cdot \gamma \cdot \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} = -\frac{\mathrm{d}^2 M_0}{\mathrm{d}x^2} \cdot \frac{1}{\sum EI} + \frac{M_0}{\sum EI} \cdot \mu \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right). \tag{2.36}$$

Kai pasidavumas tarp strypų be galo mažas, (2.36) lygtis įgauna išraišką:

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} = -\frac{M_0}{\gamma \cdot \sum EI} \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right). \tag{2.37}$$

Žinant (2.22) lygtį, naudojamas žymėjimas:

$$E_0 \cdot I_0 = \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{a^2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \left(E_1 I_1 + E_2 I_2 \right) \left(\frac{E_1 \cdot A_1 \cdot E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2} \right) = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + \frac{E_1 \cdot A_1 \cdot E_2 \cdot A_2 \cdot a^2}{E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}. \quad (2.38)$$

Tokiu atveju (2.36) lygtį galima perrašyti:

$$\frac{\mathrm{d}^4 y}{\mathrm{d}x^4} - \mu \cdot \gamma \cdot \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} = -\frac{\mathrm{d}^2 M_0}{\mathrm{d}x^2} \cdot \frac{1}{\sum EI} + \frac{M_0}{E_0 \cdot I_0} \cdot \mu \cdot \gamma . \quad (2.39)$$

Žinant išorinę apkrovą ir lenkiamąjį momentą siejančią priklausomybę (2.24), (2.39) lygtį galima užrašyti taip:

$$\frac{\mathrm{d}^4 y}{\mathrm{d}x^4} - \mu \cdot \gamma \cdot \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} = \frac{p}{\sum EI} + \frac{M_0}{E_0 \cdot I_0} \cdot \mu \cdot \gamma ; \quad (2.40)$$

$$\lambda^2 = \mu \cdot \gamma . \quad (2.41)$$

Kai išorinė apkrova yra dvi sutelktosios jėgos, (2.40) lygtis įgauna išraišką:

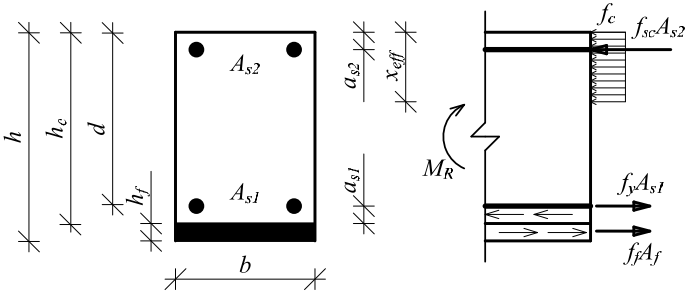
$$\frac{\mathrm{d}^4 y}{\mathrm{d}x^4} - \lambda^2 \cdot \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} = \frac{M_0}{E_0 \cdot I_0} \cdot \lambda^2 . \quad (2.42)$$

Išsprendus gautąją lygtį, gaunama didžiausiojo sijos įlinkio tarpatramio viduryje išraiška:

$$d = M \left(\frac{l^2}{8 E_0 \cdot I_0} + \left(\frac{1}{\sum EI} - \frac{1}{E_0 \cdot I_0} \right) \left(\frac{ch(0{,}5\lambda \cdot l) - 1}{\lambda^2 \cdot ch(0{,}5\lambda \cdot l)} \right) \right). \quad (2.43)$$

2.2. Gelžbetoninių elementų su išorine anglies pluošto armatūra įlinkių ir laikomosios galios skaičiavimo metodas

Sijų su išorine anglies pluošto armatūra laikomoji galia ir įlinkiai apskaičiuojami taikant 2.1 skyriuje pateiktą skaičiavimo metodiką.



2.2 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų anglies pluošto armatūra, skaičiuojamoji schema
Fig. 2.2. Design scheme of flexural reinforced concrete members strengthened with carbon fibre reinforcement

Sijų laikomoji galia apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$M_R = k(x) \cdot M_{RS}; \tag{2.44}$$

čia M_{RS} – gelžbetoninės sijos, sustiprintos išorine armatūra, laikomoji galia, kai jungtis tarp pluošto ir betono yra standi.

$$M_{RS} = f_f \cdot A_f \left(h - 0{,}5x_{eff} - 0{,}5h_f\right) + f_y \cdot A_{s1}\left(h_c - 0{,}5x_{eff} - a_{s1}\right). \tag{2.45}$$

Gniuždomosios zonos aukštis apskaičiuojamas taikant (2.46) lygtį:

$$x_{eff} = \frac{f_f \cdot A_f + f_y \cdot A_{s1} - f_{sc} \cdot A_{s2}}{f_c \cdot b_c}. \tag{2.46}$$

Koeficientas *k(x)* įvertina betono ir išorinės armatūros jungties standumą:

$$k(x) = 1 - \frac{ch(\lambda \cdot (0{,}5 \cdot l - x))}{\lambda \cdot l_a \cdot ch(\lambda \cdot 0{,}5 \cdot l)} sh(\lambda \cdot l_a). \quad (2.47)$$

Jungties standumą įvertinantis dydis λ apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\lambda = \sqrt{\mu \cdot \gamma}\,; \quad (2.48)$$

$$\mu = \frac{b_c \cdot G_{w,eff}}{a}\,; \quad (2.49)$$

$$\gamma = \frac{1}{E_{cm} \cdot A_{c,eff}} + \frac{1}{E_f \cdot A_f} + \frac{a^2}{E_{cm} \cdot I_{c,eff}}. \quad (2.50)$$

Jungties standumo šlyčiai charakteristika $G_{w,eff}$ nustatyta iš eksperimentinių tyrimų rezultatų (3.3.5. skyrius) ir gali būti apskaičiuojama taip:

$$G_{w,eff} = \frac{3k_1\beta}{E_f A_f} E_{cm},; \quad (2.51)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2{,}5 - \frac{b_f}{b_c}}{1{,}5 + \frac{b_f}{b_c}}}\,; \quad (2.52)$$

čia β – koeficientas, įvertinantis išorinės armatūros pločio įtaką, sustiprintų gelžbetoninių elementų darbui.

Sustiprintų sijų įlinkiai yra apskaičiuojami pagal (2.43) formulę:

$$d = M \cdot k_r \left(\frac{l^2}{8E_{eff} \cdot I_{eff}} + \frac{1}{D} \left(\frac{ch(0{,}5\lambda \cdot l) - 1}{\lambda^2 \cdot ch(0{,}5\lambda \cdot l)} \right) \right); \quad (2.53)$$

$$E_{eff} \cdot I_{eff} = E_{cm} \cdot I_{c,eff} + \frac{E_{cm} \cdot A_{c,eff} \cdot E_f \cdot A_f \cdot a^2}{E_{cm} \cdot A_{c,eff} + E_f \cdot A_f}; \tag{2.54}$$

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{c,eff}} - \frac{1}{E_{eff} \cdot I_{eff}}. \tag{2.55}$$

Gelžbetoninės sijos skerspjūvio su plyšiais inercijos momentas

$$I_{c,eff} = \frac{b \cdot x_{eff}^3}{3}. \tag{2.56}$$

Gniuždomosios zonos aukštis yra apskaičiuojamas:

$$x_{eff} = d\left(\sqrt{\rho^2 + \frac{\rho \cdot h}{d}} - \rho\right); \tag{2.57}$$

$$\rho = \rho_{s1} \cdot \alpha_{s1} + \rho_{s2} \cdot \alpha_{s2} + \rho_e \cdot \alpha_e; \tag{2.58}$$

$$\rho \cdot h = 2\left(\rho_{s1} \cdot \alpha_{s1} \cdot \left(h_c - a_{s1}\right) + \rho_{s2} \cdot \alpha_{s2} \cdot a_{s2} + \rho_e \cdot \alpha_e \cdot \left(h - 0{,}5h_f\right)\right). \tag{2.59}$$

2.3. Antrojo skyriaus išvados

Daugelio autorių taikoma sustiprintų sijų skaičiavimo metodika tiesiogiai neįvertina išorinės armatūros ir betono jungties šlyties deformacijų. Skaičiavimo modeliai grindžiami prielaida, kad jungtis tarp betono ir išorinės armatūros yra standi. Tačiau daugelio autorių bei mūsų atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad betono ir anglies pluošto jungtis yra dalinai standi. Jungties dalinis standumas turi didelę įtaką sustiprintų elementų įlinkiams ir laikomajai galiai. Siekiant tikslesnių skaičiavimo rezultatų, siūloma taikyti metodą, leidžiantį tiesiogiai įvertinti išorinės armatūros ir betono jungties standumą, apskaičiuojant sustiprintų elementų laikomąją galią ir įlinkius.

3

Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų su išorine anglies pluošto armatūra eksperimentiniai tyrimai

3.1. Bandinių medžiagos

VGTU Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedros laboratorijoje pagaminta 51 sija.

B grupės sijos buvo betonuojamos trimis etapais, todėl bandiniai išskirti į tris serijas. B1, B2, B3 serijų sijų betono ir plieninės strypinės armatūros mechaninės savybės pateiktos 3.1 ir 3.3 lentelėse.

S grupės sijos betonuotos dviem etapais. S1 ir S2 serijų bandinių betono ir plieninės strypinės armatūros mechaninės savybės pateiktos 3.1 ir 3.3 lentelėse.

HB grupės sijų betono mechaninės savybės pateiktos 3.1 lentelėje.

Bandinių betonas pagamintas Gelžbetonių ir mūrinių konstrukcijų katedros laboratorijoje.

Betono mechaninėms savybėms nustatyti pagaminti kontroliniai bandiniai: 100×100×100 mm kubai ir 100×100×400 mm prizmės.

Betono kubinis gniuždomasis stipris nustatytas gniuždant betoninius kubus pagal LST EN 12390-3 reikalavimus. Bandymų rezultatai pateikti suvestinėje 3.1 lentelėje.

Armatūros strypų mechaninės savybės nustatytos pagal LST EN 15630-1 reikalavimus. Tyrimų rezultatai pateikti suvestinėje 3.3 lentelėje.

Anglies pluošto stipriui ir tamprumo moduliui nustatyti pagaminti 30 cm ilgio, 5 cm pločio ir 0,167 mm storio bandiniai. Tyrimų rezultatai pateikti suvestinėje 3.2 lentelėje.

3.1 lentelė. Sijų betono savybės
Table 3.1. Concrete material properties of beams

Sijų serija	Gniuždomasis stipris f_c, MPa	Tamprumo modulis E_{cm}, GPa
HB	22,1	29,3
B1	35,0	31,3
B2	34,7	31,8
B3	24,1	30,1
S1	32,9	31,5
S2	38,3	34,1

3.2 lentelė. Sijų anglies pluošto savybės
Table 3.2. Carbon fibre reinforcement properties of beams

Sijų serija	Skerspjūvio plotas A_f, cm^2	Tempiamasis stipris f_f, MPa	Tamprumo modulis E_f, GPa
HB, B1, B2, B3	0,167	3851	232
S1, S2	0,167	3800	231

3.3 lentelė. Sijų plieninės strypinės armatūros savybės
Table 3.3. Steel bar reinforcement properties of beams

Sijų serija	Skersmuo Ø, mm	Plotas A_s, cm^2	Stipris f_y, MPa	Ribinis stipris f_u, MPa	Tamprumo modulis E_s, GPa
B1, B2	8	0,519	557	638	205
B1, B2	6	0,285	525	745	205
B3	8	0,486	567	664	205
B3	6	0,284	529	726	205
S1, S2	6	0,290	358	460	205

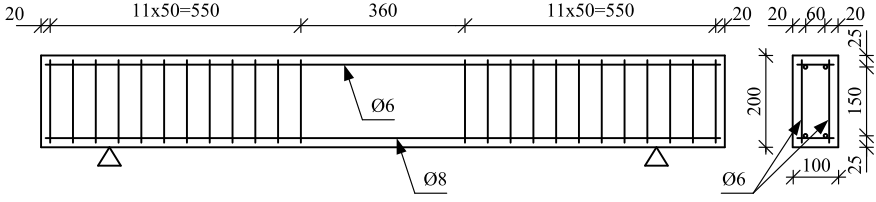
3.2. Bandinių ruošimo ir bandymo metodika

B ir S grupių bandinių eksperimentinių tyrimų tikslas yra: nustatyti, lenkiamųjų elementų įlinkius ir laikomąją galią; parinkti racionaliausią išorinės armatūros inkaravimo būdą; nustatyti betono stiprio ir išorinės anglies pluošto/strypinės plieninės armatūrų skerspjūvio plotų santykio įtaką sustiprintiems elementams.

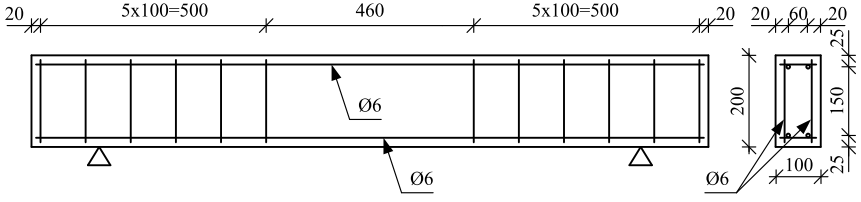
B ir S grupių gelžbetoninės sijos buvo gaminamos laboratorinėmis sąlygomis plieniniuose klojiniuose. Betonas tankintas ant vibracinio stalo. Projektiniai bandinių matmenys – 100×200×1500 mm. Sijų skerspjūvio matmenys pateikti 3.1 lentelėje.

Visų B grupės sijų gniuždomoji zona armuota 2Ø6 strypais, tempiamoji zona – 2Ø8 strypais, skersinė armatūra – 2Ø6 strypais, kai žingsnis – 50 mm (3.1 pav.).

S grupės bandinių armavimo gniuždomoji zona armuota 2Ø6 strypais, tempiamoji zona – 2Ø6 strypais, skersinė armatūra – 2Ø6 strypais, kai žingsnis – 100 mm (3.2 pav.).



3.1 pav. Sijų B armavimas plienine strypine armatūra
Fig. 3.1. Reinforcing details of B beams



3.2 pav. Sijų S armavimas plienine strypine armatūra
Fig. 3.2. Reinforcing details of S beams

Prieš klijuojant išorinę anglies pluošto armatūrą, sijų paviršius buvo atitinkamai paruoštas. Siekiant užtikrinti geresnę išorinės armatūros ir betono sukibtį, bandinių paviršius nuvalytas šlifavimo akmeniu ir metaliniu šepečiu. Nuo sijų paviršiaus papildomai nuvalytos dulkės ir bandinių vietose, kur klijuojama išori-

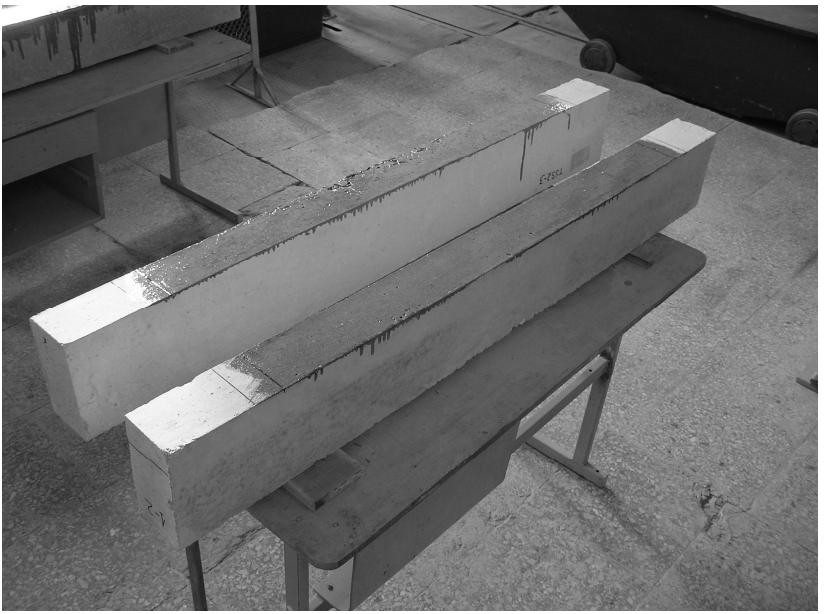
nė anglies pluošto armatūra, nuo paviršiaus nuvalyti riebalai. Gelžbetoninėms sijoms stiprinti naudotos MAPEI firmos anglies pluošto ir klijų medžiagos (3.3, 3.4, 3.5 pav.).

B ir S grupės sijų sustiprinimo anglies pluoštu būdai pateikti 3.4 lentelėje.

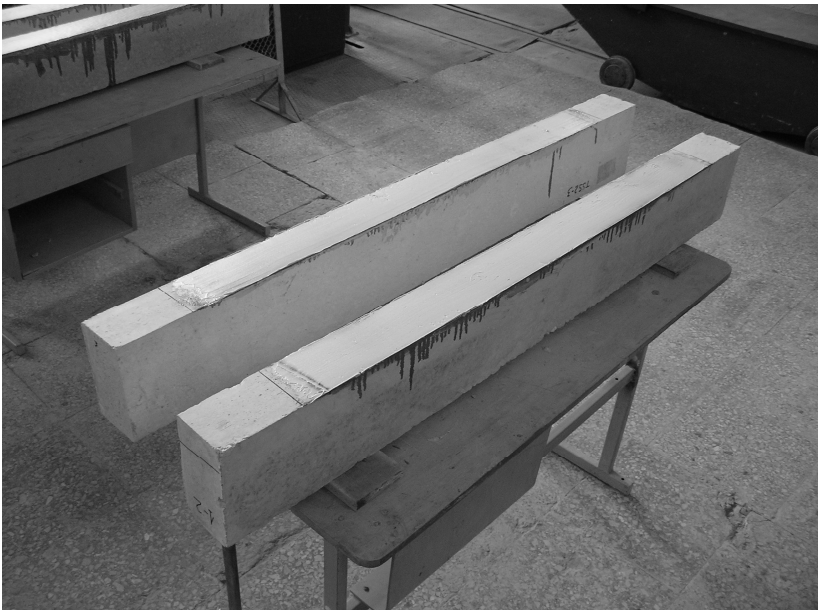
Kiekvienos serijos kontrolinės sijos BN1-1, BN2-1, BN3-1, SK6-1 nesustiprintos anglies pluoštu.

Bandiniai BR1-2, BR1-3, BR2-2, BR3-2, SB6-1, SB6-2 sustiprinti išorine anglies pluošto armatūra be papildomų anglies pluošto inkarų.

B1 serijos sijos BA1-4 ir BA1-5 išorine armatūra armuotos įrengiant T junges anglies pluoštui inkaruoti. B1 serijos sijų BS1-6, BS1-7 ir S serijos sijų SD6-1, SD6-1 išorinė armatūra buvo inkaruota anglies pluošto apkabomis, įrengtomis ties juostos galais. Išorinė armatūra buvo inkaruota naudojant metalines apkabas šiose sijose: BC1-8, BC1-9 bei B2 ir B3 serijose. B1 serijoje buvo naudojamos metalinės apkabos 50 cm^2 apspaudimo ploto, o B2 ir B3 serijose – 50, 100 ir 150 cm^2 apspaudimo ploto. B2 serijos bandinių anglies pluoštas inkaravimo zonoje metalinėmis apkabomis apspaustas skirtingais įtempiais – 0,5 MPa, 1 MPa, 2 MPa. S serijos bandiniuose SA6-1 ir SA6-1 išorinė anglies pluošto armatūra priklijuota per visą sijų ilgį. Sijų SC6-1 ir SC6-2 anglies pluoštas papildomai inkaruotas sijose įrengiant spraustelius.



3.3 pav. Sijų paviršiaus gruntavimas MAPE WRAP PRIMER 1
Fig. 3.3. Preparation of beams surface with MAPE WRAP PRIMER 1

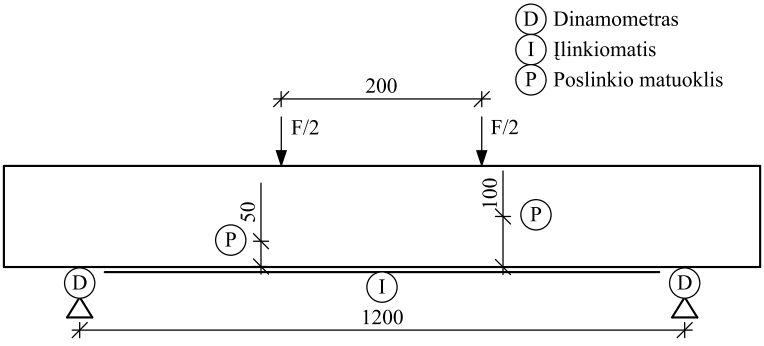


3.4 pav. Sijų paviršiaus padengimas išlyginamuoju sluoksniu MAPE WRAP11
Fig. 3.4. Preparation of beams surface with MAPE WRAP11



3.5 pav. Anglies pluošto klijavimas su MAPE WRAP11
Fig. 3.5. Gluing up of carbon fibre with MAPE WRAP11

Gelžbetoninės sijos buvo bandomos bandymų stende (3.9 pav.). Sijų tarpatramio ilgis – 1200 mm. Apkrovai suteikti naudotas vienas hidraulinis domkratas. Apkrova buvo keliama pakopomis. Išorinei apkrovai matuoti į sijų atramas buvo įstatyti elektroniniai dinamometrai (3.8 pav.). Sijų bandymo schema parodyta 3.6 paveiksle.

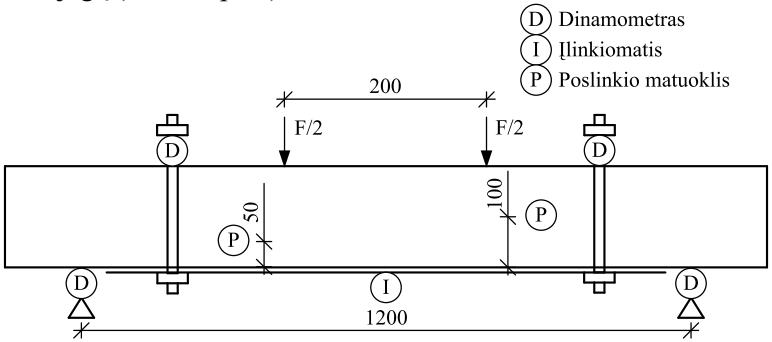


3.6 pav. Sijos bandymo ir įlinkių bei deformacijų matavimo prietaisų išdėstymo schema
Fig. 3.6. Scheme of test setup and instrumentation

Sijos įlinkis ir išorinės armatūros poslinkis betono atžvilgiu buvo matuojami elektroindukciniais indikatoriais, kurių rodmenis fiksavo automatizuota kompiuterinė įranga (3.9 pav.).

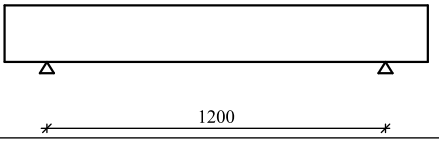
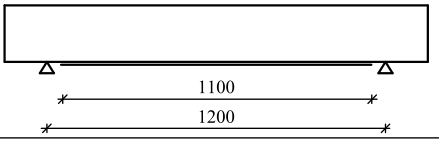
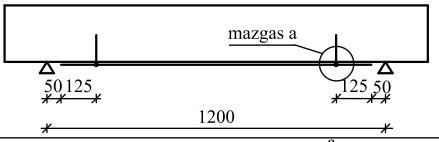
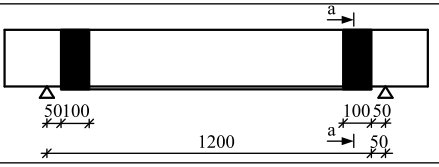
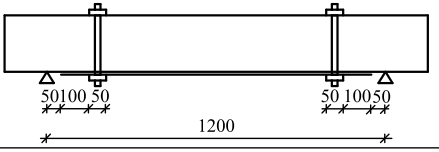
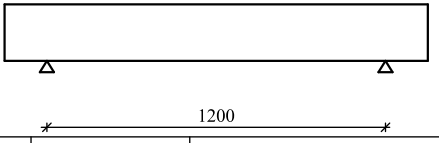
Bandant sijas taip pat buvo matuojamos tempiamosios ir gniuždomosios zonų betono, išorinės anglies pluošto armatūros deformacijos bei fiksuojamas plyšių susidarymo momentas, plyšių didėjimo pobūdis ir plotis.

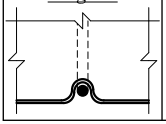
Sijoms, kurių anglies pluošto armatūra papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis, į apkabas buvo įdėti elektroniniai dinamometrai, siekiant nustatyti apspaudimo jėgą (3.7, 3.8 pav.).



3.7 pav. Sijos bandymo ir įlinkių bei deformacijų matavimo prietaisų išdėstymo schema (sijoms, kurių išorinė anglies pluošto armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis)
Fig. 3.7. Scheme of test setup and instrumentation (of beams whose external reinforcement is anchored with metal clamps)

3.4 lentelė. Sijų sustiprinimas anglies pluošto armatūra
Table 3.4. Strengthening details of beams with carbon fibre reinforcement

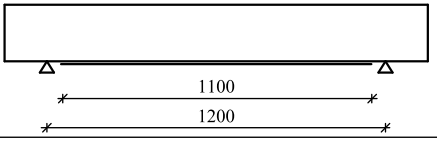
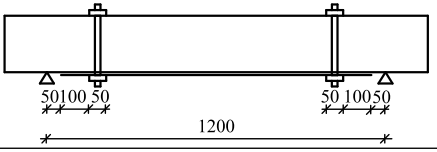
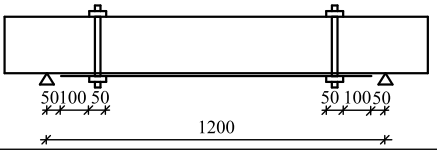
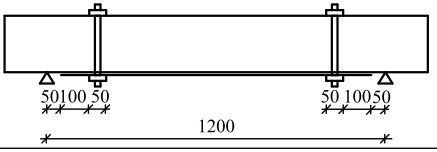
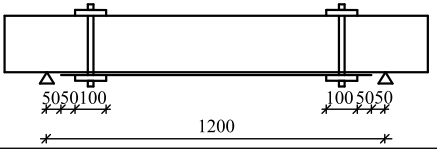
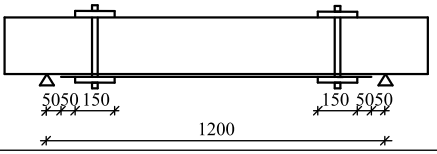
Sijos tipas	Sijos sustiprinimas anglies pluoštu	Skerspjūvio matmenys, mm		Anglies pluošto armatūros papildomas inkaravimas
		h	b	
Bandinių serija B1				
BN1-1		194	105	-
BR1-2		198	105	Papildomai neinkaruota
BR1-3		195	101	
BA1-4		193	104	Papildomai inkaruota metalinėmis T formos jungėmis
BA1-5		199	101	
BS1-6		193	104	Papildomai inkaruota U formos pluošto apkabomis
BS1-7		194	105	
BC1-8		199	104	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[1]
BC1-9		196	101	
Bandinių serija B2				
BN2-1		196	103	-





Pastabos
1. Apkabos: plotas 50 cm^2; apspaudimo lygis 1 MPa; varžtų skaičius 2 vnt.

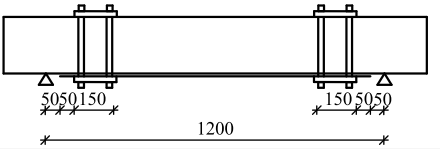
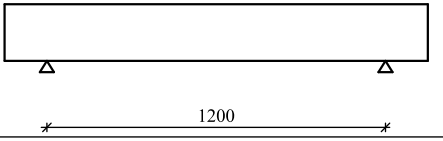
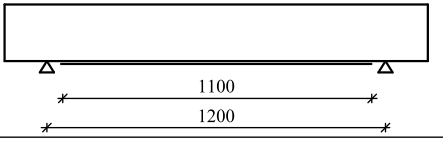
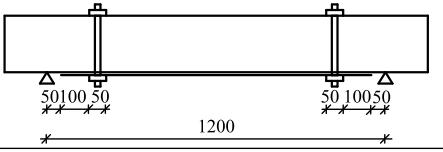
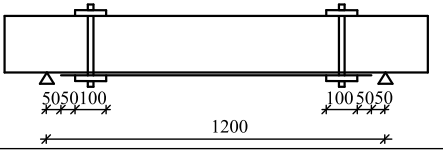
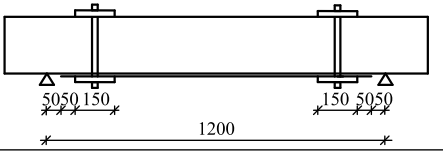
3.4 lentelės tęsinys

Sijos tipas	Sijos sustiprinimas anglies pluoštu	Skerspjūvio matmenys, mm		Anglies pluošto armatūros papildomas inkaravimas
		h	b	
BR2-2		195	104	Papildomai neinkaruota
BC2-3		194	103	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[1]
BC2-4		198	105	
BC2-5		197	105	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[2]
BC2-6		197	107	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[3]
BC2-7		196	104	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[4]
BC2-8		193	106	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[5]

Pastabos

1. Apkabos: plotas 50 cm^2; apspaudimo lygis 1 MPa; varžtų skaičius 2 vnt.
2. Apkabos: plotas 50 cm^2; apspaudimo lygis 0,5 MPa; varžtų skaičius 2 vnt.
3. Apkabos: plotas 50 cm^2; apspaudimo lygis 2 MPa; varžtų skaičius 2 vnt.
4. Apkabos: plotas 100 cm^2; apspaudimo lygis 1 MPa; varžtų skaičius 2 vnt.
5. Apkabos: plotas 150 cm^2; apspaudimo lygis 1 MPa; varžtų skaičius 2 vnt.

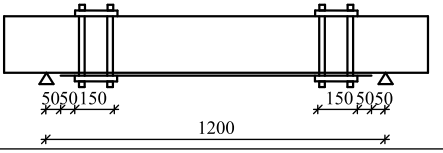
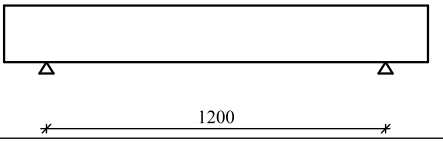
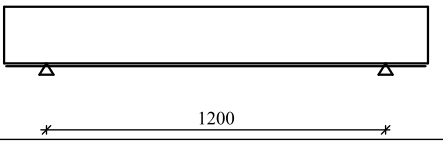
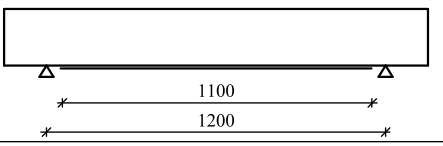
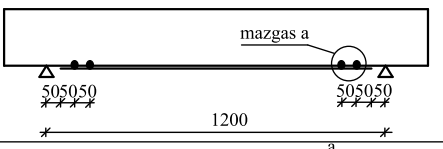
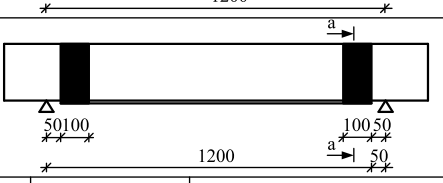
3.4 lentelės tęsinys

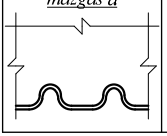
Sijos tipas	Sijos sustiprinimas anglies pluoštu	Skerspjūvio matmenys, mm		Anglies pluošto armatūros papildomas inkaravimas
		h	b	
BC2-9		196	104	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[1]
Bandinių serija B3				
BN3-1		195	104	-
BR3-2		191	102	Papildomai neinkaruota
BC3-3		196	106	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[2]
BC3-4		194	105	
BC3-5		198	107	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[3]
BC3-6		196	104	
BC3-7		195	106	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[4]
BC3-8		197	105	

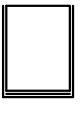
Pastabos

1. Apkabos: plotas 150 cm^2; apspaudimo lygis 1 MPa; varžtų skaičius 4 vnt.
2. Apkabos: plotas 50 cm^2; apspaudimo lygis 1 MPa; varžtų skaičius 2 vnt.
3. Apkabos: plotas 100 cm^2; apspaudimo lygis 1 MPa; varžtų skaičius 2 vnt.
4. Apkabos: plotas 150 cm^2; apspaudimo lygis 1 MPa; varžtų skaičius 2 vnt.

3.4 lentelės pabaiga

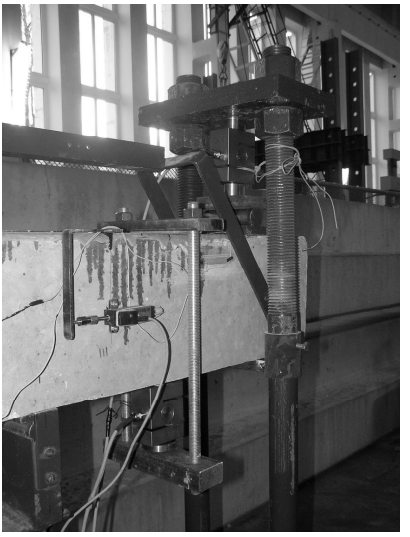
Sijos tipas	Sijos sustiprinimas anglies pluoštu	Skerspjūvio matmenys, mm		Anglies pluošto armatūros papildomas inkaravimas
		h	b	
BC3-9		194	101	Papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis[1]
BC3-10		197	104	
Bandinių serija S				
SK6-1		196	102	-
SA6-1		197	102	Pluoštas užleistas už atramų
SA6-2		195	102	
SB6-1		193	101	Papildomai neinkaruota
SB6-2		196	102	
SC6-1		196	104	Papildomai inkaruota sprausteliais
SC6-2		197	104	
SD6-1		196	104	Papildomai inkaruota U formos pluošto apkabomis
SD6-2		195	106	





Pastabos

1. Apkabos: plotas 150 cm^2; apspaudimo lygis 1 MPa; varžtų skaičius 4 vnt.



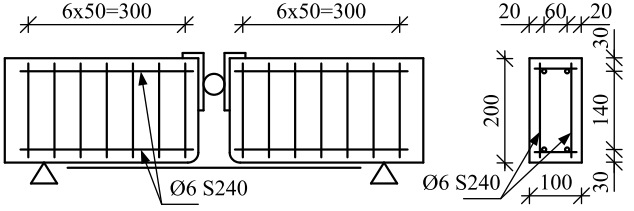
3.8 pav. Elektroniniai dinamometrai sijų atramose ir apkabose
Fig. 3.8. Electronic dynamometers in metal clamps and supports of beams



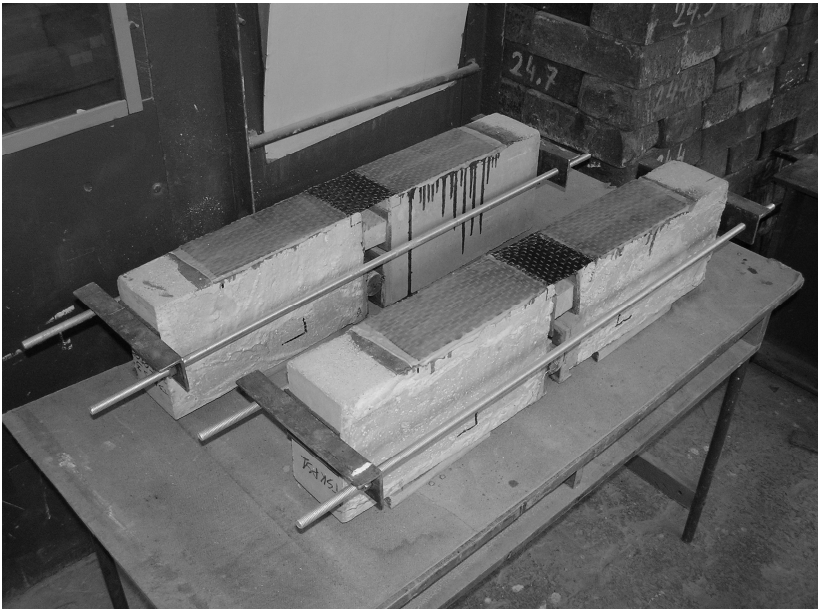
3.9 pav. Sijų bandymo įranga
Fig. 3.9. Test setup

HB grupės bandinių eksperimentinio tyrimo tikslas yra nustatyti išorinės anglies pluošto armatūros ir stiprinamo elemento jungties šlyties deformacijas ir įtempių pasiskirstymą.

Bandiniai pagaminti laboratorijoje, betonuojant plieniniuose klojiniuose. Sijų projektiniai matmenys 100×200×400(×2). Bandinių betono, išorinės armatūros mechaninės savybės pateiktos 3.1 ir 3.3 lentelėse. Sijų armavimas plienine strypine armatūra yra vienodas – 2Ø6 S240 klasės strypais (3.10 pav.).



3.10 pav. Sijų HB armavimas plienine strypine armatūra
Fig. 3.10. Reinforcing details of HB beams



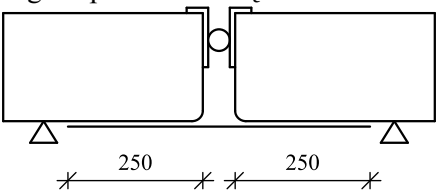
3.11 pav. HB bandiniai su priklijuotu anglies pluoštu
Fig. 3.11. HB specimens with carbon fibre reinforcement

HB sijų paviršiaus paruošimo eiga, prieš klijuojant išorinę armatūrą, tokia pat kaip ir ruošiant B bei S grupės sijas. Tik HB bandiniuose tempiamojoje zo-

noje esantis kampas užapvalintas 2 cm spinduliu. Tai atlikta siekiant, kad bandymo metu išorinė anglies pluošto armatūra nebūtų kerpama.

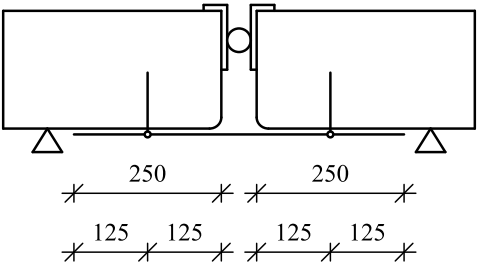
Prieš klijuojant anglies pluoštą bandiniai buvo sutvirtinti laikinomis metalinėmis apkabomis. Tolesnis išorinės armatūros klijavimo procesas nesiskiria nuo anksčiau aprašytojo (3.11 pav.).

Kontroliniai bandiniai HBS-1, HBS-2 sustiprinti išorine anglies pluošto armatūra be papildomų anglies pluošto inkarų.



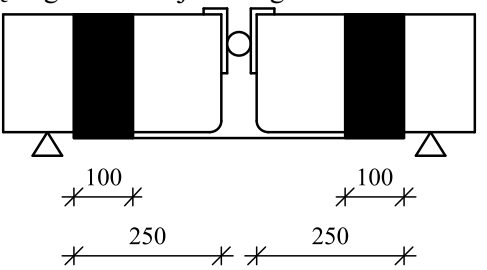
3.12 pav. Sijos HBS-1, HBS-2
Fig. 3.12. Beams HBS-1, HBS-2

HBA-1, HBA-2 sijos sustiprintos anglies pluošto armatūra įrengiant T formos junges išorinei armatūrai inkaruoti.



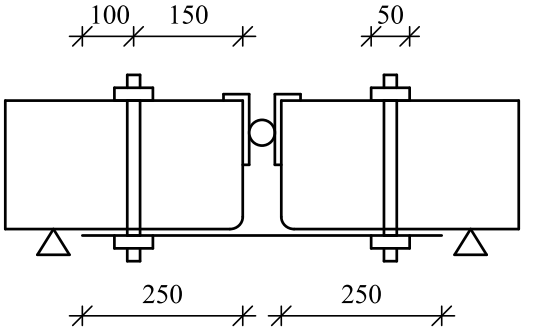
3.13 pav. Sijos HBA-1, HBA-2
Fig. 3.13. Beams HBA-1, HBA-2

HBW-1 ir HBW-2 serijos sijų išorinė armatūra buvo inkaruota anglies pluošto apkabomis, įrengtomis ties juostos galais.

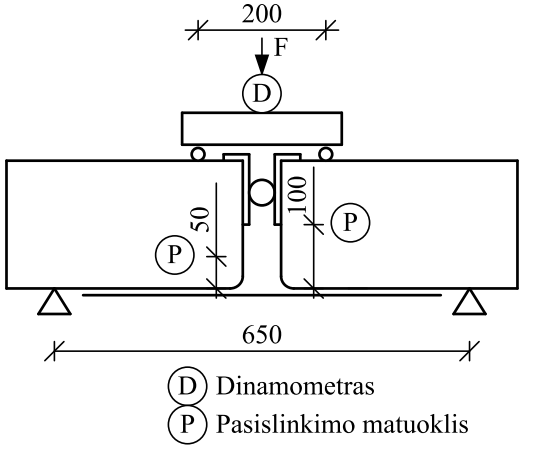


3.14 pav. Sijos HBW-1, HBW-2
Fig. 3.14. Beams HBW-1, HBW-2

Išorinė armatūra buvo inkaruota naudojant metalines apkabas šiose sijose: HBC1-5, HBC2-5, HBC2-7, HBC4-7, HBC5-9, HBC6-9. Serijose panaudotos metalinės 50 cm^2 apspaudimo ploto apkabos.



3.15 pav. Sijos HBC1-5, HBC2-5, HBC2-7, HBC4-7, HBC5-9, HBC6-9
Fig. 3.15. Beams HBC1-5, HBC2-5, HBC2-7, HBC4-7, HBC5-9, HBC6-9

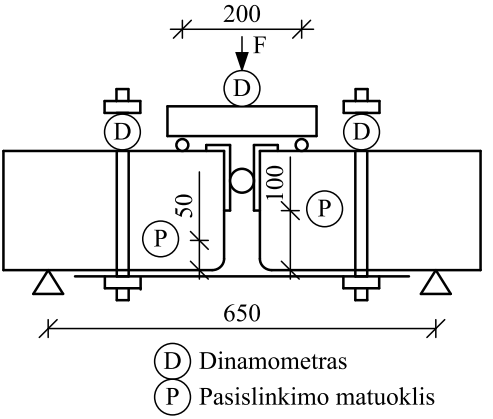


3.16 pav. Sijų bandymo schema
Fig. 3.16. Scheme of test setup and instrumentation

HB sijų bandymo įranga pavaizduota 3.16 paveiksle. Bandymo metu apkrova suteikiama presu, kuris buvo valdomas ALMEMO pultu. Apkrova buvo keliama pakopomis.

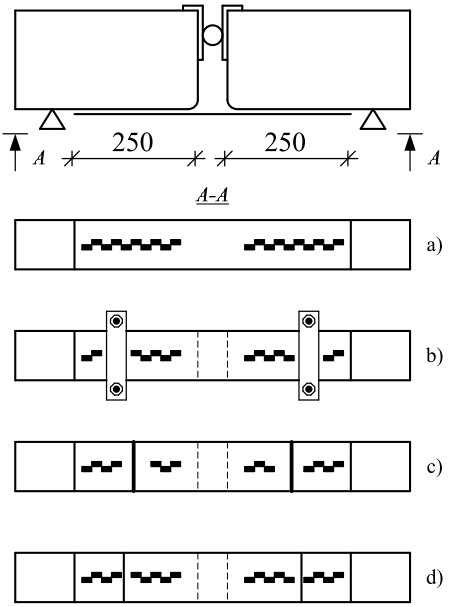
Kaip ir B grupės sijose, HBC bandiniuose, kurių išorinė anglies pluošto armatūra papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis, į apkabas įstatyti elektroniniai dinamometrai apspaudimo jėgai nustatyti (3.17 pav.). Jutiklių išdėstymas, priklausomai nuo išorinės armatūros inkaravimo būdų, pateiktas 3.18 paveiksle.

Visi bandymo duomenys buvo įrašomi į automatizuotą ALMEMO įrangą (3.19 pav.).



3.17 pav. Sijų bandymo schema (sijų, kurių išorinė anglies pluošto armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis)

Fig. 3.17. Scheme of test setup and instrumentation (of beams whose external reinforcement is anchored with metal clamps)



3.18 pav. Jutiklių išdėstymas: a – HBS bandinių; b – HBC bandinių; c – HBA bandinių; d – HBW bandinių

Fig. 3.18. Position of strain gauges of: a – HBS specimens; b – HBC specimens; c – HBC specimens; d – HBW specimens



3.19 pav. Sijų bandymo vaizdas
Fig. 3.19. Test setup

3.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai

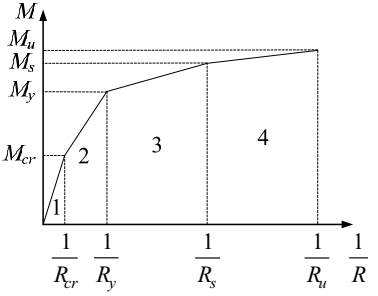
3.3.1. Anglies pluoštu sustiprintų gelžbetoninių elementų darbo modelis

Skirtingai, nei kiti autoriai teigia (1.3 skyrius), lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra, darbe galima išskirti keturis etapus: 1 – elemento darbą iki pirmųjų plyšių atsivėrimo; 2 – nuo plyšių atsivėrimo iki takumo įtempių pasireiškimo strypinėje armatūroje; 3 – strypinei plieninei armatūrai tekant; 4 – viršijus takumo įtempius strypinėje armatūroje (3.20 pav.).

Pirmajame darbo etape lenkiamasis elementas dirba tampriai. Sijų labiausiai tempiamo sluoksnio plokštuma yra visa padengta išorine armatūra. Todėl sustiprintame gelžbetoniniame elemente su suvaržyta tempiamąja zona gerokai padidėja plyšių susidarymo momentas.

Atsivėrus plyšiams, konstrukcija pereina į antrąjį darbo etapą. Visą tempiamosios zonos paviršių dengiantis anglies pluoštas neleidžia vystytis plyšiams – plyšių plotis ir aukštis didėja nedaug. Dėl šios priežasties kiek sumažėja skersp-

jūvio standumas. Tai reiškia, kad išorine armatūra sustiprintų sijų standumas yra didesnis už įprastų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų standumą.



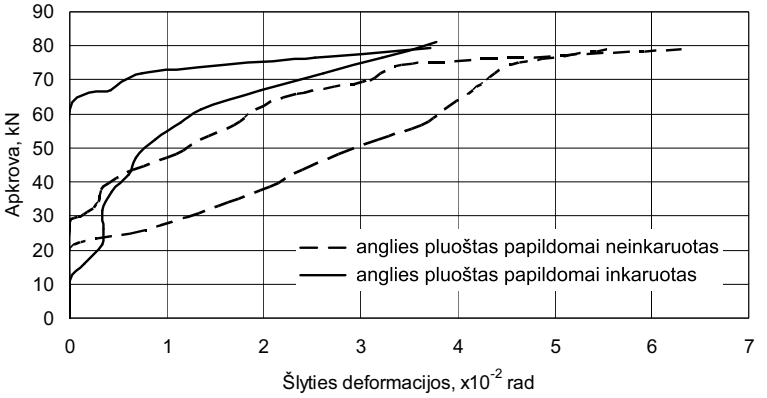
3.20 pav. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra, momento-kreivio grafikas
Fig 3.20. Moment–curvature curve of flexural reinforced concrete members strengthened with external carbon fibre reinforcement

Tempiamojoje zonoje esančios plieninės strypinės armatūros stipris dažniausia yra mažesnis už anglies pluošto stiprį, todėl tempiamojoje plieno armatūroje pasiekiami takumo įtempiai. Pasiekus strypinės armatūros takumo įtempius, konstrukcija pereina į trečiąją darbo stadiją. Šiame etape didžiąją tempiamosios zonos įtempių dalį perima anglies pluoštas. Didėjant apkrovai, susiformavusių plyšių zonose atsiranda horizontalių plyšių, kurie ilgėja anglies pluošto ir betono jungties paviršiumi, apimdami ir tą dalį, kurioje klijai įsigėrė į betoną.

Ketvirtajame darbo etape, kai strypinėje armatūroje viršijami takumo įtempiai, įtempiai joje didėja nedaug ir beveik visą tempimo įtempių padidėjimą perima išorinė armatūra.

Ruošiant bandinius tyrimams, anglies pluoštas prie gelžbetoninių sijų yra priklijuotas epoksidiniais klijais. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad klijų tamprumo ir šlyties moduliai yra 3–10 kartų mažesni už betono tamprumo ir šlyties modulius. Todėl anglies pluoštą priklijavus sijų tempiamoje zonoje, pasireiškia šlyties deformacijos. Dėl šių deformacijų išorinė armatūra pasislenka betono atžvilgiu.

Siekiant visiškai išnaudoti mechanines išorinės armatūros savybes, būtina užtikrinti anglies pluošto ir betono jungties stiprį. Tai galima pasiekti papildomai inkaruojant išorinę armatūrą. Papildomas armatūros inkaravimas turi didelę įtaką išorinės armatūros pasislinkimui betono atžvilgiu (3.21 pav.). Eksperimento metu anglies pluošto ir betono jungies šlyties deformacijos pastebimos atsivėrus pirmiesiems plyšiams. Sijų su inkaruotu anglies pluoštu ir sijų be papildomo inkaravimo šlyties deformacijos visose apkrovimo pakopose labai skiriasi.



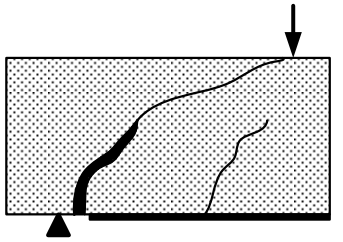
3.21 pav. Šlyties deformacijos, kai išorinė armatūra papildomai neinkaruota ir kai išorinė armatūra papildomai inkaruota
Fig. 3.21. Shear strain of beams with and without additional anchorage of external reinforcement

Sijos, kurių anglies pluoštas papildomai neinkaruotas, suyra atplėšiant išorinės armatūros juostos galą, su betono sluoksniu. Papildomas išorinės armatūros inkaravimas turi įtakos sijų suirimo pobūdžiui. Sustiprintos sijos su papildomai inkaruota išorine armatūra suyra trūkstant anglies pluoštui.

Lenkiamuosiuose anglies pluoštu sustiprintuose elementuose, skirtingai nei įprastuose gelžbetoniniuose elementuose, yra trys pavojingi pjūviai: statmenasis, įstrižasis ir horizontalusis.

Statmenajame pjūvyje elementai gali suirti suardant gniuždomosios zonos betoną arba trūkstant išorinei armatūrai:

- betonas suyra gniuždomojoje zonoje, išorinei armatūrai išliekant nepažeistai;
- anglies pluoštas trūksta tada, kai išorinė armatūra yra gerai inkaruota, ir elementai yra neperarmuoti tiek išorine, tiek strypine plienine armatūra.

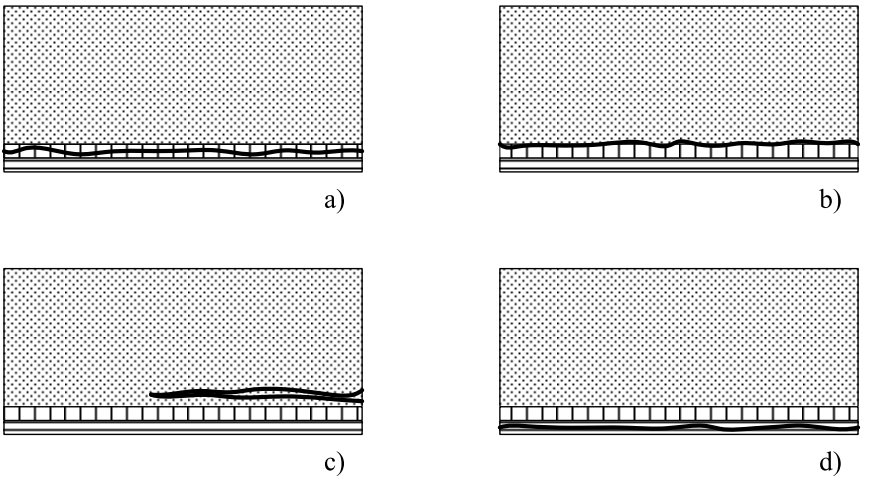


3.22 pav. Suirtis įstrižajame pjūvyje
Fig. 3.22. Shear failure

Lenkiamieji gelžbetoniniai elementai, sustiprinti išorine armatūra, gali suirti įstrižajame pjūvyje, jei yra nepakankamas skersinės armatūros kiekis (3.22 pav.).

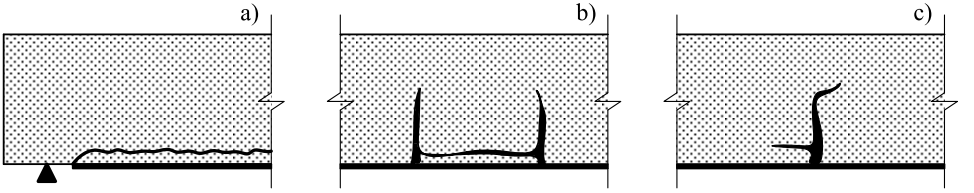
Anglies pluoštu sustiprinti elementai horizontaliajame pjūvyje gali suirti (3.23 pav.):

- – per klijų sluoksnį (3.23 pav., a);
- – per betono ir klijų paviršių (3.23 pav., b);
- – per betoną (3.23 pav., c);
- – išorinės armatūros sluoksnyje (3.23 pav., d).



3.23 pav. Suirimas: a – per klijus; b – per klijų ir betono paviršių; c – per betoną; d – per išorinę armatūrą

Fig. 3.23. Failure mode: a – failure through the adhesive layer; b – interfacial debond failure; c – concrete cover separation; d – fiber fracture



3.24 pav. Suirtis: a – armatūros galo atplėšimas; b – dėl normalinių plyšių; c – dėl įstrižųjų plyšių

Fig. 3.24. Failure mode: a – end peeling; b – peeling caused by flexural cracks; c – peeling caused by shear cracks

Suirtis per betoną yra vienas dažniausių suirimo pobūdžių. Galimi trys šio suirimo tipai: išorinės armatūros galo atplėšimas kartu su betono sluoksniu dėl įtempių koncentracijos anglies pluošto gale (3.24 pav., a); suirimas dėl normalinių arba įstrižųjų plyšių, kurie atsiranda lenkiamojo elemento tarpatramyje ir vystosi išorinės armatūros juostos galo link (3.24 pav., b, c).

Suirimas klijų sluoksnyje gali įvykti tada, kai klijų stipris yra daug mažesnis už betono stiprį, o sluoksnio storis yra gana didelis.

Pagrindinis veiksnys, turintis įtakos sustiprintos sijos suirimui betono ir klijų paviršiuje, yra betono paviršiaus paruošimas prieš klijuojant išorinę armatūrą.

Suirimas išorinės armatūros sluoksnyje yra gan retas. Šis suirimo pobūdis galimas tik tada, kai išorinė armatūra pažeista gamybos ar stiprinimo proceso metu.

3.3.2. Gelžbetoninių sijų su išorine anglies pluošto armatūra eksperimentiniai įlinkiai ir šlyties deformacijos

Siekiant nustatyti skirtingų išorinės armatūros inkaravimo būdų įtaką sustiprintų sijų darbui, buvo išbandytos trisdešimt septynios gelžbetoninės sijos (B ir S grupių bandiniai). Tyrimų metu bandytose sijose išorinė anglies pluošto armatūra sudarė 17 % (B grupės sijos) ir 29 % (S grupės sijos) tempiamojoje zonoje esančios strypinės plieno armatūros ploto. Gelžbetoninių sijų armavimo procentas anglies pluoštu – 0,08 %.

Visų anglies pluoštu sustiprintų sijų tyrimų rezultatai rodo (kaip buvo minėta ankstesniame skyriuje), kad iki plyšių atsivėrimo išorinė armatūra ir betonas dirba tampriai ir kartu. Šiame darbo etape nepastebėta anglies pluošto ir betono jungties deformacijų.

Antrame darbo etape (atsivėrus plyšiams) visų sijų įlinkiai didėja sparčiau, nes sumažėja supleišėjusių sijų standumas bei pasireiškia šlyties deformacijos tarp anglies pluošto ir betono. Tai galima pastebėti ne tik apkrovos ir įlinkių kreivėse, bet ir analizuojant išorinės armatūros ir betono jungties šlyties deformacijų grafikus, pateiktus šiame skyriuje.

Trečiame darbo etape tempiamosios zonos strypinei armatūrai pasiekus takumo įtempius, apkrovos ir įlinkių grafikuose pastebimas lūžis, įlinkių prieaugis gerokai padidėja. Išorinės armatūros apkrovos ir šlyties deformacijų grafikuose taip pat pastebimas lūžis, anglies pluošto ir betono jungties šlyties deformacijos labai padidėja, didėjant apkrovai. Tai galima paaiškinti tuo, kad didžiąją tempiamosios zonos įtempių prieaugio dalį perima anglies pluoštas. Be to, toliau didėjant susiformavusiems ir atsiveriant naujiems horizontaliems plyšiams, pažeidžiama jungtis tarp išorinės armatūros ir betono.

Ketvirtajame darbo etape (S grupės bandiniai), kai strypinėje armatūroje viršijami takumo įtempiai, įlinkių prieaugis dar padidėja, nes įtempiai strypinėje

armatūroje didėja nedaug ir beveik visą tempimo įtempių padidėjimą perima išorinė armatūra.

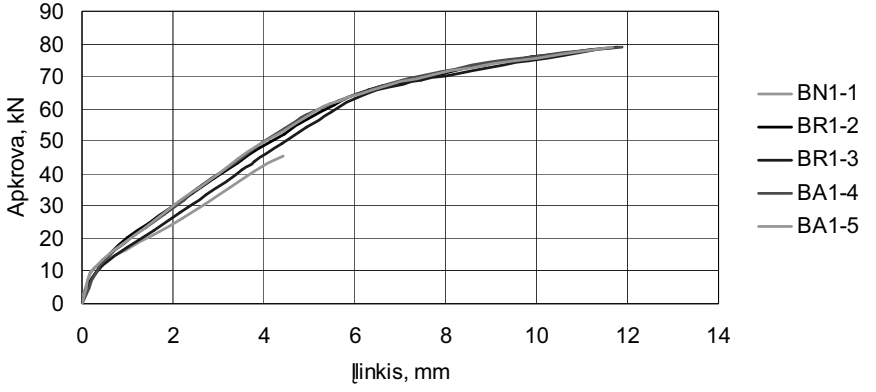
Sijos BR1-2 ir BR1-3, sustiprintos anglies pluoštu (išorinė armatūra papildomai neinkaruota), įlinksta vidutiniškai 26 % mažiau nei nesustiprinta sija BN1-1, kai apkrova $0{,}5F_u$ sijos BN1-1 ardančiosios apkrovos. Apkrovai padidėjus iki $0{,}9F_u$, BR1 sijos įlinksta vidutiniškai 15 % mažiau nei sija BN1-1.

Sijos BA1-4 ir BA1-5, kurių anglies pluošto armatūra inkaruota metalinėmis T formos jungėmis, esant apkrovai $0{,}5F_u$ sijos BN1-1 ardančiosios apkrovos, įlinksta vidutiniškai 33 % mažiau nei BN1-1 sija be išorinės armatūros (3.25 pav.). Kai apkrova siekia iki $0{,}9F_u$, BA1 sijos įlinksta vidutiniškai 24 % mažiau nei sija BN1-1.

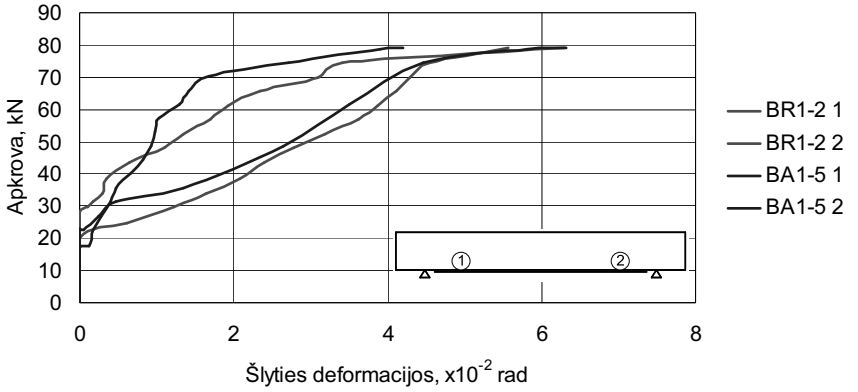
Tyrimai parodė, kad išorinę armatūrą inkaravus pluošto apkabomis, sijos BS1-6 ir BS1-7, kai apkrova $0{,}5F_u$ sijos BN1-1 ardančiosios apkrovos, įlinksta vidutiniškai 55 % mažiau nei kontrolinė sija be išorinio armavimo (3.27 pav.). Apkrovai padidėjus iki $0{,}9F_u$, BS1 sijos įlinksta vidutiniškai 31 % mažiau nei sija BN1-1.

Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad sijos BC1-8 ir BC1-9, kurių išorinė anglies pluošto armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis (pluošto apspaudimo plotas 50 cm^2, apspaudimo lygis 1 MPa), įlinksta vidutiniškai 42 % mažiau nei BN1-1 sija be išorinės armatūros, kai apkrova $0{,}5F_u$ sijos BN1-1 ardančiosios apkrovos (3.29 pav.). Apkrovai siekiant $0{,}9F_u$, BC1 sijos įlinksta vidutiniškai 30 % mažiau nei sija BN1-1.

Sustiprintų sijų įlinkių skirtumo mažėjimą, lyginant su nesustiprinta sija, galima paaiškinti tuo, kad susidarius ir vystantis plyšiams, sumažėja sijų standumas, pasireiškia šlyties deformacijos jungtyje tarp betono ir anglies pluošto.

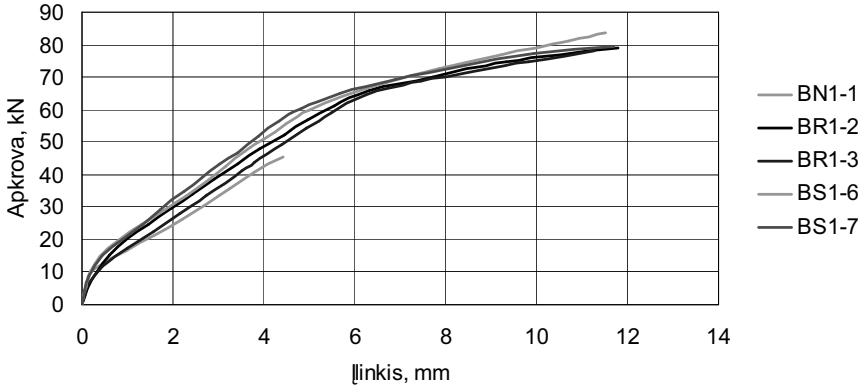


3.25 pav. Sijų BN1-1, BR1-2, BR1-3, BA1-4, BA1-5 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.25. Load-deflection curves of beams BN1-1, BR1-2, BR1-3, BA1-4, BA1-5

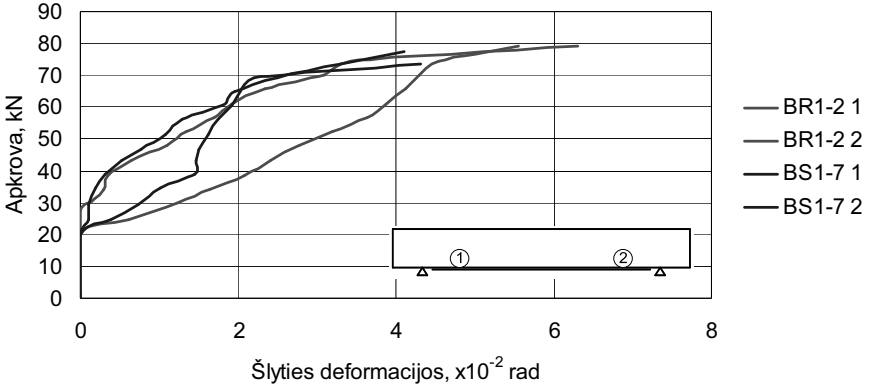


3.26 pav. Sijų BR1-2, BA1-5 apkrovos ir šlyties deformacijų grafikai
Fig. 3.26. Load-shear curves of beams BR1-2, BA1-5

Lyginant BA1 (anglies pluošto armatūra inkaruota metalinėmis T formos jungėmis) ir BR1 (anglies pluošto armatūra papildomai neinkaruota) sijų įlinkius, kai apkrova $0{,}5F_u$ bandinių ardančiosios apkrovos, gaunama toks įlinkių skirtumas: BA1 serijos bandiniai įlinksta vidutiniškai 8 % mažiau nei BR1 sijos. Apkrovai padidėjus iki $0{,}9F_u$, BA1 ir BR1 bandinių įlinkiai vienodi. Tokius tyrimų rezultatus galima paaiškinti tuo, kad išorinės armatūros inkaravimas T formos metalinėmis jungėmis daug nepadidina anglies pluošto ir betono jungties stiprio. Tai rodo ir apkrovos bei šlyties deformacijų grafikas (3.26 pav.).

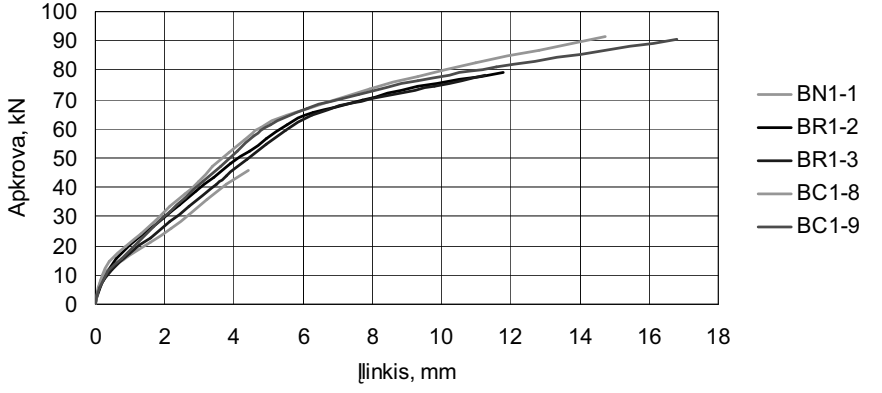


3.27 pav. Sijų BN1-1, BR1-2, BR1-3, BS1-6, BS1-7 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.27. Load-deflection curves of beams BN1-1, BR1-2, BR1-3, BS1-6, BS1-7

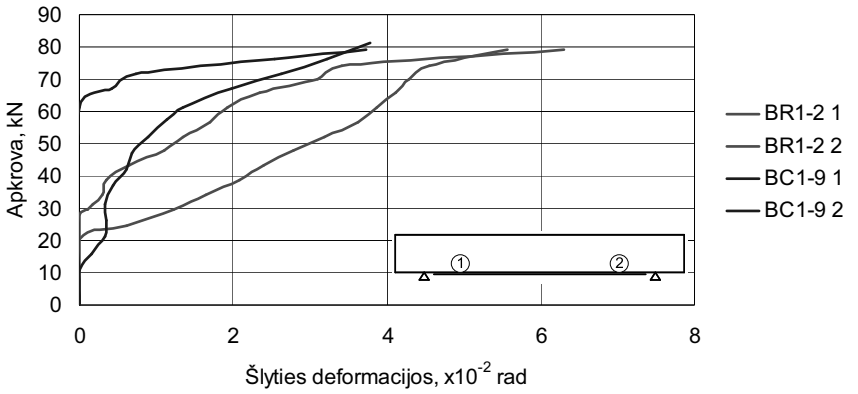


3.28 pav. Sijų BR1-2, BS1-7 apkrovos ir šlyties deformacijų grafikai
Fig. 3.28. Load-shear curves of beams BR1-2, BS1-7

BS1-6 ir BS1-7 sijos, kurių išorinė armatūra inkaruota pluošto apkabomis, įlinksta vidutiniškai 15 % mažiau nei bandiniai BR1-2 ir BR1-3, kurių anglies pluošto armatūra papildomai neinkaruota (apkrova $0{,}5F_u$ bandinių ardančiosios apkrovos). Kai apkrova padidėja iki $0{,}9F_u$, BS1 sijos įlinksta vidutiniškai 11 % mažiau nei kontroliniai bandiniai BR1 (3.27 pav.).



3.29 pav. Sijų BN1-1, BR1-2, BR1-3, BC1-8, BC1-9 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.29. Load-deflection curves of beams BN1-1, BR1-2, BR1-3, BC1-8, BC1-9



3.30 pav. Sijų BR1-2, BC1-9 apkrovos ir šlyties deformacijų grafikai
Fig. 3.30. Load-shear curves of beams BR1-2, BC1-9

Gauti rezultatai rodo, kad kai apkrovimo lygis $0{,}5F_u$ bandinių BR1 ardančiosios apkrovos, BC1 bandiniai (išorinė anglies pluošto armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis) įlinksta vidutiniškai 15 % mažiau nei kontroliniai bandiniai be papildomo išorinės armatūros inkaravimo (BR1-2 ir BR1-3). Kai apkrovimo lygis siekia $0{,}9F_u$ bandinių BR1 ardančiosios apkrovos, BC1 sijų įlinkiai vidutiniškai 14 % mažesni nei BR1 sijų.

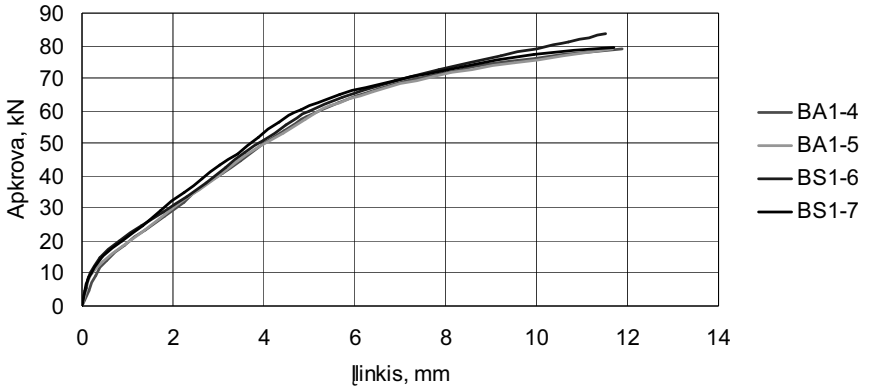
Tokie įlinkių rezultatai paaiškinami tuo, kad išorinės armatūros inkaravimas metalinėmis apkabomis veiksmingiausiai sumažina jungties šlyties deformacijas (3.30 pav.).

Siekiant nustatyti išorinės armatūros papildomų inkaravimo būdų įtaką, buvo palyginti BC, BA ir BS sijų įlinkiai. Nustatyta, kad kai apkrova $0{,}5F_u$ sijų BA1 ardančiosios apkrovos, BC1 serijos bandiniai (anglies pluoštas inkaruotas metalinėmis apkabomis) įlinksta vidutiniškai 6 % mažiau nei BA1-4 ir BA1-5 bandiniai, kurių anglies pluoštas inkaruotas T formos jungėmis. Apkrovai padidėjus iki $0{,}9F_u$ bandinių BA1 ardančiosios apkrovos, BC1-8 ir BC1-9 įlinksta vidutiniškai 11 % mažiau nei bandiniai BA1-4 ir BA1-5 (3.32 pav.).

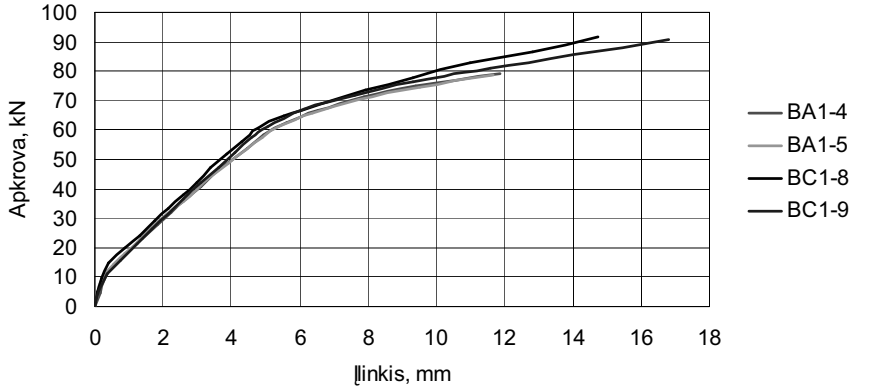
Tyrimai rodo, kad apkrovai siekiant $0{,}5F_u$ sijų ardančiosios apkrovos, sijų BS1, kurių išorinė armatūra inkaruota pluošto apkabomis, įlinkiai yra vidutiniškai 6 % mažesni nei BA1 sijų, kurių išorinė anglies pluošto armatūra inkaruota T formos jungėmis. Apkrovai pasiekus $0{,}9F_u$ sijų ardančiosios apkrovos, BS1 serijos bandiniai įlinksta vidutiniškai 8 % mažiau nei bandiniai BA1-4 ir BA1-5 (3.31 pav.).

Bandinių, kurių išorinė armatūra inkaruota pluošto (BS1 sijos) ir metalinėmis apkabomis(BC1 sijos), įlinkiai yra panašūs. Kai apkrova siekia $0{,}5F_u$ ir

$0{,}9F_u$ sijų BS1 ardančiosios apkrovos, BS1 ir BC1 serijų bandiniai įlinksta vienodai (3.33 pav.).

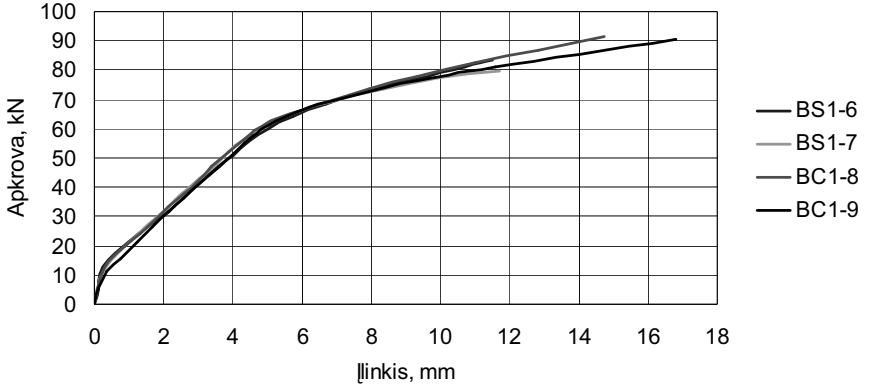


3.31 pav. Sijų BA1-4, BA1-5, BS1-6, BS1-7 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.31. Load-deflection curves of beams BA1-4, BA1-5, BS1-6, BS1-7



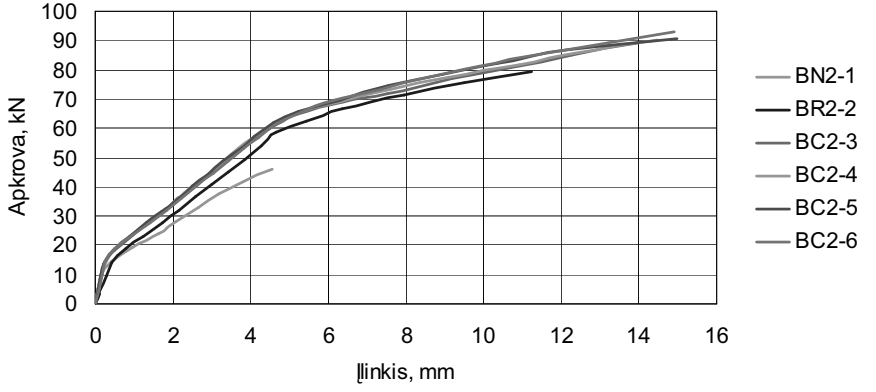
3.32 pav. Sijų BA1-4, BA1-5, BC1-8, BC1-9 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.32. Load-shear curves of beams BA1-4, BA1-5, BC1-8, BC1-9

Tyrimo rezultatai rodo, kad veiksmingiausi išorinės armatūros inkaravimo būdai – inkaravimas metalinėmis ir pluošto apkabomis, neveiksmingiausi – inkaravimas metalinėmis jungėmis.



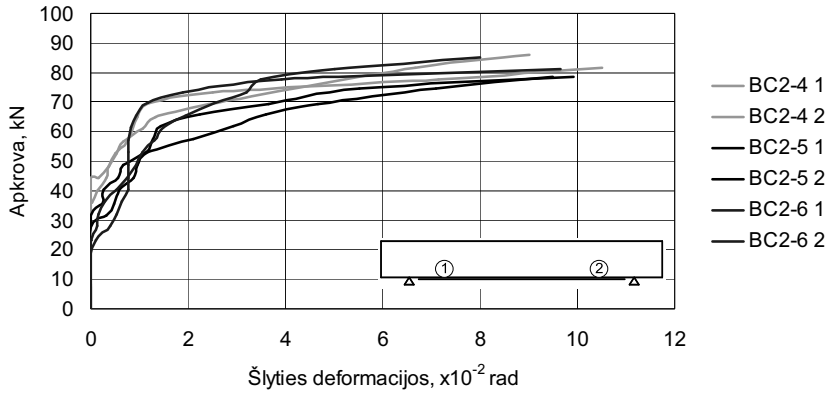
3.33 pav. Sijų BS1-6, BS1-7, BC1-8, BC1-9 apkrovos ir įlinkių grafikas
Fig. 3.33. Load-deflection curves of beams BS1-6, BS1-7, BC1-8, BC1-9

Antrosios serijos sijų (B2) bandymai buvo skirti nustatyti išorinės anglies pluošto armatūros inkaravimo metalinėmis apkabomis įtaką sustiprintoms sijoms, apspaudžiant inkaravimo zoną skirtingais įtempiais. Anglies pluošto apspaudimo plotas metaline apkaba buvo 50 cm^2. Anglies pluošto inkaravimo zonos apspaudimo įtempiai apkabomis bandymų metu buvo 0,5 MPa, 1 MPa ir 2 MPa.

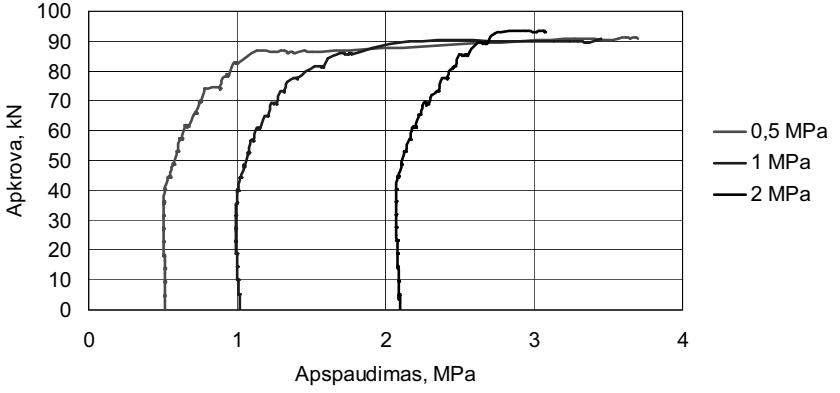


3.34 pav. B2 serijos sijų apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.34. Load-deflection curves of beams type B2

Eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad sijos BC2-3, BC2-4, BC2-5, BC2-6, kurių išorinės armatūros inkaravimo zonos apspaudimo įtempiai apkabomis bandymų metu buvo skirtingi, įlinksta panašiai (3.34 pav.).



3.35 pav. Sijų BC2-4, BC2-5, BC2-6 apkrovos ir šlyties deformacijų grafikai
Fig. 3.35. Load-shear curves of beams BC2-4, BC2-5, BC2-6



3.36 pav. Apkrovos ir apspaudimo apkabose lygio grafikai
Fig. 3.36. Load-prepressing level in clamps curves

Analizuojant 3.34, 3.35 ir 3.36 grafikus, galima pastebėti, kad pasireiškus šlyties deformacijoms, pradeda didėti sijų įlinkiai bei apspaudimas metalinėse apkabose. Kai pasiekiami ir viršijami sijų plieninės armatūros takumo įtempiai, šlyties deformacijos labai padidėja, nes didžiąją tempiamosios zonos įtempių dalį perima anglies pluoštas. Dėl to sijų įlinkiai taip pat gerokai didėja. Gautus rezultatus galima paaiškinti tuo, kad skirtingas anglies pluošto inkaravimo zonos apspaudimas neturi įtakos sijų darbui. Tai rodo ir sijų apkrovos bei jungties šlyties deformacijų grafiko analizė (3.35 pav.). Sijose BC2-3, BC2-4, BC2-5 ir BC2-6 išorinės armatūros ir betono jungties šlyties deformacijos panašios.

Tyrimų rezultatai rodo, kad prieš pat suirimą apspaudimo lygis apkabose padidėja kelis kartus, lyginant su pradiniu. Tai galima paaiškinti tuo, kad dėl šlyties deformacijų pasislenkant išorinei anglies pluošto armatūrai betono atžvilgiu ir didėjant bandinių įlinkiams, pluošto apspaudimo metaline apkaba vietoje susiformuoja spraustelis.

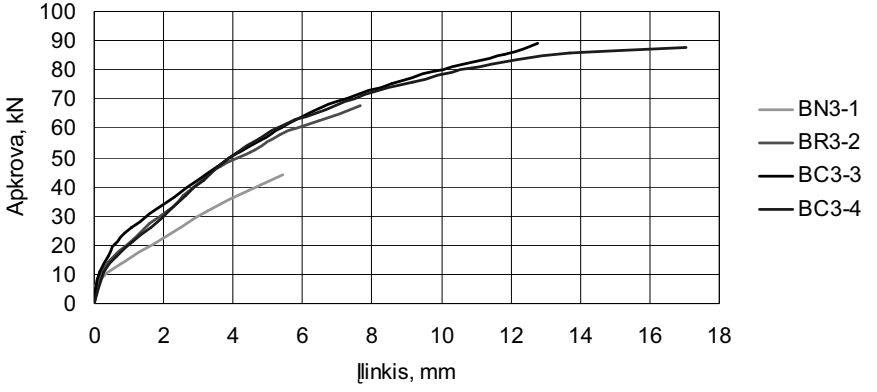
Tyrimai parodė, kad šios serijos sijos BR2-1, sustiprintos anglies pluoštu be papildomo išorinės armatūros inkaravimo, įlinkiai yra vidutiniškai 22 % ir 18 % mažesni nei nesustiprintos sijos BN2-1, kai apkrova atitinkamai siekia $0{,}5F_u$ ir $0{,}9F_u$ sijos BN2-1 ardančiosios apkrovos.

Šios serijos sijų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra su papildomu inkaravimu metalinėmis apkabomis, įlinkiai yra vidutiniškai 65 % ir 42 % mažesni nei BN2-1 sijos be išorinio armavimo, kai apkrova atitinkamai siekia $0{,}5F_u$ ir $0{,}9F_u$ sijos BN2-1 ardančiosios apkrovos.

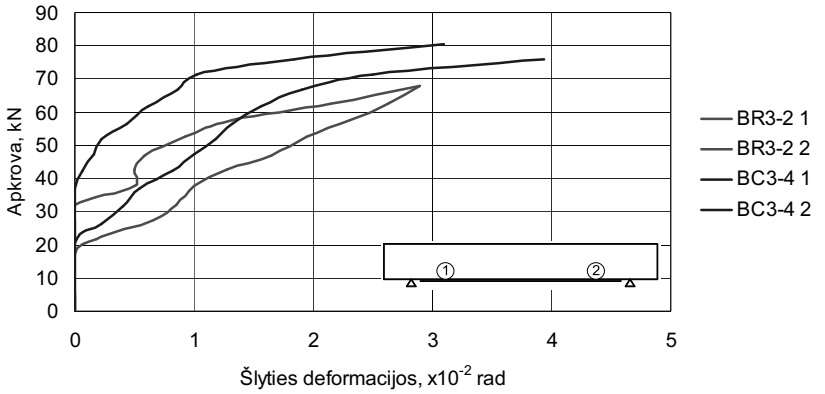
Tyrimo rezultatai rodo, kad papildomai inkaravus išorinę anglies pluošto armatūrą metalinėmis apkabomis, sijos BC2-3, BC2-4, BC2-5, BC2-6 visuose darbo etapuose įlinksta 13–18 % mažiau nei BR2-2 sija, kurios išorinė armatūra papildomai neinkaruota.

Atlikti B3 serijos bandinių tyrimai siekiant nustatyti pluošto apspaudimo ploto įtaką sustiprintoms sijoms, kurių išorinė armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis (pluošto apspaudimo lygis 1 MPa).

Gauti rezultatai parodė, kad šios serijos sijos, sustiprintos pluoštu be papildomo inkaravimo (BR3-2), įlinkiai yra vidutiniški 70 % ir 64 % mažesni nei BN3-1 sijos be išorinio armavimo, kai apkrova atitinkamai siekia $0{,}5F_u$ ir $0{,}9F_u$ sijos BN3-1 ardančiosios apkrovos.



3.37 pav. Sijų BN3-1, BR3-2, BC3-3, BC3-4 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.37. Load-deflection curves of beams BN3-1, BR3-2, BC3-3, BC3-4



3.38 pav. Sijų BR3-2, BC3-4 apkrovos ir šlyties deformacijų grafikai
Fig. 3.38. Load-shear curves of beams BR3-2, BC3-4

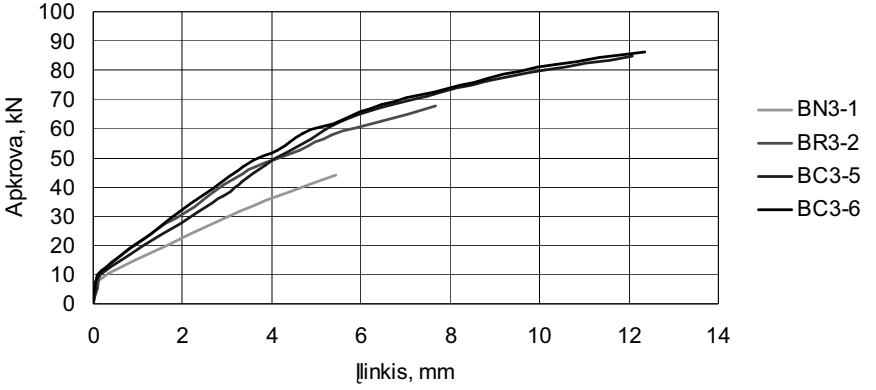
Tyrimais nustatyta, kad sijos su papildomai metalinėmis apkabomis inkaruota išorine armatūra (BC3-3, BC3-4, BC3-5, BC3-6, BC3-7, BC3-8, BC3-9, BC3-10), apkrovai siekiant $0{,}5F_u$ sijų BN3-1 ardančiosios apkrovos, įlinksta vidutiniškai 82 % mažiau nei anglies pluoštu nesustiprinta sija (BN3-1). Apkrovai pasiekus $0{,}9F_u$ sijų BN3-1 ardančiosios apkrovos, sijos su papildomai metalinėmis apkabomis inkaruota išorine armatūra įlinksta vidutiniškai 72 % mažiau nei nesustiprinta sija (3.37, 3.39, 3.41, 3.43 pav.).

Eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad sijos BR3-2, kurios išorinė armatūra papildomai neinkaruota, ir sijų, kurių anglies pluoštas inkaruotas papildomai metalinėmis apkabomis (BC3-3, BC3-4, BC3-5, BC3-6, BC3-7, BC3-8, BC3-9, BC3-10), įlinkiai yra vienodi, kai apkrova $0{,}5F_u$ sijos BR3-2 ardančiosios apkrovos.

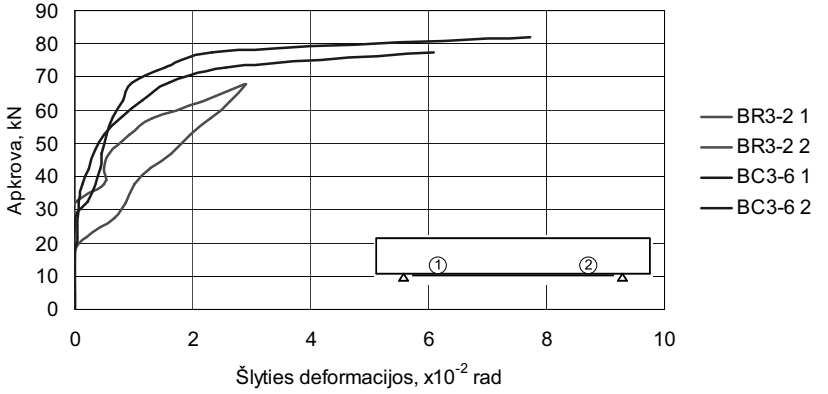
Apkrovai padidėjus iki $0{,}9F_u$ sijos BR3-2 ardančiosios apkrovos, sustiprintų sijų įlinkiai skiriasi priklausomai nuo pluošto apspaudimo ploto.

Sijos BC3-3 ir BC3-4, kurių išorinė armatūra papildomai inkaruota 50 cm^2 ploto apkabomis, apkrovai siekiant $0{,}9F_u$ sijos BR3-2 ardančiosios apkrovos, įlinksta vidutiniškai 11 % mažiau nei sija BR3-2 be papildomo išorinės armatūros inkaravimo (3.37, 3.38 pav.).

Lyginant sijų, kurių apkabų plotas – 100 cm^2, įlinkius su kontrolinės sijos įlinkiais, gaunami tokie skirtumai, kai apkrova siekia $0{,}9F_u$ sijos BR3-2 ardančiosios apkrovos, BC3-5 ir BC3-6 įlinksta vidutiniškai 14 % mažiau nei BR3-2 sijos, kurios išorinė armatūra papildomais neinkaruota (3.39, 3.40 pav.).

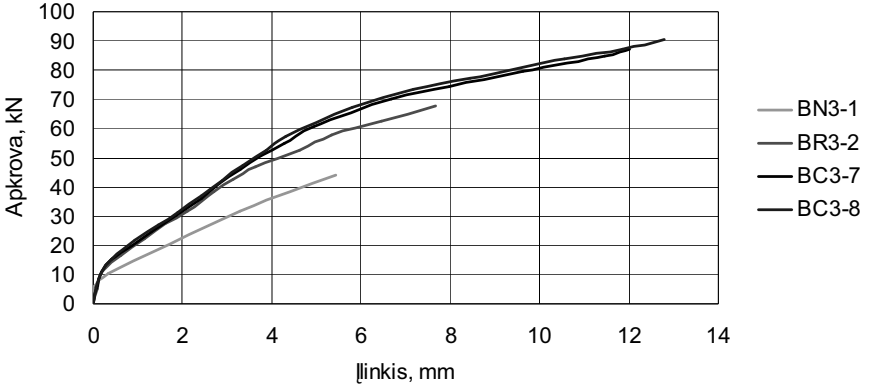


3.39 pav. Sijų BN3-1, BR3-2, BC3-5, BC3-6 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.39. Load-deflection curves of beams BN3-1, BR3-2, BC3-5, BC3-6

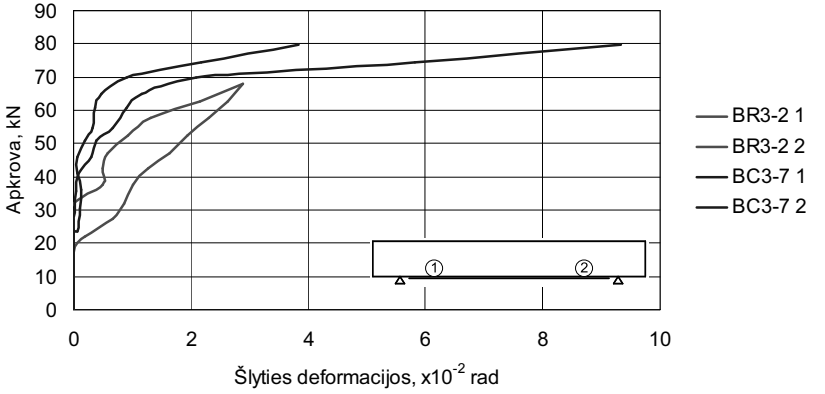


3.40 pav. Sijų BR3-2, BC3-6 apkrovos ir šlyties deformacijų grafikai
Fig. 3.40. Load-shear curves of beams BR3-2, BC3-6

Sijų BC3-7, BC3-8 ir BC3-9, BC3-10 anglies pluoštas inkaruotas 150 cm^2 ploto apkabomis. Pirmųjų dviejų bandinių apkaboms įtempti buvo naudoti du varžtai, o antrosios poros – keturi varžtai. Tyrimų rezultatai rodo, kad padidėjus apspaudimo plotui, padidėja ir papildomo inkaravimo efektyvumas (3.41, 3.42 pav.). Sijos BC3-7 ir BC3-8 įlinksta vidutiniškai 23 % mažiau nei sija BR3-2 be papildomo išorinės armatūros inkaravimo, kai apkrova $0{,}9F_u$ sijos BR3-2 ardančiosios apkrovos.

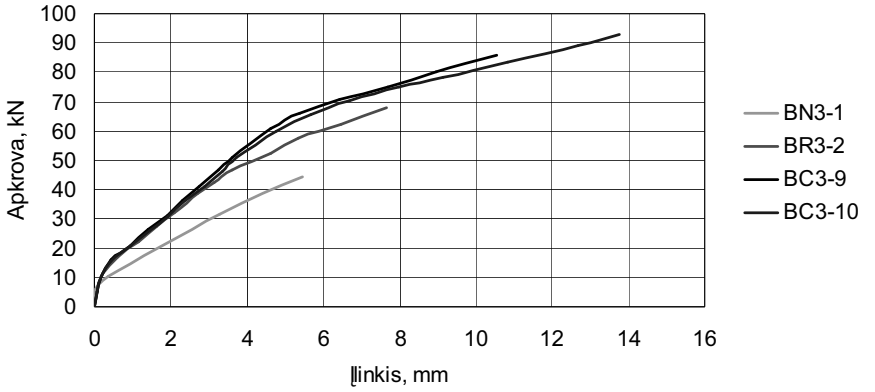


3.41 pav. Sijų BN3-1, BR3-2, BC3-7, BC3-8 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.41. Load-deflection curves of beams BN3-1, BR3-2, BC3-7, BC3-8

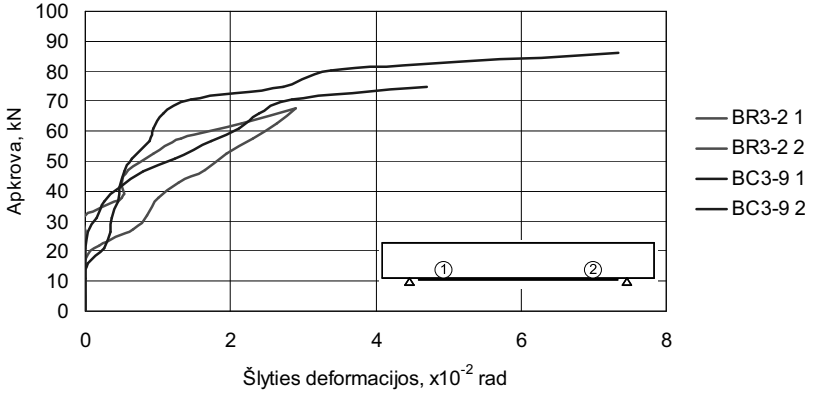


3.42 pav. Sijų BR3-2, BC3-7 apkrovos ir šlyties deformacijų grafikai
Fig. 3.42. Load-shear curves of beams BR3-2, BC3-7

Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad išorinę armatūrą papildomai inkaravus 150 cm^2 ploto apkabomis ir apkaboms įtempti panaudojus keturis varžtus, pasiekiamas didžiausias įlinkių skirtumas, lyginant su sustiprinta sija, kurios anglies pluoštas papildomai neinkaruotas. Bandiniai BC3-9 ir BC3-10 įlinksta vidutiniškai 27 % mažiau nei sija be papildomo išorinės armatūros inkaravimo, kai apkrova 0,9F_u sijos BR3-2 ardančiosios apkrovos (3.43, 3.44 pav.).



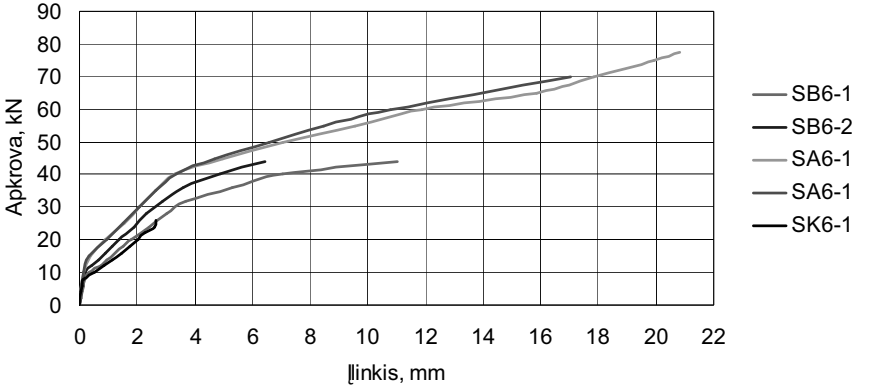
3.43 pav. Sijų BN3-1, BR3-2, BC3-9, BC3-10 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.43. Load-deflection curves of beams BN3-1, BR3-2, BC3-9, BC3-10



3.44 pav. Sijų BR3-2, BC3-9 apkrovos ir šlyties deformacijų grafikai
Fig. 3.44. Load-shear curves of beams BR3-2, BC3-9

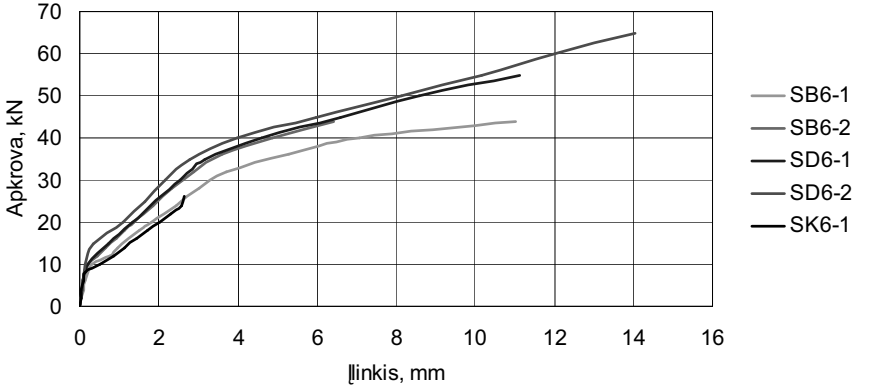
S grupės sijų tyrimų rezultatai rodo, kad išorinės armatūros papildomo inkaravimo būdų veiksmingumas skiriasi.

Sijų, sustiprintų anglies pluošto armatūra, įlinkiai yra iki kelių kartų mažesni nei nesustiprintos kontrolinės sijos (SK6-1), kai apkrova $0{,}5F_u$ sijos SK6-1 ardančiosios apkrovos.

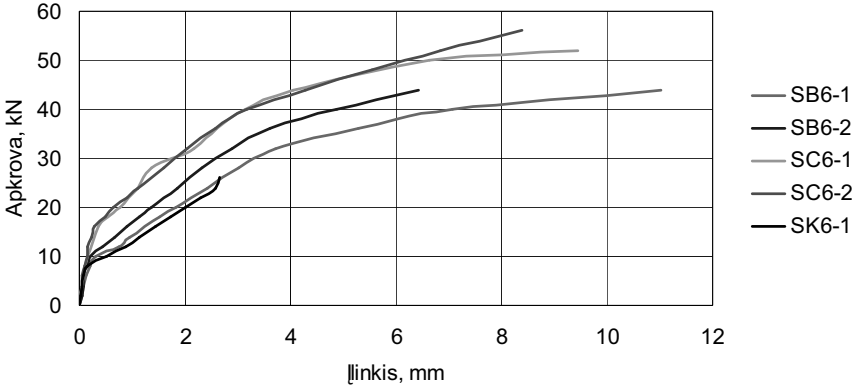


3.45 pav. Sijų SB6, SA6, SK6 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.45. Load-deflection curves of beams SB6, SA6, SK6

Lyginant sustiprintų anglies pluošto armatūra sijų ir kontrolinės sijos (SK6-1) be išorinio armavimo įlinkius, kai apkrova siekia $0{,}9F_u$ sijos SK6-1 ardančiosios apkrovos, gaunami tokie skirtumai: SA6 sijos (išorinė armatūra užleista už atramų) įlinksta vidutiniškai 71 % mažiau; SB6 sijos (anglies pluoštas papildomai neinkaruotas) įlinksta vidutiniškai 17 % mažiau (3.45 pav.); SC6 sijos (išorinė armatūra papildomai inkaruota sprausteliais) įlinksta mažiau nei du kartus (3.47 pav.); SD6 sijų (išorinė armatūra papildomai inkaruota anglies pluošto apkabomis) įlinkiai vidutiniškai 48 % mažesni nei kontrolinės nesustiprintos (SK6-1) sijos (3.46 pav.).

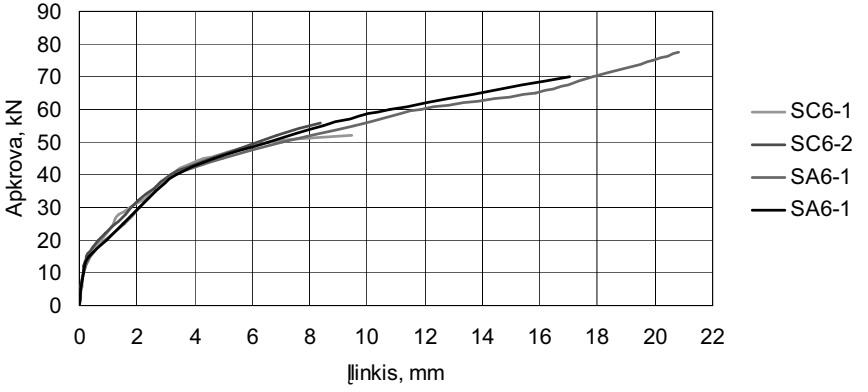


3.46 pav. Sijų SB6, SD6, SK6 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.46. Load-deflection curves of beams SB6, SD6, SK6



3.47 pav. Sijų SB6, SC6, SK6 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.47. Load-deflection curves of beams SB6, SC6, SK6

Apkrovai siekiant $0{,}5F_u$ sijų SB6 ardančiosios apkrovos, bandiniai SB6 (išorinė armatūra neinkaruota) įlinksta vidutiniškai 55 %, 96 %, 29 % daugiau nei atitinkamai sijos SA6 (anglies pluoštas užleistas už atramų), SC6 (anglies pluoštas papildomai inkaruotas sprausteliais), SD6 (išorinė armatūra papildomai inkaruota anglies pluošto apkabomis). Apkrovai padidėjus iki $0{,}9F_u$ sijų SB6 ardančiosios apkrovos, sijos SB6 įlinksta vidutiniškai: 80 % daugiau nei sijos SA6; 89 % daugiau nei sijos SC6 ir 39 % daugiau nei sijos SD6.

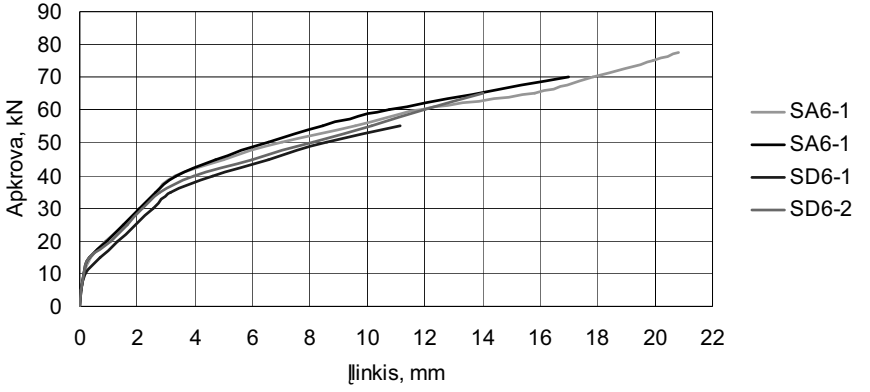


3.48 pav. Sijų SA6, SC6 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.48. Load-deflection curves of beams SA6, SC6

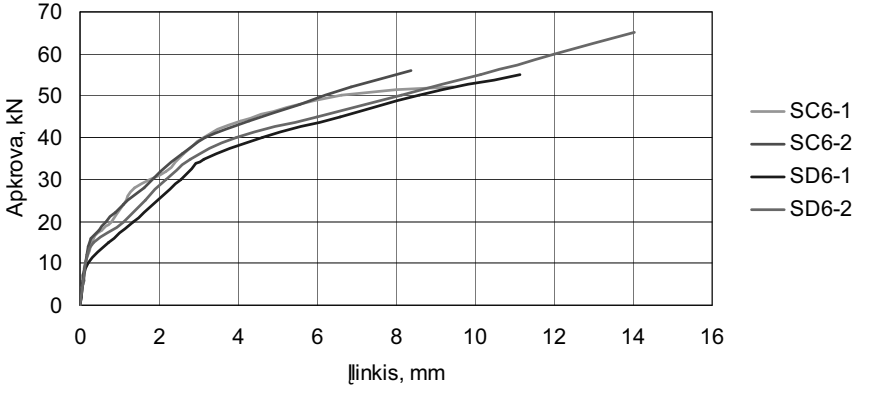
Sijos SC6, kurių išorinė armatūra papildomai inkaruota sprausteliais, kai apkrova siekia $0{,}5F_u$ sijų SC6 ardančiosios apkrovos, įlinksta vidutiniškai 43 %

ir 25 % mažiau nei SD6 sijos, kurių išorinė armatūra papildomai inkaruota anglies pluošto apkabomis, ir SA6 sijos, kurių išorinė armatūra užleista už atramų. Kai apkrova siekia $0{,}9F_u$ sijų SC6 ardančiosios apkrovos, bandiniai SC6 įlinksta 31 % ir 6 % mažiau nei SD6 ir SA6 bandiniai (3.48, 3.50 pav.).

Sijos SA6 (anglies pluoštas užleistas už atramų) įlinksta vidutiniškai 12 % ir 18 % mažiau nei sijos SD6 (išorinė armatūra papildomai inkaruota anglies pluošto apkabomis), kai apkrova $0{,}5F_u$ ir $0{,}9F_u$ sijų SD6 ardančiosios apkrovos (3.49 pav.).



3.49 pav. Sijų SA6, SD6 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.49. Load-deflection curves of beams SA6, SD6



3.50 pav. Sijų SC6, SD6 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.50. Load-deflection curves of beams SC6, SD6

3.3.3. Anglies pluoštu sustiprintų gelžbetoninių elementų laikomoji galia ir suirimo pobūdis

Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad anglies pluoštu sustiprintų sijų laikomoji galia labai padidėja (3.5 lentelė). Tyrimų metu bandytose sijose išorinė anglies pluošto armatūra sudarė 17 % (B grupės sijos) ir 29 % (S grupės sijos) tempiamojoje zonoje esančios strypinės plieno armatūros ploto. Gelžbetoninių sijų armavimo procentas anglies pluoštu – 0,08 %. Palyginti nedidelis anglies pluošto kiekis gerokai padidina gelžbetoninių sijų laikomąją galią, nes anglies pluošto tempiamasis stipris yra šešis kartus didesnis nei strypinės plieno armatūros.

B1 serijos sijų gauti eksperimentų rezultatai rodo, kad sijų laikomoji galia padidėja priklausomai nuo anglies pluošto papildomo inkaravimo būdo. Sijų BR1-2, BR1-3, kai anglies pluoštas priklijuotas papildomai neinkaruojant, laikomoji galia padidėja vidutiniškai 72 %, lyginant su nesustiprintos sijos laikomąja galia (BN1-1). Sijose BA1 išorinę armatūrą inkaravus metalinėmis jungėmis, laikomoji galia padidėja 75 %, lyginant su nesustiprinta BN1 sija. Sijos, kurių išorinė armatūra inkaruota anglies pluošto apkabomis (BS1-6 ir BS1-7), atlaiko vidutiniškai 81 % didesnę apkrovą nei kontrolinis nesustiprintas bandinys. Sijų, kurių išorinė armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis (BC1-8, BC1-9), laikomoji galia vidutiniškai 100 % didesnė, lyginant su sija BN1-1 be išorinės armatūros.

3.5 lentelė. Sijų laikomoji galia
Table 3.5. Load-carrying capacity of beams

Sijos tipas	Išorinės armatūros inkaravimo būdas	Laikomoji galia *F*, kN	Laikomosios galios padidėjimas *F*/ *F**, %
Grupė B			
BN1-1*	-	45,59	-
BR1-2	papildomai neinkaruota	79,09	73
BR1-3	papildomai neinkaruota	78,15	71
BA1-4	metalinėmis T formos jungėmis	79,88	75
BA1-5	metalinėmis T formos jungėmis	79,42	74
BS1-6	U formos pluošto apkabomis	83,57	83
BS1-7	U formos pluošto apkabomis	81,40	79
BC1-8	metalinėmis apkabomis (50 cm^2, 1 MPa)	91,46	101
BC1-9	metalinėmis apkabomis (50 cm^2, 1 MPa)	90,51	99
BN2-1*	-	46,22	-

3.5 lentelės pabaiga

BR2-2	papildomai neinkaruota	79,38	72
BC2-3	metalinėmis apkabomis (50 m^2, 1 MPa)	89,06	93
BC2-4	metalinėmis apkabomis (50 cm^2, 1 MPa)	90,98	97
BC2-5	metalinėmis apkabomis (50 cm^2, 0,5 MPa)	90,76	96
BC2-6	metalinėmis apkabomis (50 cm^2, 2 MPa)	93,44	102
BC2-7	metalinėmis apkabomis (100 cm^2, 1 MPa)	94,96	105
BC2-8	metalinėmis apkabomis (150 cm^2, 1 MPa, 2 v.)	95,17	106
BC2-9	metalinėmis apkabomis (150 cm^2, 1 MPa, 4 v.)	93,51	102
BN3-1*	-	44,12	-
BR3-2	papildomai neinkaruota	67,81	54
BC3-3	metalinėmis apkabomis (50 cm^2, 1 MPa)	88,95	102
BC3-4	metalinėmis apkabomis (50 cm^2, 1 MPa)	90,67	106
BC3-5	metalinėmis apkabomis (100 cm^2, 1 MPa)	86,49	96
BC3-6	metalinėmis apkabomis (100 cm^2, 1 MPa)	87,28	98
BC3-7	metalinėmis apkabomis (150 cm^2, 1 MPa, 2 v.)	87,33	98
BC3-8	metalinėmis apkabomis (150 cm^2, 1 MPa, 2 v.)	90,66	105
BC3-9	metalinėmis apkabomis (150 cm^2, 1 MPa, 4 v.)	86,04	95
BC3-10	metalinėmis apkabomis (150 cm^2, 1 MPa, 4 v.)	93,02	111
Grupė S			
SK6-1*	-	31	-
SA6-1	užleidžiant už atramų	77,5	150
SA6-2	užleidžiant už atramų	90	190
SB6-1	papildomai neinkaruota	44	42
SB6-2	papildomai neinkaruota	48	55
SC6-1	sprausteliais	52	68
SC6-2	sprausteliais	60	94
SD6-1	U formos pluošto apkabomis	58,5	89
SD6-2	U formos pluošto apkabomis	70	126
Pastaba: *F** – bandinių BN1-1, BN2-1, BN3-1 laikomoji galia.			

Tyrimų rezultatai rodo, kad išorinės armatūros inkaravimo metodų efektyvumas skiriasi. Sijų BA1 su inkaruota metalinėmis T formos jungėmis išorine armatūra laikomoji galia tokia pat, kaip ir sijų BR1-2, BR1-3, kurių anglies pluoštas neinkaruotas. Tai rodo, kad anglies pluošto inkaravimas metalinėmis jungėmis neužtikrina gero bendro išorinės armatūros ir betono darbo, o tik pakeičia suirimo pobūdį (3.52 pav.). Kai išorinė armatūra inkaruota metalinėmis jungėmis, anglies pluoštas trūksta inkaravimo zonoje. Tai galima paaiškinti tuo, kad anglies pluoštas yra kerpamas ties metaline junge.

Geresni eksperimento rezultatai gaunami išorinę armatūrą inkaravus anglies pluošto apkabomis. BS1 sijų laikomoji galia padidėja 6 %, lyginant su sijos, kurios išorinė armatūra neinkaruota, laikomąja galia. Sijos, kurių išorinė armatūra inkaruota anglies pluošto apkabomis, suyra trūkstant pluoštui inkaravimo zonoje (3.53 pav.).

Didžiausias inkaravimo efektyvumas laikomajai galiai pasiekiamas išorinę armatūrą apspaudus metalinėmis apkabomis. BC1 serijos sijų laikomoji galia yra vidutiniškai 16 % didesnė nei BR1 sijų laikomoji galia. Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad papildomai inkaruojant išorinę armatūrą metalinėmis apkabomis, yra gerai išnaudojamos anglies pluošto savybės. Sijos BC1 suiro trūkus išorinei armatūrai (3.54 pav.).

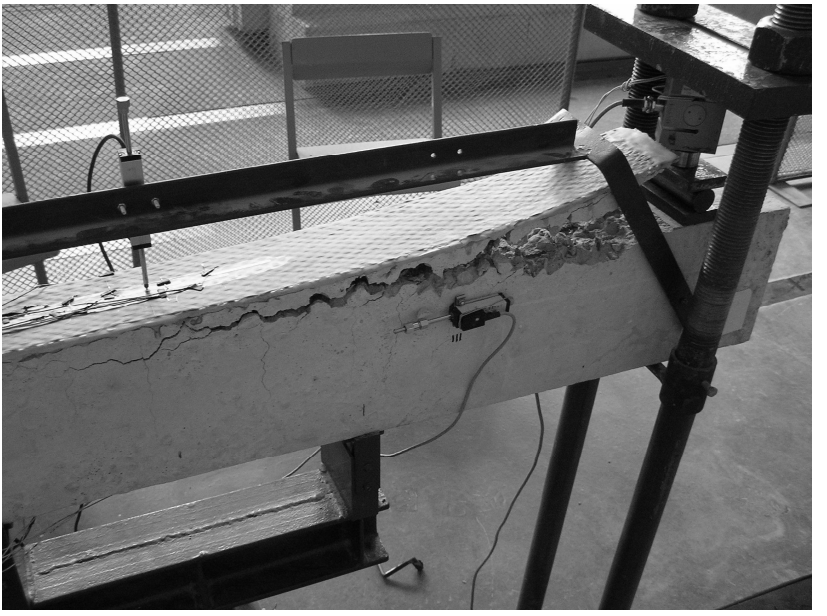
B2 serijos sijų bandymų rezultatai taip pat rodo, kad išorinės armatūros inkaravimas metalinėmis apkabomis leidžia veiksmingai panaudoti anglies pluoštą.

Sijos BR2-2, sustiprintos anglies pluoštu be papildomo inkaravimo, laikomoji galia padidėja 72 %, lyginant su BN2-1 kontroliniu bandiniu. Sijos BC2-3, BC2-4, BC2-5, BC2-6, kurių išorinė armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis, atlaiko 93–103 % didesnę apkrovą nei nesustiprinta anglies pluoštu sija. Tyrimais nustatyta, kad sustiprintų sijų išorinę armatūrą papildomai inkaravus, laikomoji galia padidėja 12–18 %, lyginant su sijos, kurios anglies pluoštas neinkaruotas.

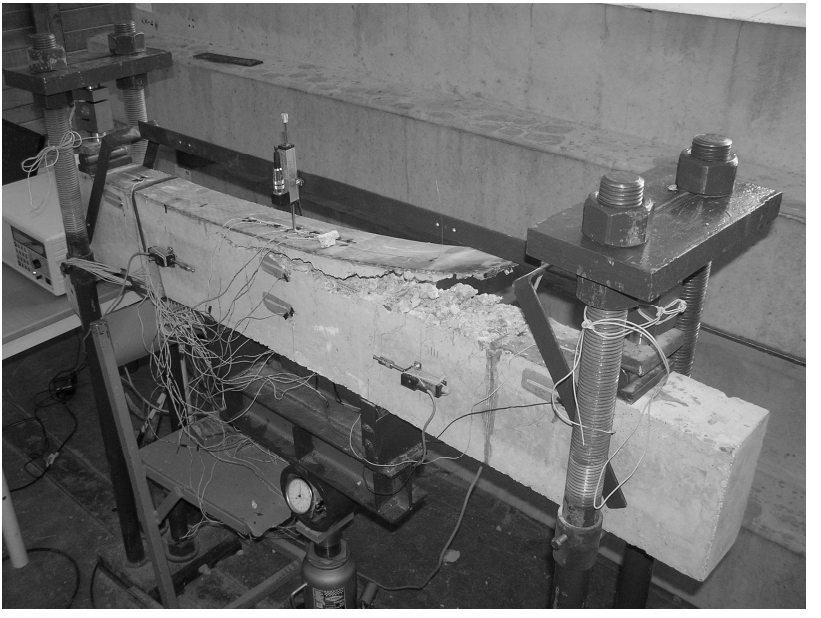
Eksperimento rezultatai parodė, kad skirtingi išorinės armatūros apspaudimo įtempiai (0,5 MPa, 1 MPa, 2 MPa) neturi įtakos sustiprintų gelžbetoninių elementų laikomajai galiai. Sijų BC2-3, BC2-4, BC2-5, BC2-6 atlaikomos didžiausiosios apkrovos skiriasi iki 5 %.

Serijos B3 sijų tyrimų rezultatai rodo, kad sustiprinus išorine armatūra lenkiamuosius gelžbetoninius elementus ir užtikrinus gerą papildomą pluošto inkaravimą, laikomoji galia padidėja, lyginant su bandiniais, kurių išorinė armatūra papildomai neinkaruota.

Sustiprinta BR3-2 sija atlaiko 54 % didesnę išorinę apkrovą nei BN3-1 sija. Gauti rezultatai rodo, kad išorinę armatūrą papildomai inkaravus metalinėmis apkabomis, laikomoji galia padidėja 27–37 %, lyginant su sijos, sustiprintos anglies pluoštu, bet be papildomo armatūros inkaravimo, laikomąja galia.



3.51 pav. Sijų BR suirties pobūdis
Fig. 3.51. Failure mode of beams BR



3.52 pav. Sijų BA suirties pobūdis
Fig. 3.52. Failure mode of beams BA



3.53 pav. Sijų BS suirties pobūdis
Fig. 3.53. Failure mode of beams BS



3.54 pav. Sijų BC suirties pobūdis
Fig. 3.54. Failure mode of beams BC

Tyrimais nustatyta, kad didėjant anglies pluošto apspaudimo plotui metalinėmis apkabomis, atlaikoma sijų apkrova kinta nedaug. Laikomosios galios rezultatai skiriasi iki 8 %. Tai rodo, kad siekiant išnaudoti anglies pluošto stiprį, nepriklausomai nuo pluošto apspaudimo ploto, pakanka papildomai inkaruoti išorinę armatūrą metalinėmis apkabomis.

S serijos bandinių tyrimų rezultatai rodo, kad SB6 sijų, kurių išorinė anglies pluošto armatūra papildomai neinkaruota, laikomoji galia padidėja 42–55 %, lyginant su nesustiprinta SK6-1 sija. SA6 serijos sijų (išorinė armatūra užleista už atramų) laikomoji galia vidutiniškai 2,7 karto didesnė nei SK6-1 kontrolinės sijos. Sijų SC6, kurių išorinė armatūra inkaruota sprausteliais, laikomoji galia padidėja vidutiniškai 91 %, lyginant su nesustiprintos sijos laikomąja galia. Kai išorinė armatūra papildomai inkaruota anglies pluošto apkabomis, sijų SD6 laikomoji galia vidutiniškai du kartus didesnė nei SK6-1 sijos.

Sijų su papildomu išorinės armatūros inkaravimu ir sijų, kurių anglies pluoštas papildomai neinkaruotas, laikomosios galios skiriasi priklausomai nuo išorinės armatūros inkaravimo efektyvumo: sijų SB6 (išorinė armatūra papildomai neinkaruota) laikomoji galia vidutiniškai 82 % mažesnė nei SA6 sijų (išorinė armatūra užleista už atramų), 22 % mažesnė nei SC6 sijų (anglies pluoštas inkaruotas sprausteliais) ir 40 % mažesnė nei SD6 sijų (išorinė armatūra inkaruota anglies pluošto apkabomis).

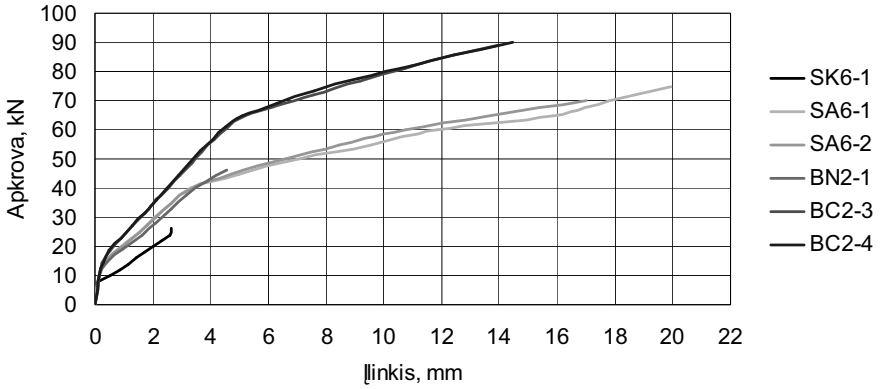
3.3.4. Armatūrų santykio ir betono stiprio įtaka gelžbetoniniams elementams, sustiprintiems anglies pluošto armatūra

Atlikti tyrimai su gelžbetoninėmis sijomis, sustiprintomis anglies pluoštu, bet armuotomis skirtingu tempiamosios strypinės armatūros kiekiu. Visų sijų skerspjūvio matmenys ir tarpatramio ilgiai yra vienodi. S serijos sijos tempiamojoje zonoje armuotos 2Ø6 armatūros strypais (armavimo procentas – 0,3 %). B serijos sijų tempiamosios armatūros strypai yra 2Ø8 ir armavimo procentas siekia 0,6 %. Visų sijų armavimas išorine pluošto armatūra yra vienodas (0,08 %). Anglies pluošto skerspjūvio plotas – 16,7 mm^2, kuris sudaro 29 % tempiamosios strypinės plieno armatūros ploto SA6 sijose, 17 % – BC serijos sijose.

Visų sustiprintų sijų išorinė armatūra papildomai inkaruota: SA6 sijose išorinė armatūra užleista už atramų; BC sijose anglies pluoštas inkaruotas apspaudžiant metalinėmis apkabomis.

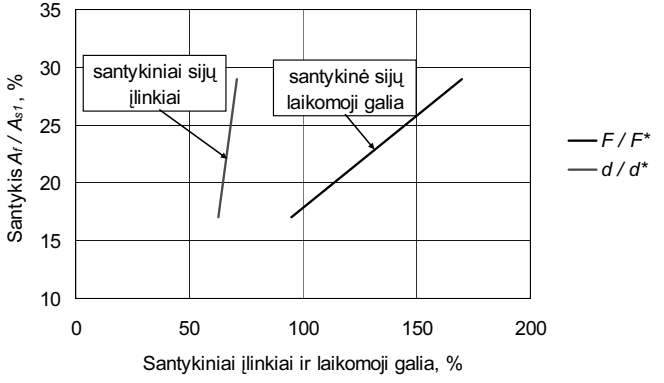
Tyrimais nustatyta, kad apkrovai siekiant $0{,}9F_u$ sijos SK6-1 ardančiosios apkrovos, sijos SA6, armuotos išorine armatūra, įlinksta vidutiniškai 71 % mažiau nei SK6-1 sija be išorinės armatūros (3.55 pav.).

Lyginant BC2-3, BC2-4 sijų įlinkius su kontroline BN2-1 nesustiprinta sija, kai apkrova siekia $0{,}9F_u$ BN2-1 ardančiosios apkrovos, sijos su anglies pluošto armatūra įlinksta vidutiniškai 63 % mažiau nei nesustiprinta sija (3.55 pav.).



3.55 pav. S6 ir B2 serijų sijų apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.55. Load-deflection curves of beams types S6 and B2

Gauti sijų laikomosios galios rezultatai kinta priklausomai anglies pluošto ir plieninės strypinės armatūrų santykio A_f / A_{s1}. Kai santykis A_f / A_{s1} = 29 %, sijos SA6-1 ir SA6-2 atlaiko 150 % ir 190 % didesnę apkrovą nei sija SK6-1. Laikomosios galios skirtumai tarp sustiprintų anglies pluoštu sijų ir sijų be išorinės armatūros mažėja, mažėjant armatūrų santykiui (A_f / A_{s1} = 17 %). BC2-3, BC2-4 sijų laikomoji galia yra 93 % ir 97 % didesnė nei BN2-1 sijos.



3.56 pav. Laikomosios galios ir įlinkių priklausomybė nuo santykio A_f / A_{s1}
Fig. 3.56. Load-carrying capacity and deflections dependence on ratio A_f / A_{s1}

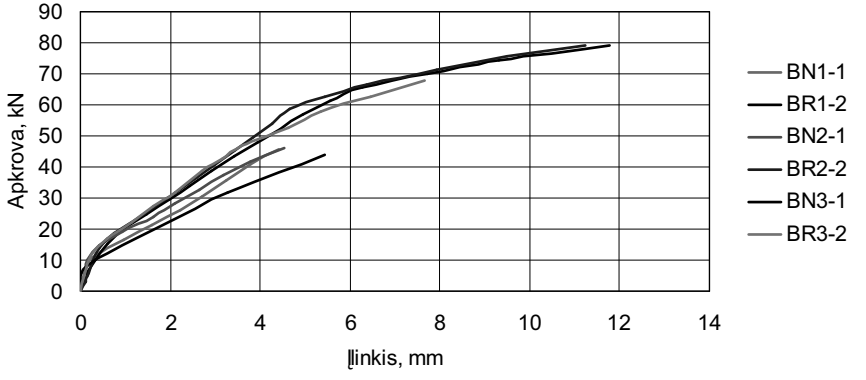
Eksperimentinių laikomosios galios ir įlinkių tyrimų rezultatai rodo, kad mažėjant anglies pluošto ir plieninės strypinės armatūrų santykiui A_f / A_{s1}, mažėja lenkiamųjų gelžbetoninių elementų sustiprinimo išorine armatūra veiksmingumas (3.56 pav.).

Eksperimentiniais tyrimais nustatyta betono savybių įtaka sustiprintų anglies pluoštu sijų darbui. Sijų serijų B1, B2, B3 betono savybės atitinkamai yra: betono gniuždomasis stipris f_{cB1} = 35,0 N/mm^2, f_{cB2} = 35,0 N/mm^2, f_{cB3} = 24,1 N/mm^2, tamprumo modulis E_{cmB1} = 31,3 GPa, E_{cmB2} = 34,7 GPa, E_{cmB3} = 30,1 GPa. Gelžbetoninių sijų armavimo procentas anglies pluoštu ir plienine strypine armatūra atitinkamai 0,08 % ir 0,6 %.

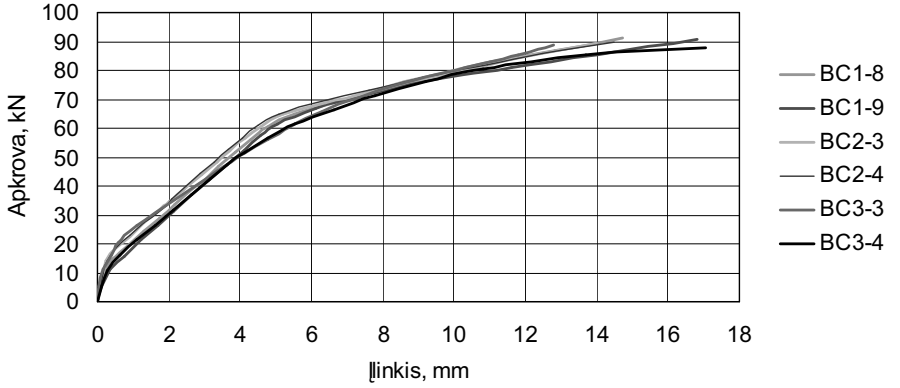
Tyrimų rezultatai rodo, kad sustiprintų sijų BR1-2, BR2-2, BR3-2 įlinkiai sumažėja atitinkamai 21 %, 18 % ir 64 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis BN1-1, BN2-1, BN3-1, kai apkrova siekia 0,9F_u sijų BN ardančiosios apkrovos. Papildomai inkaravus išorinę armatūrą, gaunami tokie įlinkių skirtumai: sustiprintos sijos BC1-8 ir BC1-9, BC2-3 ir BC2-4, BC3-3 ir BC3-4 įlinksta vidutiniškai 30 %, 40 %, 67 % mažiau nei BN1-1, BN2-1, BN3-1 kontrolinės sijos be išorinės armatūros, kai apkrova 0,9F_u sijų BN ardančiosios apkrovos.

Iš tyrimų rezultatų galima spręsti, kad mažėjant betono stipriui, didėja išorinio armavimo įtaka sustiprintų sijų įlinkiams.

Atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad esant skirtingam bandinių betonui, sijas sustiprinus anglies pluoštu, pasiekiami skirtingi laikomosios galios padidėjimo rezultatai. BR1-2, BR2-2, BR3-2 sijų, sustiprintų anglies pluoštu, bet be papildomo išorinės armatūros inkaravimo, laikomoji galia, lyginant su kontrolinėmis nesustiprintomis sijomis, padidėja atitinkamai 73 %, 72 % ir 54 % (3.57 pav.). Bandymų metu sustiprintos sijos be papildomo anglies pluošto inkaravimo suiro atplėšiant išorinės armatūros juostos galą kartu su betono sluoksniu.

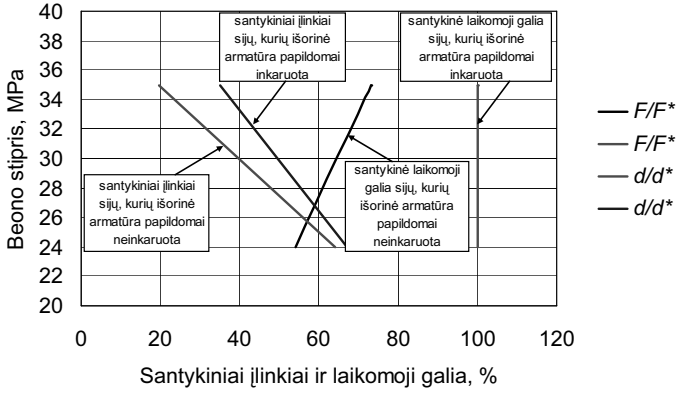


3.57 pav. Sijų BN1-1, BR1-2, BN2-1, BR2-2, BN3-1, BR3-2 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.57. Load-deflection curves of beams BN1-1, BR1-2, BN2-1, BR2-2, BN3-1,BR3-2



3.58 pav. Sijų BC1, BC2-3, BC2-4, BC3-3, BC3-4 apkrovos ir įlinkių grafikai
Fig. 3.58. Load-deflection curves of beams BC1, BC2-3, BC2-4, BC3-3, BC3-4

Tyrimų rezultatai rodo (3.58 pav.), kad sijų (BC1-8, BC1-9, BC2-3, BC2-4, BC3-3, BC3-4), kurių išorinė armatūra papildomai inkaruota apspaudžiant metalinėmis apkabomis, laikomosios galios padidėja vidutiniškai 100 % (3.5 lentelė), lyginant su nesustiprintais kontroliniais bandiniais. Nors sustiprintų sijų betono stipris skiriasi, laikomoji galia yra vienoda. Sijų su papildomai metalinėmis apkabomis inkaruota išorine armatūra suirimo pobūdis yra anglies pluošto trūkimas tarpatramio viduryje pasiekus pluošto stiprio ribą.



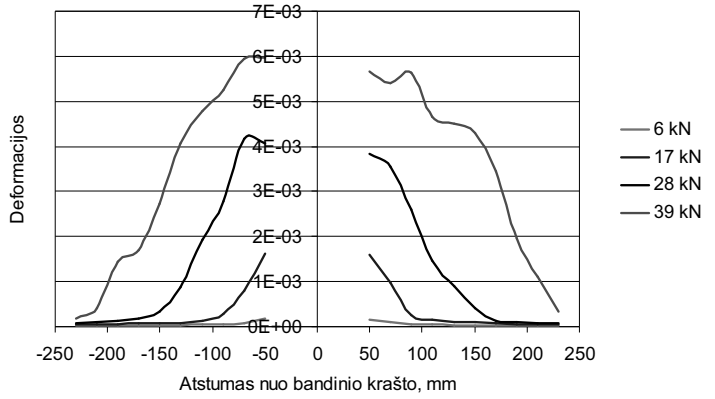
3.59 pav. Laikomosios galios ir įlinkių priklausomybė nuo betono stiprio
Fig. 3.59. Load-carrying capacity and deflections dependence on concrete strength

Gauti rezultatai rodo (3.59 pav.), kad betono stiprio įtaka laikomajai galiai sumažėja, sustiprintų sijų anglies pluoštą papildomai inkaruojant (BC1-8,

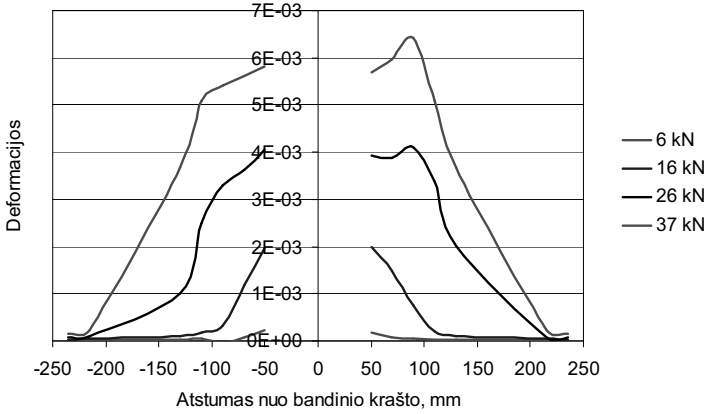
BC1-9, BC2-3, BC2-4, BC3-3, BC3-4), lyginant su sijomis, kurių išorinė armatūra papildomai neinkaruota (BR1-2, BR2-2, BR3-2).

3.3.5. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas HB sijų anglies pluošto ir betono jungtyje

Deformacijų kitimas išilgai anglies pluošto, esant skirtingoms apkrovoms, pateiktas 3.60–3.63 paveiksluose.

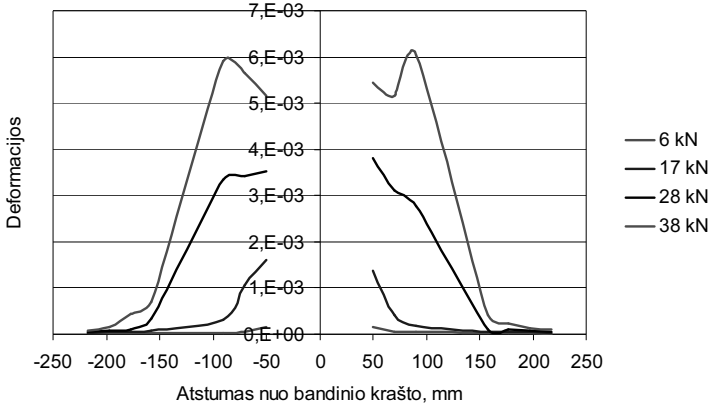


3.60 pav. Deformacijų pasiskirstymas HBS sijose išilgai išorinės armatūros
Fig. 3.60. Strain distribution of beams HBS along external reinforcement

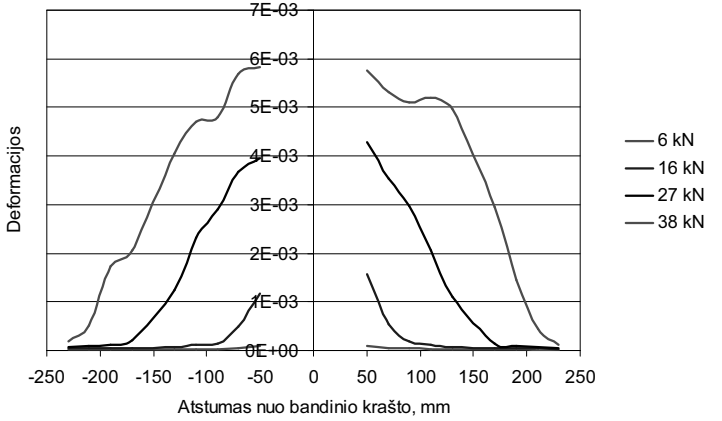


3.61 pav. Deformacijų pasiskirstymas HBC sijose išilgai išorinės armatūros
Fig. 3.61. Strain distribution of beams HBC along external reinforcement

Visų bandinių deformacijos išilgai išorinės armatūros, veikiant apkrovai, pasiskirsto panašiai. Tik prieš pat suirimą deformacijų pobūdis pasikeičia priklausomai nuo išorinės armatūros inkaravimo būdo. Iki apkrovai pasiekiant 20 kN, deformacijos didėja pirmajame trečdalyje (apie 10 cm nuo bandinio centrinės dalies), o toliau išorinės armatūros juostos galų link deformacijos gerokai mažesnės. Didėjant išorinei apkrovai (daugiau nei 20 kN), pasikeičia deformacijų pasiskirstymo pobūdis, deformacijos išorinėje armatūroje didėja. Deformacijos didėja išilgai išorinės armatūros link anglies pluošto juostos galų. Esant didžiausiosioms apkrovoms, deformacijos išorinės armatūros juostos galuose pasiskirsto skirtingai, priklausomai nuo anglies pluošto papildomo inkaravimo būdo.



3.62 pav. Deformacijų pasiskirstymas HBA sijose išilgai išorinės armatūros
Fig. 3.62. Strain distribution of beams HBA along external reinforcement



3.63 pav. Deformacijų pasiskirstymas HBW sijose išilgai išorinės armatūros
Fig. 3.63. Strain distribution of beams HBW along external reinforcement

Bandinių HBC ir HBA, kurių išorinė armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis ir metalinėmis jungėmis, deformacijos anglies pluošto juostos galuose yra mažesnės nei bandinių HBS (pluoštas papildomai neinkaruotas) ir HBW (išorinė armatūra inkaruota anglies pluošto apkabomis).

Gelžbetoninių elementų, sustiprintų išorine armatūra, jungties šlyties įtempiai gali būti apskaičiuojami, naudojant eksperimento metu nustatytų deformacijų rezultatus (3.6).

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_f - \varepsilon_{f+1} \ ; \tag{3.1}$$

$$\sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_f \ ; \tag{3.2}$$

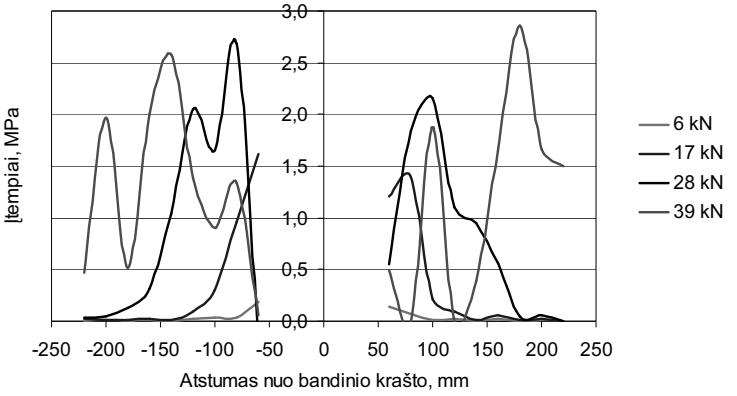
$$\tau \cdot b_f \cdot \Delta x_i = \sigma_f \cdot b_f \cdot h_f - \sigma_{f+1} \cdot b_f \cdot h_f \ ; \tag{3.3}$$

$$\tau \cdot b_f \cdot \Delta x_i = \left(\sigma_f - \sigma_{f+1}\right) \cdot b_f \cdot h_f \ ; \tag{3.4}$$

$$\tau \cdot b_f \cdot \Delta x_i = E_f \cdot \left(\varepsilon_f - \varepsilon_{f+1}\right) \cdot b_f \cdot h_f \ ; \tag{3.5}$$

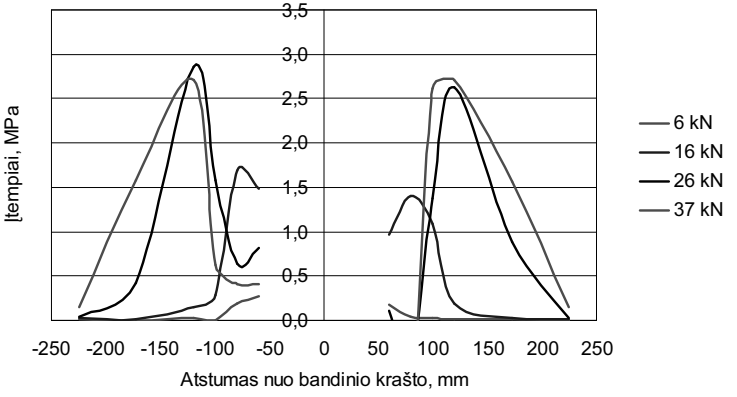
$$\tau = \frac{E_f \cdot \left(\varepsilon_f - \varepsilon_{f+1}\right) \cdot h_f}{\Delta x_i}. \tag{3.6}$$

Bandinių HBS, kurių išorinė armatūra papildomai neinkaruota, šlyties įtempiai iki 15 kN apkrovimo lygio didėja centrinėje bandinio dalyje, nedideliu atstumu nuo krašto (3.64 pav.). Kai apkrova viršija 20 kN, pasikeičia įtempių kreivės pobūdis, šlyties įtempiai pasiekia didžiausias reikšmes. Toliau didėjant apkrovai, didžiausieji įtempiai pasislenka išilgai išorinės armatūros link pluošto juostos galų. Įtempių kreivės staigūs pokyčiai, kai įtempių reikšmės kinta nuo didžiausių iki mažiausių reikšmių, esant tam tikram apkrovimo lygiui, gali būt paaiškinami susiformavusiais sprausteliais dėl paviršiaus nelygumų ir adhezijos. Įtempių sumažėjimas iki nulinių reikšmių rodo, kad tose vietose pažeista jungtis tarp išorinės armatūros ir betono. Esant didžiausiajai apkrovai, didžiausieji įtempiai artėja išorinės armatūros juostos galų link, dėl to bandinys suyra horizontaliame pjūvyje, atplėšiant anglies pluoštą su betono sluoksniu (3.71 pav.).



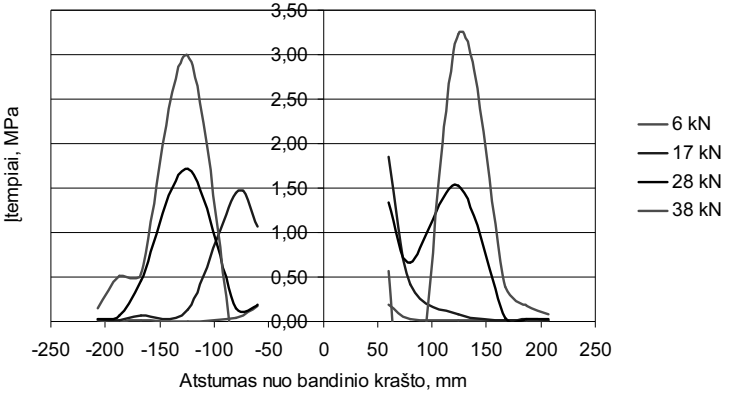
3.64 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas HBS bandinių jungties zonoje
Fig. 3.64. Bond stress distribution of beams HBS

Bandinių HBC, kurių išorinė armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis, įtempiai pradinėse apkrovimo pakopose (iki 15 kN) didėja panašiai kaip ir bandinių HBS (3.65 pav.). Kai apkrova pasiekia 15 kN, pasikeičia įtempių kreivės pobūdis. Didžiausieji įtempiai pasiekiami esant didžiausiajai apkrovai ties metaline anglies pluoštą inkaruojančia apkaba. Išorinės armatūros juostos gale viso apkrovimo metu pastebimas nedidelis įtempių padidėjimas. Tai rodo, kad metalinės apkabos patikimai papildomai inkaruoja išorinę armatūrą. Bandiniai suyra statmenajame pjūvyje trūkstant išorinei armatūrai bandinio centre (3.70 pav.).

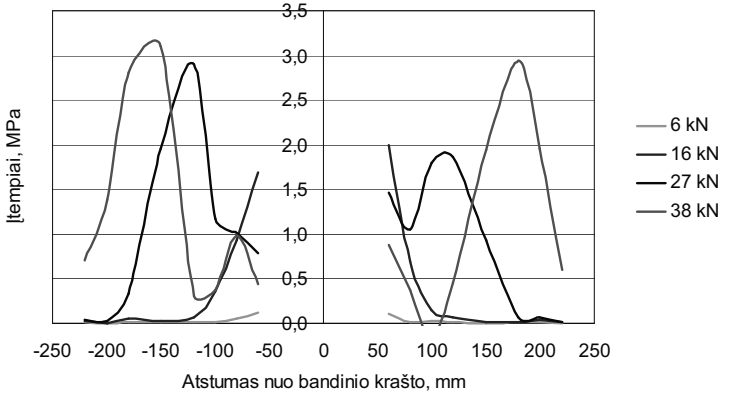


3.65 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas HBC bandinių jungties zonoje
Fig. 3.65. Bond stress distribution of beams HBC

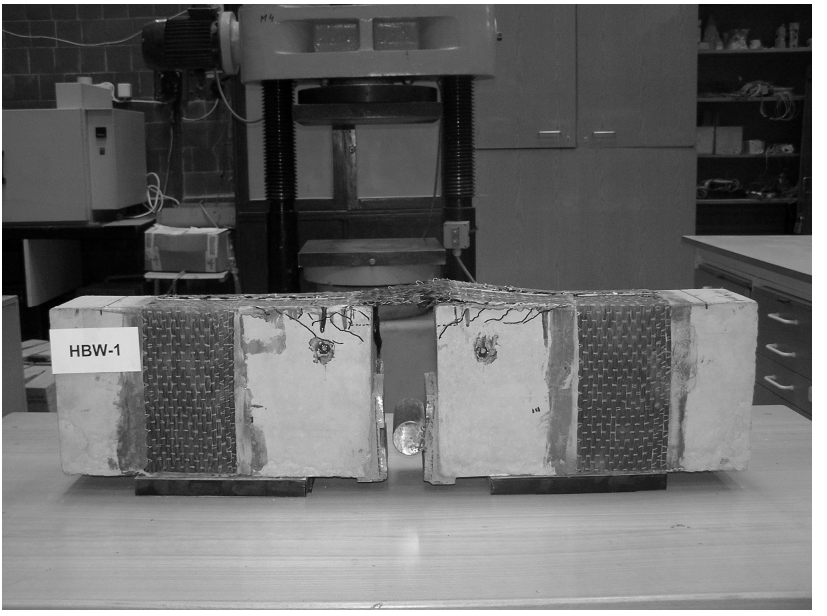
Tyrimais nustatyta, kad metalinės jungės nėra veiksmingas būdas inkaruoti anglies pluoštą (3.68 pav.). Didėjant apkrovai, kaip ir bandiniuose HBC (išorinė armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis), įtempiai didžiausias reikšmes pasiekia ties metalinėmis jungėmis. Tačiau bandiniai HBA, kurių išorinė armatūra inkaruota metalinėmis jungėmis, suyra išplėšiant junges (3.69 pav.), o ne trūkstant išorinei anglies pluošto armatūrai.



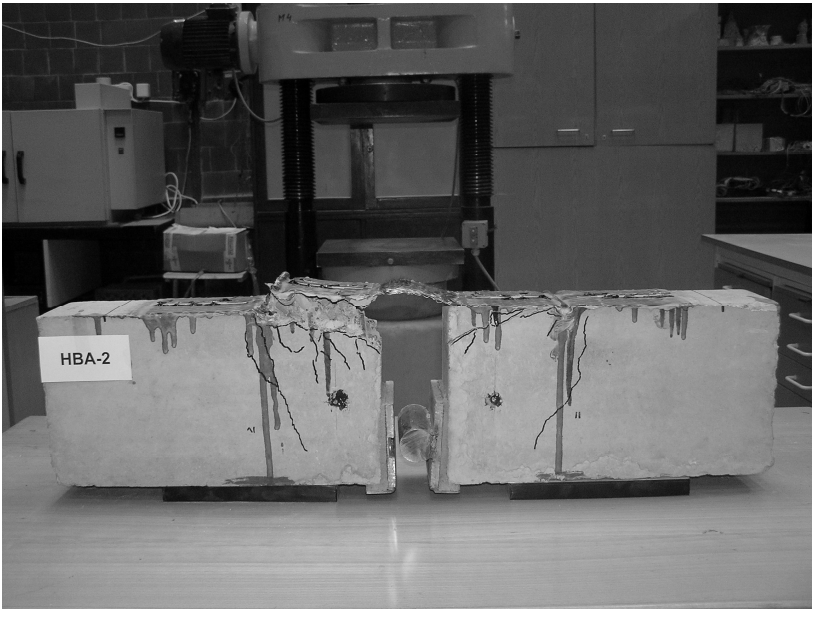
3.66 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas HBA bandinių jungties zonoje
Fig. 3.66. Bond stress distribution of beams HBA



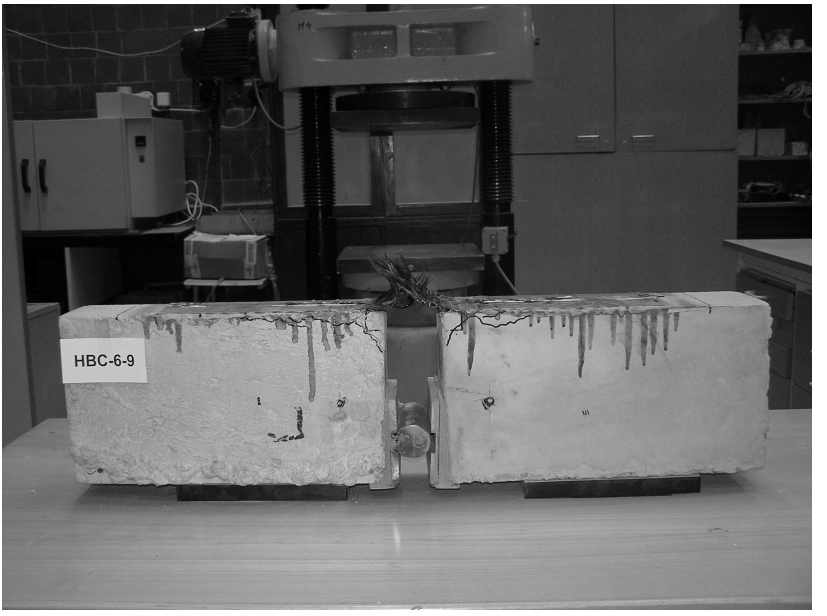
3.67 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas HBW bandinių jungties zonoje
Fig. 3.67. Bond stress distribution of beams HBW



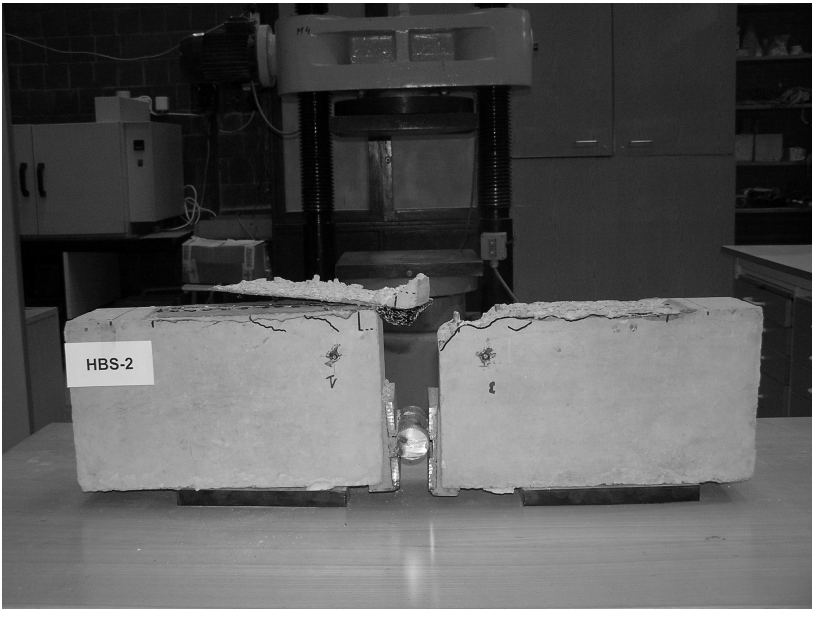
3.68 pav. HBW bandinių suirties pobūdis
Fig. 3.68. Failure mode of specimens HBW



3.69 pav. HBA bandinių suirties pobūdis
Fig. 3.69. Failure mode of specimens HBA



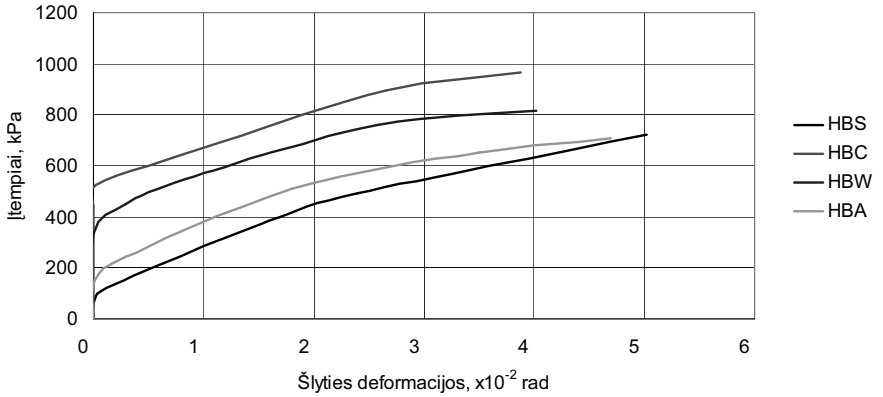
3.70 pav. HBC bandinių suirties pobūdis
Fig. 3.70. Failure mode of specimens HBC



3.71 pav. HBS bandinių suirties pobūdis
Fig. 3.71. Failure mode of specimens HBS

Bandinių, kurių išorinė armatūra inkaruota anglies pluošto apkabomis, įtempiai jungtyje pasiskirsto panašiai kaip ir bandinių HBC, kurių išorinė armatūra papildomai inkaruota metalinėmis apkabomis (3.67 pav.). Esminis skirtumas yra tas, kad bandinių HBW pluošto juostos galuose pasiekiami didesni įtempiai, esant didžiausiajai apkrovai. Išorinę armatūrą inkaravus pluošto apkabomis, pasiekiami anglies pluošto stiprio įtempiai. Bandiniai HBW su inkaruota išorine armatūra suyra statmenajame pjūvyje trūkstant anglies pluoštui bandinio viduryje (3.68 pav).

Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad šlyties deformacijos priklauso nuo išorinės armatūros inkaravimo būdo (3.72 pav.). Bandiniuose HBA (anglies pluoštas inkaruotas metalinėmis jungėmis) ir HBS (anglies pluoštas papildomai neinkaruotas) pasireiškia panašaus dydžio ir pobūdžio šlyties deformacijos. Kai išorinė armatūra inkaruota metalinėmis (HBC bandiniai) arba pluošto (HBW bandiniai) apkabomis, šlyties deformacijos pasireiškia esant gerokai didesniems įtempiams nei bandiniuose HBA ir HBS.



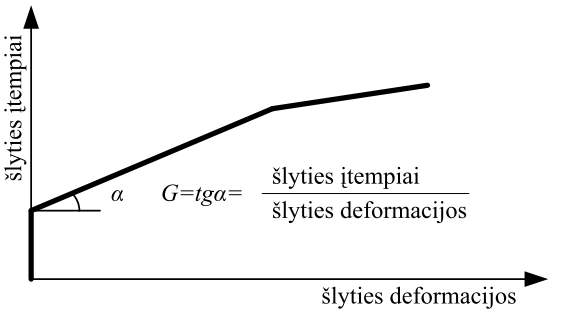
3.72 pav. Šlyties įtempių ir deformacijų grafikai
Fig. 3.72. Shear stress-strain curves

Anglies pluoštą papildomai inkaravus jungėmis, šlyties deformacijos jungtyje sumažėja. Kai apkrova yra $0{,}6F_u$ (F_u – ardančioji apkrova), naudojant metalines junges, šlyties deformacijos sumažėja 7 %, naudojant anglies pluošto apkabas, – 25 %, o plienines apkabas, – 30 %.

Tyrimų rezultatai rodo, kad jungties tarp betono ir anglies pluošto šlyties charakteristika gali būti apskaičiuojama taikant šią lygtį:

$$G_{w,eff} = \frac{3k_1\beta}{E_f A_f} E_{cm}, \tag{3.7}$$

čia k_1 – koeficientas, įvertinantis išorinės armatūros inkaravimo būdą. Koeficientas nustatytas atliekant sustiprintų sijų skaičiavimus, remiantis eksperimentiniais tyrimais: kai anglies pluošto armatūra papildomai neinkaruota, inkaruota sprausteliais arba metalinėmis jungėmis, $k_1 = 2{,}5$; kai išorinė armatūra inkaruota anglies pluošto apkabomis, $k_1 = 3{,}3$; anglies pluošto armatūrai inkaruoti naudojant metalines apkabas, $k_1 = 5$; kai išorinė armatūra užleista už atramų, $k_1 = 16{,}7$; β – koeficientas įvertinantis išorinės armatūros pločio įtaką, sustiprintų gelžbetoninių elementų darbui.



3.73 pav. Šlyties modulio priklausomybė
Fig. 3.73. Dependence of shear modulus

$$\beta = \sqrt{\frac{2{,}5 - \frac{b_f}{b_c}}{1{,}5 + \frac{b_f}{b_c}}}. \qquad (3.8)$$

čia b_f – anglies pluošto plotis; b_c – gelžbetoninės sijos plotis.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikti eksperimentiniai tyrimai rodo, kad išorine anglies pluošto armatūra sustiprintų lenkiamųjų gelžbetoninių konstrukcijų darbe galima išskirti keturis etapus: elemento darbas iki pirmųjų plyšių atsivėrimo; nuo plyšių atsivėrimo iki takumo įtempių pasireiškimo strypinėje plieninėje armatūroje; strypinei plieninei armatūrai tekant; iki išorinės armatūros trūkimo, viršijus takumo įtempius strypinėje armatūroje.

2. Sijas sustiprinus anglies pluoštu be papildomų inkarų jungtyse, įlinkiai sumažėja 20–60 %, o laikomoji galia padidėja 50–70 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis. Sustiprintų sijų, kurių išorinė armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis, įlinkiai sumažėja 30–70 %, laikomoji galia padidėja 90–110 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis. Išorinę armatūrą inkaravus anglies pluošto apkabomis, įlinkiai sumažėja 30–50 %, laikomoji galia padidėja 80–90 %. Papildomos metalinės jungės įtakos sustiprintų sijų įlinkiams ir laikomajai galiai neturėjo.

3. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad skirtingi išorinės anglies pluošto armatūros inkaravimo zonos apspaudimo lygiai metalinėmis apkabomis neturėjo įtakos sustiprintų elementų įlinkiams ir laikomajai galiai. Tyrimais taip pat nustatyta, kad pluošto apspaudimo metalinėmis apkabomis ploto didėjimas neturi įtakos išorine anglies pluošto armatūra sustiprintų sijų laikomajai galiai, tačiau turi įtakos sustiprintų sijų įlinkiams – didėjant pluošto apspaudimo plotui nuo 50 cm^2 iki 150 cm^2, įlinkiai atitinkamai sumažėja 10 % ir 30 %, lyginant su sijos, kurios anglies pluoštas papildomai neinkaruotas, įlinkiais.

4. Nustatyta, kad sustiprintų sijų suirimo pobūdis priklauso nuo išorinės armatūros inkaravimo būdo. Sijos, kurių išorinė armatūra papildomai neinkaruota, suyra horizontaliame pjūvyje atplėšiant anglies pluošto juostą kartu su betono sluoksniu. Bandiniai su papildomai inkaruota anglies pluošto armatūra (metalinėmis apkabomis ir užleidžiant už atramų) suyra statmenajame pjūvyje trūkstant išorinei armatūrai sijų tarpatramio viduryje, pasiekus ribinius anglies pluošto įtempius.

5. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų sustiprinimo išorine armatūra veiksmingumas priklauso nuo anglies pluošto ir tempiamosios strypinės armatūros plotų santykio A_f / A_{s1}. Kai plotų santykis 29 %, sustiprintų sijų įlinkiai sumažėja 70 %, o laikomoji galia padidėja 170 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis. Armatūrų plotų santykiui sumažėjus iki 17 %, sustiprintų sijų įlinkiai sumažėja 60 %, o laikomoji galia padidėja 100 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis.

6. Nustatyta, kad betono stipris turi didelę įtaką sustiprintų sijų laikomajai galiai, kai išorinė armatūra papildomai neinkaruota. Sustiprintų sijų, kurių išorinė anglies pluošto armatūra papildomai neinkaruota, santykinė laikomoji galia sumažėja nuo 70 % iki 50 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis, betono stipriui atitinkamai mažėjant nuo 35 MPa iki 24 MPa. Sijų išorinę armatūrą papildomai inkaravus (metalinėmis apkabomis), betono stipris neturi įtakos sustiprintų bandinių laikomajai galiai, santykinė laikomoji galia padidėja vidutiniškai 100 % , lyginant su sijomis be išorinės armatūros.

7. Eksperimentiniai tyrimai patvirtino, kad jungtis tarp betono ir anglies pluošto nėra standi. HB serijos bandiniuose su papildomu išorinės armatūros inkaravimu pradinės šlyties deformacijos jungtyje pasireiškia esant iki 5 kartų didesniems įtempiams, lyginant su bandiniais, kurių išorinė anglies pluošto armatūra papildomai neinkaruota.
8. Remiantis eksperimentiniais tyrimais, nustatytas jungties tarp betono ir anglies pluošto šlyties modulis, bei pasiūlyta lygtis jam apskaičiuoti.

4

Eksperimentinių ir teorinių tyrimų vertinimas

4.1. Eksperimentiniai ir teoriniai sustiprintų sijų laikomosios galios rezultatai

Gauti rezultatai rodo, kad siūloma skaičiavimo metodika, kuri grindžiama sudėtinių strypų teorija (SST), gana tiksliai įvertina išorine armatūra sustiprintų sijų laikomąją galią (4.1 lentelė ir 4.1 pav.). Atliktų eksperimentų metu nustatyta sijų laikomoji galia ir kitų dvidešimt keturių autorių gautieji septyniasdešimt penkių sijų laikomosios galios bandymų rezultatai pakankamai gerai sutampa su apskaičiuotosiomis reikšmėmis.

Palyginimui atlikti skaičiavimai pagal metodikas pateiktas ACI 440.2R–02 ir *FIB biulletin 14* rekomendacijose. Gauti rezultatai parodė, kad taikant siūlomą metodiką, gana tiksliai nustatoma išorine armatūra sustiprintų sijų laikomoji galia – skaičiavimų vidurkis lygus 1,01 (4.1 lentelė ir 4.1 pav.). Pagal ACI ir FIB metodus atliktų skaičiavimų vidurkiai 0,96 ir 0,89.

Siekiant nustatyti skaičiavimo metodų patikimumą apskaičiuotas patikimumo koeficientas k_{min} (Vadlūga, Kudzys 1975):

$$k_{\min} = \frac{1}{\left(F_{\exp}/F_{calc}\right)_{vid} \cdot \left(1 - n\delta\right)}. \quad (4.1)$$

Nustatyta, kad kai standartų skaičius n=3: $k_{min,\mathrm{SST}}$=1,34; $k_{min,\mathrm{ACI}}$=2,16; $k_{min,\mathrm{FIB}}$=2,68. Gauti rezultatai rodo, kad, lyginant tris skaičiavimo metodikas, pagal kurias apskaičiuojama lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų anglies pluoštu, laikomoji galia, tinkamiausia yra metodika, kuri remiasi sudėtinių strypų teorija.

4.1 lentelė. Sijų eksperimentinė ir teorinė laikomoji galia
Table 4.1. Experimental and theoretical load-carrying capacity of beams

Autorius	Sijos tipas	F_{exp}, kN	Skaičiavimo metodas					
			SST		ACI		FIB	
			F_{calc}, kN	F_{exp}/F_{calc}	F_{calc}, kN	F_{exp}/F_{calc}	F_{calc}, kN	F_{exp}/F_{calc}
	BR1-2	79,09	77,01	1,03	95,21	0,83	103,9	0,76
	BR1-3	78,15	74,24	1,05	93,02	0,84	101,5	0,77
	BA1-4	79,88	75,01	1,06	92,28	0,87	100,7	0,79
	BA1-5	79,42	75,43	1,05	95,27	0,83	104,0	0,76
	BS1-6	83,57	82,03	1,02	92,28	0,91	100,7	0,83
	BS1-7	81,4	82,80	0,98	92,96	0,88	101,5	0,80
	BC1-8	91,46	93,13	0,98	95,65	0,96	104,4	0,88
	BC1-9	90,51	90,71	1,00	93,58	0,97	102,1	0,89
	BR2-2	79,38	76,26	1,04	93,95	0,84	102,5	0,77
	BC2-3	89,06	91,17	0,98	93,27	0,95	101,8	0,87
	BC2-4	90,98	93,64	0,97	95,75	0,95	104,5	0,87
	BC2-5	90,76	93,20	0,97	95,19	0,95	103,9	0,87
	BC2-6	93,44	93,88	1,00	95,42	0,98	104,1	0,90
	BC2-7	94,96	92,41	1,03	94,51	1,00	103,1	0,92
	BC2-8	95,17	91,76	1,04	93,06	1,02	101,5	0,94
	BC2-9	93,51	92,41	1,01	94,51	0,99	103,1	0,91
	BR3-2	67,81	68,93	0,98	84,05	0,81	92,0	0,74
	BC3-3	88,95	87,51	1,02	87,46	1,02	95,7	0,93
	BC3-4	90,67	86,27	1,05	86,20	1,05	94,4	0,96
	BC3-5	86,49	88,74	0,97	88,72	0,97	97,1	0,89
	BC3-6	87,28	86,76	1,01	87,13	1,00	95,4	0,91
	BC3-7	87,33	87,07	1,00	86,91	1,00	95,1	0,92

4.1 lentelės tęsinys

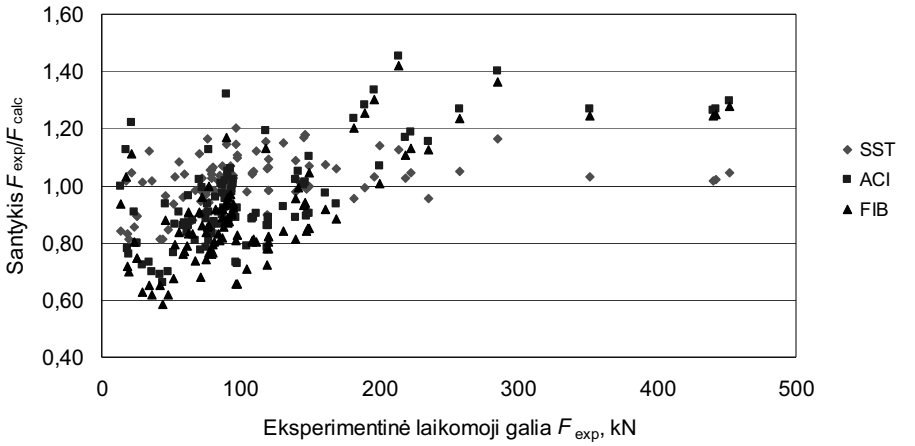
	BC3-8	90,66	87,57	1,04	87,85	1,03	96,2	0,94
	BC3-9	86,04	84,74	1,02	85,52	1,01	93,6	0,92
	BC3-10	93,02	87,19	1,07	87,68	1,06	96,0	0,97
	SA6-1	77,5	78,4	0,99	68,85	1,13	77,8	1,00
	SA6-2	90	78,5	1,15	68,27	1,32	77,1	1,17
	SB6-1	44	54,1	0,81	66,73	0,66	75,4	0,58
	SB6-2	48	56,9	0,84	68,65	0,70	77,5	0,62
	SC6-1	52	55,6	0,93	68,00	0,76	76,8	0,68
	SC6-2	60	57,8	1,04	69,11	0,87	78,0	0,77
	SD6-1	58,5	60,9	0,96	68,00	0,86	76,8	0,76
	SD6-2	70	63,0	1,11	68,44	1,02	77,3	0,91
Brosens 2001	A1	111	98,9	1,12	123,2	0,90	138,3	0,80
	B1	131	114,0	1,15	141,1	0,93	156,1	0,84
	c1	120,5	113,4	1,06	140,1	0,86	155,0	0,78
	d1	118,9	112,2	1,06	138,1	0,86	152,8	0,78
	e1	120,6	110,6	1,09	135,5	0,89	150,0	0,80
	f1	104,8	107,2	0,98	133,0	0,79	148,0	0,71
	g1	140,1	128,9	1,09	157,7	0,89	172,4	0,81
Alagusundaramoorthy 2003	CB11-1F	219,0	213,3	1,03	187,7	1,17	197,6	1,11
	CB12-1F	223,0	213,3	1,05	187,7	1,19	197,6	1,13
Beber *et al* 1999	VR3	65,2	74,1	0,88	74,1	0,88	78,5	0,83
	VR4	62,0	74,1	0,84	74,1	0,84	78,5	0,79
Ceroni *et al* 2001	A3	19,2	23,6	0,81	25,2	0,76	27,5	0,70
	A4	19,0	22,9	0,83	24,4	0,78	26,5	0,72
	B2	25,8	28,9	0,89	32,3	0,80	34,6	0,75
	B3	25,8	28,9	0,89	32,3	0,80	34,6	0,75
	D3	42,1	51,8	0,81	61,1	0,69	64,7	0,65
Ahmed *et al* 2001	DF1	118,0	102,3	1,15	99,0	1,19	104,6	1,13
	AF3	96,5	80,2	1,20	108,4	0,89	119,6	0,81
Shahawy *et al* 1996	S6-P3	97,9	89,2	1,10	134,5	0,73	149,3	0,66
Maalej, Leong 2005	A3	77,5	78,0	0,99	85,5	0,91	90,1	0,86
	A4	75,5	78,0	0,97	85,5	0,88	90,1	0,84
Ramana 2000	0,52b	21,2	20,3	1,04	17,4	1,22	19,1	1,11
	0,89b	23,2	27,1	0,86	25,6	0,90	28,9	0,80
	1,42b	28,9	28,5	1,01	40,1	0,72	46,1	0,63
Maalej, Bian 2001	B2	72,0	73,4	0,98	80,1	0,90	83,6	0,86
	S3a	120,6	122,4	0,99	135,8	0,89	146,6	0,82

4.1 lentelės tęsinys

Pham, Al-Mahaidi 2004a	S3b	120,3	122,4	0,98	135,8	0,89	146,6	0,82
	S1a	147,5	149,6	0,99	164,9	0,89	175,4	0,84
	S1b	149,0	149,6	1,00	164,9	0,90	175,4	0,85
	S2a	160,8	149,6	1,07	164,9	0,98	175,4	0,92
	S2b	148,9	149,6	1,00	164,9	0,90	175,4	0,85
Gao *et al* 2004	A20	87,9	95,9	0,92	95,2	0,92	103,0	0,85
	B20	96,8	84,4	1,15	132,0	0,73	147,1	0,66
Rahimi, Hutchinson 2001	B3	55,2	51,0	1,08	60,7	0,91	66,0	0,84
	B4	52,5	51,0	1,03	60,7	0,86	66,0	0,80
	c3	74,9	82,2	0,91	95,7	0,78	100,7	0,74
	c4	77,2	82,2	0,94	95,7	0,81	100,7	0,77
White *et al* 2001	S-A	200,0	175,4	1,14	187,0	1,07	198,8	1,01
	R-A	181,5	190,2	0,95	147,2	1,23	150,9	1,20
	R-B	189,0	190,2	0,99	147,2	1,28	150,9	1,25
	R-C	196,4	190,2	1,03	147,2	1,33	150,9	1,30
	R-D	214,0	190,2	1,12	147,2	1,45	150,9	1,42
Kim, Sebastian 2002	B5	142,0	139,5	1,02	135,1	1,05	142,8	0,99
	B6	149,0	139,5	1,07	135,1	1,10	142,8	1,04
Xiong *et al* 2007	2C	45,5	47,2	0,96	48,7	0,93	51,9	0,88
Ross *et al* 1999	1B	80,1	75,4	1,06	92,0	0,87	104,4	0,77
	1C	71,2	75,4	0,94	92,0	0,77	104,4	0,68
	2B	97,9	88,6	1,11	106,4	0,92	118,5	0,83
	3B	109,0	103,7	1,05	122,6	0,89	134,4	0,81
	3C	108,1	103,7	1,04	122,6	0,88	134,4	0,80
	3D	108,6	103,7	1,05	122,6	0,89	134,4	0,81
	5B	146,8	124,7	1,18	144,9	1,01	156,3	0,94
	5C	146,6	124,7	1,18	144,9	1,01	156,3	0,94
	5D	145,5	124,7	1,17	144,9	1,00	156,3	0,93
	5D	169,1	159,3	1,06	180,5	0,94	191,1	0,89
Triantafillou, Plevris 1992	2	13,2	15,7	0,84	13,2	1,00	14,1	0,93
	3	17,3	17,0	1,01	15,4	1,12	16,8	1,03
Aprile *et al* 2001	BC	119,0	132,7	0,90	151,8	0,78	164,3	0,72
Tann *et al* 2004	B4	72,5	70,5	1,03	72,9	0,99	75,5	0,96
	B6	62,5	70,4	0,89	72,7	0,86	75,3	0,83
Wenwei, Guo 2006	CFC30	140,0	142,9	0,98	137,1	1,02	146,5	0,96
	B2	285,0	244,8	1,16	203,8	1,40	209,2	1,36
	B3	352,0	341,3	1,03	277,7	1,27	283,0	1,24

4.1 lentelės pabaiga

Chan *et al* 2001	B4	442,0	432,5	1,02	348,1	1,27	353,4	1,25
	B5	235,0	245,6	0,96	203,8	1,15	209,2	1,12
	B6	258,0	245,6	1,05	203,8	1,27	209,2	1,23
	B7	452,0	432,5	1,05	348,1	1,30	353,4	1,28
	B8	440,0	432,5	1,02	348,1	1,26	353,4	1,25
Spadea *et al* 2000	A1.1	86,8	81,3	1,07	96,9	0,90	106,5	0,82
Zhang *et al* 2006	A10	62,7	71,9	0,87	65,0	0,96	69,1	0,91
	B10	82,4	99,2	0,83	86,0	0,96	89,8	0,92
	A20	75,8	65,2	1,16	81,1	0,93	88,8	0,85
	B20	85,1	82,3	1,03	98,2	0,87	105,3	0,81
Garden *et al* 1998	B1U	36,5	35,9	1,02	52,4	0,70	59,2	0,62
	B3U	34,0	30,3	1,12	46,3	0,73	52,2	0,65
Vidurkis				1,01		0,96		0,89
Standartas				0,0882		0,1643		0,1714
Variacijos koeficientas				0,0871		0,1718		0,1932
Patikimumo koeficientas				1,34		2,16		2,68



4.1 pav. Sijų eksperimentinės ir teorinės laikomosios galios lyginimas
Fig. 4.1. Comparison experimental and theoretical load-carrying capacity of beams

4.2. Eksperimentiniai ir teoriniai sustiprintų sijų įlinkių rezultatai

Sustiprintų sijų įlinkiai yra apskaičiuojami pagal 2 skyriuje pateiktą formulę:

$$d = M \cdot k_r \left(\frac{l^2}{8E_{eff} \cdot I_{eff}} + \frac{1}{D} \left(\frac{ch(0{,}5\lambda \cdot l) - 1}{\lambda^2 \cdot ch(0{,}5\lambda \cdot l)} \right) \right). \quad (4.2)$$

Atlikus skaičiavimus pagal siūlomą metodiką ir siekiant patikslinti skaičiavimo rezultatus yra papildomai nustatomas koeficientas k_r:

$$k_r = \frac{M_{cr}}{M} \varphi_f + 0{,}5\varphi_s . \quad (4.3)$$

Dydis φ_f, vertinantis išorinės anglies pluošto armatūros įtaką sustiprintų sijų įlinkiams iki tempiamoji strypinė armatūra pasiekia takumo įtempius ir po to:

$$\varphi_f = E_f \cdot A_f \cdot 0{,}04, \text{ kai } \sigma_s < \sigma_y ; \quad (4.4)$$

$$\varphi_f = E_f \cdot A_f \cdot 0{,}25, \text{ kai } \sigma_s > \sigma_y . \quad (4.5)$$

Koeficientas φ_s, įvertinantis gelžbetoninio elemento armavimą plienine strypine tempiamąja armatūra ir išorine anglies pluošto armatūra, apskaičiuojamas taip:

$$\varphi_s = 1, \text{ kai } \sigma_s < \sigma_y ; \quad (4.6)$$

$$\varphi_s = 1 - k_2 \frac{E_{s1} \cdot A_{s1}}{E_f \cdot A_f}, \text{ kai } \sigma_s > \sigma_y . \quad (4.7)$$

čia k_2 – koeficientas, įvertinantis išorinės armatūros inkaravimo būdą: kai anglies pluošto armatūra papildomai neinkaruota, inkaruota sprausteliais arba metalinėmis jungėmis, $k_2 = 1{,}65$; kai išorinė armatūra inkaruota anglies pluošto apka-

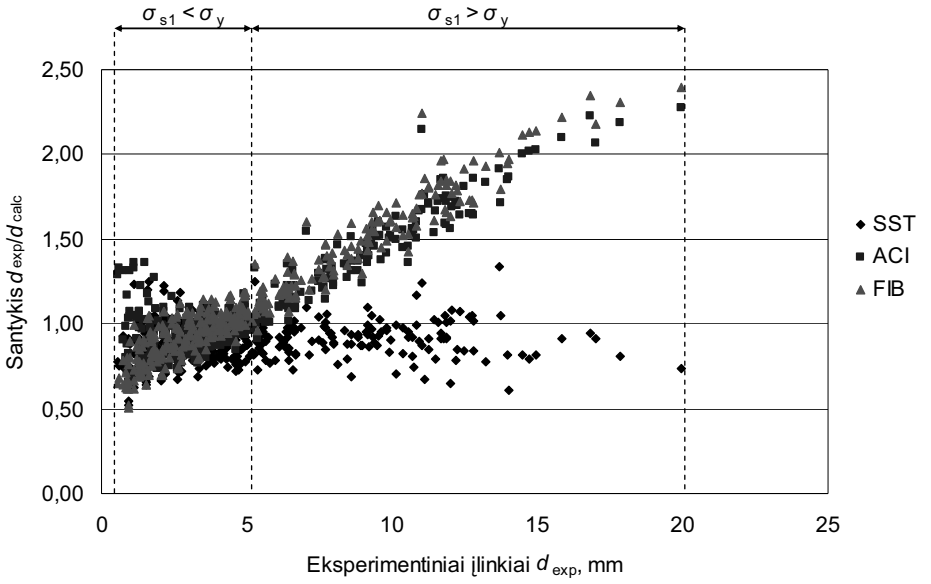
bomis, $k_2 = 1{,}7$; anglies pluošto armatūrai inkaruoti naudojant metalines apkabas, $k_2 = 1{,}8$; kai išorinė armatūra užleista už atramų, $k_2 = 2{,}4$.

Gauti skaičiavimo rezultatai su eksperimentiniais palyginti 4.2 paveiksle ir 4.2 lentelėje.

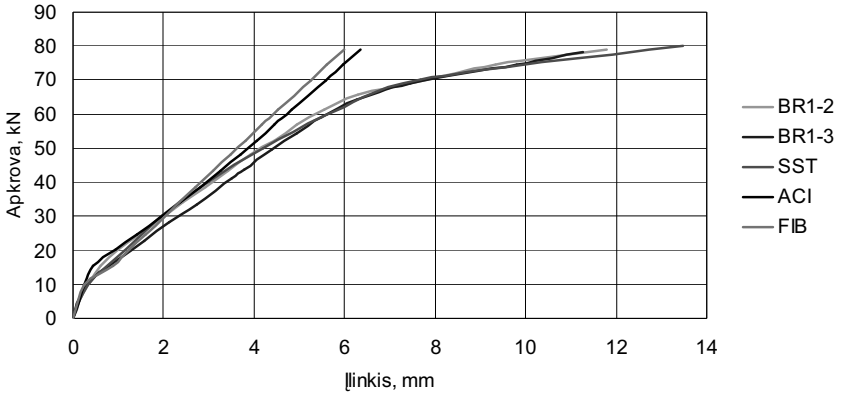
Taip pat atlikti gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies pluošto armatūra, įlinkių skaičiavimai pagal metodikas pateiktas ACI 440.2R–02 ir *FIB biulletin 14* rekomendacijose.

4.2 lentelė. Eksperimentinių ir teorinių įlinkių palyginimas
Table 4.2. Comparison of experimental and theoretical deflections

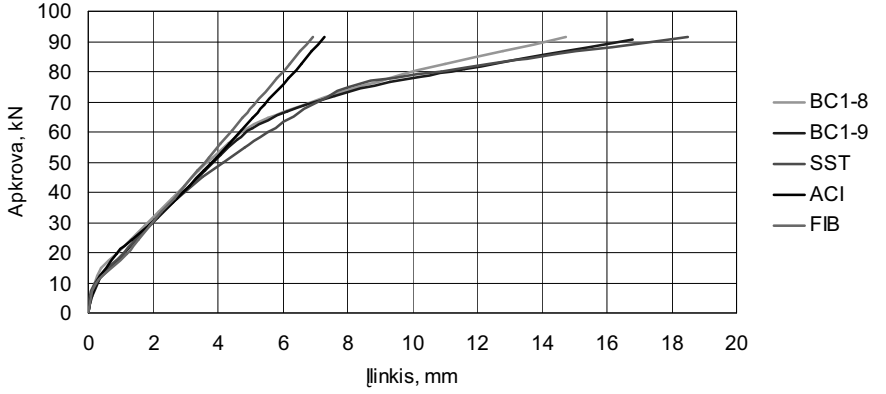
Įlinkių skaičiavimo rezultatai	$M < M_y$			$M > M_y$		
	SST d_{exp} / d_{calc}	ACI d_{exp} / d_{calc}	FIB d_{exp} / d_{calc}	SST d_{exp} / d_{calc}	ACI d_{exp} / d_{calc}	FIB d_{exp} / d_{calc}
Vidurkis	0,89	0,93	0,91	0,90	1,37	1,44
Standartas	0,1194	0,1372	0,1416	0,1132	0,3332	0,3531
Variacijos koeficientas	0,1343	0,1470	0,1553	0,1265	0,2432	0,2447
Patikimumo koeficientas	1,88	1,92	2,05	1,80	2,70	2,61



4.2 pav. Sijų eksperimentinių ir teorinių įlinkių lyginimas
Fig. 4.2. Comparison of experimental and theoretical deflections



4.3 pav. Sijų BR1-1, BR1-2 eksperimentiniai ir apskaičiuotieji įlinkiai
Fig. 4.3. Theoretical and experimental deflections of beams BR1-1, BR1-2



4.4 pav. Sijų BC1-8, BC1-9 eksperimentiniai ir apskaičiuotieji įlinkiai
Fig. 4.4. Theoretical and experimental deflections of beams BC1-8, BC1-9

Atliktų skaičiavimų rezultatai rodo, kad įlinkių skaičiavimui taikant metodiką, leidžiančią įvertinti jungties standumą tarp betono ir anglies pluošto, gaunamas pakankamai geras eksperimentinių ir teorinių įlinkių sutapimas. Charakteringi įlinkių skaičiavimo rezultatai pavaizduoti 4.3 ir 4.4 paveiksluose.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

Pagal siūlomą skaičiavimo metodą apskaičiuoti lenkiamųjų gelžbetoninių sijų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra, teorinė laikomoji galia ir teoriniai įlinkiai gerai sutapo su eksperimentiniais. Skaičiuojant (atliktų eksperimentinių bandinių ir kitų autorių tirtų 75 lenkiamųjų elementų) laikomąją galią, vidutinis eksperimentinių ir teorinių reikšmių vidurkis F_{exp}/F_{calc} = 1,01, vidutinis kvadratinis nuokrypis lygus s = 0,0882.

Skaičiuojant pagal siūlomą metodą, įvertinantį betono ir anglies pluošto jungties standumą, gaunami tikslesni lenkiamųjų elementų laikomosios galios skaičiavimų rezultatai, lyginant su metodais, kurie to nevertina. Pagal ACI 440.2R–02 ir *FIB biulletin 14* metodus atliktų eksperimentinių sijų laikomosios galios skaičiavimų vidurkiai ir kvadratiniai nuokrypiai: F_{exp}/F_{calc} = 0,96, s = 0,1643 (ACI); F_{exp}/F_{calc} = 0,89, s = 0,1714 (FIB).

Skaičiavimo metodų patikimumo koeficientai rodo ($k_{min,\mathrm{SST}}$ = 1,34; $k_{min,\mathrm{ACI}}$ = 2,16; $k_{min,\mathrm{FIB}}$ = 2,68), kad tinkamiausias metodas lenkiamųjų elementų, sustiprintų anglies pluoštu, laikomajai galiai apskaičiuoti yra siūloma metodika, kuri įvertina betono ir anglies pluošto jungties standumą.

Lyginant eksperimentinius ir teorinius įlinkius, apskaičiuotus pagal siūlomą metodiką, iki tempiamoji plieninė strypinė armatūra pasiekia takumo įtempius, gautas vidurkis d_{exp}/d_{calc} = 0,89, kvadratinis nuokrypis s = 0,1194 ir skaičiavimo metodikos patikimumo koeficientas $k_{min,\mathrm{SST}}$ = 1,88. Tempiamajai plieninei strypinei armatūrai viršijus takumo įtempius, eksperimentinių ir teorinių įlinkių santykio vidurkis d_{exp}/d_{calc} = 0,90, kvadratinis nuokrypis s = 0,1132, patikimumo koeficientas $k_{min,\mathrm{SST}}$ = 1,80. Įlinkius skaičiuojant pagal ACI 440.2R–02 ir *FIB biulletin 14* metodikas, neįvertinančias betono ir anglies pluošto jungties standumo, gauti tokie rezultatai: iki tempiamoji plieninė strypinė armatūra pasiekia takumo įtempius d_{exp}/d_{calc} = 0,93 (ACI), s = 0,1372 (ACI), $k_{min,\mathrm{SST}}$ = 1,92 (ACI), d_{exp}/d_{calc} = 0,91 (FIB), s = 0,1416 (FIB), $k_{min,\mathrm{SST}}$ = 2,05 (FIB); tempiamajai plieninei strypinei armatūrai viršijus takumo įtempius d_{exp}/d_{calc} = 1,37 (ACI), s = 0,3332 (ACI), $k_{min,\mathrm{SST}}$ = 2,70 (ACI), d_{exp}/d_{calc} = 1,44 (FIB), s = 0,3531 (FIB), $k_{min,\mathrm{SST}}$ = 2,61 (FIB). Skaičiavimų rezultatai rodo, kad tinkamiausia metodika lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų išorine anglies pluošto armatūra, įlinkiams apskaičiuoti yra siūloma metodika, įvertinanti betono ir anglies pluošto jungties standumą.

Pagrindiniai darbo rezultatai ir išvados

1. Literatūroje pateikti eksperimentiniai tyrimai rodo, kad išorinės pluošto armatūros naudojimas yra veiksmingas būdas stiprinti gelžbetonines konstrukcijas. Sustiprinus gelžbetonines sijas anglies pluoštu, padidėja plyšių susidarymo momentas, sumažėja įlinkiai ir plyšių plotis, padidėja laikomoji galia.

2. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta išorinės armatūros papildomo inkaravimo būdo įtaka sustiprintų sijų darbui. Veiksmingiausias inkaravimo būdas – inkaravimas metalinėmis apkabomis. Išorinę armatūrą inkaravus šiuo būdu, sumažėja betono ir anglies pluošto jungties šlyties deformacijos, dėl to sumažėja įlinkiai, padidėja laikomoji galia, lyginant su sijomis, kurių anglies pluoštas papildomai neinkaruotas.

3. Sijų, sustiprintų išorine armatūra, suirimo pobūdis priklauso nuo pluošto papildomo inkaravimo būdo. Bandiniai, kurių išorinė armatūra papildomai neinkaruota, suyra horizontaliame pjūvyje atplėšiant anglies pluošto juostą su betono sluoksniu. Papildomai inkaravus pluoštą, sijos suyra trūkstant išorinei armatūrai inkaravimo zonoje arba tarpatramio viduryje.

4. Tyrimais nustatyta, kad išorinę armatūrą inkaruojant metalinėmis apkabomis, pluošto apspaudimo lygis ir plotas neturi įtakos sustiprintų sijų laikomajai galiai. Rekomenduojamas mažiausias pluošto apspaudimo plotas ir lygis – 50 cm^2 ir 1 MPa, kad būtų pasiekiamas didžiausias sustiprinimo veiksmingumas

laikomosios galios atžvilgiu. Nustatyta, kad didėjant pluošto apspaudimo plotui, didėja betono ir anglies pluošto jungties standumas, mažėja sustiprintų sijų įlinkiai.

5. Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad sijas sustiprinus anglies pluoštu be papildomų inkarų jungtyse, įlinkiai sumažėja 20–60 %, o laikomoji galia padidėja 50–70 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis. Sustiprintų sijų, kurių išorinė armatūra inkaruota metalinėmis apkabomis, įlinkiai sumažėja 30–70 %, laikomoji galia padidėja 90–110 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis. Išorinę armatūrą inkaravus anglies pluošto apkabomis, įlinkiai sumažėja 30–50 %, laikomoji galia padidėja 80–90 %. Papildomos metalinės jungės įtakos sustiprintų sijų įlinkiams ir laikomajai galiai neturėjo.

6. Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų sustiprinimo išorine armatūra veiksmingumas priklauso nuo anglies pluošto ir tempiamosios strypinės armatūros plotų santykio A_f / A_{s1}. Kai plotų santykis 29 %, sustiprintų sijų įlinkiai sumažėja 70 %, o laikomoji galia padidėja 170 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis. Armatūrų plotų santykiui sumažėjus iki 17 %, sustiprintų sijų įlinkiai sumažėja 60 %, o laikomoji galia padidėja 100 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis.

7. Nustatyta, kad betono stipris turi didelę įtaką sustiprintų sijų laikomajai galiai, kai išorinė armatūra papildomai neinkaruota. Sustiprintų sijų, kurių išorinė anglies pluošto armatūra papildomai neinkaruota, santykinė laikomoji galia sumažėja nuo 70 % iki 50 %, lyginant su nesustiprintomis sijomis, betono stipriui atitinkamai mažėjant nuo 35 MPa iki 24 MPa. Sijų išorinę armatūrą papildomai inkaravus (metalinėmis apkabomis), betono stipris neturi įtakos sustiprintų bandinių laikomajai galiai, santykinė laikomoji galia padidėja vidutiniškai 100 % , lyginant su sijomis be išorinės armatūros.

8. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, išorinės anglies pluošto armatūros ir stiprinamo elemento jungties šlyties deformacijos bei įtempių pasiskirstymas priklauso nuo pluošto papildomo inkaravimo būdo.

9. Siūloma metodika sustiprintų elementų laikomajai galiai ir įlinkiams skaičiuoti, paremta sudėtinių strypų teorija, leidžia įvertinti anglies pluošto ir stiprinamo elemento jungties standumą. Apskaičiuoti lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų išorine pluošto armatūra, laikomoji galia ir įlinkiai gana tiksliai sutampa su tyrimų rezultatais.

Literatūra ir šaltiniai

Abdel-Jaber, M. S.; Walker, P. R.; Hutchinson, A. R. 2003. Shear strengthening of reinforced concrete beams using different configurations of externally bonded carbon fibre reinforced plates, *Materials and Structures* 36(5): 291–301.

Ahmed, O.; Van Gemert D.; Vandewalle, L. 2001. Improved model for plate-end shear of CFRP strengthened RC beams, *Cement and Concrete Composites* 23(1): 3–19.

Alagusundaramoorthy, P.; Harik, I. E.; Choo, C. C. 2003. Flexural behaviour of rc beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets or fabric, *Journal of Composites for Construction* 7(4): 292–301.

Al-Amery, R.; Al-Mahaidi, R. 2006. Coupled flexural–shear retrofitting of RC beams using CFRP straps, *Composite Structures* 75(1–4): 457–464.

Almusallam, T. H.; Al-Salloum, Y. A. 2001. Ultimate strength prediction for RC beams externally strengthened by composite materials, *Composites Part B: Engineering* 32(7): 609–619.

American Concrete Institute (ACI). 2005. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-05).* Farmington Hills, Mich.

American Concrete Institute (ACI). 2008. *Guide for the Design and Construction of Externally bonded FRP systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08)*. Farmington Hills, Mich.

An, W.; Saadatmanesh, H.; Ehsani M. R. 1991. RC beams strengthened with FRP plates. II analysis and parametric study, *Journal of Structural Engineering* 117(11): 3434–3455.

Aprile, A.; Benedetti, A. 2004. Coupled flexural-shear design of R/C beams strengthened with FRP, *Composites Part B: Engineering* 35(1): 1–25.

Aprile, A.; Spacone, E.; Limkatanyu, S. 2001. Role of bond in RC beams strengthened with steel and FRP plates, *Journal of Structural Engineering* 127(12): 1445–1452.

Au, C.; Buyukozturk, O. 2006. Peel and shear fracture characterization of debonding in FRP plated concrete affected by moisture, *Journal of Composites for Construction* 10(1): 35–47.

Bakis, C. E.; Bank, L. C.; Brown, V. L.; Cosenza, E.; Davalos, J. F.; Lesko, J. J.; Machida, A.; Rizkalla, H.; Triantafillou, T. C. 2002. Fiber reinforced polymer composites for construction – state of the art review, *Journal of Composites for Construction* 6(2): 73–87.

Balaguru, P.; Nanni, A.; Giancaspro, J. 2008. *FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures*. Taylor and Francis Group. 348 p.

Bank, L. C.;. Arora, D. 2007. Analysis and design of rc beams with mechanically fastened FRP (MF-FRP) strips, *Composite Structures* 79(2): 180–191.

Bareisis, J. 2006. Stiffness and strength of multilayer beams, *Journal of Composite Materials* 40(6): 515–531.

Beber, A. J.; Filloh, A. C.; Campagnolo, J. L. 1999. Flexural Strengthening of R/C Beams with CFRP Sheets, in *The 8th International Conference in Structural Faults and Repair 99*, 1999, London. CD-ROM. Edinburgh: Engineering Technics Press, 1–9.

Bencardino, F.; Colotti, V.; Spadea, G.; Swamy, R. N. 2005. Shear behavior of reinforced concrete beams strengthened in flexure with bonded carbon fibre reinforced polymers laminates, *Canadian Journal of Civil Engineering* 32(5): 812–824.

Bencardino, F.; Spadea, G.; Swamy, R. N. 2007. The problem of shear in RC beams strengthened with CFRP laminates, *Construction and Building Materials* 21(11): 1997–2006.

Benjeddou, O.; Ouezdou, M. B.; Bedday, A. 2007. Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates, *Construction and Building Materials* 21(6): 1301–1310.

Brena, S. F.; Macri, B. M. 2004. Effect of carbon fiber reinforced polymer laminate configuration on the behavior of strengthened reinforced concrete beams, *Journal of Composites for Construction* 8(3): 229–240.

Brosens, K. 2001. *Anchorage of Externally Bonded Steel Plates and CFRP Laminates for the Strengthening of Concrete Elements*. PhD thesis, K.U.Leuven. 225 p.

Buyukozturk, O.; Gunes, O.; Karaca, E. 2004. Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites, *Construction and Building Materials* 18(1): 9–19.

Buyukozturk, O.; Hearing B. 1998. Failure behavior of precracred concrete beams retrofitted with FRP, *Journal of Composites for Construction* 2(3): 138–144.

Bulavs, F.; Radinsh, I.; Tirans, N. 2005. Improvement of capacity in bending by the use of FRP layers on RC beams, *Journal of Civil Engineering and Management* 11(3): 169–174.

Camata, G.; Spacone, E.; Al Mahaidi, R.; Saouma, V. 2004. Analysis of Test Specimens for Cohesive Near-Bond Failure of FRP-Plated Concrete, *Journal of Composites for Construction* 8(6): 528–538.

Camli, U. S.; Binici, B. 2007. Strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete and masonry, *Construction and Building Materials* 21(7): 1431–1446.

Capozucca, R.; Cerri, M. N. 2002. Static and dynamic behaviour of RC beam model strengthened by CFRP-sheets, *Construction and Building Materials* 16(2): 91–99.

Carolin, A. 2003. *Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*: Doctoral thesis. Lulea University of Technology. 194 p.

Casas, J. R.; Pascual, J. 2007. Debonding of FRP in bending: simplified model and experimental validation, *Construction and Building Materials* 21(10): 1940–1949.

Ceroni, F.; Pecce, M. 2007. Cracking behaviour of RC beams externally strengthened with emerging materials, *Construction and Building Materials* 21(4):736–745.

Ceroni, F.; Prota, A.; Pecce, M. 2001. Experimental behaviour of RC beams strengthened by FRP sheets, in *Proc. of the International Conference "Composites in Construction"*, Porto, 2001, 499–504.

Chahrour, A.; Soudki, K. 2005. Flexure response of reinforced concrete beams strengthened with end anchored partially bonded carbon fiber reinforced polymer strips, *Journal of Composites for Construction* 9(2): 170–177.

Chan, T. K.; Cheong, H. K.; Nguyen, D. M. 2001. Experimental Investigation on Delamination of CFRP-concrete beams, in *Proceedings of ICCMC/IBST 2001 International Conference on Advanced Technologies in Design, Construction and Maintenance of Concrete Structures*, Hanoi, Vietnam, 2001.

Charkas, H.; Rasheed, H. A.; Melhem, H. 2003. Rigorous procedure for calculating deflections of Fiber-Reinforced Polymer-strengthened reinforced concrete beams, *ACI Structural Journal* 100(4): 529–539.

Chen, J. F.; Teng, J. G. 2001. Anchorage strength models for frp and steel plates bonded to concrete, *Journal of Structural Engineering* 127(7): 784–791.

Chen, J. F. 2001. FRP or steel plate-to-concrete bonded joints: effect of test methods on experimental bond strength, *Steel and Composite Structures* 1(2): 231–244.

Chen, J. F.; Pan, W.K. 2006. Three dimensional stress distribution in FRP-to-concrete bond test specimens, *Construction and Building Materials* 20(1–2): 46–58.

Chen, J. F.; Teng, J. G. 2003. Shear capacity of fiber reinforced polymer strengthened reinforced concrete beams: fiber reinforced polymer rupture, *Journal of Structural Engineering* 129(5): 615–625.

Chen, J. F.; Teng, J. G. 2003. Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding *Construction and Building Materials* 17(1): 27–41.

Cho, K.; Cho, J. R.; Chin, W. J.; Kim, B. S. 2006. Bond-slip model for coarse sand coated interface between FRP and concrete from optimization technique, *Computers & Structures* 84(7): 439–449.

Concrete Society Committee. 2000. *Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials*: Technical Report 55. Published by The Concrete Society. 71 p.

Dai, J.; Ueda, T.; Sato, Y. 2005. Development of the nonlinear bond stress–slip model of fiber reinforced plastics sheet–concrete interfaces with a simple method, *Journal of Composites for Construction* 9(1): 52–62.

David, E.; Ragneau E.; Buyle-Bodin F. 2003. Experimental analysis of flexural behaviour of externally bonded CFRP reinforced concrete structures, *Materials and Structures* 36(4): 238–241.

De Lorenzis, L.; Miller, B.; Nanni, A. 2001. Bond of FRP laminates to concrete, *ACI Materials Journal* 98(3): 256–264.

Di Ludovico, M.; Nanni, A.; Prota, A; Cosenza, E. 2005. Repair of bridge girders with composites: Experimental and analytical validation, *ACI Structural Journal* 102(5): 639–648.

Duthinh, D.; Starnes, M. 2004. Strength and ductility of concrete beams reinforced with carbon fiber reinforced polymer plates and steel, *Journal of Composites for Construction* 8(1): 59–69.

Ekenel, M.; Rizzo, A.; Myers, J. J.; Nanni, A. 2006. Flexural fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with frp fabric and precured laminate systems, *Journal of Composites for Construction* 10(5): 433–442.

Fanning, P.; Kelly, O. 2001. Ultimate response of rc beams strengthened with CFRP plates, *Journal of Composites for Construction* 5(2): 122–127.

Faruqi, M.; Wu, C. C.; Benson, F. 2003. Development of deflection equations using moment–curvature relationships for reinforced concrete beams strengthened with fibre reinforced polymer (FRP) plates, *Magazine of Concrete Research* 55(6): 549–557.

Ferracuti, B.; Savoia, M.; Mazzotti, C. 2007. Interface law for FRP–concrete delamination, *Composite Structures* 80(4): 523–531.

Ferrier, E.; Avril, S.; Hamelin, P.; Vautrin, A. 2006. Mechanical behavior of rc beams reinforced by externally bonded CFRP sheets, *Materials and Structure* 36(8): 522–529.

Ferrier, E.; Bigaud, D.; Hamelin, P.; Bizindavyi, L.; Neale, K.W. 2005. Fatigue of CFRPs externally bonded to concrete, *Materials and Structures* 38(1): 39–46.

Ferrier, E.; Hamelin, P. 2002. Long-time concrete-composite interface characterization for reliability prediction of RC beam strengthened with FRP, *Materials and Structures* 35(9): 564–572.

Fib Task Group 9.3. 2001. *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*, fib bulletin 14, Lausanne, Switzerland. 130 p.

Freddi, F.; Savoia, M. 2008. Analysis of FRP–concrete debonding via boundary integral equations, *Engineering Fracture Mechanics* 75(6): 1666–1683.

GangaRao, H. V. S.; Vijay, P. V. 1998. Bending behavior of concrete beams wrapped with carbon fiber, *Journal of Structural Engineering* 124(1): 3–10.

GangaRao, H. V. S.; Taly N.; Vijay, P. V. 2007. *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. Taylor and Francis Group, CRC Press. 382 p.

Gao, B.; Jang-Kyo Kim, Christopher K.Y. 2004. Leung Experimental study on RC beams with FRP strips bonded with rubber modified resins, *Composites Science and Technology* 64(16): 2557–2564.

Gao, B.; Kim, J. K.; Leung C. K. Y. 2006a. Strengthening efficiency of taper ended FRP strips bonded to RC beams, *Composite Science and Technology* 66(13): 2257–2264.

Gao, B.; Kim, J. K.; Leung, C. K. Y. 2003. Effect of rubber modifier on interlaminar fracture toughness of CFRP-concrete interface, *Composites Science and Technology* 63(6): 883–892.

Gao, B.; Kim, J. K.; Leung, C. K. Y. 2006b. Effect of tapered FRP sheets on interlaminar fracture behaviour of FRP-concrete interface, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37(10): 1605–1612.

Gao, B.; Leung, C. K. Y; Kim, J. K. 2007. Failure diagrams of FRP strengthened RC beams, *Composite Structures* 77(4): 493–508.

Garden, H. N.; Quantrill, R. J.; Hollaway, L. C.; Thorne, A. M.; Parke, G. A. R. 1998. An experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials* 12(4): 203–219.

Gheorghiu, C.; Labossiere, P.; Proulx, J. 2006. Fatigue and monotonic strength of RC beams strengthened with CFRPs, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37(8):1111–1118.

Gheorghiu, C.; Labossiere, P.; Raihe, A. 2004. Environmental Fatigue and Static Behavior of RC Beams Strengthened with Carbon-Fiber-Reinforced Polymer, *Journal of Composites for Construction* 8(3): 211–218.

Ghosh, K. K.; Karbhari, V. M. 2007. Evaluation of strengthening through laboratory testing of FRP rehabilitated bridge decks after in-service loading, *Composite Structures* 77(2): 206–222.

Grace, N. F. 2004. Concrete repair with CFRP, *Concrete International* 26(5): 45–52.

Grace, N. F.; Singh, S. B. 2005. Durability evaluation of cfrp strengthened concrete beams experimental study and design, *ACI Structures Journal* 102(1): 40–53.

Green, M. F.; Bisby, L.A.; Beaudoin, Y.; Labossiere, P. 2000. Effect of freeze-thaw cycles on the bond durability between fibre reinforced polymer plate reinforcement and concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering* 27(5): 949–959.

Hadi, M. N. S. 2003. Retrofitting of shear failed reinforced concrete beams, *Composite Structures* 62(1): 1–6.

Hag-Elsafi, O.; Alampalli S.; Kunin, J. 2001. Application of FRP laminates for strengthening of a reinforced-concrete T-beam bridge structure, *Composite Structures* 52(3–4): 453–466.

Hag-Elsafi, O.; Alampalli S.; Kunin, J. 2004. In-service evaluation of a reinforced concrete T-beam bridge FRP strengthening system**,** *Composite Structures* 64(2): 179–188.

Harries, K. A.; Reeve, B.; Zorn, A. 2007. Experimental evaluation of factors affecting monotonic and fatigue behavior of FRP to concrete bond, *ACI Structures Journal* 104(6): 667–674.

Heffernan, P. J.; Erki, M. A. 2004. Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced plastic laminates, *Journal of Composites for Construction* 8(2): 132–140.

Hollaway, L. C.; Leeming, M. B. 2000. *Strengthening of Reinforced Concrete Structures Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering* Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing Limited. 327 p.

Hsu, C. T. T.; Punurai, W.; Bian, H.; Jia, Y. 2003. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using carbon fibre reinforced polymer strips, *Magazine of Concrete Research* 55(3): 279–288.

Yuan, H.; Teng, J. G.; Seracino, R.; Wu, Z. S.; Yao. J. 2004. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints, *Engineering Structures* 26(5): 553–565.

Kachlakev, D.; McCurry, D. D. 2000. Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates, *Composites Part B: Engineering* 31(6–7): 445–452.

Kachlakev, D.; McCurry, D. D. 2000. Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates, *Composites Part B: Engineering* 31(6–7): 445–452.

Kamaitis, Z. 2000. *Gelžbetoninių tiltų remontas*. Vilnius: Technika. 168 p.

Karbhari, V. M.; Chin, J. W.; Hunston, D.; Benmokrane, B.; Juska, T.; Morgan, R.; Lesko, J. J.; Sorathia, U.; Reynaud, D. 2003. Durability gap analysis for fiber reinforced polymer composites in civil infrastructure, *Journal of Composites for Construction* 7(3): 238–247.

Khalifa, A.; Alkhradaji, T.; Nanni, A.; Lansburg, S. 1999. Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement, *Concrete International* 21(10): 49–54.

Khalifa, A.; Nanni, A. 2000. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites, *Cement and Concrete Composites* 22(3): 165–174.

Khomwan, N.; Foster, S. J.; Smith, S. T. 2005. *Debonding Failure in CFRP Flexurally Strengthened Reinforced Concrete Beams*. The University of New South Wales. 252 p.

Kim, D.; Sebastian M. W. 2002. Parametric study of bond failure in concrete beams externally strengthened with fibre reinforced polymer plates, *Magazine of Concrete Research* 54(1): 47–59.

Labossiere, P.; Neale, K. W.; Rochette, P.; Demers, M.; Lamothe, P.; Lapierre, P.; Desgagne, G. 2000. FRP strengthening of the Sainte-Emelie-de-l energie bridge: design, instrumentation and field testing, *Canadian Journal of Civil Engineering* 27(5): 916–927.

Lamanna, A. J.; Bank, L. C.;. Scott, D. W. 2001. Flexural strengthening of rc beams using fasteners and FRP strips, *ACI Structures Journal* 98(3): 368–376.

Lamanna, A. J.; Bank, L. C.;. Scott, D. W. 2004. Flexural strengthening of rc beams by mechanically attaching FRP Strips, *Journal of Composites for Construction* 8(3): 203–210.

Leung, H. Y.; Balendran, R. V. 2003. Effect of using external GFRP plates on structurally deficient RC beams, *Journal of Civil Engineering and Management* 9(1): 36–44.

Li, A.; Assih, J.; Delmas, Y. 2001a. Shear strengthening of rc beams with externally bonded CFRP sheets, *Journal of Structural Engineering* 127(4): 374–380.

Li, A.; Diagana, C.; Delmas, Y. 2001b. CRFP contribution to shear capacity of strengthened RC beams, *Engineering Structures* 23(10):1212–1220.

Li, L.; Guo, Y.; Liu, F. 2008. Test analysis for FRC beams strengthened with externally bonded FRP sheets, *Construction and Building Materials* 22(3): 315–323.

Li, L. J.; Guo, Y. C.; Liu, F.; Bungey, J. H. 2006. An experimental and numerical study of the effect of thickness and length of CFRP on performance of repaired reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials* 20(10): 901–909.

Lu, S.; Xie, H. 2007. Strengthen and real-time monitoring of RC beam using “intelligent” CFRP with embedded FBG sensors, *Construction and Building Materials* 21(9): 1839–1845.

Lu, X. Z.; Jiang, J. J.; Teng, J. G.; Ye, L. P. 2006. Finite element simulation of debonding in FRP-to-concrete bonded joints, *Construction and Building Materials* 20(6): 412–424.

Maalej, M.; Bian, Y. 2001. Interfacial shear stress concentration in FRP strengthened beams, *Composite Structures* 54(4): 417–426.

Maalej, M.; Leong, K. S. 2005. Effect of beam size and FRP thickness on interfacial shear stress concentration and failure mode of FRP-strengthened beams, *Composite Science and Technology* 65(7-8): 1148–1158.

Malek, A. M.; Patel, K. 2002. Flexure strengthening of reinforced concrete flanged beams with composite laminates, *Journal of Composites for Construction* 6(2): 97–103.

Marchukaitis, G.; Valivonis, Yo.; Bareishis, J. 2007. An analysis of the joint operation of a CFRP concrete in flexural elements, *Mechanics of Composite Materials* 43(5): 467–478.

Marčiukaitis, G.; Jonaitis, B.; Valivonis, J. 2006. Analysis of deflections of composite slabs with profiled sheeting up to the ultimate moment, *Journal of Constructional Steel Research* 62(8): 820–830.

Mazzotti, C.; Savoia, M.; Ferracuti, B. 2008. An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete, *Construction and Building Materials* 22(7): 1409–1421.

Monti, G.; Liotta, M. 2007. Tests and design equations for FRP-strengthening in shear, *Construction and Building Materials* 21(4): 799–809.

Nakaba, K.; Kanakubo, T.; Furuta, T.; Yoshizawa, H. 2001. Bond behavior beetween FRP laminates and concrete, *ACI Structures Journal* 98(3): 359–367.

Nanni, A.; Khalifa, A. 2002. Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites, *Construction and Building Materials* 16(3): 135–146.

Neto, P.; Alfaiate, J.; Almeida, J. R.; Pires, E. B. 2004. The influence of mode II fracture on concrete strengthened with CFRP, *Computers & Structures* 82(17-19): 1495–1502.

Nguyen D. M.; Toong K. C.; Cheong, H. K. 2001. Brittle failure and bond development length of CFRP concrete beams, *Journal of Composites for Construction* 5(1): 12–17.

Niu, H.; Wu, Z. 2006. Effects of FRP concrete interface bond properties on the performance of rc beams strengthened in flexure with externally bonded FRP sheets, *Journal of Materials in Civil Engineering* 18(5): 723–731.

Norris, T.; Saadatmanesh, H.; Ehsani, M. R. 1997. Shear and flexural strengthening of rc beams with carbon fiber sheets, *Journal of Structural Engineering* 123(7): 903–911.

Pan, J.; Leung, C. K. Y. 2007 a. Debonding along the FRP–concrete interface under combined pulling/peeling effects, *Engineering Fracture Mechanics* 74(1-2): 132–150.

Pan, J.; Leung, C. K. Y. 2007 b. Effect of concrete composition on frp concrete bond capacity, *Journal of Composites for Construction* 11(6): 611–618.

Pellegrino, C.; Modena, C. 2006. Fiber-Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams: Experimental Study and Analytical Modeling, *ACI Structures Journal* 103(5): 720–728.

Perera, R.; Recuero, A.; De Diego, A.; Lopez, C. 2004. Adherence analysis of fiber-reinforced polymer strengthened RC beams, *Computers & Structures* 82(23-26): 1865–1873.

Pham, H. B.; Al-Mahaidi, R.; Saouma, V. 2006. Modelling of CFRP–concrete bond using smeared and discrete cracks, *Composite Structures* 75(1–4): 145–150.

Pham, H.; Al-Mahaidi, R. 2004a. Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites, *Composites Structures* 66(1–4): 617–625.

Pham, H.; Al-Mahaidi, R.; 2004b. Assessment of available prediction models for the strength of FRP retrofitted RC beams, *Composite Structures* 66(1-4): 601–610.

Pham, H. B.; Al-Mahaidi, R. 2007. Modelling of CFRP-concrete shear-lap tests, *Construction and Building Materials* 21(4): 727–735.

Pimanmas, A.; Pornpongsaroj, P. 2004. Peeling behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates under various end restraint conditions, *Magazine of Concrete Research* 56(2): 73–81.

Rahimi, H.; Hutchinson, A. 2001. Concrete beams strengthened with externally bonded frp plates, *Journal of Composites for Construction* 5(1): 44–56.

Ramana, V. P. V. 2000. Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening, *Composites Part B: Engineering* 31(6–7): 461–470.

Ramos, G.; Casas, J. R.; Alarcón, A. 2004. Repair and strengthening of segmental bridges using carbon fibers, *Engineering Structures* 26(5): 609–618.

Ramos, G.; Casas, J. R.; Alarcon, A. 2006. Normalized test for prediction of debonding failure in concrete elements strengthened with CFRP, *Journal of Composites for Construction* 10(6): 509–519.

Rasheed, H. A.; Charkas, H.; Melhem, H. 2004. Simplified nonlinear analysis of strengthened concrete beams based on a rigorous approach, *Journal of Structural Engineering* 130(7): 1087–1096.

Rizzo, A.; De Lorenzis, L. 2007. Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement, *Construction and Building Materials* in press.

Ross, A.; Jerome, D. M.; Tedesco, J. W.; Hughes, M. L. 1999. Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates, *ACI Structural Journal* 96(2): 212–220.

Saadatmanesh, H.; Ehsani, M. R. 1990. Fiber composite plates can strengthen concrete beams, *Concrete International* 12(3):65–71.

Saxena, P.; Toutanji, H.; Noumowe, A. 2008. Failure analysis of FRP strengthened RC beams, *Journal of Composites for Construction* 12(1): 2–14.

Schilde, K.; Seim, W. 2007. Experimental and numerical investigations of bond between CFRP and concrete, *Construction and Building Materials* 21(4): 709–726.

Shahawy, M. A.; Arockiasamy, M.; Beitelman, T.; Sowrirajan, R. 1996. Reinforced concrete rectangular beams strengthened with CFRP laminates, *Composites Part B: Engineering* 27(3–4): 225–233.

Silva, M. A. G.; Biscaia, H. 2008. Degradation of bond between FRP and RC beams, *Composite Structures* 85(2): 164–174.

Smith, S. T.; Teng, J. G. 2002a. FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models, *Engineering Structures* 24(4): 385–395.

Smith, S. T.; Teng, J. G. 2002b. FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models, *Engineering Structures* 24(4): 397–417.

Spadea, G.; Bencardino, F.; Swamy, R. N. 2000. Optimizing the performance characteristics of beams strengthened with bonded CFRP laminates, *Materials and Structures* 33(2): 119–126.

Subramaniam, K. V.; Carloni, C.; Nobile L. 2007. Width effect in the interface fracture during shear debonding of FRP sheets from concrete, *Engineering Fracture Mechanics* 74(4): 578–594.

Taheri, F.; Shahin, K.; Widiarsa, I. 2002. On the parameters influencing the performance of reinforced concrete beams strengthened with FRP plates, *Composite Structures* 58(2): 217–226.

Taljsten, B. 2003. Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets, *Construction and Building Materials* 17(1): 15–26.

Tann, D. B.; Delpak, R.; Davies, P. 2004. Ductility and deformability of fibre-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams, *Structures & Buildings* 157(1): 19–-30.

Thomsen, H.; Spacone, E.; Limkatanyu, S.; Camata, G. 2004. Failure mode analyses of reinforced concrete beams strengthened in flexure with externally bonded fiber-reinforced polymers, *Journal of Composites for Construction* 8(2): 123–131.

Toutanji, H.; Ortiz, G. 2001. The effect of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members, *Composite Structures* 53(4): 457–462.

Toutanji, H.; Zhao, L. 2006. Verifications of design equations of beams externally strengthened with frp composites, *Journal of Composites for Construction* 10(3): 254–264.

Toutanji, H. A.; Gomez, W. 1997. Durability characteristics of concrete beams externally bonded with FRP composite sheets, *Cement and Concrete Composites* 19(4): 351–358.

Triantafillou T. C.; Plevris, N. 1992. Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials, *Materials and Structures* 25(4): 201–211.

Ueda, T.; Jianguo, D. 2005. Interface bond between FRP sheets and concrete substrates: properties, numerical modeling and roles in member behaviour, *Progress in Structural Engineering and Materials* 7(1): 27–43.

Valivonis, J.; Jonaitis, B.; Papinigis V. 1993. Nemetalinė išorinė armatūra lenkiamuose elementuose, iš *3-osios tarptautinės konferencijos „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“, įvykusios Vilniuje 1993 m. gegužės 10–13 d., straipsnių rinkinys,* Vilnius: Technika, 134–139.

Van Den Einde, L.; Zhao, L; Seible, F. 2003. Use of FRP composites in civil structural applications, *Construction and Building Materials* 17(6–7): 389–403.

Wang, Y. C.; Chen, C. H. 2003. Analytical study on reinforced concrete beams strengthened for flexure and shear with composite plates, *Composite Structures* 59(1): 137-148.

Wang, Y. C.; Lee, M. G.; Chen, B. C. 2007. Experimental study of FRP-strengthened RC bridge girders subjected to fatigue loading, *Composite Structures* 81(2): 491–498.

Wang, J. 2007. Cohesive-bridging zone model of FRP–concrete interface debonding, *Engineering Fracture Mechanics* 74(17): 2643–2658.

Wenwei, W.; Guo L. 2006. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load, *International Journal of Solids and Structures* 43(6): 1372–1387.

White, T. W.; Soudki, K. A.; Erki, M. A. 2001. Response of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates and Subjected to a High Rate of Loading, *Journal of Composites for Construction* 5(3): 153–162.

Xiao, J.; Li, J.; Zha, Q. 2004. Experimental study on bond behavior between FRP and concrete, *Construction and Building Materials* 18(10): 745–752.

Xiong, G. J.;. Jiang, X; Liu, J. W.; Chen, L. 2007. A way for preventing tension delamination of concrete cover in midspan of FRP strengthened beams, *Construction and Building Materials* 21(2): 402–408.

Zhang, A.; Jin, W.; Li, G. 2006. Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 7(3): 436–444.

Вадлуга, Р. Р.; Кудзис, А. П. 1976. Анализ точности и надёжности расчёта по прочности изгибаемых железобетонных элементов кольцевого сечения [Vadlūga, R. R.; Kudzys, A. P. Žiedinio skerspjūvio lenkiamų gelžbetoninių elementų stiprumo skaičiavimo tikslumo ir patikimumo analizė], *Железобетонные конструкции* [*Gelžbetoninės konstrukcijos*] 7: 155–162.

Ржаницын, А. Р. 1986. *Составные стержни и пластинки* [Rzhanicin, A. Built-up bars and plates]. Москва: Стройиздат. 316 с.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Skuturna, T.; Valivonis, J.; Vainiūnas, P.; Marčiukaitis, G.; Daugevičius, M. 2008. Analysis of deflections of bridge girders strengthened by carbon fiber reinforcement, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(3): 145–151.

Valivonis, J.; Skuturna, T. 2007. Cracking and strength of reinforced concrete structures in flexure strengthened with carbon fibre laminates, *Journal of Civil Engineering and Management* 13(4): 317–323.

Straipsniai kituose recenzuojamuose leidiniuose

Skuturna, T.; Valivonis, J.; Vainiūnas, P. 2007. Investigation of the influence of the externally bonded carbon fibre reinforcement on the cracking of reinforced concrete members, in *The 9th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques"*: Selected papers, vol. 2. May 16–18, 2007 Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 786–791.

Skuturna, T.; Valivonis, J. 2009. Jungties tarp betono ir anglies pluošto šlyties deformacijų tyrimas, iš *Statybinės konstrukcijos: respublikinės konferencijos, įvykusios Vilniuje 2009 m. vasario 6 d., straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika, 127–134.

Tomas SKUTURNA

LENKIAMŲJŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ, SUSTIPRINTŲ ANGLIES PLUOŠTU, TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

Tomas SKUTURNA

RESEARCH OF FLEXURAL REINFORCED CONCRETE MEMBERS STRENGTHENED WITH EXTERNAL CARBON FIBRE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences, Civil Engineering (02T)

2009 08 21. 13,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“,
J. Jasinskio g. 16A, 01112 Vilnius