



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

Egidijus Barauskas

**TEKSTILE ARMUOTO BETONO SIJŲ STIPRUMO,
STANDUMO IR IRIMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Nerijus Partaukas

PANEVĖŽYS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS
TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas doc. Arūnas Tautkus

(parašas)

(data)

**TEKSTILE ARMUOTO BETONO SIJŲ STIPRUMO,
STANDUMO IR IRIMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Mechanikos inžinerija (621H30001)

Vadovas

Lekt. dr. Nerijus Partaukas

(parašas)

(data)

Recenzentas

(parašas)

(data)

Projektą atliko

Egidijus Barauskas

(parašas)

(data)

PANEVĖŽYS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Egidijus Barauskas

(Studento vardas, pavardė)

Mechanikos inžinerija, 621H30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Tekstile armuoto betono sijų stiprumo, standumo ir irimo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. birželio 1 d.

Panevėžys

Patvirtinu, kad mano **Egidijaus Barausko** baigiamasis projektas tema „Tekstile armuoto betono sijų stiprumo, standumo ir irimo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Egidijui Barauskui Grupė PMM - 3

1. Darbo tema:

Lietuvių kalba: Tekstile armuoto betono sijų stiprumo, standumo ir irimo tyrimas
Study of strenght, stiffness and fracture of textile reinforced concrete beams

Anglų kalba:

Patvirtinta 2015 m. vasario mėn. 13 d. dekanu potvarkiu Nr. *ST17-F-13-11*

2. Darbo tikslas:

Ištirti tekstile armuoto betono sijų stiprumą, standumą bei irimo pobūdį.

3. Reikalavimai ir sąlygos:

Atlikti eksperimentinius betono armuoto stiklo pluošto tinkleliu tyrimus, išnagrinėti betono sijų mechaninę elgseną veikiant lenkimo apkrovai (trijų taškų schema). Apskaičiuoti analitiškai sijų laikančiąją galią ir palyginti su eksperimentiškai gautomis vertėmis. Bandinio matmenys: 40 x 40 x 160 mm. Tinklelio matmenys: 2.85 x 2.85 mm. Armuojančių sluoksnių skaičius: 12, 18, 24 bei 12 sluoksnių su pašalinta ataudų dalimi.

4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.

*Įvadas
Santrauka
Sluoksniuotų konstrukcinių elementų panaudojimas ir tyrimų apžvalga
Tekstile armuoto betono sijų stiprumo ir standumo tyrimas
Tyrimo rezultatai ir jų analizė
Išvados
Šaltinių sąrašas*

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas

2015 – 06 - 01

(data)

Užduotį gavau: Egidijus Barauskas

(studento vardas, pavardė, parašas)

2015 – 02 - 02

(data)

Vadovas: Lekt. dr. Nerijus Partaukas

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

2015 – 02 - 02

(data)

Barauskas, E. Tekstile armuoto betono stiprumo, standumo ir irimo tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas Lekt. dr. Nerijus Partaukas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, Technologijų katedra.

Panevėžys, 2015. 61 psl.

SANTRAUKA

Šiame darbe yra apžvelgiamos daugiasluoksnės konstrukcijos, jų efektyvumas, bendrosios charakteristikos, panaudojimas. Padaryta analizė kurioje apžvelgti tyrimai, kuriuose buvo naudojamas armuotas kompozitais betonas. Aprašyti tyrime naudotų bandinių gaminimo metodai, naudotos medžiagos ir jų kiekiai, gamybos eiga ir naudota įranga. Naudojant iš gniuždymo mašinos gautus duomenis, buvo atlikta statistinė užfiksuotų duomenų analizė, kuri parodė, kad armavimas stiklo pluoštu betoną sustiprina vidutiniškai nuo 150 % iki 200 %, bei padidina jo plastiškumą vidutiniškai nuo 400 iki 660 %. Paskaičiuota teorinė, armuoto betono, atlaikoma jėga jį lenkiant yra iki 1,5 karto didesnė nei išmatuota atlikus eksperimentinius tyrimus, nes stiklo pluošto sluoksnio stiprumo potencialas nėra visuomet pilnai išnaudojamas.

Raktiniai žodžiai: stiklo pluoštas, armuotas betonas, kompozitai, tekstile armuotas betonas.

Barauskas, E. Study of strenght, stiffness and fracture of textile reinforced concrete beams. Masters final project / supervisor Lekt. dr. Nerijus Partaukas; Kaunas University of Technology, Panevėžys Faculty of Technology and Business, Department of Technologies.

Panevėžys, 2015. 61 psl.

SUMMARY

This thesis includes multilayer structure description, its efficiency, general characteristics, and applications. Analysis were carried out which include research of the composite reinforced concrete. Fabrication methods, materials used, their quantities, fabrication process and used testing equipment of samples are described in this research. Using data acquired from compression machine a statistical analysis were carried out, which showed that textile reinforced concrete strength increases from 150 % to 200 % on average and its plasticity also increases from 400 % to 660 % on average. Theoretically calculated textile reinforced concrete strength sustained, when it is being bent, is 1,5 times greater than measured during the experiments due to the glass fiber layer's strength not always being used to its full potential.

Keywords: fiberglass, reinforced concrete, composites, textile reinforced concrete.

TURINYS

ĮVADAS	9
1. SLUOKSNIUOTŲ KONSTRUKCINIŲ ELEMENTŲ PANAUDOJIMAS IR TYRIMŲ APŽVALGA.....	10
1.1 DKE panaudojimo sritys ir jų efektyvumas.....	10
1.2 Daugiasluoksnių konstrukcinių elementų bendrosios charakteristikos	11
1.2.1 Neutraliojo sluoksnio koordinatės nustatymas	11
1.2.2 Konstrukcinio elemento ekvivalentinis tamprumo modulis.....	12
1.2.3 Sijos standumas lenkiant	12
1.2.4 Normalinių įtempimų nustatymas	13
1.2.5 Tangentinių įtempimų nustatymas	14
1.3 Armavimas	15
1.3.1 Stiklo pluoštas	16
1.4 Daugiasluoksnių gelžbetoninių sijų armuotų stiklo pluoštu analizė.....	17
1.4.1 Betono konstrukcijos stiprinimas naudojant stiklo pluoštą – atsparumo testavimas veikiant statinei ir smūginei apkrovai	18
1.4.2 Betono, armuoto stiklo pluoštu, nuovargio tyrimas atliekant lenkimo bandymą....	21
1.4.3 Anglies pluoštu sustiprintų betono sijų stebėjimas lenkiant.....	22
2. TEKSTILE ARMUOTO BETONO SIJŲ STIPRUMO IR STANDUMO TYRIMAS	25
2.1 Bandinių ruošimas	25
2.2 Testavimo mašina	30
3. TYRIMO REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ	31
3.1 Bendroji dalis	31
3.2 Nulinės serijos bandinių tyrimo rezultatai	31
3.3 Pirmos serijos bandinių tyrimo rezultatai	34
3.4 Antros serijos bandinių tyrimo rezultatai.....	37
3.5 Trečios serijos bandinių tyrimo rezultatai	40
3.6 Ketvirtos serijos bandinių tyrimo rezultatai.....	43
3.7 Statistinė duomenų analizė	45
3.7.1 Inercijos momentų I vidutinių kvadratinių nuokrypių F testas	46
3.7.2 Plyšio atsivėrimo jėgų F_I vidutinių kvadratinių nuokrypių F-testas	47
3.7.3 Plyšio atsivėrimo įlinkių S_I vidutinių kvadratinių nuokrypių F-testas	48

3.7.4	Matmenų įtakos analizė	50
3.7.5	Armuotų ir nearmuotų bandinių parametrų palyginimas	52
3.8	Teorinė armuoto betono elgsena	55
3.9	Išorinės jėgos darbas bandiniui suardyti	58
IŠVADOS		60
ŠALTINIŲ SĄRAŠAS		61

IVADAS

Dažnai būna sunku arba neįmanoma suderinti konstrukcijai keliamų reikalavimų su medžiagų mechaninėmis savybėmis, nes daugumoje atvejų konstrukciniai elementai (KE) yra vienalyčiai, sudaryti iš vienos medžiagos rūšies, tačiau dažnai konstrukcija turi atitikti ne tik jei keliamus stiprumo reikalavimus, bet ir masės, kainos, dizaino ir pan. Dėl šių priežasčių žmonės pradėjo ieškoti būdų kaip būtų galima pagerinti medžiagų savybes. Vienas iš jų yra skirtingų medžiagų derinimas. Jau prieš daugelį metų buvo pastebėta, kad derinant tokias medžiagas kaip akmuo, molis, medis, galima pasiekti geresnių savybių, nei turi pavienė medžiaga.

Daugiasluoksniais konstrukciniais elementais (DKE) vadinama tokia konstrukcija, kurių gamyboje panaudota dvi ir/ar daugiau medžiagų, kurių stiprumo ir standumo charakteristikos žinomos [1]. Lyginant su įprastais vienalyčiais KE, daugiasluoksniai turi pranašumų. Keičiant sluoksnių medžiagas, storių, išdėstymą konstrukcijoje, galima pakeisti visos konstrukcijos mechanines ir nemechanines charakteristikas: stiprumą, standumą, masę, kainą, laidumą šilumai, elektrai, atsparumą dilimui. Skirtingos medžiagos, turi skirtingas charakteristikas, todėl konstruojant DKE iš kelių skirtingų medžiagų galima didelė konstrukcijų įvairovė.

Taigi derinant skirtingas medžiagas tarpusavyje galima gauti maksimalaus stiprumo ir standumo, norimo dizaino, bei minimalios kainos ir masės daugiasluoksnes konstrukcijas.

Pagrindinis darbo tikslas – Ištirti tekstile armuoto betono sijų stiprumą, standumą bei irimo pobūdį.

Darbo uždaviniai – pagaminti bandinius, tinkamus atlikti eksperimentą; atlikti bandinių lenkimo eksperimentą; atlikti gautų duomenų statistinę analizę.

1. SLUOKSNIUOTŲ KONSTRUKCINIŲ ELEMENTŲ PANAUDOJIMAS IR TYRIMŲ APŽVALGA

1.1 DKE panaudojimo sritys ir jų efektyvumas

Konstruktines medžiagas dažniausiai sudaro kompozicijos, kurios gaminiui suteikia norimų savybių. Kompozicijos, tai skirtingų medžiagų sistema, kurioje kiekvienas komponentas turi skirtingas savybes. Skirtingų medžiagų bendras darbas kompozicijoje yra tolygus naujos medžiagos, tik su norimomis savybėmis, sukūrimui. Tai daugiasluoksniai konstrukciniai elementai, kurie gali būti gauti naudojant medį, metalą, stiklą, betoną ir kt. Plačiausiai yra paplitusios sluoksniuotos konstrukcijos, sudarytos iš 2 ir daugiau medžiagų [2].

Daugiasluoksniai konstrukciniai elementai yra naudojami labai plačiai, įvairios paskirties gaminiuose. DKE gali būti naudojami transporto srityje - laivai, lėktuvai, automobiliai, taip pat buitinėje technikoje, bei statybinėse konstrukcijose. Kadangi sluoksniuojant skirtingas medžiagas galima gauti reikiamų savybių naujas konstrukcijas, jos yra plačiai naudojamos [1, 2].

Naudojant vienos rūšies medžiagą, dažnai negalima pasiekti reikiamų savybių, tokių kaip stiprumas, masė, kaina. Tik naudojant įvairias medžiagas, turinčias skirtingas prieš tai išvardintas savybes, galima gauti reikiamų parametru konstrukcinius elementus.

DKE pirmiausiai buvo pradėtos naudoti gaminant paprastas plonasienes konstrukcijas iš lengvų medžiagų. Gaminant dideles konstrukcijas, kurios turi būti plonos, dažnai yra būtina padidinti jų atsparumą lenkimui. Padidinti sienelių storį gali būti tiek ekonomiškai, tiek estetiškai nenaudinga, taip pat dėl to padidėtų ir konstrukcijos storis. Įterpus tarp kompozito lakštų poringo plastiko, konstrukcijos atsparumas lenkimui padidėja kelis kartus, o masė tik iki 10 % [3].

Poringi ir koriniai intarpai ne tik gerina gaminio mechanines savybes, bet ir mažina šilumos laidumą, didina atsparumą ugniai bei garso izoliavimo savybes. Dėl tokio savybių komplekso lengvosios konstrukcinės medžiagos sparčiai plinta. Lengvosios konstrukcinės medžiagos, naudojamos kompozitų dirbiniuose, dažniausiai gaminamos dviejų tipų: putos ir koriai. Kiekviena jų gali būti įvairios sudėties, struktūros ir savybių [2].

Statybai kompozicinės medžiagos ir konstrukcijos gaminamos iš tradicinių statybinių medžiagų: betono, metalo, medžio. Dabar visa tai keičia naujos medžiagos, sukurtos iš įvairių polimerų ir jų priedų. Nesunku įrodyti, kad grynas betonas yra trapus ir neatsparus lenkimui, tačiau į betoną įdėjus metalinę armatūrą, galima gauti labai tvirtą konstrukciją [3].

Dabartiniu metu statyboje vis plačiau naudojamos kompozicinės monolitinės plieno ir betono perdangos, armuotos profilineis metaliniais lakštais. Tokie lakštai betonuojant konstrukcijas naudojami kaip liekamieji klojiniai, o eksploatacijos metu veikiant apkrovos, dirba

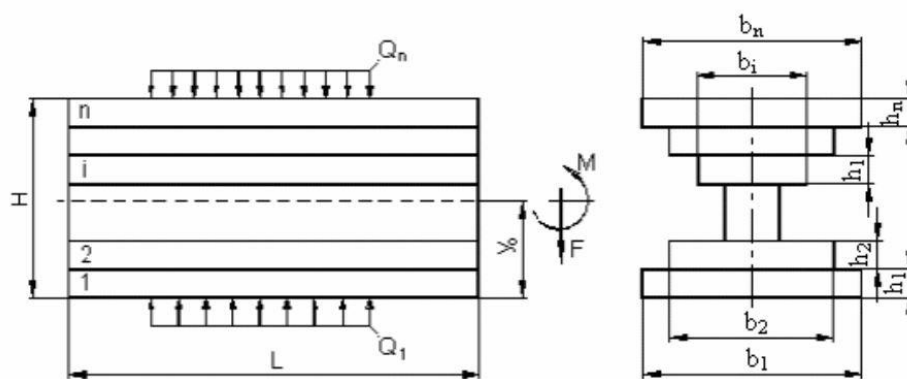
kaip išorinė armatūra. Naudojant profilinius lakštus, betono sluoksnio ir lakštų bendras darbas būna geresnis, efektyviau išnaudojamas tokios plokštės aukštis [1].

1.2 Daugiasluoksnių konstrukcinių elementų bendrosios charakteristikos

Daugiasluoksniai elementai, pagaminti iš dviejų ar daugiau medžiagų, gali būti veikiami statinių ir ciklinių apkrovų, bei išorės faktorių. Todėl yra svarbu apskaičiuoti daugiasluoksnių konstrukcijų, kurias sudaro skirtingos medžiagos, turinčios skirtingas fizikines ir mechanines savybes, stiprumą, standumą, tam, kad konstrukciją būtų saugu eksploatuoti. Bendrosios DKE charakteristikos:

- Neutraliojo sluoksnio koordinatė y_n ;
- Konstrukcinio elemento ekvivalentinį tamprumo modulis E_k ;
- DKE standumas D ;
- Normaliniai įtempimai σ_j bet kuriame sijos sluoksnyje
- Tangentinius įtempimai τ_j

Bendruoju atveju sluoksniuotą konstrukcinį elementą gali sudaryti įvairaus pločio b ir aukščio h sluoksniai (1 pav.). Konstrukcinis elementas gali būti apkrautas įvairių tipų apkrovomis: ašine jėga N , skersine jėga F , sloginiu Q ar lenkimo momentu M arba kombinuota apkrova. Kiekviename sijos skerspjūvyje bendru atveju veikia ašinės ir skersinės jėgos bei lenkimo momentų įrašos [1].



1 pav. Sluoksniuotas konstrukcinis elementas [1]

1.2.1 Neutraliojo sluoksnio koordinatės nustatymas

Sijos ašis, kurios ilgis lenkimo momentu nekinta, vadinama neutraliąja ašimi. Jos koordinatės apskaičiuojamos pagal formulę [1]:

$$y_n = \frac{\sum_{i=1}^n B_i \delta_i + 2 \sum_{i=2}^n \left(B_i \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j \right)}{2 \sum_{i=1}^n B_i} \quad (1)$$

čia B – ašinis standumas $B = \sum_{i=1}^n B_i = \sum_{i=1}^n E_i A_i$ [N];

δ_i – i -tojo sluoksnio storis [m];

E_i – i -tojo sluoksnio tamprumo modulis [Pa].

Iš formulės matome, kad norint rasti neutraliosios ašies padėti daugiasluoksnėje sijoje pakanka žinoti kiekvieno sluoksnio medžiagos tamprumo modulį ir geometrinius matmenis.

1.2.2 Konstrukcinio elemento ekvivalentinis tamprumo modulis

Daugiasluoksnės sijos ekvivalentinis tamprumo modulis lenkimo atveju yra atskirų jį sudarančių elementų tamprumo modulių, padaugintų iš šio elemento inercijos momento santykio su visos sijos skerspjūvio inercijos momentu, suma. Jis gali būti paskaičiuotas pagal formulę [1]:

$$E_k = \frac{\sum_{i=1}^n E_i I_i}{I_k} \quad (2)$$

Čia I_i – i -tojo sluoksnio skerspjūvio ploto inercijos momentas neutraliosios ašies atžvilgiu [m^4];

I_k – skerspjūvio inercijos momentas neutralios ašies atžvilgiu.

1.2.3 Sijos standumas lenkiant

Izotropinių (kurių savybės vienodos visomis kryptimis) sijų tamprumo modulio ir inercijos momento sandauga $E_k I_k$ vadinama sijos standumu lenkimo atveju. Daugiasluoksnių sijų standumas apskaičiuojamas įvertinant siją sudarančių sluoksnių skaičių n , kurių kiekvienas turi savąjį standumą $E_i I_i$ [1]:

$$D = E_k I_k = \sum_{i=1}^n E_i I_i \quad (3)$$

Čia E_k – medžiagos tamprumo modulis; I_k – inercijos momentas neutralios ašies atžvilgiu.

Iš formulės matome, kad daugiasluoksnės sijos standumui nustatyti pakanka apskaičiuoti kiekvieno sluoksnio inercijos momentus sijos skerspjūvio neutralios ašies atžvilgiu ir rasti jų sandaugą su tamprumo moduliais suma.

1.2.4 Normalinių įtempimų nustatymas

Normalinius įtempimus, esant grynam lenkimui, bet kuriame daugiasluoksnės sijos elemente apskaičiuojame pasinaudodami įtempimų nustatymo lenkiamoje izotropinėje sijoje metodika [1].

Apskaičiuojant daugiasluoksnės sijas pagal J. Bareišio sluoksniuotų konstrukcinių elementų (SKE) skaičiavimo metodiką laikomasi šių prielaidų [2]:

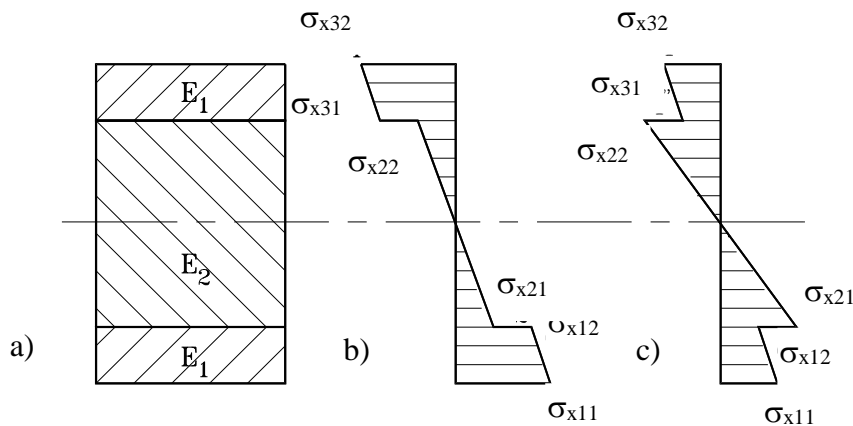
1. Deformuojamo KE skersiniai pjūviai lieka plokšti ir statmeni išilginiams sijos sluoksniams, nepriklausomai nuo to, ar sluoksnio medžiaga yra linijiškai tampri.
2. Linijinės išilginės deformacijos konstrukcinio elemento aukštyje pasiskirsčiusios pagal linijinį dėsnį.
3. Sluoksnio mechaninės charakteristikos priklauso nuo kompozito armuojančios ir rišamosios medžiagos, kaip visumos, savybių, nustatomų eksperimentiniu būdu.
4. Sluoksnių sujungimo vietose nėra praslydimo.
5. Sluoksnius sudarančių medžiagų Puasono koeficientai yra vienodi.

$$\sigma_{xi} = \frac{M \cdot y_i}{D} \cdot E_{xi} \quad (4)$$

Čia M – lenkimo momentas [Nm];

y_i – atstumas nuo neutralios ašies iki nagrinėjamo sluoksnio [m].

Pereinant iš vieno sijos sluoksnio į kitą visada gaunamas įtempimų šuolis, proporcingas tų sluoksnių tamprumo modulių santykiui. Tokiu būdu normalinių įtempimų dydis daugiasluoksnėje sijoje priklauso ne tik nuo išorinės apkrovos, bet ir nuo sijos standumo D ir medžiagos tamprumo modulio skaičiuojamame pjūvyje [1].



2 pav. Trisluoksnės sijos skerspjūvis (a) ir normalinių įtempimų pasiskirstymai jame (b, c), kai $E_1 > E_2$ (b) ir $E_1 < E_2$ (c) [1]

1.2.5 Tangentinių įtempimų nustatymas

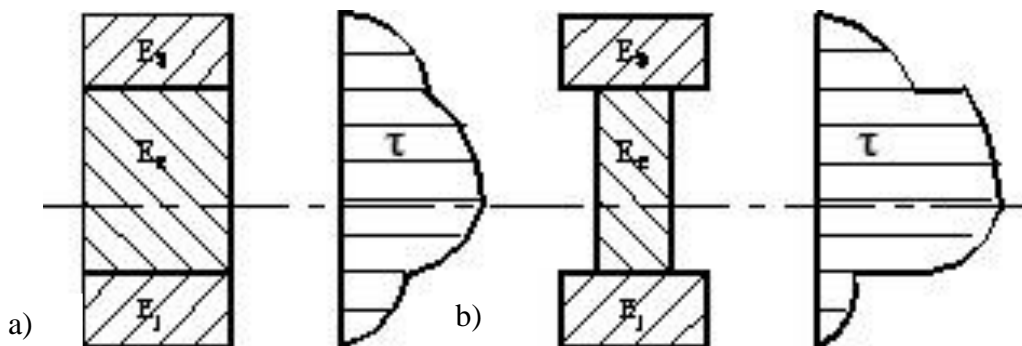
Žinome, kad skersinio lenkimo atveju, sijos pjūviuose veikia lenkimo ir skersinės įrašos, ko pasėkoje jos skerspjūvyje atsiranda ne tik normaliniai bet ir tangentiniai įtempimai. Pastarųjų apskaičiavimo formulę galime gauti dvejopai: nagrinėjant kiekvieno trisluoksnės sijos dz ilgio elemento pusiausvyros sąlygas arba pasinaudojant žinoma tangentinių įtempimų izotropinėse medžiagose (Žuravskio formulė) apskaičiavimo metodika. Abiem atvejais gaunama ta pati tangentinių įtempimų daugiasluoksnėse sijose išraiška [1].

$$\tau_i = \frac{F \cdot C}{D \cdot b_i} \quad (5)$$

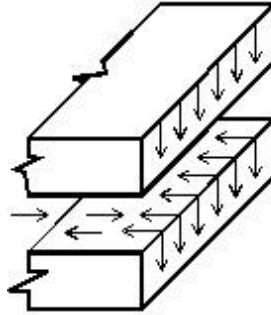
Čia F – skersinė jėga [N];

b_i – sijos sluoksnio plotis [m];

C – ekvivalentinis statinis momentas neutralios ašies atžvilgiu [m³].



3 pav. Tangentinių įtempimų pasiskirstymai trisluoksnėje sijoje, kai sijos sluoksnių pločiai vienodi (a) ir skirtingi (b) [1]



4 pav. Tangentiniai įtempimai sluoksnių sandūroje [1]

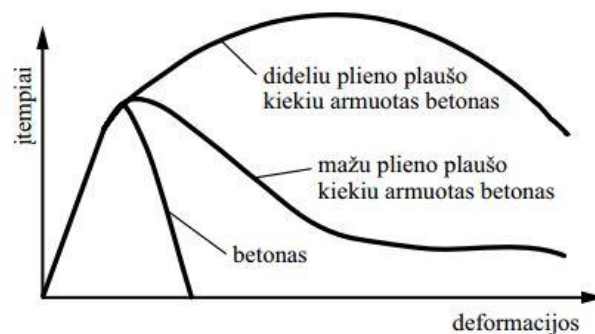
1.3 Armavimas

Pastaraisiais metais vietoje tradicinio gelžbetonio vis dažniau vartojama platesnė armuotojo betono sąvoka, nusakanti įvairių armatūros rūšių ir betono kompoziciją. Be įprastos strypinės plieninės armatūros, vis plačiau taikomas dispersinis armavimas, konstrukcijoms armuoti naudojami ir įvairūs polimerinio kompozito (anglies, stiklo, aramido, bazalto pluoštų) strypai [3].

Armuotasis betonas yra kompozitinė medžiaga, pasižyminti ypač sudėtinga fizikine ir mechanine elgsena. Plastiškumas, armatūros ir betono sąveikos aprašymas, ilgalaikiai efektai (susitraukimas, valkšnumas, relaksacija), pleišėjimas, medžiagos senėjimas ir mastelio faktorius yra tik dalis iššūkių, su kuriais susiduria armuotojo betono konstrukcijų projektuotojai, statytojai, eksploatuotojai [3].

Dispersinis armavimas labai pagerina eksploatacines betono savybes. Jis neturi didesnės įtakos gniuždomojo betono stipriui ir deformacijų moduliui, tačiau visiškai pakeičia tempiamojo betono suirimo pobūdį. Dispersiškai armuotas betonas tampa izotropiškai atsparus pleišėjimui, sumažėja lokalių struktūros defektų įtaka mechaninėms jo savybėms [3].

Tipinės betono ir dispersiškai armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybės pateiktos 5 pav.



5 pav. Tipinės betono ir dispersiškai armuoto betono įtempių ir deformacijų priklausomybės [3]

1.3.1 Stiklo pluoštas

Plaušinė armatūra jau ilgą laiką naudojama įvairių formų betoninėms ir gelžbetoninėms konstrukcijoms gaminti. Dispersinė armatūra naudojama betoninių statinių konstrukcinių elementų trapijojo suirimo pobūdį paversti plastiškesniu ir suvaržyti plyšių vystymąsi. Yra žinoma daugybė skirtingų plaušų tipų. Vystantis mokslui ir technologijoms, pagerėjo kompozitinės medžiagos ir jų savybės. Dėl skirtingų gamybos technologijų ypatumų skiriasi plaušinės armatūros geometriniai parametrai ir mechaninės savybės. Dispersinei armatūrai dažniausiai naudojamos tokios medžiagos: plienas, stiklas, polimerai ir organinės kilmės plaušas [3].

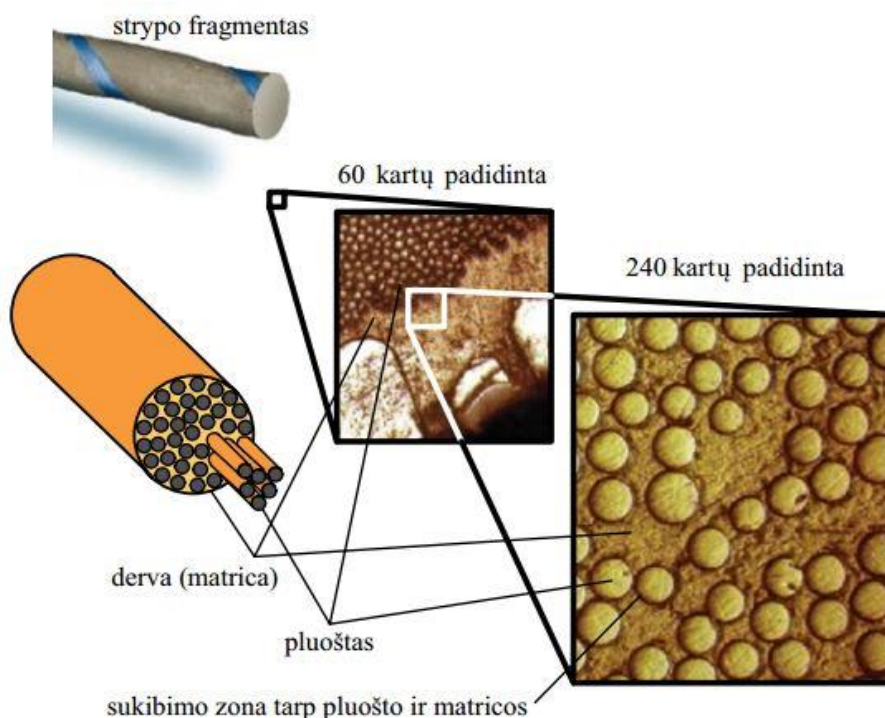
Stiklo plaušas (6 pav.) turi didelį tempiamąjį stiprį (2–4 GPa) ir mažą, palyginti su plienu, tamprumo modulį (70–80 GPa). Stiklo plaušas gaminamas siūlelių formos, valcuojant išlydytą stiklą per specialias įvoves. Keli šimtai siūlelių vienu metu lydomi, o sukietėję suformuojami į vientisą pluoštą, prieš tai tepami klėjais, apsaugančiais nuo oro poveikio ir dilimo. Klėjais siūleliai taip pat sujungiami į vientisą viją. Kelias vijas suvyniojus tarpusavyje, suformuojamas stiklo plaušas. Pažymėtina, kad toks plaušas nėra tvirtas šarminėje aplinkoje, todėl gaminant betoną reikia naudoti šiai aplinkai atsparų stiklo plaušą, kurio sudėtyje yra apie 16–20 % cirkonio. Stiklo plaušas gaminamas skirtingo ilgio. Dispersiniam konstrukcinio betono mišinio armavimui naudojamas 25 mm ilgio plaušas, o armuojant torkretuoti naudojamus mišinius – iki 35 mm [3].



6 pav. Stiklo plaušas [3]

Stiklo pluoštas kompozitinių elementų gamybai naudojamas plačiausiai. Stiklo pluošto populiarumą lemia santykinai nedidelė kaina, palyginus su kitais pluoštų tipais. Stiklas yra amorfinė, neorganinė medžiaga, kurios didžiąją dalį sudaro silicio dioksidas SiO_2 (50–70 % masės). Stiklo stipris daugiausia priklauso nuo bandinio matmenų, todėl suformavus ypač mažo skersmens (paprastai 3–24 μm) gijas, stiklo tempiamasis stipris padidėja keliasdešimt kartų. Pluoštas gaminamas lydinį nukreipiant per specialius purkštukus, vadinamus filjerėmis.

Gaminant pluoštą tokiu būdu, naudojamos nuo 1,6–2 mm skersmens platinos lydinio filjerės, kuriose paprastai išdėstomi keli šimtai purkštukų. Stiklo lydinys teka per purkštukus ir suformuojamos ypač plonos stiklo gijos. Susidariusių gijų skersmuo priklauso nuo stiklo temperatūros purkštuke ir lydinio judėjimo greičio. Iš keliolikos tokių gijų sudaromas vadinamasis filjerės pluoštas, kuris susukamas į rites arba kapojamas. Gamybos metu stiklo pluošto gijos padengiamos specialia danga (klijais), kurios paskirtis: apsaugoti atskiras stiklo gijas nuo mechaninių pažeidimų bei pagerinti sukibimą su polimerine matrica [3].



7 pav. Stiklo pluošto armatūros komponentai [3]

1.4 Daugiasluoksnių gelžbetoninių sijų armuotų stiklo pluoštu analizė

Gelžbetoninių konstrukcijų tradiciniai stiprinimo būdai yra betono apvaskalai ir papildomi plieniniai elementai. Naudojant betoną gerokai padidėja konstrukcijų matmenys bei svoris. Todėl šis stiprinimo metodas nėra visada tinkamas. Stiprinimui naudojant plieninius elementus agresyvioje aplinkoje, dažnai tenka plieną padengti antikorozine danga, be to, įprasto plieno stipris yra palyginti nedidelis [4].

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 [4].

Stiklo pluoštu armuoti gelžbetoniniai elementai yra sąlyginai nauja daugiasluoksne konstrukcija, kurią pastaruoju metu bandoma pritaikyti ne tik statant naujus pastatus, tiltus ir pan., bet ir juos renovuojant, tvarkant įtrukimus, bandant sustiprinti senas konstrukcijas.

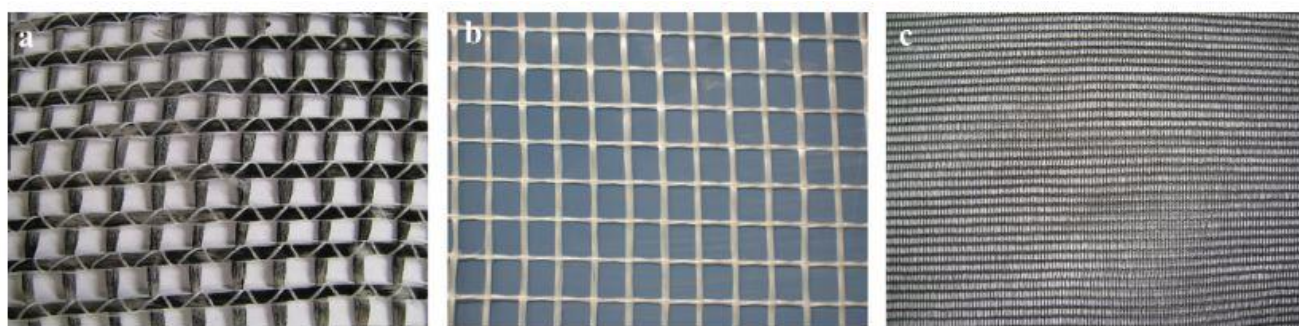
Analizėje apžvelgti keli moksliniai darbai atlikti nuo 2008 metų. Straipsniuose atkreiptas dėmesys kokią įtaką turi stiklo pluoštas, liejant naujas betono konstrukcijas. Taip pat skirtumai tarp armavimo stiklo, anglies ir kitais pluoštais.

1.4.1 Betono konstrukcijos stiprinimas naudojant stiklo pluoštą – atsparumo testavimas veikiant statinei ir smūginei apkrovai

Šiame darbe buvo tiriami gelžbetoniniai elementai, sustiprinti vidine stiklo pluošto, anglies pluošto arba plastiko armatūra veikiant juos statine ir smūgine apkrova. Testuojant sustiprintus elementus lenkiant buvo gauti rezultatai, kurie parodė, kaip pakinta betono savybės armuojant jį skirtingais pluoštais. Visos armavimo medžiagos sustiprino betoną. Teigiami rezultatai buvo gauti lyginant apkrovimo dydį, atsparumą lenkimui ir atsparumą smūginei apkrovai. Tyrime geresni rezultatai gauti veikiant statine apkrova [5].

Kad ištirti stiklo pluoštu sustiprinto bandinio savybes ir elgseną – ne kaip vienalytės, bet kaip daugiasluoksnės konstrukcijos, buvo pagaminti keturių tipų bandiniai į betono skiedinį nededant ir įdedant skirtingus pluoštus.

Pluoštai buvo klojami bandinių apačioje, nes ten susidaro tempimo įtempimai, kai bandinys yra lenkiamas.

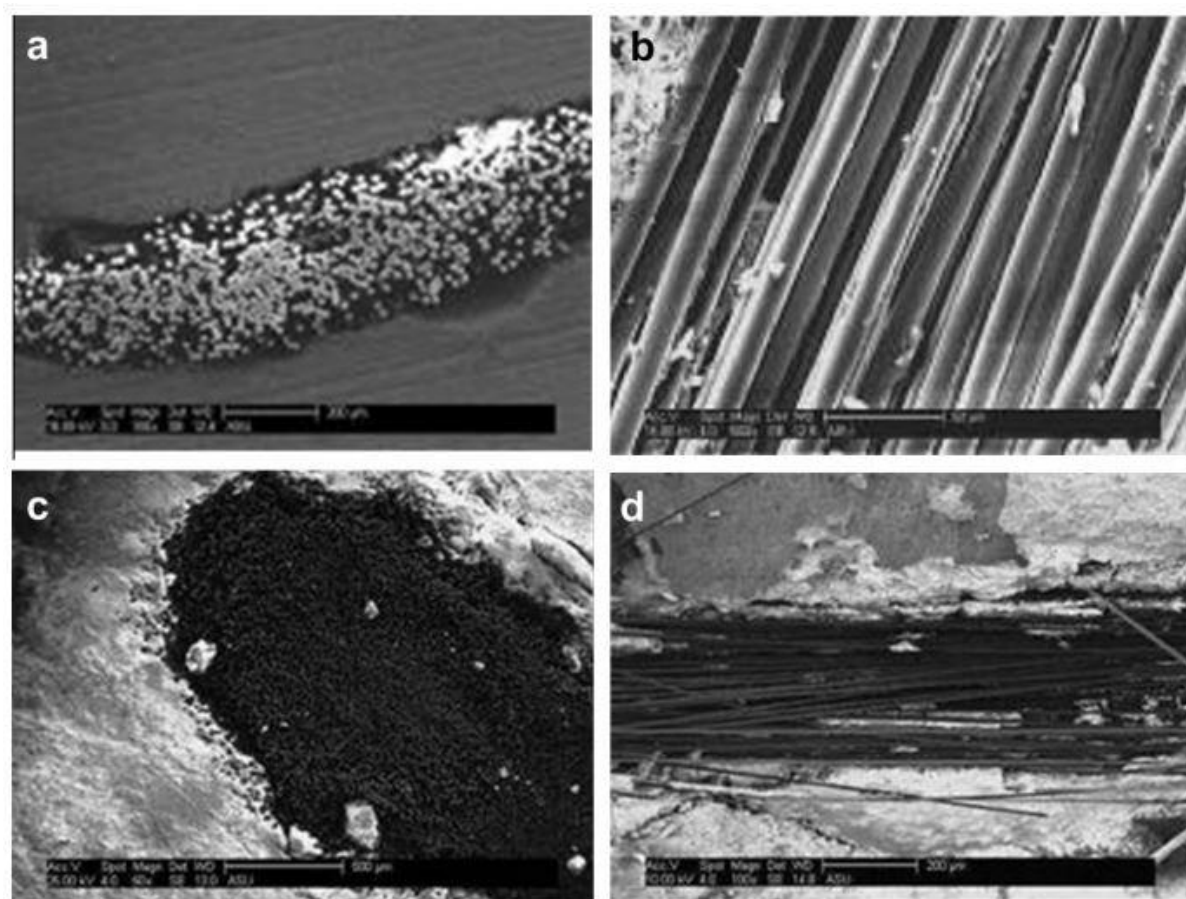


8 pav. Pluoštai naudoti betonui stiprinti: a – anglies pluoštas, b – stiklo pluoštas, c- plastiko (polietileno) pluoštas [5]

Mechaninės bandinių savybės buvo gautos atliekant lenkimo bandymą. Buvo atliekamas trijų taškų lenkimo bandymas su lenkimo mašina, kurioje buvo nustatyta stūmoklio eiga 180 mm, spaudimo greitis 1.0 mm/min. Testavimo mašinos didžiausia spaudimo jėga 100 kN.

Atliekant bandymą buvo gautos įtempimų kreivės ir paskaičiuotas įlinkių koeficientas pagal pradinius lenkimo mašinos nustatymus.

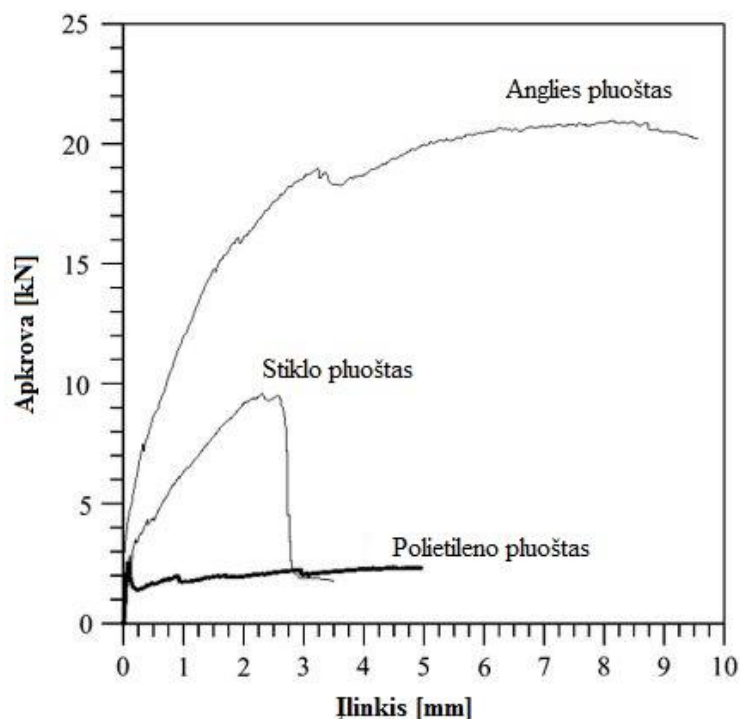
Papildomai buvo atliktas bandinių mikro-įtrūkimų skenavimas su elektroniniu mikroskopu (žr. 9 pav.).



9 pav. Mikro įtrūkimų nuotraukos darytos su elektroniniu mikroskopu [5]

Lenkimo įlinkių kreivės parodytos grafike (10 pav.). Į grafiką buvo atrinktos tos kreivės, kurių nuokrypis nuo bendrų vidutinių, eksperimento metu gautų duomenų, buvo mažiausias. Iš grafiko matyti, kad bandinių atlaikomi lenkimo įtempimai skiriasi. Geriausi rezultatai buvo gauti betoną armuojant anglies pluoštu, toliau eina stiklo pluoštas ir tada polietileno pluoštas.

Bandiniai, armuoti polietileno pluoštu, vidutiniškai lūždavo apkrovai pakilus iki 2,5 kN, kurio metu įlinkiai būdavo 0,076 mm; stiklo pluoštu armuoti bandiniai pasirodė geriau ir vidutiniškai pasiekdavo apkrovą 9,5 kN, esant 2,3 mm įlinkiams; anglies pluoštu armuoti bandiniai atlaikė didžiausias apkrovas, vidutiniškai 21 kN, esant 8,0 mm įlinkiams. Lyginant su nearmuotu betonu, visi bandiniai tapo atsparesni lenkimui. Juos perlaužti užtruko ilgiau [5].



10 pav. Lenkimo deformacijų grafikas [5]

Bandiniuose su armavimu (ypač stiklo pluoštu) atsiranda daug įtrūkimų, kai yra beveik pasiekiami leistinieji įtempimai, tačiau bandinys iš karto nelūžta. Bandiniuose be armavimo atsiranda vos keli matomi įtrūkimai ir bandinys lūžta. Taip pat buvo pastebėta, kad bandiniai su armavimu suyra atplėšiant viduje esančios armatūros juostos galą, su betono sluoksniu.

Skirtingų pluoštų įtaka betonui yra palyginta 1 lentelėje.

1 lentelė

Armavimo naudingumas lyginant su nearmuotu betonu [5]

Pluoštas	V_f (%)	Armavimo naudingumas %	Statinė apkrova		Smūginė apkrova		
			Apkrova (%)	Energija (%)	Apkrova (%)	Energija (%)	Impulsas (%)
Polietilenas	3	18	170	333	188	575	667
Stiklas	1	33	500	5670	257	592	750
Anglis	8	13	1430	55000	1355	6400	7500

Šiame tyrime buvo paruošti trijų rūšių armuoti bandiniai, su stiklo pluoštu, anglies pluoštu ir polietileno pluoštu ir buvo gauti trys skirtingi rezultatai: nedidelio stiprumo, bet didelio plastiškumo, ir labai mažos kainos polietileno pluoštas; vidutinio stiprumo, vidutinio

plastiškumo stiklo pluoštas; labai stiprus ir labai didelio plastiškumo anglies pluoštas, tačiau didelės kainos.

1.4.2 Betono, armuoto stiklo pluoštu, nuovargio tyrimas atliekant lenkimo bandymą

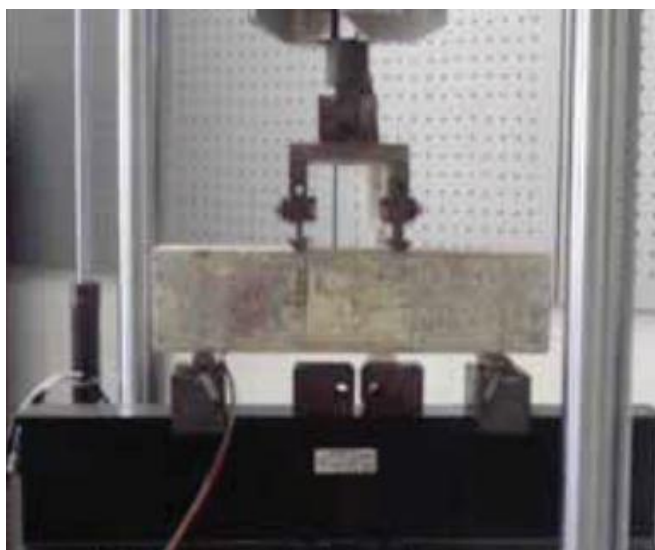
Šiame tyrime buvo atlikti bandymai su 63 stiklo pluoštu armuotais bandiniais, kurių matmenys buvo 100x100x400 mm ir kurie buvo testuojami pagal keturių taškų lenkimo schemą. Stiklo pluoštas bandiniuose sudarė 0,6 %, 0,8 % ir 1,00 % viso bandinio storio. Betono mišinys bandiniams buvo paruoštas taip, kad atitiktų standartą LST EN 206-1:2002 kurio stiprio gniuždant klasė C40. Betono sudedamųjų dalių santykis parodytas 2 lentelėje [6].

2 lentelė

Mišinio santykis kg/m³ [6]

Cementas	Vanduo	Smėlis	Žvyras
409	180	880	1076

Atliekant nuovargio bandymą lenkiant, betono sijos lenkimo mašinoje buvo padėtos taip, kad tarp atramos taškų būtų 300 mm atstumas, o apkrovos taškai būtų paskirstyti tolygiai šiam atstumui (žr. 11 pav.). Toks pat bandinio padėjimo būdas buvo naudojamas tiek atliekant nuovargio bandymus, tiek apkraunant statinę jėga [6].



11 pav. Stiklo pluoštu sustiprinta betono sija [6]

Atliekant nuovargio bandymus buvo naudojamos skirtingų dydžių, bet vienodo dažnio apkrovos. Apkrovos ciklą skaičius, kurį atlaiko bandinys iki kol lūžta, buvo laikomas nuovargio

laiku, kurio reikia sulaužyti bandiniui. Buvo pastebėta, kad padidinus stiklo pluošto storį bandinyje, padaugėja ciklų skaičius reikalingas perlaužti bandiniui, todėl buvo padaryta išvada, kad stiklo pluoštu sustiprintos betono sijos tampa atsparesnės nuovargiui lenkiant, nei įprastas betonas be armavimo.

1.4.3 Anglies pluoštu sustiprintų betono sijų stebėjimas lenkiant

Metale, kuriuo yra armotas betonas, gali atsirasti korozija, o tai labai paveikia konstrukcijos ilgaamžiškumą. Dėl šios priežasties buvo pradėta ieškoti alternatyvų, kas galėtų pakeisti tradicinį metalą. Nebloga alternatyva pasirodė esantis anglies pluoštas. Šiame darbe bus atliekami bandymai su betono sijomis sustiprintomis anglies pluoštu ir plieniniais strypais [7].

Pagrindiniai šio tyrimo uždaviniai yra stebėti, kas vyksta lenkiant bandinius, kokie didžiausi įlinkiai, didžiausios atlaikomos pakrovos ir susidaranti įtrūkių struktūra.

Bandinių matmenys, naudoti tyrime buvo 2000x120x200 mm (žr. 12 pav.). Visi bandiniai buvo sustiprinti keturiais anglies pluošto strypais, įdėtais apačioje ir viršuje po 2 strypus, išilgai bandinio, kontrolinei grupei bandinių buvo naudojami įprasti plieniniai strypai.

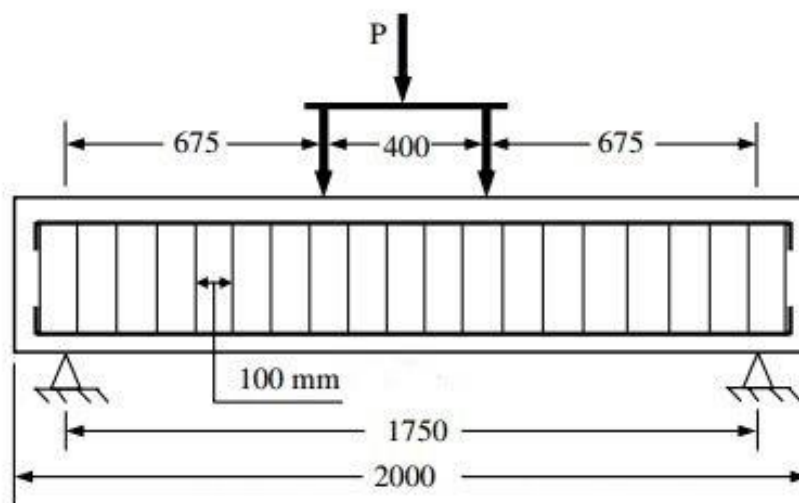
Bandiniams pagaminti, betono mišinys buvo maišomas keturis kartus, kiekvieną kartą stengiantis, kad mišinio sudedamosios dalys būtų vienodos. Mišinio sudedamosios dalys pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė

Mišinio santykis kg/m^3 [7]

Cementas	Vanduo	Smėlis	Žvyras
325	216	853	1001

Bandiniai buvo testuojami pagal keturių taškų lenkimo schemą (žr. 12 pav.).



12 pav. Keturių taškų lenkimo schema. Matmenys nurodyti mm [7]

Lentelėje 4 yra pateikta gauta vidutinė lenkimo jėga. Sijos žymėjimas: K – nurodo, kad sijos buvo laikomos kambario temperatūroje; P – armavimas plieniu; A – armavimas anglies pluoštu.

4 lentelė

Sijų atlaikoma apkrova [7]

Sija	Gniuždymo jėga, MPa
KP1	46,52
KP2	44,64
KA1	42,55
KA2	41,71

Atliekant lenkimo bandymą, bandiniai buvo padėti ant pusapvalių atramų, tarp kurių atstumas 1750 mm. Apkrova buvo didinama pamažu iki visiško bandinio suardymo. Bandiniai buvo lenkiami dviejose vietose su 38 mm skersmens voleliais. Spaudimo preso galia 200 kN. Po abiem voleliais buvo padėtos metalinės plokštelės 25 mm pločio ir 5 mm storio, tam, kad lenkiant jėga pasiskirstytų tolygiau. Įtrūkiai buvo stebimi naudojant padidinimo stiklą ir sužymėti (žr. 13 pav.).



13 pav. Bandinių pavyzdžiai po atlikto lenkimo bandymo [7]

Lentelėje 5 pateikta kiek atsirado įtrūkimų kiekviename bandinyje ir koks buvo atstumas tarp jų.

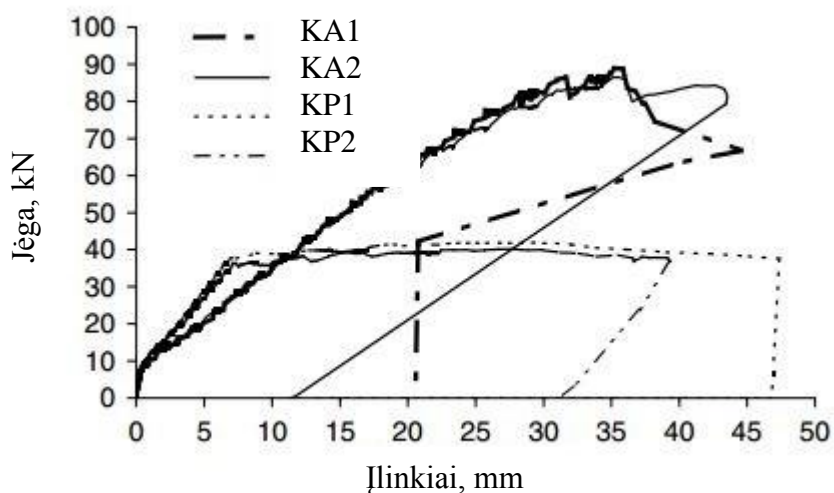
5 lentelė

Bandinio įtrūkimai [7]

Sija	Įtrūkimų skaičius	Tarpas tarp įtrūkimų, mm
KP1	13	96
KP2	12	100
KA1	18	77
KA2	25	99

Iš lentelės matome, kad įtrūkimų skaičius ir atstumas tarp jų skiriasi nežymiai.

Atlikus bandymą buvo pastebėta, kad tiek plieniu tiek anglies pluoštu armuotuose bandiniuose įtrūkimų struktūra yra panaši. Abi bandinių serijos pasižymėjo panašiu įtrūkių skaičiumi ir atstumu tarp jų. Taip pat buvo pastebėta, kad atlaikoma apkrova taip pat beveik nesiskiria, tačiau anglies pluoštu armuoti bandiniai pasižymėjo didesniu plastiškumu (žr. 14 pav.).



14 pav. Jėgos – poslinkių diagrama [7]

2. TEKSTILE ARMUOTO BETONO SIJŲ STIPRUMO IR STANDUMO TYRIMAS

2.1 Bandinių ruošimas

Norint nustatyti stiklo pluošto įtaką betonui buvo pagaminti penkių tipų bandiniai ir suskirstyti į serijas (žr. 6 lentelė). Bandiniai buvo gaminami naudojant savo gamybos metalines dėžutes į kurias buvo klojamas stiklo pluoštas ir liejamas betonas. Stiklo pluoštas buvo dedamas bandinių apačioje, nes ten susidaro lenkimo įtempimai. Viso bandinių tyrimui buvo pagaminta 75 vienetai, po 15 vienetų kiekvienam tipui. Bandinių nominaliniai matmenys 40x40x160 mm (žr. 16 pav.).

6 lentelė

Bandinių numeracija

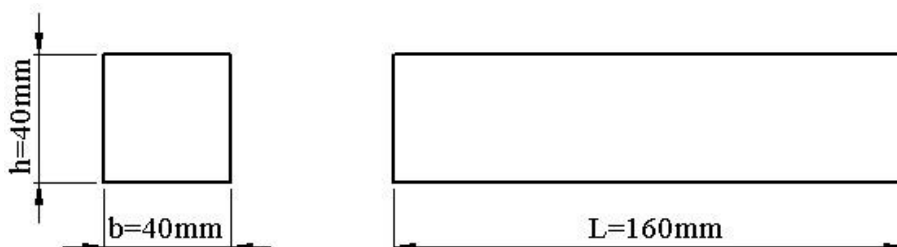
Serija	Stiklo pluošto sluoksnių skaičius	Pastabos
0	0	Grynas betonas, be armavimo
1	12	
2	12	Su išretintu tinkleliu
3	18	
4	24	

Liejimo formas gaminome iš metalinės skardos, kurių matmenys 40x40x160 mm. Skarda buvo karpoma naudojant mechanines karpymo stakles-giljotiną, ir lankstoma naudojant mechanines skardos lankstymo stakles. Liejimo formų pavyzdys pateiktas 15 pav.



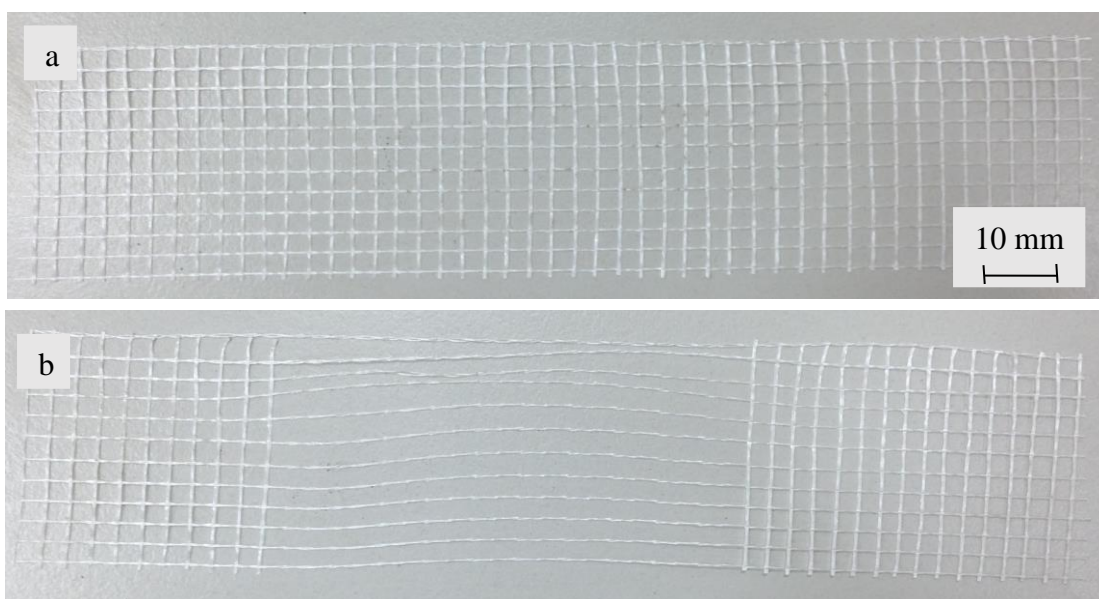
15 pav. Liejimo formos bandinių gamybai

Bandiniams buvo gautas 48 mm pločio stiklo pluoštas suvyniotas į rulonus po 150 metrų. Kadangi naudojamas stiklo pluoštas buvo per platus, buvo nukerpami šonai, kad plotis liktų 40 mm. Bandiniams jau paruošto stiklo pluošto matmenys 40x160 mm. Tokių pat matmenų stiklo pluoštas buvo naudojamas visų serijų bandiniams.



16 pav. Sijos matmenys

Antrai serijai bandinių buvo naudojamas stiklo pluošto tinklelis su išretinta vidurine dalimi (žr. 17 pav.).



17 pav. Stiklo pluošto tinklelis naudotas bandiniams: a) apkarpytas, b) apkarpytas ir su išretinta vidurine dalimi

Betonas buvo maišomas kibire naudojant elektrinę skiedinio maišyklę. Buvo atlikti 5 maišymai. Vieno maišymo metu buvo pagaminama 15 bandinių. Betono mišinio sudedamosios dalys aprašytos 7 lentelėje.

Iš lentelėje pateiktų duomenų matosi, kad vandens/cemento santykis svyravo nuo 0,389 iki 0,400.

Betono mišinio sudedamosios dalys

Betono sudedamosios dalys	1 maišymas	2 maišymas	3 maišymas	4 maišymas	5 maišymas
Tuščias indas [g]	1463	1463	1412	1412	1412
Indas su žvyru 1 [g]	11836	11830	11831	11826	11813
Grynas žvyras 1 [g]	10373	10367	10418	10414	10401
Indas su žvyru 2 [g]	3564	4586	4742	4900	4900
Grynas žvyras 2 [g]	2101	3123	3330	3488	3488
Bendras gryno žvyro kiekis 1+2 [g]	12474	13491	13748	13902	13889
1/3 žvyro [g]	4158	4497	4582	4634	4629
Cementas + indas [g]	5621	5960	5995	6046	6042
Vanduo + kibiras [g]	4146	4077	1948	2014	12014
Kibiras su vandens likučiu [g]	2528	2298	1620	1613	1630
Snaudotas vanduo [g]	1618	1779	1786	1853	1851
Cemento ir vandens santykis	0,389	0,395	0,390	0,400	0,400

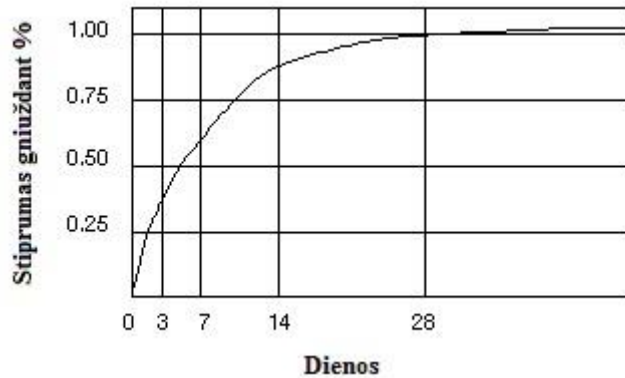
Bandiniai buvo ruošiami pirmiausiai sudedant į pagamintas liejimo formas reikiamą kiekį stiklo pluošto: 12, 18, 24 arba 12 sluoksnių su išretinta vidurine tinklelio dalimi. Tuomet buvo pilamas betono mišinys ir paruošti bandiniai buvo nešami ant vibravimo mašinos. Suvibravus bandinius, buvo papildomai įdedama betono mišinio, nes vibruojant betonas tolygiai pasiskirstė po visą bandinio formą, prasiskverbė pro stiklo pluošto tinklelį, sutankėjo, pasišalino perteklinis vanduo. Betono mišinio buvo įdedama ir suvibruojama kelis kartus, kol buvo pilnai ir tolygiai užpildyta liejimo forma.

Paruošti bandiniai buvo palikti 12 valandų liejimo formose, kad betonas sudžiūtų. Po 12 valandų bandiniai buvo išimami iš liejimo formų ir įmerkiami į šarminį vandenį specialioje vonelėje. Remiantis tyrimais [8] yra svarbu, kad betonas pirmąsias 10 kietėjimo dienų nebūtų veikiamas žemų temperatūrų ir neišdžiūtų, nes tai turi didelę įtaką galutiniam betono stiprumui.

Vonelėje esantis vanduo buvo palaikomas kambario temperatūros apie 19°C. Bandiniai vonelėje buvo laikomi 14 dienų. Kaip rodo tyrimai [8], betonas įgauna 90 % stiprumo per pirmąsias 28 dienas (žr. 18 pav.).

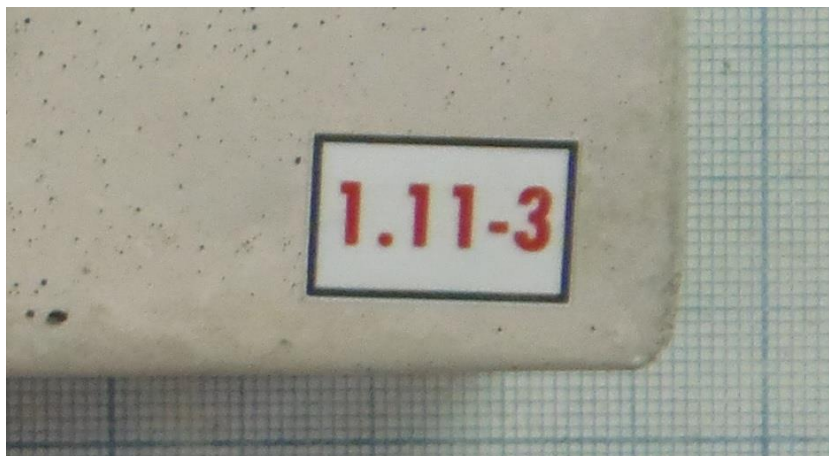
Visiems bandiniams pagaminti, betono mišinys buvo ruošiamas 5 kartus. Kiekvienam maišymui buvo pagamintas betono kubas 90x90 mm matmenų. Kubai skirti betono mišinio tamprumo moduliui nustatyti.

Buvo pastebėta, kad darant mišinį su šiek tiek didesniu vandens/betono santykiu, kuomet vandens dalis buvo didesnė, betonui buvo lengviau prasiskverbti pro stiklo pluošto tinklelį ir tolygiau pasiskirstyti.



18 pav. Betono stiprėjimo nuo laiko grafikas [9]

Praėjus 22 dienoms bandiniai buvo išimti iš vandens vonelės, pasverti, pamatuoti, pažymėti bandinių centrai ir sunumeruoti. Numeravimo reikšmės: pirmas skaičius – tai bandinio grupė, kuri parodo kiek stiklo pluošto sluoksnių buvo įdėta į bandinį; antras skaičius - bandinio eilės numeris; trečias skaičius – betono mišinio numeris (žr. 19 pav.).

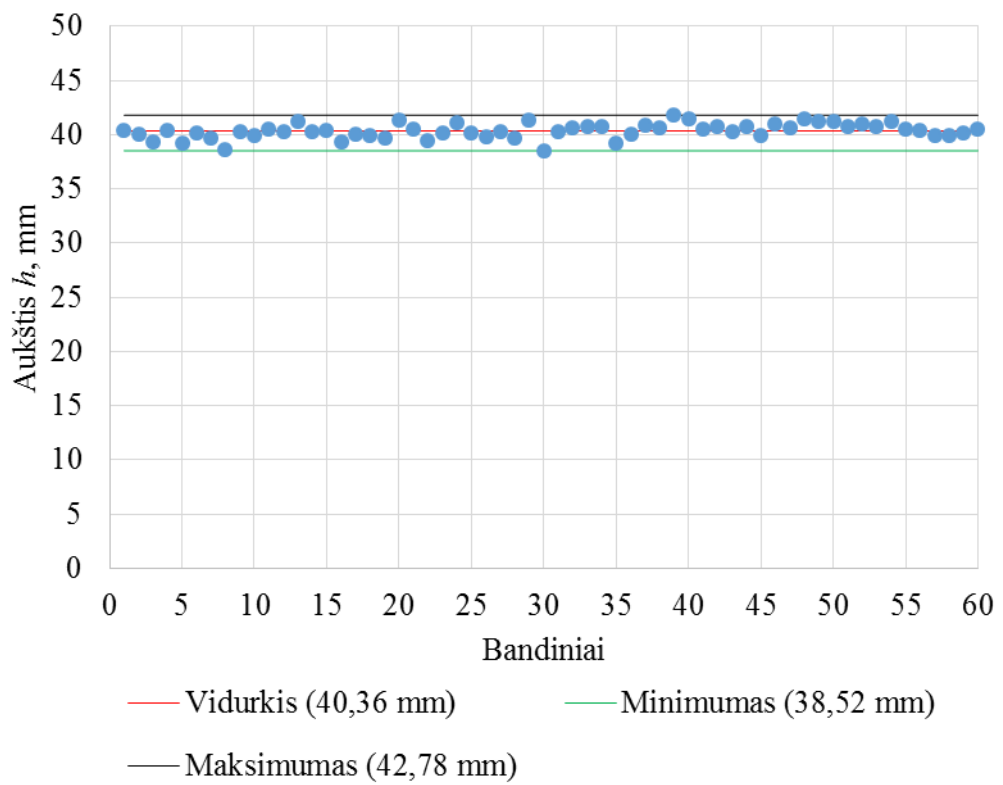
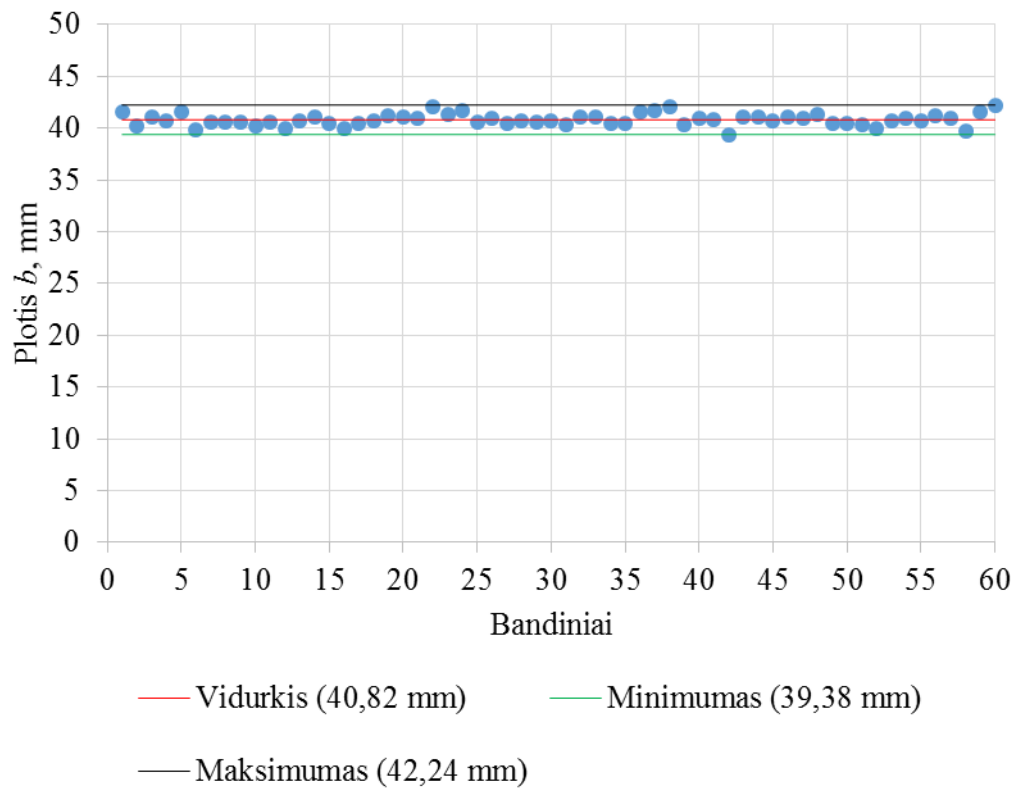


19 pav. Bandinių žymėjimas

Pastaba: Šis bandinys (žr. 19 pav.) turi 12 sluoksnių stiklo pluošto, 3 betono mišinys, kurio vandens/cemento santykis 0,395.

Pamatavus visų pagamintų armuotų bandinių aukštį ir plotį buvo sudaryti grafikai (žr. 20 pav.) iš kurių matome, koks yra matmenų išsidėliojimas apie vidurkį, bei kokia buvo mažiausia ir didžiausia pločio ir aukščio reikšmė.

Trečiame skyriuje septintame poskyryje nagrinėjama bandinių geometrija, t. y. atlikta statistinė duomenų analizė kurioje įvertinta ar bandinių matmenys turėjo įtakos bandinių stiprumui, lyginant su gryno betono bandiniais.



20 pav. Aukščio ir pločio pasiskirstymas apie vidurkį

2.2 Testavimo mašina

Bandinių testavimui ir duomenų fiksavimui buvo naudojama gniuždymo mašina Walter+bai AG su Proteus 7.1.1 programine įranga, 200 kN spaudimo presu ir poslinkio davikliu BRÜTSCH/RÜEGGER (žr. 21 pav.). Vaizdinei medžiagai fiksuoti buvo naudojamos 4 skaitmeninės kameros sustatytos skirtingais kampais.

Bandiniai buvo apkraunami pagal trijų taškų lenkimo schemą (žr. 22 pav.). Jėga (F) buvo pridėta vertikaliai bandinio viduryje ir nukreipta žemyn. Naudotas apkrovimo greitis 0,15 kN/s. Apkrova buvo didinama nuo nulio iki bandinio suirimo.



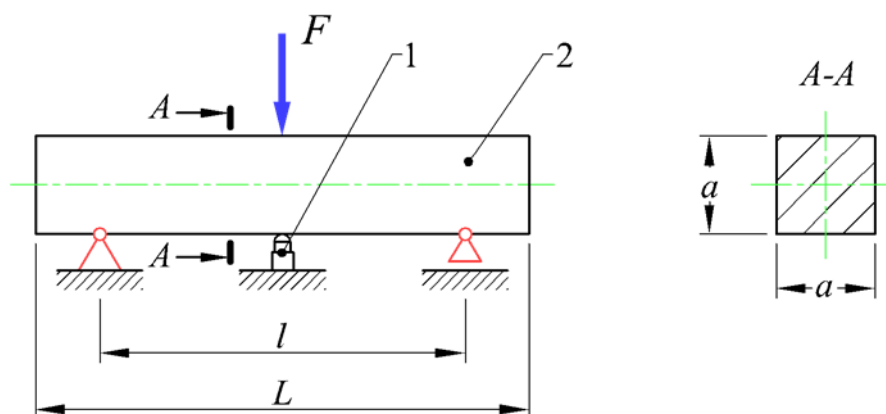
21 pav. Gniuždymo mašina Walter+bai AG ir poslinkio daviklis BRÜTSCH/RÜEGGER

3. TYRIMO REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

3.1 Bendroji dalis

Buvo tirti penkių serijų badinai: nearmuoto betono, armuoto 12, 12 su išretinta vidurine dalimi, 18 ir 24 stiklo pluošto tinklelio sluoksniais. Pluošto kiekis išilgai bandinio ašies buvo apie 0,3 % (12 sluoksnių), 0,45 % (18 sluoksnių) ir 0,6 % (24 sluoksnių) skaičiuojant nuo bendro sijos skerspjūvio ploto. Kiekvienoje serijoje buvo pagaminta ir išbandyta po 15 bandinių. Bandiniai buvo išlieti iš penkių skirtingų maišymų, kuriuose vandens/cemento santykis kito nuo 0,389 iki 0,400.

Bandinių stiprumas lenkimui buvo tiriamas naudojant trijų taškų lenkimo schemą (žr. 22 pav.). Atstumas tarp atramų $l = 140$ mm. Jėga F buvo pridėta vertikaliai bandinio viduryje ir nukreipta žemyn. Poslinkio matuoklio didžiausia santykinė paklaida 0,92 % [ASTM E83]. Jėga buvo nustatoma iš preso cilindre veikiančio slėgio. Slėgis matuotas absoliutinio slėgio keitikliu, kurio tikslumo klasė 0,3 %.



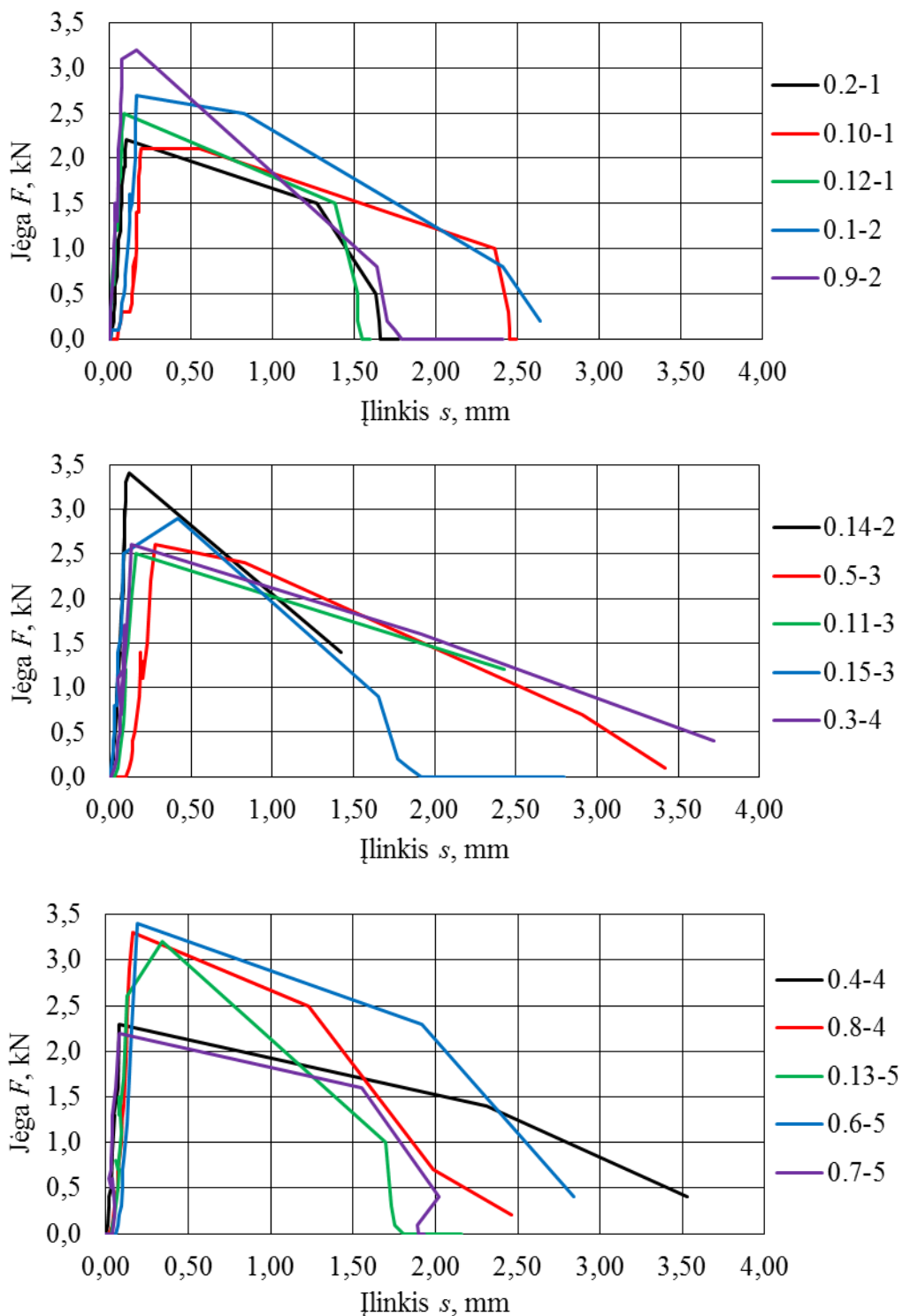
22 pav. Trijų taškų lenkimo schema: 1) poslinkio daviklis, 2) bandinys

Bandiniai buvo statomi ir tiksliai prispaudžiami ant cilindrinę atramų taip, kad viršutinė atrama būtų tiksliai bandinio viduryje. Įlinkiai matuojami bandinio viduryje užtikrinant kelis mm įvaržą prieš apkrovimą. Visiems bandiniams naudotas apkrovimo greitis 0,15 kN/s. Apkrova buvo didinama nuo nulio iki bandinio suirimo. Matavimo duomenys buvo surinkti ir apdoroti programine įranga, kuri kas 0,1 s nuskaito jėgos ir poslinkių vertes.

3.2 Nulinės serijos bandinių tyrimo rezultatai

Bandymo rezultatus atvaizduojame grafiškai, jėgos-poslinkių diagramomis $F-s$. Kad geriau matytųsi kiekvienos bandinio kreivės individualus pobūdis, jos pavaizduotos trijuose

skirtinguose grafikuose po penkias kreives. Nulinės serijos (gryno betono) bandinių diagramos pateiktos 23 pav.



23 pav. 0.x-y serijos (gryno betono) F - s diagramos

Iš grafikų matyti, kad gryno betono irimo apkrova kinta ribose 2,1 ... 3,4 kN. Sijų irimo apkrovos vidurkis 2,7 kN, vidutinis kvadratinis nuokrypis 0,5 kN. Bandinių įrimo įlinkiai kinta ribose 0,08 ... 0,42 mm, įlinkių vidurkis 0,17 mm, vidutinis kvadratinis nuokrypis 0,1 mm. Iš gautų duomenų matome, kad sijų stiprumo skirtumas yra iki 1,6 karto. Paanalizavus turimus

duomenis, bei filmuotą medžiagą ir nuotraukas, darytas atliekant bandymus, galima manyti, kad tam įtakos galėjo turėti betono mišinys, taip pat galėjo pasitaikyti broko bandinių gamybos procese.

Gryno betono sija suyra tuoj pat po plyšio atsivėrimo. Plyšys susiformuoja netoli sijos vidurio ir dažniausiai jis yra vertikalus arba nežymiai pakrypęs. Bandinio įrimo pobūdis parodytas 24 pav. Iš jo matyti, kad gryno betono bandiniuose pirmiausiai jėga F kyla proporcingai įlinkiams s , toliau vyksta staigus sijos irimas ir apkrovos mažėjimas. Toks perėjimas įvyksta susiformavus plyšiui tempiamoje sijos dalyje. Plyšys išplinta labai greitai ir apima visą bandinį – sija suyra.



24 pav. Gryno betono bandinys po eksperimento

Nulinės serijos bandinių matmenys, jėgos-poslinkio diagramų charakteringieji taškai ir inercijos momentai pateikti 8 lentelėje.

8 lentelė

Gryno betono matavimų rezultatai

Bandinio nr.	b mm	h mm	F_I kN	S_I mm	F_{II} kN	S_{II} mm	I mm ⁴
0,2-1	40,91	41,14	2,20	0,11	-	-	237378
0,10-1	41,35	40,62	2,10	0,10	-	-	230948
0,12-1	41,30	40,89	2,50	0,09	-	-	235299
0,1-2	40,78	39,22	2,70	0,17	-	-	205016
0,9-2	41,08	40,62	3,20	0,17	-	-	229440
0,14-2	41,99	40,55	3,40	0,12	-	-	233312
0,5-3	40,82	39,61	2,60	0,28	-	-	211401
0,11-3	40,34	40,66	2,50	0,16	-	-	225973
0,15-3	40,31	40,51	2,90	0,42	-	-	223315
0,3-4	40,21	39,63	2,60	0,13	-	-	208557
0,4-4	41,06	38,36	2,30	0,08	-	-	193141

Lentelės tęsinys kitame puslapyje

0,8-4	41,82	40,27	3,30	0,16	-	-	227587
0,13-5	40,98	39,15	3,20	0,34	-	-	204921
0,6-5	40,42	40,26	3,40	0,19	-	-	219804
0,7-5	42,01	39,50	2,20	0,08	-	-	215756
Min	40,21	38,36	2,10	0,08	-	-	193141
Max	42,01	41,14	3,40	0,42	-	-	237378
Vidurkis	41,03	40,07	2,74	0,17	-	-	220123
SD	0,59	0,78	0,46	0,10	-	-	13154
CI_U, 95%	41,35	40,50	3,00	0,229	-	-	227408
CI_L, 95%	40,70	39,63	2,48	0,118	-	-	212839

Lentelėje SD – standartinis nuokrypis (arba vidutinis kvadratinis nuokrypis).

Lentelėje CI_U, 95 % ir CI_L, 95 % yra pasikliautinio intervalo viršutinė ir apatinė riba, paskaičiuota su 95 % tikimybe. Pasikliautinis intervalas – tai intervalas, kuriame, su tam tikra tikimybe, yra matuojamo dydžio reikšmė.

Iš lentelės matome, kad gryo betono sijos neturi antro jėgos pakilimo - F_{II} (žr. 3.3 poskyris), nes bandiniai atsiradus plyšiui, iškart suyra.

3.3 Pirmos serijos bandinių tyrimo rezultatai

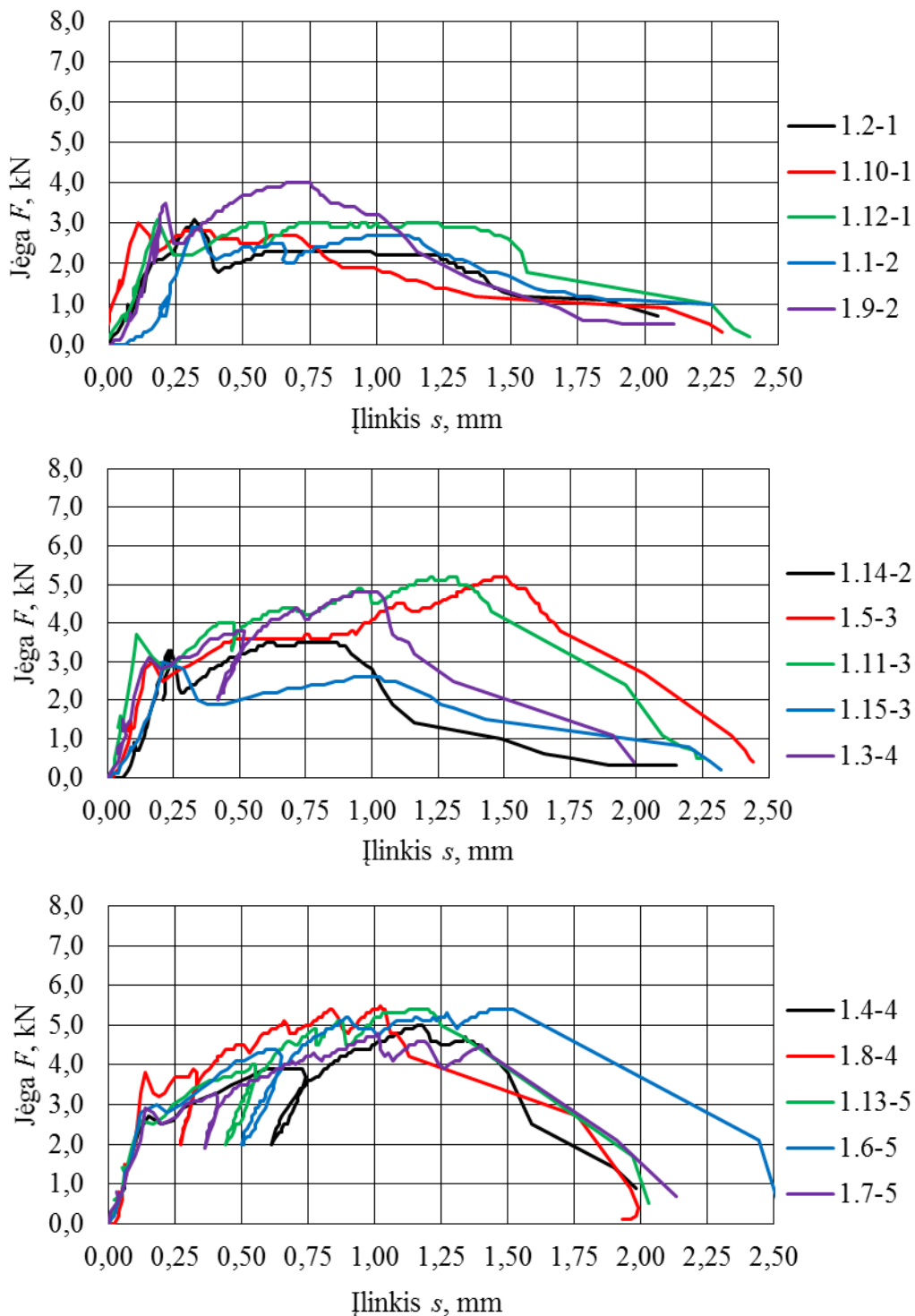
Betono armuoto su 12 sluoksnių stiklo pluošto tinkleliu (1 serija) $F-s$ diagramos pateiktos 25 pav.

Iš diagramų matome, kad 1 serijos, bandinių įrimo apkrova kito ribose 2,9 ... 5,5 kN, apkrovos vidurkis 4,2 kN, apkrovos vidutinis kvadratinis nuokrypis 1,0 kN. Lyginant 0 ir 1 serijos duomenis matome, kad maksimali vidutinė bandinių įrimo apkrova pakilo nuo 2,7 kN iki 4,2 kN (t. y. apie 1,6 karto), taip pat padidėjo ir vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo 0,5 kN iki 1,0 kN. Paskaičiavę variacijos koeficientą (vidutinio kvadratinio nuokrypio ir vidurkio santykis) gauname, kad variacija 0 serijos bandiniuose – 17 %, 1 serijos bandiniuose – 25 %.

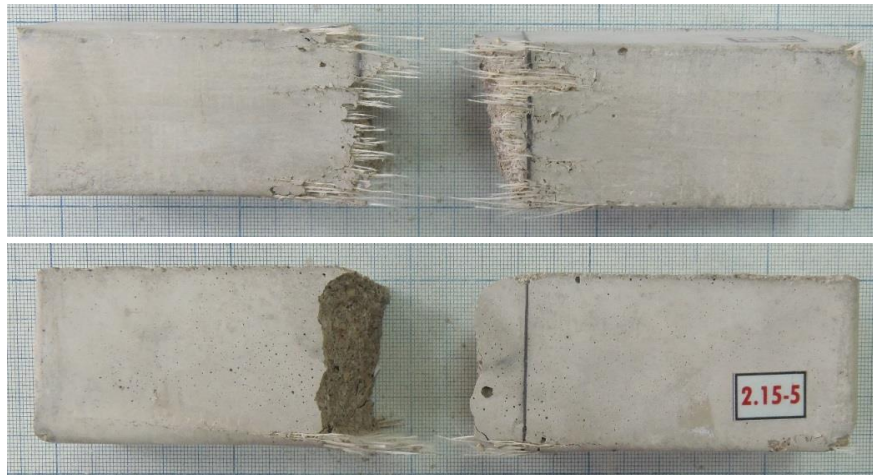
Pirmos serijos bandinių įrimo įlinkiai kinta ribose 0,11 ... 1,52 mm, įlinkių vidurkis 0,84 mm, vidutinis kvadratinis nuokrypis 0,49 mm. Lyginant 0 ir 1 serijos duomenis matome, kad įlinkių vidurkis padidėjo nuo 0,17 mm iki 0,84 mm (t. y. apie 5 kartus), tačiau kaip ir apkrovos atveju, padidėjo ir vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo 0,1 mm iki 0,49 mm. Variacijos koeficientas 0 serijos bandiniuose – 58 %, 1 serijos bandiniuose – 59 %.

Lygindami 0 ir 1 serijos bandinių $F-s$ diagramas lengva pastebėti, kad armuoto betono sijų irimas skiriasi. Armuotose sijose susiformavus plyšiui, kuris apima beveik visą konstrukciją, sija praranda stiprumą. Jėgos – poslinkio diagramose matyti, kad jėga staiga sumažėja, bet sija visiškai nesuyra, nes tempimo apkrovą priima stiklo pluoštas, o gniuždymo betonas. Tuomet

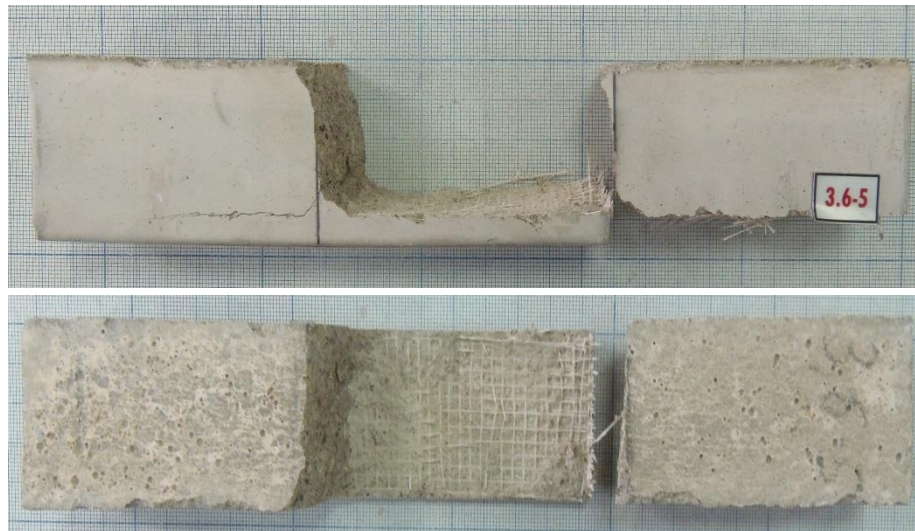
apkrova vėl ima didėti iki taško ($F_{II}; s_{II}$) (žr. lentelė 9). Tai tęsiasi kol apkrova pluoštui viršija jo stiprumo ribą ir jam nutrūkus (žr. 26 pav.) arba jį atplėšus (žr. 27 pav.) sija galutinai suyra. Buvo pastebėta, kad kuo didesnis stiklo pluošto kiekis betone, tuo mažiau krenta apkrova po plyšio atsivėrimo ir tuo aukščiau yra taškas ($F_{II}; s_{II}$). Kai kuriais atvejais taško ($F_{II}; s_{II}$) gali ir visai nebūti (žr. 9 lentelė, bandinio nr. 1,2-1) arba jis yra nežymus.



25 pav. 1.x-y serijos, betono armuoto su 12 sluoksnių stiklo pluošto tinkleliu, F - s diagramos



26 pav. Antros serijos bandinio pavyzdys po eksperimento. Stiklo pluoštas bandinyje buvo nutrauktas



27 pav. Trečios serijos bandinio pavyzdys po eksperimento. Stiklo pluoštas bandinyje buvo atplėštas

Pirmos serijos bandinių matmenys, jėgos-poslinkio diagramų charakteringieji taškai ir inercijos momentai pateikti 9 lentelėje.

9 lentelė

Armuoto betono (1 serija) matavimų rezultatai

Bandinio nr.	b mm	h mm	F_I kN	S_I mm	F_{II} kN	S_{II} mm	I mm ⁴
1,2-1	40,82	40,51	3,10	0,29	-	-	226141
1,10-1	39,38	40,73	3,00	0,11	-	-	221737
1,12-1	41,05	40,3	3,10	0,18	-	-	223896
1,1-2	40,71	40,73	2,90	0,34	-	-	229226
1,9-2	40,94	41,24	3,50	0,21	4,00	0,75	239289

Lentelės tęsinys kitame puslapyje

9 lentelės tęsinys

1,14-2	40,67	40,53	3,30	0,24	3,50	0,87	225643
1,5-3	41,63	40,18	3,00	0,17	5,20	1,51	225038
1,11-3	42,24	40,56	3,70	0,11	5,20	1,32	234875
1,15-3	41,59	40,42	3,00	0,21	-	-	228874
1,3-4	40,22	39,98	3,10	0,16	4,80	1,02	214185
1,4-4	41,06	39,29	2,70	0,15	5,00	1,18	207531
1,8-4	40,74	40,36	3,80	0,14	5,50	1,02	223200
1,13-5	40,61	39,71	2,60	0,17	5,40	1,20	211910
1,6-5	41,60	39,15	3,00	0,18	5,40	1,52	208021
1,7-5	39,90	40,13	2,80	0,17	4,80	1,01	214882
Min	39,38	39,15	2,60	0,11	3,50	0,75	207531
Max	42,24	41,24	3,80	0,34	5,50	1,52	239288
Vidurkis	40,88	40,25	3,11	0,19	4,88	1,14	222296
SD	0,72	0,55	0,34	0,06	0,65	0,26	9357
CI_U, 95%	41,28	40,56	3,30	0,223	5,242	1,282	227478
CI_L, 95%	40,48	39,95	2,92	0,154	4,518	0,998	217114

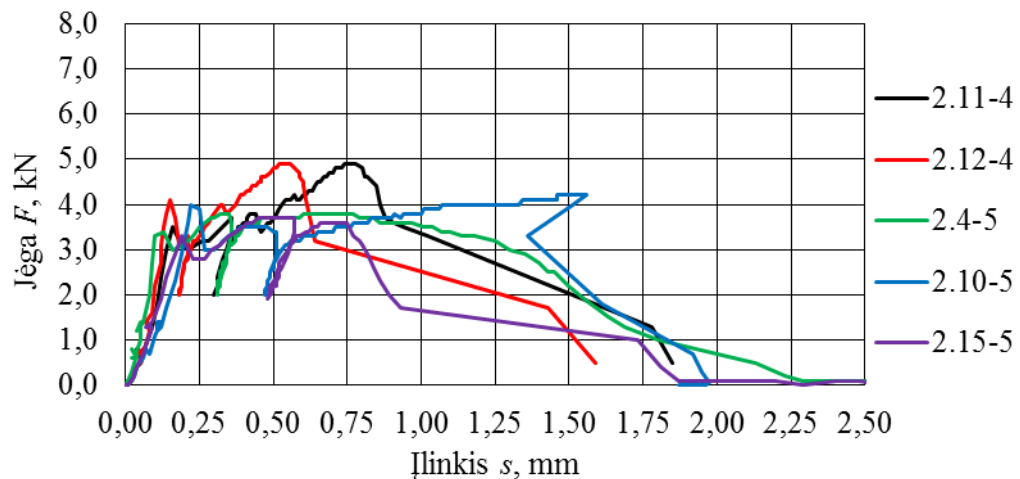
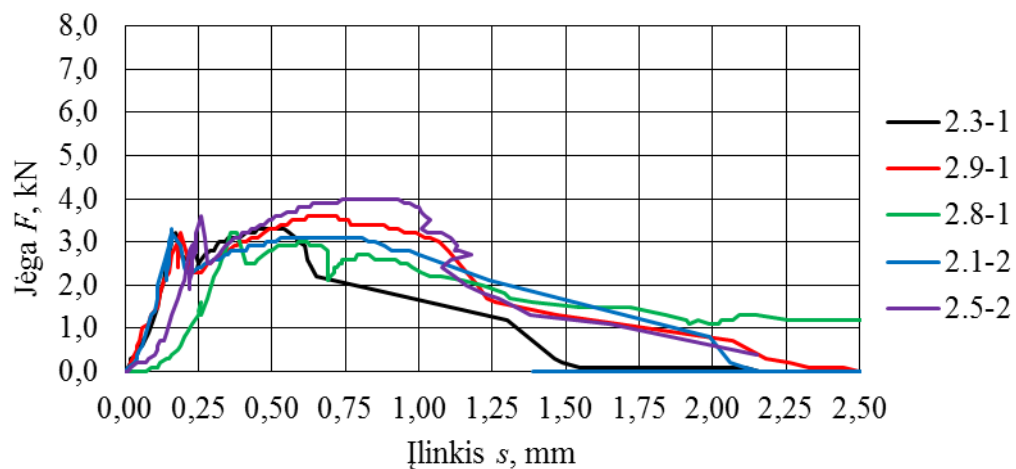
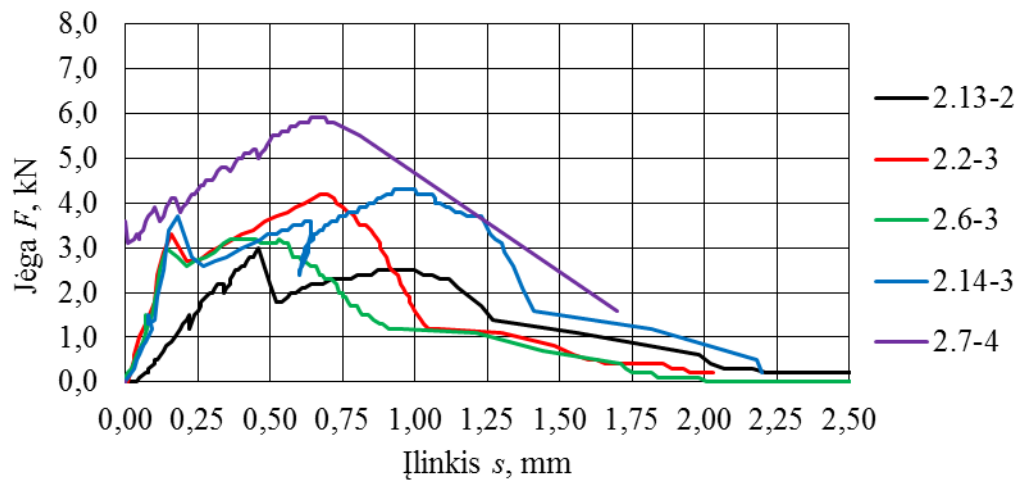
Iš 9 lentelės matome, kad mažiausia pirmos serijos armuoto bandinio atlaikoma jėga yra 2,9 kN (bandinio nr. 1,1-2), o didžiausia 5,5 kN (bandinio nr. 1,8-4). Panagrinėjus filmuotą medžiagą, bei nuotraukas, buvo pastebėti bandinių irimo skirtumai t. y. mažesnę apkrovą atlaikęs bandinys suyra atplėšiant stiklo pluoštą, o didesnę apkrovą atlaikęs bandinys suyra nutraukiant stiklo pluoštą. Iš to seka, kad bandinyje 1,1-2 stiklo pluoštas nesuveikė iki galo. Taip galėjo nutikti dėl prastesnio stiklo pluošto ir betono sukibimo.

Pirmoje serijoje mažiausi įlinkiai buvo 0,11 mm (bandinio nr. 1,10-1) ir didžiausias 1,52 mm (bandinio nr. 1,6-5). Tarp šių bandinių irimo skirtumų nebuvo pastebėta t. y. abu bandiniai suyra taip pat, stiklo pluoštas bandinyje buvo atplėštas kartu su betono sluoksniu. Toks įlinkių skirtumas galėjo atsirasti dėl betono ir stiklo pluošto sluoksnio prasto sukibimo.

Iš lentelės matome, kad daugumoje armuotų bandinių atsirado antras jėgos pikas F_{II} . Jį taip pat lengva pastebėti ir grafikuose. F_{II} atsiranda tik armuotuose bandiniuose, kai tempimo apkrovą priima stiklo pluoštas.

3.4 Antros serijos bandinių tyrimo rezultatai

Betono armuoto 12 sluoksnių, su išretinta vidurine stiklo pluošto tinklelio dalimi (2 serija) F -s diagramos pateiktos 28 pav. Antros serijos įrimo apkrova kito ribose 3,0 ... 5,9 kN, apkrovos vidurkis 4,0 kN, vidutinis kvadratinis nuokrypis 0,8 kN.



28 pav. 2.x-y serijos, betono armuoto su 12 sluoksnių stiklo pluošto tinkleliu, ir išretinta vidurine stiklo pluošto dalimi, F - s diagramos

Lyginant 0 ir 2 serijos duomenis matome, kad maksimali vidutinė įrimo apkrova padidėjo nuo 2,7 kN iki 4,0 kN (t. y. apie 1,5 karto), taip pat padidėjo ir vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo 0,5 kN iki 0,8 kN. Variacijos koeficientas 0 serijos bandiniuose – 17 %, 2 serijos bandiniuose – 20 %. Iš šių duomenų galime daryti išvadą, kad stiklo pluošto vidurinės dalies išretinimas turi įtakos duomenų variacijai. Išretinus vidurinę stiklo pluošto tinklelio dalį

duomenų variacija sumažėja. Lyginant su 1 bandinių serija, kurios variacijos koeficientas – 25 %. Variacija sumažėja 1,25 karto.

Antros serijos bandinių irimo įlinkiai kinta ribose 0,16 ... 1,56 mm, įlinkių vidurkis 0,66 mm, vidutinis kvadratinis nuokrypis 0,33 mm.

Lyginant 0 ir 2 serijos bandinių irimo įlinkių duomenis matome, kad vidutiniai maksimalūs įlinkiai padidėjo nuo 0,17 mm iki 0,66 mm (t. y. apie 4 kartus), vidutinis kvadratinis nuokrypis padidėjo nuo 0,1 mm iki 0,33 mm. Variacijos koeficientas 0 serijos bandiniuose – 58%, 2 serijos bandiniuose – 50 %.

Lyginant 1 ir 2 serijos duomenis matome, kad pirmos serijos vidutinė irimo apkrova yra 4,2 kN, antros serijos 4,0 kN. Iš šių duomenų matome, kad vidutinė irimo apkrova skiriasi 5 %. Kadangi tiek pirmoje, tiek antroje serijoje buvo dedama 12 sluoksnių stiklo pluošto, galime manyti, kad ta dalis, kuri buvo išretinta antroje serijoje, nedaro įtakos bandinio stiprumui t. y. nedirba.

Lyginant 1 ir 2 serijos bandinių irimo įlinkių duomenis matome, kad pirmos serijos vidutiniai įlinkiai yra 0,84 mm, antros serijos 0,66 mm. Iš šių duomenų matome, kad 2 serijos bandiniuose įlinkiai sumažėjo apie 27 %. Taip galėjo nutikti dėl to, kad išretinus stiklo pluošto vidurinę dalį (siūlus, kurie eina skersai pluošto), betonas ir pluoštas geriau sukibo ir dėl to jie buvo greičiau nutraukti.

Antros serijos bandinių irimas labai panašus į pirmos serijos. Susiformavus plyšiui ir sijai praradus stiprumą, ji visiškai nesuyra. Apkrovą priima stiklo pluoštas, kuris ir neleidžia sijai suirti, tol kol apkrova neviršija stiklo pluošto stiprumo ribos.

Antros serijos bandinių matmenys, jėgos-poslinkio diagramų charakteringieji taškai ir inercijos momentai pateikti 10 lentelėje.

10 lentelė

Armuto betono (2 serija) matavimų rezultatai

Bandinio nr.	b mm	h mm	F_I kN	S_I mm	F_{II} kN	S_{II} mm	I mm ⁴
2,3-1	41,11	40,71	3,10	0,18	3,30	0,54	231137
2,9-1	41,08	40,94	3,20	0,19	3,60	0,72	234905
2,8-1	40,67	39,95	3,20	0,38	-	-	216094
2,1-2	40,93	39,88	3,30	0,16	-	-	216335
2,5-2	41,21	40,42	3,60	0,26	4,00	0,93	226783
2,13-2	39,68	39,92	3,00	0,46	-	-	210359
2,2-3	40,53	38,58	3,30	0,16	4,20	0,70	193947
2,6-3	40,56	40,27	3,00	0,14	3,20	0,53	220730
2,14-3	40,18	39,95	3,70	0,18	4,30	1,00	213491

Lentelės tęsinys kitame puslapyje

10 lentelės tęsinys

2,7-4	40,60	40,56	3,90	0,14	5,90	0,69	225756
2,11-4	40,02	40,25	3,50	0,16	4,90	0,78	217467
2,12-4	40,65	41,26	4,10	0,15	4,90	0,56	237940
2,4-5	41,03	40,33	3,40	0,13	3,80	0,35	224287
2,10-5	40,49	40,43	4,00	0,22	4,20	1,56	222986
2,15-5	39,91	39,28	3,30	0,19	3,70	0,57	201565
Min	39,68	38,58	3,00	0,13	3,20	0,35	193947
Max	41,21	41,26	4,10	0,46	5,90	1,56	237940
Vidurkis	40,58	40,18	3,44	0,21	4,17	0,74	219585
SD	0,46	0,65	0,35	0,09	0,77	0,31	11837
CI_U, 95%	40,83	40,54	3,64	0,259	4,592	0,918	226140
CI_L, 95%	40,32	39,82	3,24	0,155	3,741	0,571	213031

Iš 10 lentelės matome, kad mažiausia antros serijos atlaikoma jėga yra 3,0 kN (bandinio nr. 2,13-2), o didžiausia 5,9 kN (bandinio nr. 2,7-4). Panagrinėjus šios serijos bandinių turimą filmuotą medžiagą, buvo pastebėti tokie patys bandinių irimo skirtumai kaip ir pirmoje serijoje. Mažesnę apkrovą atlaikęs bandinys suyra atplėšiant stiklo pluoštą, o didesnę apkrovą atlaikęs bandinys suyra jį nutraukiant.

Iš lentelės matome, kad daugumoje armuotų bandinių atsirado antras jėgos pikas F_{II} kaip ir 1 serijos bandinių lentelėje.

3.5 Trečios serijos bandinių tyrimo rezultatai

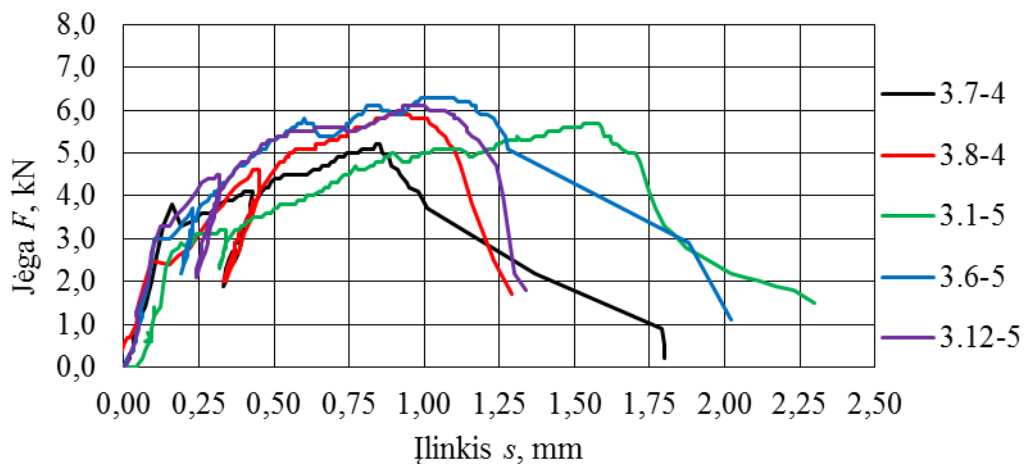
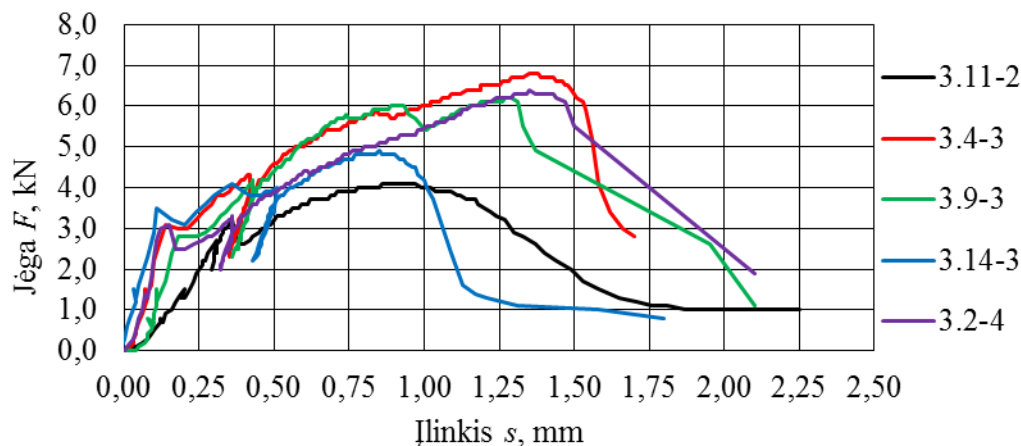
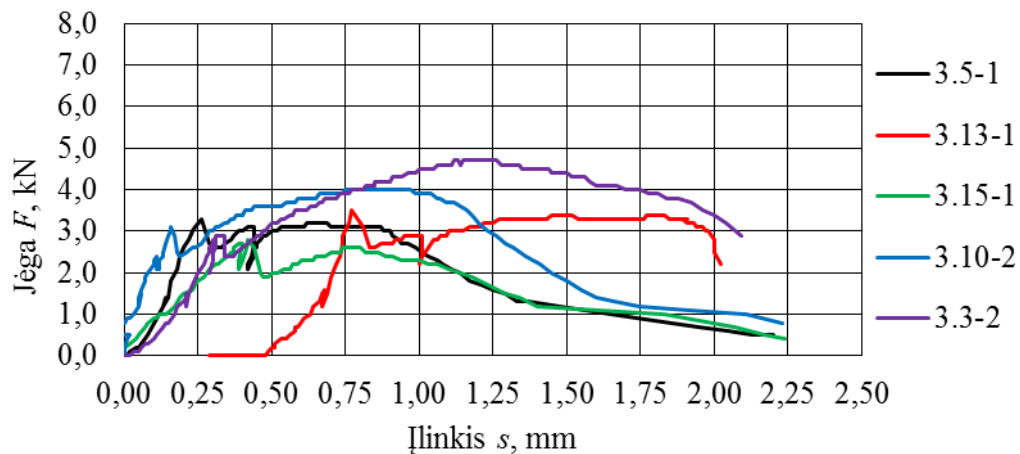
Betono armuoto su 18 sluoksnių stiklo pluošto tinkleliu (3 serija) F -s diagramos pateiktos 29 pav. Trečios serijos irimo apkrova kito ribose 2,8 ... 6,8 kN, apkrovos vidurkis 5,5 kN, vidutinis kvadratinis nuokrypis 0,9 kN.

Lyginant 0 ir 3 serijos bandinių duomenis matome, kad maksimali vidutinė įrimo apkrova padidėjo nuo 2,7 kN iki 5,5 (t. y. apie 2 kartus), vidutinis kvadratinis nuokrypis padidėjo nuo 0,5 kN iki 0,9 kN. Variacijos koeficientas 0 serijos bandiniuose – 17 %, 3 serijos bandiniuose – 25 %.

Trečios serijos bandinių irimo įlinkiai kinta ribose 0,09 ... 1,58 mm, įlinkių vidurkis 1,13 mm, vidutinis kvadratinis nuokrypis 0,24 mm.

Lyginant 0 ir 3 serijos bandinių irimo įlinkių duomenis matome, kad vidutiniškai maksimalūs įlinkiai padidėjo nuo 0,17 mm iki 1,13 mm (t. y. apie 6,6 karto), vidutinis kvadratinis nuokrypis padidėjo nuo 0,1 iki 0,24 mm. Variacijos koeficientas 0 serijos bandiniuose – 58 %, 3 serijos bandiniuose – 36 %.

Lyginant 1 ir 3 serijos bandinių duomenis matome, kad pirmos serijos vidutinė irimo apkrova yra 4,2 kN, trečios serijos 5,5 kN. Trečioje serijoje buvo dedama 18 sluoksnių stiklo pluošto t. y. 50 % daugiau nei pirmoje serijoje, o atlaikoma vidutinė jėga padidėjo apie 30 %. Iš šių duomenų galime manyti, kad stiklo pluošto sluoksnių skaičiaus didinimas bandinyje, duoda teigiamą rezultatą bandinio stiprumui.



29 pav. 3.x-y serijos, betono armuoto su 18 sluoksnių stiklo pluošto tinkleliu, F - s diagramos

Lyginant 1 ir 3 serijos įlinkių duomenis matome, kad pirmos serijos vidutiniai įlinkiai yra 0,84 mm, trečios serijos 1,13 mm. Įlinkiai, trečioje serijoje, vidutiniškai padidėjo 35 %. Vadinasi, sluoksnių kiekio padidėjimas bandinyje taip pat duoda teigiamą rezultatą ir sijų įlinkiams.

Trečios serijos bandinių irimas taip pat panašus į 1 ir 2 serijos bandinių, t. y. sija iškarto nesuyra atsiradus plyšiu, tačiau, skiriasi jėga, kurios reikia visiškai jai suardyti. Kaip buvo pastebėta anksčiau, sija visiškai suyra tada, kai yra viršijama stiklo pluošto stiprumo riba, kadangi 3 serijoje į bandinius buvo dedama 18 sluoksnių stiklo pluošto (6 sluoksniais daugiau nei 1 ir 2 serijos bandiniuose), todėl ir jėga, reikalinga visiškai suardyti sijai, padidėjo.

Trečios serijos bandinių matmenys, jėgos-poslinkio diagramų charakteringieji taškai ir inercijos momentai pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė

Armuoto betono (3 serija) matavimų rezultatai

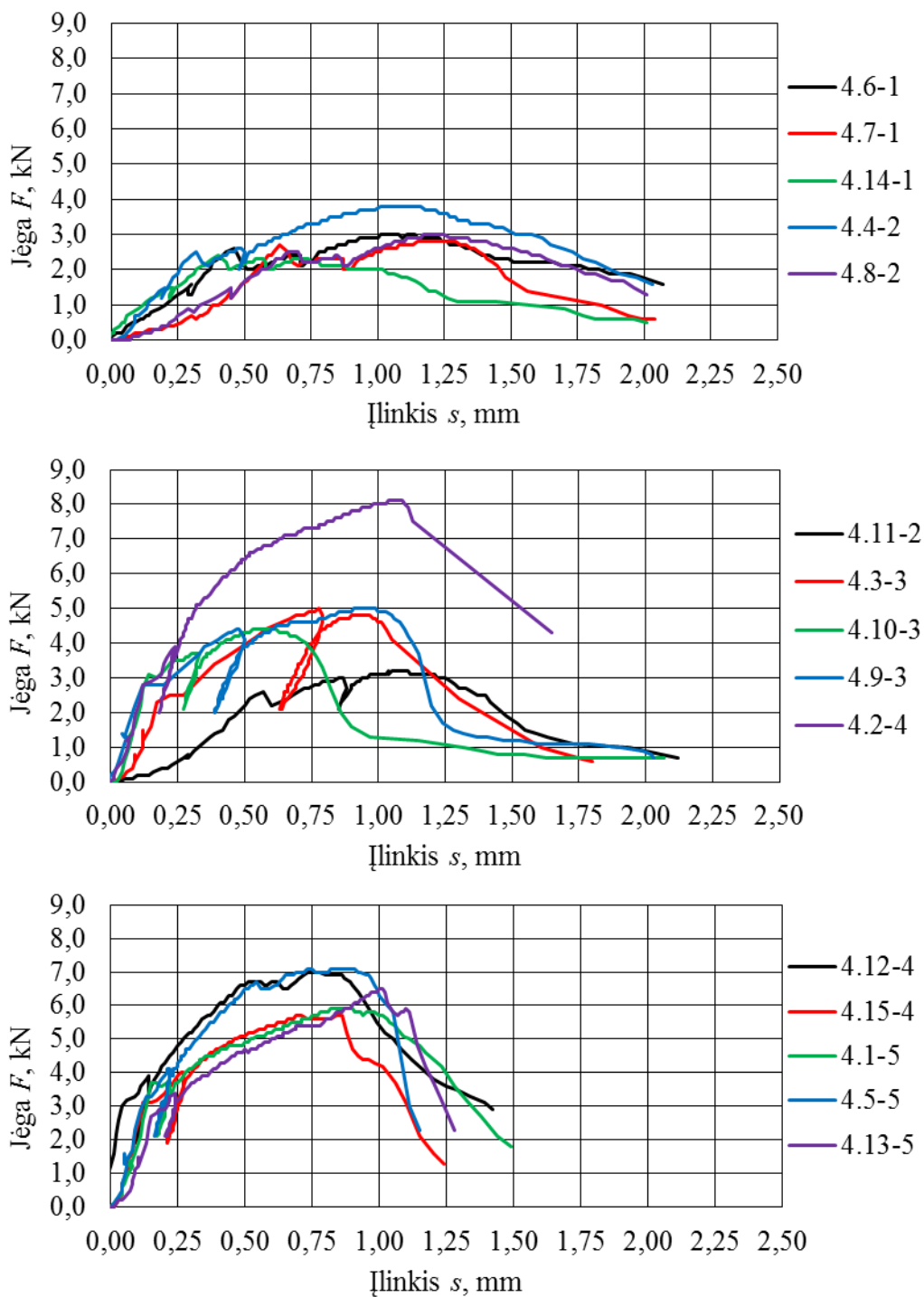
Bandinio nr.	<i>b</i> mm	<i>h</i> mm	<i>F_I</i> kN	<i>S_I</i> mm	<i>F_{II}</i> kN	<i>S_{II}</i> mm	<i>I</i> mm⁴
3,5-1	41,00	40,64	3,30	0,26	-	-	229331
3,13-1	41,35	41,44	3,50	0,77	-	-	245219
3,15-1	40,43	41,19	2,80	0,42	-	-	235450
3,3-2	42,08	40,58	2,90	0,34	4,70	1,26	234331
3,10-2	40,34	41,78	3,10	0,16	4,00	0,97	245166
3,11-2	41,01	41,50	3,20	0,36	4,10	0,97	244260
3,4-3	40,43	40,05	3,10	0,14	6,80	1,38	216436
3,9-3	40,65	39,97	4,20	0,43	6,20	1,29	216313
3,14-3	41,19	39,73	3,50	0,11	4,90	0,85	215261
3,2-4	41,13	41,35	3,10	0,15	6,40	1,35	242328
3,7-4	40,94	40,46	3,80	0,16	5,20	0,85	225967
3,8-4	42,08	39,46	2,50	0,09	6,00	0,91	215460
3,1-5	41,39	40,15	3,10	0,36	5,70	1,58	223239
3,6-5	41,73	41,05	3,70	0,23	6,30	1,10	240551
3,12-5	40,63	40,20	4,50	0,32	6,10	1,00	219960
Min	40,34	39,46	2,50	0,09	4,00	0,85	215261
Max	42,08	41,78	4,50	0,77	6,80	1,58	245219
Vidurkis	41,09	40,64	3,35	0,29	5,53	1,13	229951
SD	0,56	0,71	0,53	0,18	0,93	0,24	11771
CI_U, 95%	41,40	41,03	3,65	0,384	6,050	1,258	236470
CI_L, 95%	40,78	40,24	3,06	0,189	5,017	0,993	223433

Iš 11 lentelės matome, kad mažiausia trečios serijos atlaikoma jėga yra 2,8 kN (bandinio nr. 3,15-1), o didžiausia 6,8 kN (bandinio nr. 3,4-3). Panagrinėjus šios serijos turimą filmuotą medžiagą, buvo pastebėta, kad bandiniai suyra vienodai, atplėšiant stiklo pluoštą, tačiau

bandinyje 3,15-1 plyšys susiformuoja ir išplinta ne ties bandinio viduriu, o yra pasislinkęs į šoną apie 20 mm.

3.6 Ketvirtos serijos bandinių tyrimo rezultatai

Betono armuoto su 24 sluoksniais stiklo pluošto tinkleliu (4 serija) F - s diagramos pateiktos 30 pav.



30 pav. 4.x-y serijos, betono armuoto su 24 sluoksniais stiklo pluošto tinkleliu, F - s diagramos

Ketvirtos serijos bandinių irimo apkrova kito ribose 2,4 ... 8,1 kN, apkrovos vidurkis 5 kN, vidutinis kvadratinis nuokrypis 1,7 kN.

Lyginant 0 ir 4 serijos bandinių duomenis matome, kad maksimali vidutinė irimo apkrova padidėjo nuo 2,7 kN iki 5 kN (t. y. 1,9 karto), taip pat padidėjo ir vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo 0,5 kN iki 1,7 kN (t. y. apie 3,4 karto). Variacijos koeficientas 0 serijos bandiniuose – 17 %, 4 serijos bandiniuose – 37 %. Iš gautų duomenų matome, kad skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios atlaikomos apkrovos labai didelis. Taip galėjo nutikti dėl to, kad gaminant bandinius su vis daugiau stiklo pluošto sluoksnių, pasunkėja pats gamybos procesas, todėl tampa vis sunkiau pagaminti vienodus bandinius, užtikrinti gerą betono ir stiklo pluošto sukibimą.

Ketvirtos serijos bandinių įlinkiai kinta ribose 0,14 ... 1,29 mm, įlinkių vidurkis 0,99 mm, vidutinis kvadratinis nuokrypis 0,19 mm.

Lyginant 0 ir 5 serijos bandinių irimo įlinkių duomenis matome, kad vidutiniškai maksimalūs įlinkiai padidėjo nuo 0,17 mm iki 0,99 mm (t. y. apie 5,8 karto), vidutinis kvadratinis nuokrypis padidėjo nuo 0,1 iki 0,19 mm. Variacijos koeficientas 0 serijos bandiniuose – 58 %, 4 serijos bandiniuose – 25 %.

Lyginant 1 ir 4 serijos duomenis matome, kad pirmos serijos vidutinė irimo apkrova yra 4,2 kN, ketvirtos serijos 5 kN. Ketvirtoje serijoje buvo dedami 24 sluoksniai stiklo pluošto t. y. dvigubai daugiau nei pirmoje, o atlaikoma jėga padidėjo tik apie 20 %. Tokie rezultatai rodo, kad dėti 24 sluoksnius stiklo pluošto yra neefektyvu, nes jėga taip stipriai nepadidėja. Lyginant vidutinę irimo apkrovą su trečia serija (6,8 kN), matome, kad padidinus sluoksnių skaičių atlaikoma jėga netgi sumažėjo. Taip galėjo nutikti dėl to, kad pasunkėja gamybos procesas, sunkiau užtikrinti, kad betonas prasiskverbtų pro visus stiklo pluošto sluoksnius. Taip pat dėl didelio kiekio stiklo pluošto sluoksnių, betonas prasčiau sukimba su pluoštu.

Lyginant 1 ir 4 serijos įlinkių duomenis matome, kad pirmos serijos vidutiniai įlinkiai yra 0,84 mm, ketvirtos 0,99 mm. Įlinkiai, ketvirtoje serijoje, vidutiniškai padidėjo tik apie 18 %. Vadinas, dvigubai didesnis stiklo pluošto sluoksnių kiekis neduoda didelio efekto įlinkiams. Tai dar labiau matosi lyginant su trečios serijos vidutiniais įlinkiais (1,13 mm), jie sumažėja apie 14 %.

Ketvirtos serijos bandinių matmenys, jėgos-poslinkio diagramų charakteringieji taškai ir inercijos momentai pateikti 12 lentelėje.

12 lentelė

Armoto betono (4 serija) matavimų rezultatai

Bandinio nr.	b mm	h mm	F_I kN	S_I mm	F_{II} kN	S_{II} mm	I mm ⁴
4,6-1	40,41	41,25	2,60	0,46	3,00	1,14	236363

Lentelės tęsinys kitame puslapyje

12 lentelės tęsinys

4,7-1	40,37	40,78	2,70	0,63	2,80	1,29	228149
4,14-1	39,91	41,01	2,40	0,40	-	-	229388
4,11-2	40,42	39,24	2,60	0,57	3,20	1,11	203518
4,4-2	41,52	40,02	2,50	0,32	3,80	1,16	221772
4,8-2	41,76	40,89	2,50	0,70	3,00	1,25	237920
4,3-3	40,71	38,52	2,50	0,27	5,00	0,78	193900
4,9-3	40,95	39,75	4,40	0,48	5,00	0,99	214331
4,10-3	40,48	40,31	3,10	0,14	4,40	0,62	220952
4,2-4	40,59	41,38	3,80	0,25	8,10	1,09	239668
4,12-4	40,33	40,33	3,80	0,16	6,90	0,80	220461
4,15-4	40,71	39,64	4,00	0,27	5,70	0,86	211310
4,1-5	41,07	40,63	3,70	0,17	5,90	0,90	229554
4,5-5	41,04	40,69	4,10	0,23	7,10	0,91	230404
4,13-5	40,47	40,78	3,30	0,26	6,50	1,01	228714
Min	39,91	38,52	2,40	0,14	2,80	0,62	193900
Max	41,76	41,38	4,40	0,70	8,10	1,29	239668
Vidurkis	40,72	40,35	3,20	0,35	5,03	0,99	223094
SD	0,48	0,79	0,71	0,18	1,73	0,19	12892
CI_U, 95%	40,98	40,78	3,59	0,452	5,988	1,100	230233
CI_L, 95%	40,45	39,91	2,81	0,256	4,069	0,887	215954

Iš 12 lentelės matome, kad mažiausia ketvirtos serijos atlaikoma jėga yra 2,4 kN (bandinio nr. 4,14-1), o didžiausia 8,1 kN (bandinio nr. 4,2-4). Panagrinėjus šios serijos turimą filmuotą medžiagą, buvo pastebėta, kad bandiniai suyra vienodai, stiklo pluoštas yra atplėšiamas, tačiau stipresniame bandinyje pradeda formuotis du įtrūkimai, kurie išplinta simetriškai į abi puses ir vienoje pusėje stiklo pluoštas atplėšiamas. Toks bandinio irimas rodo, kad pluoštas buvo vienodai tvirtai sukibęs su betonu, todėl iš abiejų pusių centro link pradėjo formuotis plyšys ir tai turėjo teigiamos įtakos sijos stiprumui.

Iš lentelės galime pastebėti, kad padidinus stiklo pluošto kiekį antras jėgos pikas F_{II} atsiranda beveik kiekviename bandinyje.

3.7 Statistinė duomenų analizė

Norėdami atlikti statistinius testus ir patikrinti hipotezes apie stiprumą ir arba standumą, turime pasirinkti tinkamą testą. Tam dažnai reikia žinoti ar populiacijų variacijos yra žinomos ar nežinomos, lygios ar nelygios [10].

Eksperimentiškai ištyrėme nedidelį kiekį bandinių t. y. $n < 30$ vienos serijos bandinių, todėl populiacijų variacijos nežinomos. Ar populiacijų variacijos yra lygios atliekame inercijos momentų I , 0 ir 1 serijos bandinių, vidutinių kvadratinių nuokrypių F-testą.

3.7.1 Inercijos momentų I vidutinių kvadratinių nuokrypių F testas

Iš 8 lentelės paimame gryno betono (0 serija) inercijos momento vidurkį ir inercijos vidutinio kvadratinio nuokrypio vidurkį, kurie jau yra apskaičiuoti:

$$M_0(I) = 220123 \text{ mm}^4$$

$$S_0(I) = 13154 \text{ mm}^4$$

Čia $M_0(I)$ – gryno betono inercijos momento vidurkis

$S_0(I)$ – gryno betono inercijos vidutinio kvadratinio nuokrypio vidurkis

Atitinkamai iš 9 lentelės armuotiems bandiniams (1 serija):

$$M_1(I) = 222296 \text{ mm}^4$$

$$S_1(I) = 9357 \text{ mm}^4$$

Čia $M_1(I)$ – armuoto betono inercijos momento vidurkis

$S_1(I)$ – armuoto betono inercijos vidutinio kvadratinio nuokrypio vidurkis

Pasirenkame reikšmingumo lygį α ir alternatyvią hipotezę H_0 . Įprastai reikšmingumo lygmuo $\alpha=0,05$. Vidutinis kvadratinis nuokrypis $S_0(I)$ didesnis už $S_1(I)$, todėl renkamės $H_a: \sigma_0(I)^2 > \sigma_1(I)^2$.

Formuluojame hipotezes:

$$H_0: \sigma_0(I)^2 = \sigma_1(I)^2$$

$$H_a: \sigma_0(I)^2 > \sigma_1(I)^2$$

Paskaičiuojame parametą F_0 :

$$F_0 = \frac{S_o(I)^2}{S_1(I)^2} = \frac{13154^2}{9357^2} = 1,9762 \quad (6)$$

Pasinaudoja excel funkcija =F.INV(1-0.05,14,14), randame $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$:

$$F_{\alpha, n1-1, n2-1} = 2,4837$$

Palyginame F_0 ir $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ reikšmes:

$$F_0 = 1,9762 > F_{1-0,05,9,9} = 2,4837$$

Kadangi sąlyga $F_0 > F_{1-0,05,9,9}$ yra neteisinga, tai gauname, kad H_0 negalime atmesti. Vadinasi parametro I standartiniai nuokrypiai abiejose populiacijose yra laikytini lygūs:

$$H_0: \sigma_0(I)^2 = \sigma_1(I)^2$$

3.7.2 Plyšio atsivėrimo jėgų F_I vidutinių kvadratinių nuokrypių F-testas

Plyšio atsivėrimo (įrimo pradžios) jėgoms F_I atliekame 0 ir 1 serijos bandinių vidutinių kvadratinių nuokrypių F-testą. Iš 8 lentelės paimeame gryno betono įrimo jėgos vidurkį ir įrimo jėgos vidutinio kvadratinio nuokrypio vidurkį:

$$M_0(F_I) = 2,74 \text{ kN}$$

$$S_0(F_I) = 0,46 \text{ kN}$$

Čia $M_0(F_I)$ – gryno betono įrimo jėgos vidurkis

$S_0(F_I)$ – gryno betono įrimo jėgos vidutinio kvadratinio nuokrypio vidurkis

Atitinkamai iš 9 lentelės armuotiems bandiniams (1 serija):

$$M_1(F_I) = 3,11 \text{ kN}$$

$$S_1(F_I) = 0,34 \text{ kN}$$

Čia $M_1(F_I)$ – armuoto betono įrimo jėgos vidurkis

$S_1(F_I)$ – armuoto betono įrimo jėgos vidutinio kvadratinio nuokrypio vidurkis

Reikšmingumo lygmuo toks pat kaip ir anksčiau, $\alpha = 0,05$. Vidutinis kvadratinis nuokrypis $S_0(F_I)$ didesnis už $S_1(F_I)$, todėl alternatyvią hipotezę renkamės $H_a: \sigma_0(F_I)^2 > \sigma_1(F_I)^2$.

Formuluojame hipotezes:

$$H_0: \sigma_0(F_I)^2 = \sigma_1(F_I)^2$$

$$H_a: \sigma_0(F_I)^2 > \sigma_1(F_I)^2$$

Paskaičiuojame parametą F_0 :

$$F_0 = \frac{S_0(F_I)^2}{S_1(F_I)^2} = \frac{0,46^2}{0,34^2} = 1,8304 \quad (7)$$

Parametro $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ reikšmė lieka ta pati:

$$F_{\alpha, n1-1, n2-1} = 2,4837$$

Palyginame F_0 ir $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ reikšmes:

$$F_0 = 1,8304 > F_{1-0,05,9,9} = 2,4837$$

Kadangi sąlyga $F_0 > F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ yra neteisinga, tai gauname, kad jėga F_I turi vienodus standartinius nuokrypius armuotiems ir nearmuotiems bandiniams.

$$H_a: \sigma_0(F_I)^2 = \sigma_1(F_I)^2$$

3.7.3 Plyšio atsivėrimo įlinkių S_I vidutinių kvadratinių nuokrypių F-testas

Plyšio atsivėrimo įlinkiams S_I atliekame 0 ir 1 serijos bandinių vidutinių kvadratinių nuokrypių F-testą:

Iš 8 lentelės paimame gryno betono įlinkių vidurkį ir įlinkių vidutinio kvadratinio nuokrypio vidurkį:

$$M_0(S_I) = 0,17 \text{ kN}$$

$$S_0(S_I) = 0,10 \text{ kN}$$

Čia $M_0(S_I)$ – gryno betono įlinkių vidurkis

$S_0(S_I)$ – gryno betono įlinkių vidutinio kvadratinio nuokrypio vidurkis

Atitinkamai iš 9 lentelės armuotiems bandiniams (1 serija):

$$M_1(S_I) = 0,19 \text{ kN}$$

$$S_1(S_I) = 0,06 \text{ kN}$$

Čia $M_I(S_I)$ – armuoto betono įlinkių vidurkis

$S_I(S_I)$ – armuoto betono įlinkių vidutinio kvadratinio nuokrypio vidurkis

Reikšmingumo lygmuo toks pat kaip ir anksčiau, $\alpha = 0,05$. Vidutinis kvadratinis nuokrypis $S_x(S_I)$ didesnis už $S_y(S_I)$, todėl alternatyvią hipotezę renkamės $H_a: \sigma_0(S_I)^2 > \sigma_1(S_I)^2$.

Formuluojame hipotezes:

$$H_0: \sigma_0(S_I)^2 = \sigma_1(S_I)^2$$

$$H_a: \sigma_0(S_I)^2 > \sigma_1(S_I)^2$$

Paskaičiuojame parametą F_0 :

$$F_0 = \frac{S_0(S_I)^2}{S_1(S_I)^2} = \frac{0,10^2}{0,06^2} = 2,7778 \quad (8)$$

Parametro $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ reikšmė lieka ta pati:

$$F_{\alpha, n1-1, n2-1} = 2,4837$$

Palyginame F_0 ir $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ reikšmes:

$$F_0 = 2,7778 > F_{1-0,05,9,9} = 2,4837$$

Kadangi sąlyga $F_0 > F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ yra teisinga, tai gauname, kad įlinkiai S_I turi nevienodus standartinius nuokrypius armuotiems ir nearmuotiems bandiniams.

$$H_a: \sigma_0(S_I)^2 > \sigma_1(S_I)^2$$

3.7.4 Matmenų įtakos analizė

Prieš pradėdami nagrinėti stiprumą ir arba standumą privalome įsitikinti, kad armuoti ir nearmuoti bandiniai nesiskiria savo matmenimis. Jei matmenys tarp armuotų ir nearmuotų bandinių būtų statistiškai reikšmingai skirtingi, stiprumas būtų nulemtas ne vien armavimo, bet ir skirtingų matmenų. Tuomet nebūtų įmanoma nieko pasakyti apie armavimo įtaką stiprumui [10].

Iš atsparumo žinome, kad homogeninės sijos stiprumas priklauso tiek nuo jos pločio b , tiek nuo jos aukščio h . Tai išreiškiama skerspjūvio inercijos momentu $I=bh^3/12$.

Anksčiau atlikome F-testą inercijos momentams armuotų ir nearmuotų bandinių imtims. Gavome jog jų vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai gali būti laikomi lygūs, todėl atliksime t-testą imtims, turinčioms vienodus vidutinius kvadratinius nuokrypius.

Iš 8 lentelės (gryno betono) ir 9 lentelės (armuoto betono 1 serija) paimame jau paskaičiuotus inercijos vidutinį kvadratinį nuokrypį ir inercijos vidurkį:

$$M_0(I) = 220123 \text{ mm}^4 \quad S_0(I) = 13154 \text{ mm}^4$$

$$M_1(I) = 222296 \text{ mm}^4 \quad S_1(I) = 9357 \text{ mm}^4$$

Formuluojame hipotezes:

$$H_0: \mu_0(I) = \mu_1(I)$$

$$H_a: \mu_0(I) > \mu_1(I)$$

Paskaičiuojame parametą t_0 :

$$sp = \sqrt{\frac{(n_0 - 1)S_0^2 + (n_1 - 1)S_1^2}{n_0 + n_1 - 2}} = \sqrt{\frac{14 * 13154^2 + 14 * 9357^2}{15 + 15 - 2}} = 11414,49 \quad (9)$$

$$t_0 = \frac{M_1 - M_0}{sp \sqrt{\frac{1}{n_0} + \frac{1}{n_1}}} = \frac{222296 - 220123}{11414,49 \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{1}{15}}} = 0,52 \quad (10)$$

Čia n_0 – bandinių skaičius imtyje (0 serijos)

n_1 – bandinių skaičius imtyje (1 serijos)

Pasinaudoja excel funkcija =T.INV(1-0,05,15+15-2), randame $t_{1-\alpha, n_x+n_y-2}$:

$$t_{1-\alpha, nx+ny-2} = 1,7011$$

Palyginame t_0 ir $t_{1-\alpha, nx+ny-2}$ reikšmes:

$$t_0 = 0,52 > t_{1-\alpha, nx+ny-2} = 1,7011$$

Kadangi sąlyga $t_0 > t_{1-\alpha, nx+ny-2}$ yra neteisinga, tai gauname, kad H_0 negalime atmesti. Vadinasi nearmuoti ir armuoti bandiniai (1 serijos) turi inercijos momentą, kuris reikšmingai nesiskiria. Galime daryti išvadą, kad inercijos momento I variacija 0 ir 1 serijos bandiniuose negali būti laikoma reikšminga. Iš čia seka, kad nustatyta jėga stiprumui nėra sąlygota 0 ir 1 serijos bandinių matmenų.

2, 3 ir 4 serijos bandiniams atlikome tuos pačius statistinių duomenų skaičiavimus. Nustatėme ar populiacijų variacijos yra lygios. Tam atlikome inercijos momentų I , 0 ir 2, 3, 4 serijos bandinių, vidutinių kvadratinių nuokrypių F-testą. Testui buvo naudotos tos pačios formulės (6, 7, 8, 9, 10), iškeltos tos pačios hipotezės kaip ir analizuojant 1 serijos bandinių duomenis. Atlikus skaičiavimus buvo sudaryta rezultatų lentelė.

13 lentelė

Statistinės duomenų analizės rezultatai

Parametras	1 serija	2 serija	3 serija	4 serija
Inercijos momentų I vidutinių kvadratinių nuokrypių F-testas				
$M_y(I)$	222296	219585	229951	223094
$S_y(I)$	9357	11837	11771	12892
H_0	$\sigma_0(I)^2 = \sigma_1(I)^2$	$\sigma_0(I)^2 = \sigma_2(I)^2$	$\sigma_0(I)^2 = \sigma_3(I)^2$	$\sigma_0(I)^2 = \sigma_4(I)^2$
H_a	$\sigma_0(I)^2 > \sigma_1(I)^2$	$\sigma_0(I)^2 > \sigma_2(I)^2$	$\sigma_0(I)^2 > \sigma_3(I)^2$	$\sigma_0(I)^2 > \sigma_4(I)^2$
F_0	1,9762	1,2349	1,2616	1,0411
$F_{\alpha, n1-1, n2-1}$	2,4837	2,4837	2,4837	2,4837
Gauta teisinga hipotezė	$\sigma_0(I)^2 = \sigma_1(I)^2$	$\sigma_0(I)^2 = \sigma_2(I)^2$	$\sigma_0(I)^2 = \sigma_3(I)^2$	$\sigma_0(I)^2 = \sigma_4(I)^2$
Plyšio atsivėrimo jėgų F_I vidutinių kvadratinių nuokrypių F-testas				
$M_y(F_I)$	3,11	3,44	3,35	3,20
$S_y(F_I)$	0,34	0,35	0,53	0,71
H_0	$\sigma_0(F_I)^2 = \sigma_1(F_I)^2$	$\sigma_0(F_I)^2 = \sigma_2(F_I)^2$	$\sigma_0(F_I)^2 = \sigma_3(F_I)^2$	$\sigma_0(F_I)^2 = \sigma_4(F_I)^2$
H_a	$\sigma_0(F_I)^2 > \sigma_1(F_I)^2$	$\sigma_0(F_I)^2 > \sigma_2(F_I)^2$	$\sigma_0(F_I)^2 > \sigma_3(F_I)^2$	$\sigma_0(F_I)^2 > \sigma_4(F_I)^2$
F_0	1,8304	1,7273	0,7533	0,4198
$F_{\alpha, n1-1, n2-1}$	2,4837	2,4837	2,4837	2,4837
Gauta teisinga hipotezė	$\sigma_0(F_I)^2 = \sigma_1(F_I)^2$	$\sigma_0(F_I)^2 = \sigma_2(F_I)^2$	$\sigma_0(F_I)^2 = \sigma_3(F_I)^2$	$\sigma_0(F_I)^2 = \sigma_4(F_I)^2$

Lentelės tęsinys kitame puslapyje

Ilnikių S_I vidutinių kvadratinų nuokrypių F-testas				
$M_y(S_I)$	0,19	0,21	0,29	0,35
$S_y(S_I)$	0,06	0,09	0,18	0,18
H_0	$\sigma_0(S_I)^2 = \sigma_1(S_I)^2$	$\sigma_0(S_I)^2 = \sigma_2(S_I)^2$	$\sigma_0(S_I)^2 = \sigma_3(S_I)^2$	$\sigma_0(S_I)^2 = \sigma_4(S_I)^2$
H_a	$\sigma_0(S_I)^2 > \sigma_1(S_I)^2$	$\sigma_0(S_I)^2 > \sigma_2(S_I)^2$	$\sigma_0(S_I)^2 > \sigma_3(S_I)^2$	$\sigma_0(S_I)^2 > \sigma_4(S_I)^2$
F_0	2,7778	1,2346	0,3086	0,3086
$F_{\alpha, n1-1, n2-1}$	2,4837	2,4837	2,4837	2,4837
Gauta teisinga hipotezė	$\sigma_0(S_I)^2 = \sigma_1(S_I)^2$	$\sigma_0(S_I)^2 = \sigma_2(S_I)^2$	$\sigma_0(S_I)^2 = \sigma_3(S_I)^2$	$\sigma_0(S_I)^2 = \sigma_4(S_I)^2$

Iš lentelės matome, kad atlikus skaičiavimus, visų serijų bandiniams, gauname tokius pačius rezultatus kaip ir pirmos serijos. Vadinasi armuoti (2, 3, 4 serija) ir nearmuoti bandiniai turi inercijos momentą, kuris reikšmingai nesiskiria. Iš čia seka, kad nustatyta jėga stiprumui nėra sąlygota 2, 3 ir 4 serijos bandinių matmenų.

3.7.5 Armuotų ir nearmuotų bandinių parametų palyginimas

Pirmiausiai patikriname įrimo jėgas abiejose bandinių grupėse t. y. F_1 .

Iš 8 lentelės (gryno betono) ir 9 lentelės (armuoto betono 1 serija) paimame jau paskaičiuotus irimo apkrovos vidutinį kvadratinį nuokrypį ir irimo jėgos vidurkį:

$$M_0(F_1) = 2,74 \text{ kN} \quad S_0(F_1) = 0,46 \text{ kN}$$

$$M_1(F_1) = 3,11 \text{ kN} \quad S_1(F_1) = 0,34 \text{ kN}$$

Formuluojame hipotezes:

$$H_0: \mu_0(F_1) = \mu_1(F_1)$$

$$H_a: \mu_1(F_1) > \mu_0(F_1)$$

Paskaičiuojame parametą t_0 :

$$sp = \sqrt{\frac{(n_0 - 1)S_0^2 + (n_1 - 1)S_1^2}{n_0 + n_1 - 2}} = \sqrt{\frac{14 * 0,46^2 + 14 * 0,34^2}{15 + 15 - 2}} = 0,404$$

$$t_0 = \frac{M_1 - M_0}{sp \sqrt{\frac{1}{n_0} + \frac{1}{n_1}}} = \frac{0,46 - 0,34}{0,404 \sqrt{\frac{1}{15} + \frac{1}{15}}} = 2,499$$

Pasinaudoja excel funkcija =T.INV(1-0,05,15+15-2), randame $t_{1-\alpha, nx+ny-2}$:

$$t_{1-\alpha, nx+ny-2} = 1,7011$$

Palyginame t_0 ir $t_{1-\alpha, nx+ny-2}$ reikšmes:

$$t_0 = 2,499 > t_{1-\alpha, nx+ny-2} = 1,7011$$

Kadangi sąlyga $t_0 > t_{1-\alpha, nx+ny-2}$ yra teisinga, tai gauname, kad t_0 galime atmesti. Vadinasi armuotų (1 serija) ir nearmuotų bandinių irimo jėga yra skirtinga t. y. armavimas padarė statistiškai reikšmingos įtakos sijos atlaikomai apkrovai.

Atlikę statistinę duomenų analizę ir gavę, kad bandinių stiprumui įtakos neturėjo bandinių matmenys, galime teigti, kad gauti duomenys, yra teisingi ir 1 serijos bandiniai yra stipresni apie 1,6 karto.

Atliekame sijos įlinkių irimo metu palyginimą. Iš 8 lentelės (gryno betono) ir 9 lentelės (armuoto betono 1 serija) paimame jau paskaičiuotą įlinkių vidutinį kvadratinį nuokrypį ir įlinkių vidurkį:

$$M_0(S_1) = 0,17 \text{ mm} \quad S_0(S_1) = 0,10 \text{ mm}$$

$$M_1(S_2) = 1,14 \text{ mm} \quad S_1(S_2) = 0,26 \text{ mm}$$

Formuluojame hipotezes:

$$H_0: \mu_0(S_1) = \mu_1(S_1)$$

$$H_a: \mu_1(S_1) > \mu_0(S_1)$$

Paskaičiuojame parametą t_0 :

$$t_0 = \frac{M_1 - M_0}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_0^2}{n_0}}} = \frac{1,14 - 0,17}{\sqrt{\frac{0,26^2}{15} + \frac{0,10^2}{15}}} = 13,486$$

Palyginame t_0 ir $t_{1-\alpha, nx+ny-2}$ reikšmes:

$$t_0 = 13,486 > t_{1-\alpha, nx+ny-2} = 1,7011$$

Kadangi sąlyga $t_0 > t_{1-\alpha, nx+ny-2}$ yra teisinga, tai gauname, kad H_0 galime atmesti. Vadinasi armavimas pirmos serijos bandiniuose padarė įtakos įlinkiams, juos pastebimai nepadidino.

Apibendrinus gryno betono ir 1 serijos armuotų bandinių duomenų analizę, galime teigti, kad jog papildomas armavimas bandiniuose padidino sijos stiprumą, bei jos plastiškumą. Iš to seka, kad naudojant tokius armavimo kiekius, kokie buvo naudojami tiriamuose bandiniuose, užtenka pastebimai padidinti sijos stiprumą bei plastiškumą.

2, 3 ir 4 serijos bandiniams taip pat atlikome T-testą naudojant tuos pačius statistinių duomenų skaičiavimus. Testui buvo naudotos tos pačios formulės (9, 10), iškeltos tos pačios hipotezės kaip ir analizuojant pirmos serijos bandinių duomenis. Atlikus skaičiavimus buvo sudaryta rezultatų lentelė.

14 lentelė

Statistinės duomenų analizės rezultatai

Parametras	1 serija	2 serija	3 serija	4 serija
Inercijos momento I T-testas				
$M_y(I)$	222296	219585	229951	223094
$S_y(I)$	9557	11837	11771	12892
H_0	$\mu_0(I) = \mu_1(I)$	$\mu_0(I) = \mu_2(I)$	$\mu_0(I) = \mu_3(I)$	$\mu_0(I) = \mu_4(I)$
H_a	$\mu_0(I) > \mu_1(I)$	$\mu_0(I) > \mu_2(I)$	$\mu_0(I) > \mu_3(I)$	$\mu_0(I) > \mu_4(I)$
t_0	0,52	0,11	1,27	0,62
$t_{1-\alpha, nx+ny-2}$	1,7011	1,7011	1,7011	1,7011
Gauta teisinga hipotezė	$\mu_0(I) = \mu_1(I)$	$\mu_0(I) = \mu_2(I)$	$\mu_0(I) = \mu_3(I)$	$\mu_0(I) = \mu_4(I)$
Jėgų F_I T-testas				
$M_y(F_I)$	3,11	3,44	3,35	3,20
$S_y(F_I)$	0,34	0,35	0,53	0,71
H_0	$\mu_0(F_I) = \mu_1(F_I)$	$\mu_0(F_I) = \mu_2(F_I)$	$\mu_0(F_I) = \mu_3(F_I)$	$\mu_0(F_I) = \mu_4(F_I)$
H_a	$\mu_1(F_I) > \mu_0(F_I)$	$\mu_2(F_I) > \mu_0(F_I)$	$\mu_3(F_I) > \mu_0(F_I)$	$\mu_4(F_I) > \mu_0(F_I)$
t_0	2,4999	4,6786	3,3581	2,1006
$t_{1-\alpha, nx+ny-2}$	1,7011	1,7011	1,7011	1,7011
Gauta teisinga hipotezė	$\mu_1(F_I) > \mu_0(F_I)$	$\mu_2(F_I) > \mu_0(F_I)$	$\mu_3(F_I) > \mu_0(F_I)$	$\mu_4(F_I) > \mu_0(F_I)$
Įlinkių S_2 T-testas				
$M_y(S_{II})$	1,14	0,74	1,13	0,99
$S_y(S_{II})$	0,26	0,31	0,24	0,19
H_0	$\mu_0(S_2) = \mu_1(S_2)$	$\mu_0(S_2) = \mu_2(S_2)$	$\mu_0(S_2) = \mu_3(S_2)$	$\mu_0(S_2) = \mu_4(S_2)$
H_a	$\mu_1(S_2) > \mu_0(S_2)$	$\mu_2(S_2) > \mu_0(S_2)$	$\mu_3(S_2) > \mu_0(S_2)$	$\mu_4(S_2) > \mu_0(S_2)$
t_0	13,486	6,7778	14,3002	14,7914
$t_{1-\alpha, nx+ny-2}$	1,7011	1,7011	1,7011	1,7011
Gauta teisinga hipotezė	$\mu_1(S_2) > \mu_0(S_2)$	$\mu_2(S_2) > \mu_0(S_2)$	$\mu_3(S_2) > \mu_0(S_2)$	$\mu_4(S_2) > \mu_0(S_2)$

Iš lentelės matome, kad armuotų ir nearmuotų bandinių irimo jėga yra statistiškai skirtinga t. y. armavimas padarė statistiškai reikšmingos įtakos sijos atlaikomai apkrovai, todėl galime teigti, kad gauti eksperimento duomenys, yra teisingi ir armuoti bandiniai sustiprėjo dėl armavimo. Taip pat matome, kad armavimas padarė įtakos ir bandinių plastiškumui, juos padidino.

Atkreipiant dėmesį į naudojamo stiklo pluošto kiekį bandinyje, galime daryti išvadą, kad padidinus stiklo pluošto kiekį bandiniai dar labiau sustiprėja ir tampa dar plastiškesni. Tai galime pastebėti iš 14 lentelėje esančių duomenų.

3.8 Teorinė armuoto betono elgsena

Armuoto betono elgsenai, veikiant apkrovai, modeliuoti pasinaudosime sluoksniuotų sijų skaičiavimo metodika [1]. Pirmiausia iš gryno betono rezultatų nustatome jo stiprumo ribą tempimui ir tamprumo modulį. Homogeninės sijos medžiagos stiprumas [1]:

$$\sigma_{ut} = 3L_C \frac{F_I}{b \cdot h^2} \quad (11)$$

čia L_C – atstumas tarp atramų; b ir h – sijos skerspjūvio aukštis ir plotis.

$$E = \frac{F_I L_C^3}{48s_I I} \left(1 + \frac{h^2}{L_C^2} (2 + \nu) \right) \quad (12)$$

čia I – sijos skerspjūvio inercijos momentas; ν – betono Puasono koeficientas.

Penkioliktoje lentelėje pateikta suskaičiuota gryno betono stiprumo riba tempiant σ_{ut} ir medžiagos tamprumo modulis E .

15 lentelė

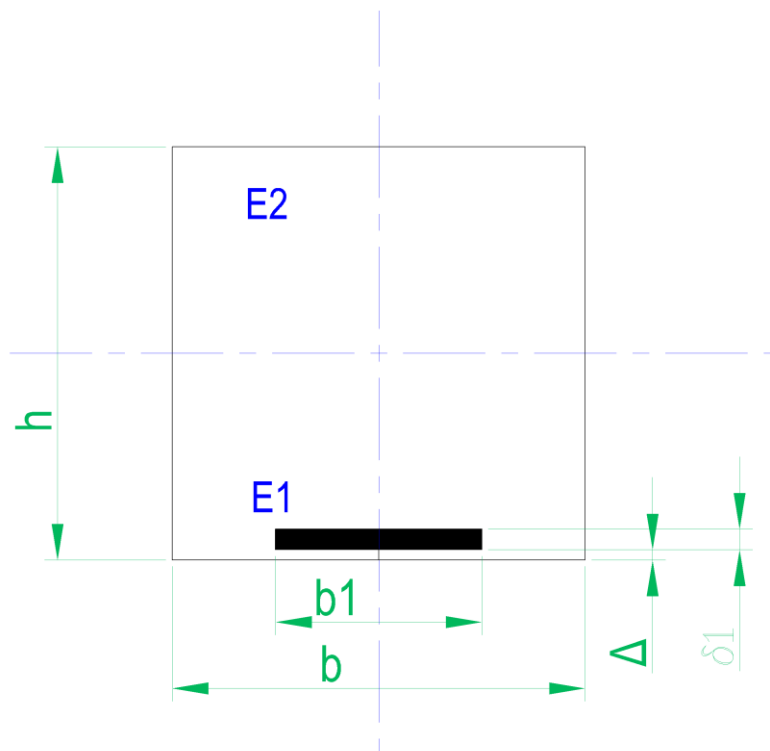
Gryno betono skaičiavimų rezultatai

Bandinio nr.	σ_{ut} , MPa	E, GPa
0,2-1	18,2	5,7
0,10-1	18,5	6,2
0,12-1	18,2	8,0
0,1-2	20,1	5,2
0,9-2	18,6	5,6
0,14-2	18,2	8,2

Lentelės tęsinys kitame puslapyje

0,5-3	19,7	3,0
0,11-3	18,9	4,7
0,15-3	19,0	2,1
0,3-4	20,0	6,4
0,4-4	20,9	9,9
0,8-4	18,6	6,1
0,13-5	20,1	3,1
0,6-5	19,2	5,5
0,7-5	19,2	8,6
Min	18,2	2,1
Max	20,9	9,9
Vidurkis	19,2	5,9
SD	0,82	2,2
CI_U, 95%	19,6	7,1
CI_L, 95%	18,7	4,7

Sijos skerspjūvį sudaro dvi medžiagos: betonas (E_2) ir stiklo pluoštas (E_1). Skaičiavimams supaprastinti laikysime, kad stiklo pluošto tinklėlis yra be tarpų (žr. 31 pav.).



31 pav. Sijos skerspjūvis.

Neutralinio sluoksnio koordinatė apskaičiuojama [1]:

$$y_n = \frac{b_1 \delta_1 (\Delta + 0.5 \delta_1) (E_1 - E_2) + 0.5 b h^2 E_2}{b_1 \delta_1 E_1 + (b h - b_1 \delta_1) E_2} \quad (13)$$

čia E_1 – stiklo pluošto tamprumo modulis; E_2 – betono tamprumo modulis.

Normaliniai įtempiai sijoje:

$$\sigma_i = \frac{0.5 L_C F E_i y}{\left(\frac{b_1 \delta_1^3}{12} + b_1 \delta_1 (y_n - \Delta - 0.5 \delta_1)^2 \right) E_1 + \left(\frac{b \Delta^3 + (b - b_1) \delta_1^3 + b (\delta_2 - \Delta - \delta_1)^3}{12} + \dots \right.} \dots \left. + b \Delta (y_n - 0.5 \Delta)^2 + (b - b_1) \delta_1 (y_n - \Delta - 0.5 \delta_1)^2 + b (\delta_2 - \delta_1 - \Delta) (y_n - \Delta - \delta_1)^2 \right) E_2} \quad (14)$$

Sijos atlaikoma jėga:

$$F = \frac{D}{1 + \frac{h^2}{L_C^2} (2 + \nu)} \cdot \frac{48 s_l}{L_C^3} \quad (15)$$

Čia D – sijos standumas lenkiant; h – sijos aukštis; L_C – atstumas tarp atramų; s_l – poslinkis.

Matmuo b_1 buvo apskaičiuotas iš sąlygos, jog bendras stiklo pluošto skerspjūvio plotas realioje konstrukcijoje yra lygus skerspjūvio plotui skaičiuojamojoje konstrukcijoje (žr. 31 pav.).

$$b_1 = \frac{n}{\delta_1} A_f = \frac{n}{\delta_1} 29.4 \cdot 10^{-9} \quad (16)$$

Čia n – stiklo audinio siūlų skaičius armuoto betono sijoje apmatų kryptimi.

Jėgos, reikalingos plyšiui atsirasti F_l ir jėgos, reikalingos sijai suardyti F_H , matavimų rezultatai, kartu su suskaičiuota teorine, plyšiui atsiverti reikalinga jėga, pateikti 16 lentelėje. Lentelėje yra pateikti matavimų ir skaičiavimų rezultatai su 12, 18 ir 24 stiklo pluošto sluoksniais.

Daugiasluoksnės konstrukcijos matavimų ir skaičiavimų rezultatai

Sluoksnių skaičius	Δ , mm	δl , mm	Y_n , mm	F_I , kN matavimų vidurkis	F_{II} , kN matavimų vidurkis	F_I , kN Skaičiavimų vidurkis
12	0,2	2,0	12,0	3,1	5,5	6,3
18	0,2	3,0	10,1	3,4	6,8	7,0
24	0,2	4,0	8,8	3,2	5,0	7,4

Iš lentelės matome, kad paskaičiuota teorinė vidutinė atlaikoma sijos jėga nuo eksperimentiškai išmatuotos F_I , skiriasi iki 2,3 karto, o nuo F_{II} iki 1,5 karto. Pagal šią skaičiavimo metodiką gauti rezultatai yra arčiau išmatuotos F_{II} jėgos. Vadinasi, ši metodika labiau tinka paskaičiuoti jėgai, reikalingai visiškai suardyti sijai. Taip pat iš šių duomenų galime manyti, kad stiklo pluošto sluoksnio stiprumo potencialas nėra visuomet pilnai išnaudojamas.

3.9 Išorinės jėgos darbas bandiniui suardyti

Atliekant bandymus su sijomis buvo pastebėta, kad įtrūkimai bandiniuose atsiranda prie panašių įlinkių (s_l), nepriklausomai ar bandinys buvo su armavimu ar be, tačiau jėga, reikalinga plyšiui atsirasti, bei sijai suardyti visuomet buvo didesnė armuotuose bandiniuose. Paanalizavus bandinius vizualiai buvo pastebėta, kad įtrūkimas atsiranda bandinio apačioje ir išplinta per centrą. Pasitaikė atvejų, kai įtrūkimas atsirasdavo ne centre, bet pasislinkęs į šoną, tokių bandinių atlaikoma apkrova buvo mažesnė, jie greičiau suirdavo. Stipriausi bandiniai buvo tie, kuriuose plyšys atsirasdavo sijos centre ir plėsdavosi maždaug 45° kampu į abi puses simetriškai. Septynioliktoje lentelėje yra pateiktas suskaičiuotas sijai suardyti reikalingas darbas (energija).

Išorinės jėgos darbas

0 serija	A, $N \cdot m$	1 serija	A, $N \cdot m$	2 serija	A, $N \cdot m$	3 serija	A, $N \cdot m$	4 serija	A, $N \cdot m$
0,2-1	0,114	1,2-1	0,822	2,3-1	1,5095	3,5-1	2,4565	4,6-1	2,351
0,10-1	0,103	1,10-1	0,384	2,9-1	2,033	3,13-1	4,394	4,7-1	2,2455
0,12-1	0,099	1,12-1	0,445	2,8-1	0,5565	3,15-1	1,8045	4,14-1	1,341
0,1-2	0,098	1,1-2	0,5195	2,1-2	2,2875	3,3-2	4,1585	4,11-2	2,266
0,9-2	0,0995	1,9-2	2,3125	2,5-2	2,8955	3,10-2	3,3775	4,4-2	3,2335
0,14-2	0,2445	1,14-2	2,4425	2,13-2	0,79	3,11-2	2,877	4,8-2	2,243
0,5-3	0,1835	1,5-3	5,59	2,2-3	2,13	3,4-3	7,198	4,3-3	4,2945

Lentelės tęsinys kitame puslapyje

17 lentelės tęsinys

0,11-3	0,1295	1,11-3	5,433	2,6-3	1,4025	3,9-3	6,3335	4,9-3	4,508
0,15-3	0,7565	1,15-3	0,549	2,14-3	3,4275	3,14-3	3,672	4,10-3	2,332
0,3-4	0,159	1,3-4	4,259	2,7-4	3,364	3,2-4	6,0835	4,2-4	6,727
0,4-4	0,078	1,4-4	4,841	2,11-4	3,092	3,7-4	3,9	4,12-4	6,178
0,8-4	0,1685	1,8-4	4,594	2,12-4	2,176	3,8-4	4,5785	4,15-4	4,096
0,13-5	0,5735	1,13-5	5,3715	2,4-5	2,934	3,1-5	6,6965	4,1-5	5,4115
0,6-5	0,1245	1,6-5	7,142	2,10-5	6,262	3,6-5	5,5495	4,5-5	5,474
0,7-5	0,0785	1,7-5	3,6025	2,15-5	2,8535	3,12-5	5,2725	4,13-5	4,512
Min	0,08	0,38		0,56		1,80		1,34	
Max	0,76	7,14		6,26		7,20		6,73	
Vidurkis	0,20	3,22		2,51		4,56		3,81	
SD	0,19	2,29		1,36		1,61		1,66	
CI_U 95%	0,31	4,49		3,27		5,45		4,74	
CI_L 95%	0,09	1,95		1,76		3,67		2,89	

Iš 17 lentelės matome, kad daugiausiai energijos, suardyti sijai, reikia trečios serijos bandiniuose, su 18 sluoksnių stiklo pluošto. Šie skaičiavimai papildo anksčiau gautus rezultatus, kad trečios serijos bandiniai buvo ir stipriausi ir plastiškiausi.

IŠVADOS

1. Atlikus tyrimą buvo nustatyta, kad visais atvejais armuotų sijų stiprumas yra didesnis lyginant su gryno betono sijomis. Bandiniai su 12 sluoksnių stiklo pluošto vidutiniškai sustiprėjo - 1,6 karto; su 12 sluoksnių ir išretintu tinkleliu – 1,5 karto; su 18 sluoksnių – 2 kartus; su 24 sluoksniais – 1,9 karto.
2. Atlikus tyrimą buvo nustatyta, kad visais atvejais armuotų sijų plastiškumas padidėjo lyginant su gryno betono sijomis. Bandiniuose su 12 sluoksnių stiklo pluošto tinkleliu irimo įlinkiai vidutiniškai padidėjo – 5,0 kartus; su 12 sluoksnių ir išretintu tinkleliu – 4,0 kartus; su 18 sluoksnių – 6,6 kartus; su 24 sluoksniais – 5,8 karto.
3. Armuotuose bandiniuose padidėja vidutinis kvadratinis nuokrypis. Nuokrypis padidėja dėl sudėtingesnės sijos gamybos lyginant su gryno betono sijos gamyba. Gaminant siją su armavimu, reikia užtikrinti, kad betonas prasiskverbs pro stiklo pluošto tinklelį ir tolygiai pasiskirstys.
4. Iki plyšio atsivėrimo armuoto ir nearmuoto betono elgsena yra labai panaši. Skirtumai tampa pastebimi tik atsivėrus plyšiui armuotame betone. Susiformavus plyšiui tempiamuose sluoksniuose dalis apkrovos perduodama stiklo pluoštui, kuris dar kurį laiką išlaiko konstrukciją nesuirusią, pristabdo plyšio didėjimą. Didinant apkrovą pluoštas yra suardomas ir nutraukiamas arba kai kuriais atvejais atplėšiamas su betono sluoksniu – konstrukcija galutinai suyra. Stipriausi bandiniai buvo tie, kuriuose plyšys atsirasdavo sijos centre ir plėsdavosi maždaug 45° kampu į abi puses simetriškai, silpniausi, kuriuose plyšys atsirasdavo nutolęs nuo centro ir plėsdavosi horizontaliai.
5. Apskaičiavus tekstile armuotų sijų laikančiąją jėgą analitiškai buvo gauta, kad bandinio laikančioji jėga turėtų būti iki 1,5 karto didesnė, nei išmatuota eksperimentiškai. Norint pilnai išnaudoti stiklo pluošto stiprumą, reiktų užtikrinti gerą sukibimą tarp betono ir stiklo pluošto sluoksnio.
6. Sijai suardyti atliekamas darbas (sunaudojama energija) yra didžiausias trečios serijos bandiniuose. Sunaudojama energija vidutiniškai yra $4,6 N \cdot m$, kai tuo tarpu gryname betone ji yra $0,2 N \cdot m$.

ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. **J. Bareišis**, „Plastikų, kompozitų ir daugiasluoksnių konstrukcinių elementų stiprumas“. Kaunas: Technologija, 2007.
2. **J. Bareišis**, „Konstrukcinis stiprumas ir patikimumas“. Paskaitų mokomoji medžiaga, 2014.
3. **G. Kaklauskas, D. Bačinskas, V. Gribniak, R. Jakubovskis, D. Ulbinas, E. Gudonis**, et al., „Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos“, 2010.
4. **T. Skuturna**, „Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų, sustiprintų anglies pluoštu“, tyrimas. Vilnius: Technika, 2009.
5. **M. Tsesarsky, A. Peled, A. Katz, and I. Anteby**, "Strengthening concrete elements by confinement within textile reinforced concrete (TRC) shells – Static and impact properties," *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 514-523, 2013.
6. **Y. Lv, H.-m. Cheng, and Z.-g. Ma**, "Fatigue performances of glass fiber reinforced concrete in flexure," *Procedia Engineering*, vol. 31, pp. 550-556, 2012.
7. **M. M. Rafi, A. Nadjai, F. Ali, and D. Talamona**, "Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 277-285, 2008.
8. **B. Mobasher**, *Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites*: CRC Press, 2012.
9. **Internetinis puslapis**: <http://www.ce.memphis.edu/>. Žiūrėta (2015-02-25). Nuoroda: http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/section_3_properties.html
10. **V. Čekanavičius, G. Murauskas**, „Statistika ir jos taikymai“. Vilnius: TEV, 2000.