



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Antanas Vaivada

SUSITANKINANČIO BETONO ARMUOTU ORIENTUOTU
PLIENINIU PLAUSŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Prof. dr. Žymanats Rudžionis

KAUNAS, 2016

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA**

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius

**SUSITANKINANČIO BETONO ARMUOTU ORIENTUOTU
PLIENINIU PLAUSŲ SAVYBIŲ TYRIMAI**

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (M6026M21)

Vadovas

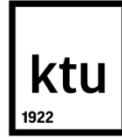
Prof. dr. Žymantas Rudžionis

Recenzentas

Projektą atliko

Antanas Vaivada

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Statybos ir architektūros fakultetas

(Fakultetas)

Antanas Vaivada

(Studento vardas, pavardė)

Statybos inžinerija, M6026M21

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Susitankinančio betono armuotu orientuotu plieniniu plaušu savybių tyrimai“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Antano Vaivados**, baigiamasis projektas tema „Susitankinančio betono armuotu orientuotu plieniniu plaušu savybių tyrimai“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ MEDŽIAGŲ KATEDRA

Magistro baigiamasis darbas

**“SUSITANKINANČIO BETONO ARMUOTU ORIENTUOTU PLIENINIU
PLAUŠU SAVYBIŲ TYRIMAI”**

Antanas Vaivada

Baigiamojo magistro darbo tikslas – ištirti orientuoto plieninio plaušo formavimosi ypatumus ir jo įtaką susitankinančio betono savybėms.

Baigiamajame magistro darbe apžvelgta literatūra, kurioje supažindinama su veiksniais įtakojančiais plieninio plaušo pasiskirstymą, jo įtaka sukietėjusio betono mechaninėms savybėms ir plieninio plaušo kryptingumo ir orientacijos nustatymo metodus. Eksperimentiškai nustatyta orientuoto ir neorientuoto, su skirtinga koncentracija plieninio plaušo įtaka betono savybėms, nustatyta vandens įgėrio kinetika, poringumas ir kitos savybės, keičiant stambaus užpildo koncentraciją betono mišinyje.

Baigiamąjį magistro darbą sudaro įvadas, 6 skyriai, baigiamosios išvados ir literatūros sąrašas.

Raktiniai žodžiai: lenkimo stipris, plieninis plaušas, plyšio plotis, orientacija, koncentracija.

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE FACULTY
BUILDING MATERIALS DEPARTMENT

Master final work

**“INVESTIGATIONS ON PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE
REINFORCED WITH ORIENTED STEEL FIBRE “**

Antanas Vaivada

The purpose of final master thesis – to research particularities of oriented steel fibre formation and his influence to self-compact concrete properties.

There is reviewed the literature which presents factors influencing steel fibre distribution, his influence to hardened concrete mechanical properties and steel fibre orientation and distribution determined methods in this final master thesis. There is experimentaly ascertained the influence of orientated and non-orientated, differently distributed steel fibre to concrete properties. Besides, there is researched kinetics, porosity and diferent property of water absorbaton by changing coarse aggregate distribution of self-compact concrete.

The final work consists of an introduction, six chapters, final conclusion and references.

Keywords: bending strength, steel fibre, slot width, orientation, distribution.

Turinys

Turinys	4
Paveikslų sąrašas.....	5
Lentelių sąrašas.....	7
Įvadas	9
1. Literatūros apžvalga.....	10
1.1 Susitankinančio betono armuotu plieniniu plaušu savybės ir panaudojimo ypatumai	10
1.2 Susitankinančio betono armuotu orientuotu plieniniu plaušu tyrimų apžvalga	13
1.3 Orientuoto plieninio plaušo padėties sukietėjusiam betone nustatymo metodų apžvalga.....	14
1.4 Veiksniai įtakojantys plieninio plaušo orientaciją susitankinančiame betono mišinyje	16
2. Darbo tikslai ir uždaviniai.....	17
3. Tyrimo metodika ir naudotos žaliavos.....	18
3.1 Tyrimams naudotos medžiagos	18
3.2 Tyrimo metodikų ir metodų aprašymas.....	18
3.2.1 Tritaškis apkrovos bandymas.....	18
3.2.2 Gniuždymo apkrovos bandymas.....	20
3.2.3 Plieninio plaušo kryptingumo ir koncentracijos nustatymo bandymas	20
3.2.4 Vandens įgeriamumo kinetika	21
4. Susitankinančio betono armuoto plieniniu plaušu savybių tyrimai, kintant stambaus užpildo koncentracijai	24
4.1 Tiriamieji objektai	24
4.2 Susitankinančio betono mišinio armuoto plieniniu plaušu su kintamu stambaus užpildo kiekiu savybių tyrimai	25
4.3 Sukietėjusio plieniniu plaušu armuoto betono su kintamu stambaus užpildo kiekiu savybių tyrimai	28
5. Susitankinančio betono mišinio tėkmės įtakos plieninių plaušų orientavimuisi ir koncentracijai tyrimai	30
5.1 Tiriamieji objektai	30
5.2 Eksperimento eiga ir tyrimo rezultatai	31

6. Plieninio plaušo koncentracijos ir orientacijos įtakos betono lenkiamajam stipriui tyrimai	43
6.1 Tiriamieji objektai	43
6.2 Eksperimento eiga ir tyrimo rezultatai	43
7. Magistrinio darbo išvados	54
Literatūra	55

Paveikslų sąrašas

Pav. 1. Įprasto ir susitankinančio betono armuotu plieniniu plaušu įtempių ir deformacijų priklausomybės	11
Pav. 2. Elementų suirimas: a – betoninio; b- plieniniu pluoštu armuotu susitankinančio betono.....	11
Pav. 3. Plieninio plaušo išsidėstymas plyšyje: a – idealus pasiskirstymas; b – neefektyvus pasiskirstymas.....	12
Pav. 4. Stiprio lenkiant ir plyšio pločio priklausomybė nuo skirtingų formų plieninių plaušų	13
Pav. 5. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo plyšio pločio: 2, 8 kreivės bandiniai su neorientuotu plieniniu plaušu, 6, 18 kreivės bandiniai su orientuotu plieniniu plaušu.....	14
Pav. 6. Plieninio plaušo padėties sukietėjusiam betone nustatymas arduomuoju metodu	14
Pav. 7. Plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos nustatymo metodai.....	15
Pav. 8. Betono užpildų įtaka plieninio plaušo padėčiai	16
Pav. 9. Eksperimente naudoto plieninio plaušo charakteristikos.....	18
Pav. 10. Savaimė susitankinančio betono liejimas į formą.....	19
Pav. 11. Tritaškio lenkimo bandymo schema ir eksperimente naudotas hidraulinis presas „Toni Technik“	19
Pav. 12. Eksperimente naudotas hidraulinis presas „Pilot4“	20
Pav. 13. Eksperimente naudotas elektromagnetinės indukcijos prietaisas BSM-100.....	21
Pav. 14. Nomograma vidutinių porų dydžio rodiklio α ir porų vienodumo rodiklio λ_1 nustatymui.....	23
Pav. 15. Betono atsparumo šalčiui priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus Kš	26

Pav. 16. Betono vandens įgeriamumo rezultatai.....	26
Pav. 17. Betono poringumo rezultatai.....	27
Pav. 18. Prognozuojamo atsparumo šalčiui priklausomybė nuo stambaus užpildo kiekio.	27
Pav. 19. Betono gniuždymo stiprio priklausomybė nuo stambaus užpildo kiekio.	29
Pav. 20. Lenkimo s-e diagrama SSB-0.25-2 bandinio.....	31
Pav. 21. Lenkimo s-e diagrama: a) SSB-33.25-1 bandinio, b) SSB-33.25-2 bandinio	31
Pav. 22. Lenkimo s-e diagrama: a) SSB-66.25-1 bandinio, b) SSB-66.25-2 bandinio	32
Pav. 23. Lenkimo s-e diagrama: a) SSB-100.25-1 bandinio, b) SSB-100.25-2 bandinio	32
Pav. 24. Lenkimo s-e diagrama: a) SSB-133.25-1 bandinio, b) SSB-133.25-2 bandinio	33
Pav. 25. Plieninio plaušo kryptingumo priklausomybė nuo prizmės ilgio betono mišinio tekėjimo kryptimi bandiniuose.	37
Pav. 26. Plieninio plaušo koncentracijos priklausomybė nuo prizmės ilgio betono mišinio tekėjimo kryptimi bandiniuose.	38
Pav. 27. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo plieninio pluošto kryptingumo.....	40
Pav. 28. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo plieninio pluošto kryptingumo.....	40
Pav. 29. Bandinių gniuždymo stiprio palyginimas.	41
Pav. 30. Gniuždymo stiprio priklausomybė nuo plieninio plaušo kryptingumo.	42
Pav. 31. Lenkimo s-e diagrama: a) SSB-66.35-B(1) bandinio, b) SSB-66.35-B(2) bandinio.....	44
Pav. 32. Lenkimo s-e diagrama: a) SSB-66.55-B(1) bandinio, b) SSB-66.55-B(2) bandinio	44
Pav. 33. Lenkimo s-e diagrama: a) SSB-66.55-V(1) bandinio, b) SSB-66.55-V(2) bandinio.....	44
Pav. 34. Lenkimo s-e diagrama: a) SSB-66.55-G(1) bandinio, b) SSB-66.55-G(2) bandinio.....	45
Pav. 35. Lenkimo s-e diagrama: a) SSB-66.75-B(1) bandinio, b) SSB-66.75-B(2) bandinio.....	45
Pav. 36. Lenkimo s-e diagrama: a) SSB-66.95-B(1) bandinio, b) SSB-66.95-B(2) bandinio.....	45

Pav. 37. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo plieninio plaušo koncentracijos ties 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 plyšiu.....	49
Pav. 38. Plieninio plaušo kryptingumo priklausomybė nuo plienio plaušo koncentracijos.	50
Pav. 39. Lenkimo stiprio priklausomybė nuo plieninio plaušo kryptingumo ties 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 plyšiu.....	51
Pav. 40. Gniuždymo stiprio priklausomybė nuo plieninio plaušo koncentracijos.....	52
Pav. 41. Gniuždymo stiprio priklausomybė nuo plieninio plaušo kryptingumo.	53

Lentelių sąrašas

Lentelė 1. Tyrimams naudotos medžiagos.....	18
Lentelė 2. Betono mišinio klojumas.	24
Lentelė 3. Betono mišinių sudėtis 1 m ³	24
Lentelė 4. Vandens įgėris, poringumas, prognozuojamas atsparumas šalčiui bandiniuose.	25
Lentelė 5. Betono stiprio gniuždant tyrimo rezultatai.	28
Lentelė 6. Betono mišinių klojumas.	30
Lentelė 7. Pakoreguota betono mišinių sudėtis 1 m ³	30
Lentelė 8. SSB-0.25 bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos tyrimo rezultatai.	34
Lentelė 9. SSB-33.25 bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos tyrimo rezultatai.	34
Lentelė 10. SSB-66.25 bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos tyrimo rezultatai.	35
Lentelė 11. SSB-100.25 bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos tyrimo rezultatai.....	35
Lentelė 12. SSB-133.25 bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos tyrimo rezultatai.....	36
Lentelė 13. Lenkiamojo stiprio, plieninio plaušo kryptingumo ir koncentracijos ties 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 tyrimo duomenys.	39

Lentelė 14. Bandinių gniuždymo rezultatai.	41
Lentelė 15. SSB-66.35-B(1) ir SSB-66.35-B(2) bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos rezultatai.	46
Lentelė 16. SSB-66.75-B(1) ir SSB-66.75-B(2) bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos rezultatai.	46
Lentelė 17. SSB-66.55-B(1), SSB-66.55-B(2), SSB-66.55-V(1), SSB-66.55-V(2), SSB-66.55-G(1) ir SSB-66.55-G(2) bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos rezultatai.	47
Lentelė 18. SSB-66.95-B(1) ir SSB-66.95-B(2) bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos rezultatai.	48
Lentelė 19. Lenkiamojo stiprio, plieninio plaušo kryptingumo ir koncentracijos ties 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 plyšiu tyrimo duomenys.....	49
Lentelė 20. Lenkiamojo stiprio, plieninio plaušo kryptingumo ir koncentracijos ties 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 plyšiu tyrimo duomenys.....	50
Lentelė 21. Bandinių SSB-66.35-B(1,2), SSB-66.55-B(1,2), SSB-66.75-B(1,2), SSB-66.95-B(1,2), gniuždymo rezultatai.	52
Lentelė 22. Bandinių SSB-66.55-B(1,2), SSB-66.55-V(1,2), SSB-66.55-G(1,2) gniuždymo rezultatai.....	53

Įvadas

Betonas nors ir tvirta ir ilgaamžė medžiaga tačiau dėl mažo tempiamojo stiprio ir jo trapumo eksploatuojamose konstrukcijose neretai atsiveria neleistini pločio plyšiai. Dėl tos priežasties plieninė armatūra rūdyja, o susidarę korozijos produktai toliau ardo betono struktūrą. Todėl statyboje vis dažniau pradėtas naudoti susitankinantis betono mišinys (SSB) armuotas plieniniu plaušu. Jis elemento skerspjūvyje suvaržo tempimo deformacijas, o tai lemia mažesnę plyšių plotį, tolygesnę jų išsidėstymą, plastiškesnę elemento suirimo pobūdį, didesnę atsparumą lenkiant.

Siekiant dar labiau pagerinti konstrukcijų atlaikymą lenkimo jėgoms reikia, kad plieninis plaušas išsidėstytų kryptingai, o ne chaotiškai nes kuo išsidėsto kryptingiau tuo jo efektyvumas didesnis. Tačiau tyrimų, susijusių su plieninio plaušo kryptingumo įtaka sukietėjusio SSB savybėms, yra atlikta labai nedaug. Taip pat nėra visiškai aišku kaip betono tėkmė, stambių užpildų koncentracija mišinyje įtakoja plieninio plaušo pasiskirstymą ir kryptingumą. Jeigu tai pavyktų išsiaiškinti tiksliau, tai betono ir gelžbetonio gamybos, monolitinės statybos srityje šie tyrimų rezultatai leistų efektyviau panaudoti plieninius plaušus gelžbetoninėms konstrukcijoms.

1. Literatūros apžvalga

1.1 Susitankinančio betono armuotu plieniniu plaušu savybės ir panaudojimo ypatumai

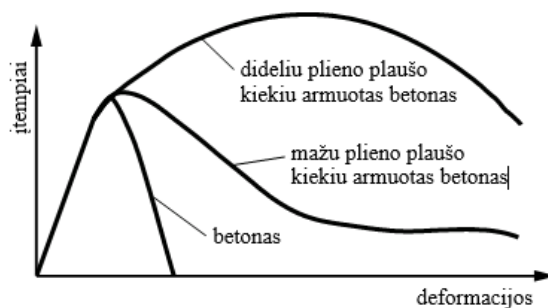
Susitankinantis betonas armuotas plieniniu plaušu plačiai taikomas tik kelis dešimtmečius, todėl dar nėra sukaupta didelė praktinė tokių konstrukcijų projektavimo ir panaudojimo patirtis. Dėl tos priežasties SSB armuotas plieninis plaušais Lietuvoje dažniausiai naudojamas liejant pramoninių pastatų grindis.

Pradžioje plieninis plaušas buvo naudojimas tik papildomam armavimui, plyšių suvaržymui ir mažiau deformuojamiems konstrukciniams elementams. Tačiau atlikus daugiau tyrimų ir moksliniams komitetams išleidus dispersiškai armuoto betono rekomendacijas (RILEM TC162 TDF, ACI 544), taip pat atsiradus vandens poreikavimą mažinančioms įmaišos (superplastikliams) plieniniu plaušu armuotos susitankinančio betono konstrukcijos pradėtos naudoti vis plačiau ir vis įvairesnėms sritims, pavyzdžiui:

- torkretuojant uolų šlaitus;
- betonuojant perdangas;
- įrengiant automobilių stovėjimo aikšteles;
- remontuojant tiltų perdangų plokštes;
- klojant lėktuvų kilimo ir tūpimo takus;
- tiesiant tunelius;
- betonuojant pramoninių pastatų grindis;
- gaminant surenkamąsias betonines konstrukcijas;
- perdengiant susisiekimo statinių angas;
- konstrukciniais tikslais, visiškai pakeičiant skersinę armatūrą iš anksto įtemtose konstrukcijose ir armatūros strypynus, tunelių segmentuose bei pamatų plokštėse.

Priežasčių lėmusių vis platesnį panaudojimą yra keletas. Viena iš jų susitankinančio betono armavimas plieniniu plaušu žymiai pagerina eksploatacines betono kaip medžiagos savybes. Jis neturi reikšmingos įtakos gniuždomojo betono stipriui. Geriausiu atveju gniuždomasis stipris gali padidėti iki 15 %, kai elementas armuojamas 1,5 % plieniniu plaušu. Tai galima būtų sieti su plieninio plaušo savybe varžyti plyšių vystymąsi betono

mikrostruktūros lygmenyje. Tačiau betono armavimas plieniniu plaušu visiškai pakeičia lenkiamąjį betono stiprį (1 pav.). Dėl kurio armuotas plieniniu plaušu susitankinantis betonas tampa izotropiškai atsparus pleišėjimui, sumažėja lokalių struktūros defektų įtaka mechaninėms jo savybėms. [1]



Pav. 1. Įprasto ir susitankinančio betono armuotu plieniniu plaušu įtempių ir deformacijų priklausomybės

Dėl geresnio lenkiamojo stiprio susitankinančio betono armuotu plieniniu plaušu suirimo pobūdis tampa plastiškas, veikiamas apkrovos. Betoninio elemento suirimas yra trapus. 2 pav. pateiktas skirtingas tokių elementų suirimo pobūdis. Veikiamas apkrovos betoninis elementas suirdamas visiškai sutrupa (2 pav., a). Plieniniu plaušu armuotas betoninis elementas dėl dispersiškai pasiskirsčiusio plaušo sukeltų tempimo deformacijų suvaržymo suyra plastiškai (2 pav., b).



a)



b)

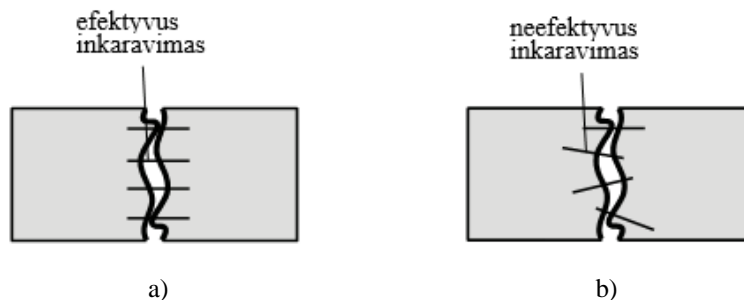
Pav. 2. Elementų suirimas: a – betoninio; b- plieniniu pluoštu armuotu susitankinančio betono

Plastiškas suirimas pagerina betono naudojimo galimybes statyboje, nes pleišėjant plieniniu plaušu armuotam betonui, plaušas suvaržo atsiveriančius plyšius, taip pat plyšiai išsidėsto tolygiau ir perima elemento tempiamojoje zonoje veikiančius tempimo įtempimus. Tai įtakoja didesnę atsparumą dinaminėms apkrovoms (smūgiams, sproginams, žemės drebėjimams

ir t.t.). Taip pat plieniniu plaušu armuojant betoną padidinamas elementų ilgaamžiškumas ir atsparumas dėvėjimuisi bei nuovargiui. Dėl plaušo įtakos gaunami du pagrindiniai efektai: pirma suvaržomas plyšys ir padidėja betoninio elemento plastiškumas; antra, padidėja pasipriešinimas tempimo jėgoms. [1]

Susitankinančio betono armavimas plieniniu plaušu turi ir trūkumų. Technologiniu požiūriu problema kyla maišant ir liejant betoną - plaušas sukimba tarpusavyje arba pasiskirsto netolygiai. Standartinė maišymo metodika leidžia pagaminti betono mišinį su gana mažu plieno plaušo kiekiu (skirtingų šaltinių duomenimis, nuo 1 iki 1,5 % pagal tūrį). Taip pat jeigu mišinys tiekiamas siurbliu atsiranda metalinio plaušo kiekio ribojimas nes jeigu plieninis plaušas sukimba į gniužulą, jis gali užkimšti betono mišinio pumpavimo sistemą.

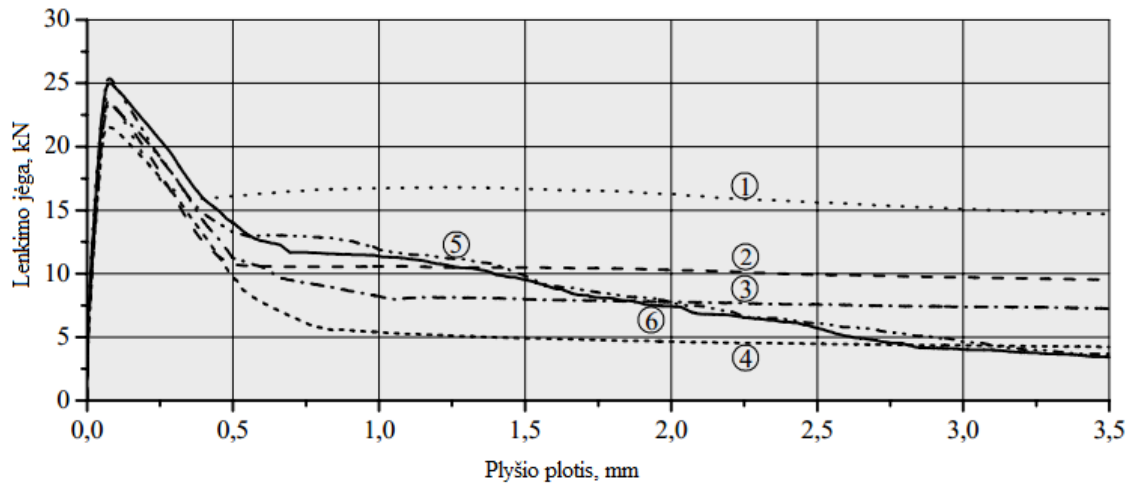
Kita problema yra dėl netolygiaus plieninio plaušo pasiskirstymo visame elemento skerspjūvyje, dėl netolygaus tempimo įtempių susidarymo dalis plieninio plaušo tampa neveiksmingas. Taip pat dalis plieninio plaušo pasiskirsto ne orientuotai elemente, o padrikai. Dėl to kai kurių plyšių atžvilgiu plieninio plaušo inkaravimo ilgis nepakankamas ir nėra veiksmingas suvaržant pleišėjimo deformacijas, kaip parodyta 3 pav., b. Veiksmingiausias plieninio plaušo pasiskirstymas pateiktas 3 pav., a. [1]



Pav. 3. Plieninio plaušo išsidėstymas plyšyje: a – idealus pasiskirstymas; b – neefektyvus pasiskirstymas

Norint pasiekti efektyvesnį inkaravimą reikia pagerinti sukibimą plieninio plaušo su betono mišiniu. Tam naudojamos įvairių tipų plieninio plaušo formos: užlenktais galais, išlietais galais, gofruotos, periodiško skerspjūvio, sukto skerspjūvio ir t.t. Pagal Klaus Holschemacher ir Torsten Muller atliktus tyrimus galima matyti kokią reikšmingą įtaką turi plieninio plaušo forma lenkiamojo betono stipriui (4 pav.). 4 pav. parodyta stiprio lenkiant ir plyšio pločio priklausomybė nuo skirtingų formų plieninių plaušų: 1 - užlenktais galais, $l=60$ mm, $d=0,75$ mm; 2 - užlenktais galais, $l=60$ mm, $d=0,9$ mm; 3 - užlenktais galais, $l=50$ mm, $d=1,05$ mm; 4 - tiesūs,

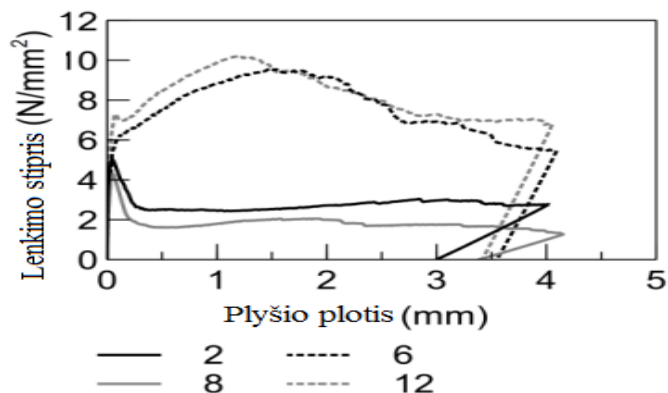
$l=50$ mm, $d=1,00$ mm; 5 - gofruoti su užlietais galais, $l=60$ mm, $d=1,00$ mm; 6 - gofruoti, $l=50$ mm, $d=1,00$ mm. [2]



Pav. 4. Stiprio lenkiant ir plyšio pločio priklausomybė nuo skirtingų formų plieninių plaušų

1.2 Susitankinančio betono armuotu orientuotu plieniniu plaušu tyrimų apžvalga

Susitankinančio betono armuotu orientuotu plieniniu plaušu pagrindinis pranašumas prie neorientuoto plaušo konstrukcijas yra geresnis tempimo įtempių atlaikymas (5 pav.). Buvo nustatyta, kad jeigu plieninis plaušas būtų išsidėstęs kryptingai, tai jo efektyvumas būtų 100 %, o kai pasiskirsto netaisyklingai, jo efektyvumas sumažėja iki 30 %. Tačiau šis efektyvumo mažėjimas yra kintantis dydis nes jis priklauso nuo to kaip stipriai plieninis plaušas nesuorientavo. Šį mažėjimą lemia tai, kad betonui praradus savo laikomąją galią neorientuotas plieninis plaušas tik dalinai perima lenkimo įtempius ir elementas suyra greičiau, o orientuotas perima (5 pav). [3], [4], [5]

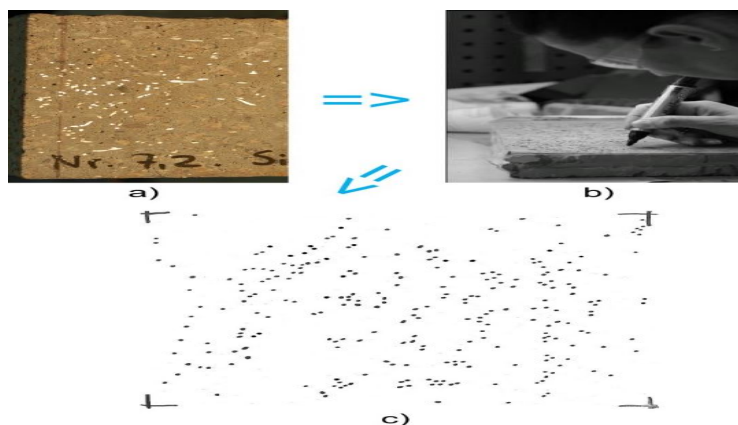


Pav. 5. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo plyčio pločio: 2, 8 kreivės bandiniai su neorientuotu plieniniu plaušu, 6, 18 kreivės bandiniai su orientuotu plieniniu plaušu

1.3 Orientuoto plieninio plaušo padėties sukietėjusiame betone nustatymo metodų apžvalga

Orientuoto plieninio plaušo padėtį ir koncentraciją, jeigu reikia, sukietėjusiame betone galima nustatyti ardomaisiais arba neardomaisiais metodais.

Ardomuoju metodu bandinius galima pjauti plokštumomis ir skaičiuoti kaip plieninis plaušas pasiskirstęs skerspjūvyje (6 pav.). Šis metodas nereikalauja specialios įrangos ar įgūdžių, bet užima labia daug laiko. Todėl yra nepraktiškas ir mažai naudojamas.



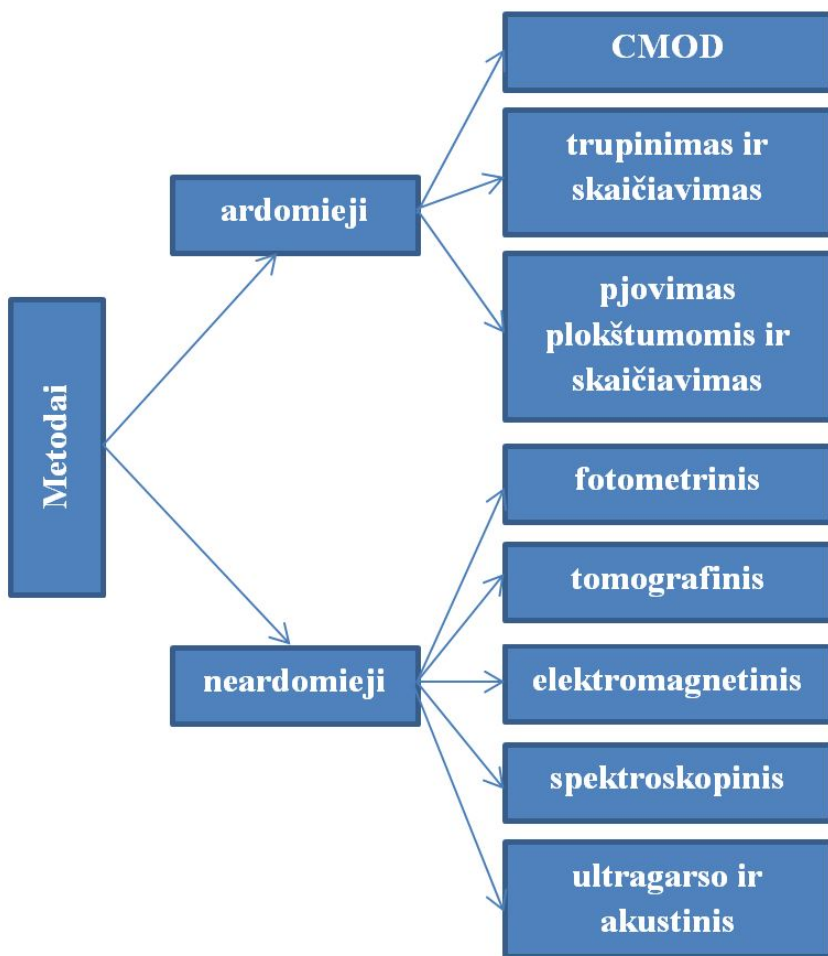
Pav. 6. Plieninio plaušo padėties sukietėjusiame betone nustatymas ardomuoju metodu

Taip pat yra pažangesnių, paprastesnių, tikslesnių metodų nustatyti plieninių plaušų orientaciją ir jų kiekį neardomaisiais metodais: rentgeno kompiuterine tomografija, elektromagnetine indukcija ir kiti (7 pav.).

Naudojant rentgeno kompiuterinės tomografijos metodą betoniniams elementams tirti gaunamas trimatis vaizdas, todėl labai aiškiai matoma kaip išsidėstęs plieninis plaušas. Šis

metodas patogus tuo, kad bandinius galima tirti juos nesupjausčius ir poto galima nustatinėti stiprumines savybes. Tiriant šiuo metodu naudojamas kompiuterinis tomografas, kuris siunčia kelis rentgenų spindulių srautus skirtingais kampais ir tuomet matuojamas perėjusių spindulių srautas. [6]

Elektromagnetinės indukcijos metodas paremtas indukcinės ritės principu. Šio metodo privalumas yra toks, kad galima tiksliai nustatyti plieninio plaušo orientaciją ir koncentraciją elemente. Trūkumai, kad reikia prietaisą nustatinėti iš naujo naudojant skirtingo tipo plieninius plaušus, negaunamas trimatis vaizdas. [7]



Pav. 7. Plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos nustatymo metodai

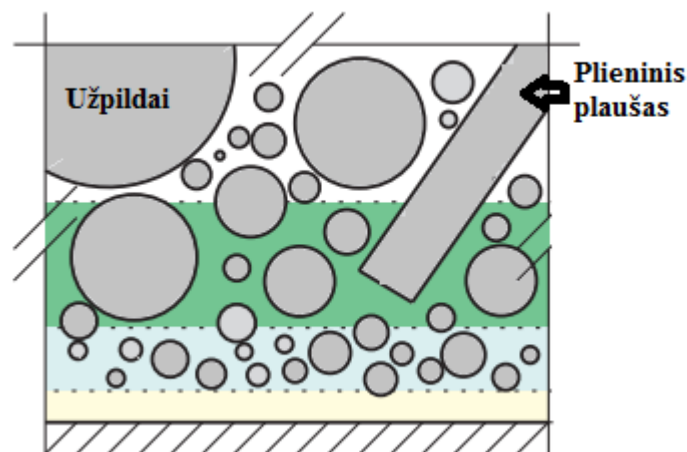
1.4 Veiksniai įtakojantys plieninio plaušo orientaciją susitankinančiame betono mišinyje

Susitankinančio betono mišinyje esančio plieninio plaušo padėtis turi įtakos betono mechaninėms savybėms, ypač lenkimo stipriui [4]. Todėl svarbūs tampa veiksniai įtakojantys plieninio plaušo orientavimąsi mišinyje. Įtakojantys veiksniai yra šie:

- mišinio sudėtis [8];
- klojinių geometrija [9];
- armatūros padėtis ir kitos kliūtys [10];
- klojinių paviršiaus kokybė [4];
- betono liejimo metodai ir būdai [11];
- mišinio reologinės savybės [12];
- plieninio plaušo tipas ir geometrija [10];.

Didžiausią įtaką plieninio plaušo orientacijai turi betono mišinio tekėjimo srauto sukeltos šlyties jėgos ir klojinių geometrija [9]. Mišinio srautas priverčia plieninį plaušą orientuotis jo tekėjimo kryptimi.

Nemažiau svarbus yra vadinamasis pasienio poveikis. Kadangi betonas yra daugiafazė medžiaga, sudaryta iš cemento, smulkių ir stambių užpildų, plieninių plaušų. Visi šie užpildai pasiskirsto nevienodai ir geometriškai įtakoja plieninio plaušo padėtį (8 pav.).



Pav. 8. Betono užpildų įtaka plieninio plaušo padėčiai

2. Darbo tikslai ir uždaviniai

Darbo tikslas:

Atlikus eksperimentinius tyrimus, įvertinti ar susitankinančio betono mišinio stambių užpildų koncentracija turi įtakos plieninio plaušo kryptingumui ir koncentracijai. Įvertinti kokia yra kryptingai išsidėsčiusio plieninio plaušo įtaka sukietėjusio betono savybėms.

Uždaviniai:

1. Ištirti susitankinančio betono armuotu plieniniu plaušu fizikines savybes.
2. Betono mišinio reologinių ir technologinių savybių įtaka plieninio plaušo kryptingam susiformavimui.
3. Ištirti orientuoto ir neorientuoto plieninio plaušo įtaką betono stiprumo savybėms.
4. Ištirti plieninio plaušo koncentracijos įtaka betono stiprumo savybėms.

Tyrimo objektas:

Įvairios sudėties susitankinančio armuoto plieniniu plaušu betono.

3. Tyrimo metodika ir naudotos žaliavos

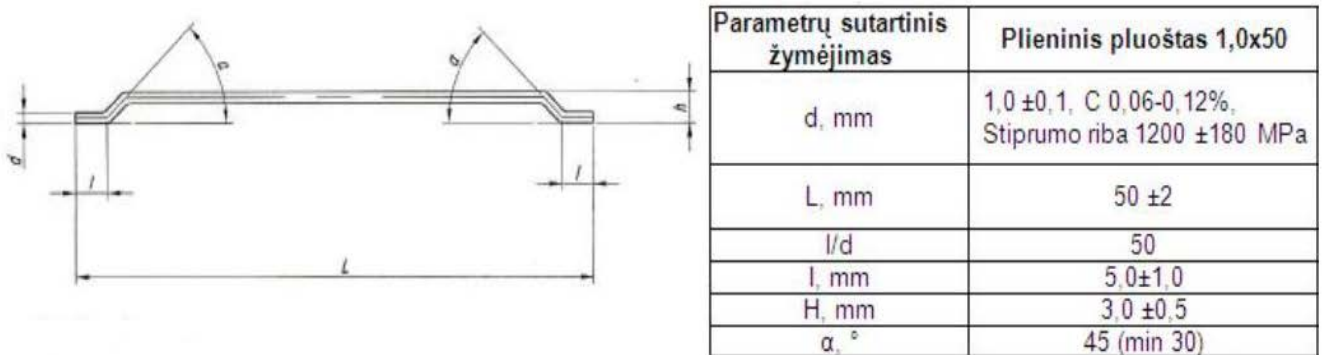
3.1 Tyrimams naudotos medžiagos

Magistriniame darbe atliekamiems tyrimams bandiniai buvo ruošiami iš vienodų žaliavų (žiūr. 1 lentelę). Siekiant, kad bandiniai būtų lengviau atpažįstami kiekvienam bandiniui buvo duodamas išskirtinis kodas, pvz. SSB-0.25-1 (čia: SSB – susitankinantis betonas, 0 – stambių užpildų procentinė išraiška nuo kontrolinėje sudėtyje esančios stambių užpildų koncentracijos, 25 – plieninio plaušo kiekis kg/m^3 , 1 – bandinio numeris).

Lentelė 1. Tyrimams naudotos medžiagos.

Cementas:	CEMII/A-LL 42,5R.
Plieninis plaušas:	Plieninis plaušas su standartiniais užlenktais galais.
Superplastiklis:	Sika ViscoCrete-D187
Stabilizatorius:	Sika Stabilizer 4R.
Užpildai:	UAB „Rizgonys“, Kvesų cechas. Smėlis 0/1 ir 0/4 fr., žvirgždas 4/16 fr.

Detalesnė informacija apie naudotą plieninį plaušą pateikta 9 paveiksle.



Pav. 9. Eksperimente naudoto plieninio plaušo charakteristikos

3.2 Tyrimo metodikų ir metodų aprašymas

3.2.1 Tritaškis apkrovos bandymas

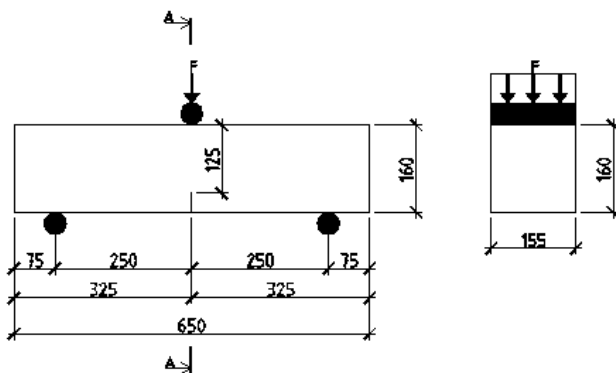
Tritaškis apkrovos bandymas buvo atliktas su 130x15x15 cm bandiniais. Betono mišinys buvo pilamas į formą per plastikinį vamzdį 110 mm skersmens, jį pavertus 30° kampu, siekiant

užtikrinti stabilų ir pastovų mišinio tekėjimo srautą (10 pav.). Forma betoniniams bandiniams paruošti buvo pagaminta iš plastiku padengtos medžio drožlių plaušo plokštės ir visų bandymų metu sutepama identišku statybiniu formų tepalu. Atidarius “V-funnel” indo sklende, susitankinantis betono mišinys savaime tekėdamas plastiniu vamzdžiu užpildė paruoštą pailgą formą. Suformuoti bandiniai buvo uždengti ir 2 paras kietinami natūraliose sąlygose 20°C temperatūroje, po to išformuojami ir dar 28 paroms paliekami kietinimui standartinėmis kietinimo sąlygomis vonelėje su vandeniu.



Pav. 10. Savaime susitankinančio betono liejimas į formą

Praėjus 28 paroms bandiniai buvo perpjauti per pusę nes pagal standartą EN 12390-1 atliekant tempiamojo stiprio lenkiant matavimus bandinių ilgis turi būti nuo 550 mm iki 700 mm. Taip pat ties viduriu bandinys buvo įpjautas 5 mm pločio įpjova, kurios auštis 25 mm ±1 mm. Įpjovas aukštis ir plotis paimtas pagal standartą LST EN 14651+A1. Naudojant tritaškę apkrovą bandiniai buvo lenkiami, hidrauliniu presu „Toni Technik“ (11 pav). [13], [14]



Pav. 11. Tritaškio lenkimo bandymo schema ir eksperimente naudotas hidraulinis presas „Toni Technik“

3.2.2 Gniuždymo apkrovos bandymas

Gniuždymo bandymas buvo atliktas su 10x10x10 cm bandiniais. Mišinys buvo pilamas į formas, kurios pagamintos iš plastiku padengtos medžio drožlių plaušo plokštės. Visų bandymų metu formos buvo sutepamos identišku statybiniu formų tepalu. Suformuoti bandiniai buvo uždengti ir 2 paras kietinami natūraliose sąlygose 20⁰C temperatūroje, po to išformuojami ir dar 28 paroms paliekami kietinimui standartinėmis kietinimo sąlygomis vonelėje su vandeniu. Sukietėję bandiniai buvo gniuždomi hidrauliniu presu Controls „Pilot4“ (12 pav.).



Pav. 12. Eksperimente naudotas hidraulinis presas „Pilot4“

Prieš tai skyriuje paminėti bandiniai (130x15x15 cm) po tritaškio lenkimo bandymo buvo supjaustyti į 10 dalių ir taip pat sugniuždyti hidrauliniu presu.

3.2.3 Plieninio plaušo kryptingumo ir koncentracijos nustatymo bandymas

Atliekant plieninio plaušo kryptingumo ir koncentracijos bandymą iš pradžių prizmės (130x15x15 cm) buvo supjaustytos į 10 dalių. Tada neardomuoju elektromagnetinės indukcijos metodu visi bandiniai tirti trimis skirtingomis kryptimis X, Y, Z. X kryptis yra lygiagreti betono mišinio tekėjimo krypčiai, Y statmena tekėjimo krypčiai, Z vertikali tekėjimo krypčiai. Kryptingumui ir koncentracijai nustatymui buvo naudojamas prietaisas BSM-100 (13 pav.)



Pav. 13. Eksperimente naudotas elektromagnetinės indukcijos prietaisas BSM-100

3.2.4 Vandens įgeriamumo kinetika

Nustatant betono bandinių vandens įgeriamumo kinetika bandiniai ventiliuojamoje (105 ± 5) C^0 temperatūros džiovykloje buvo džiovinami, kol masė per 24 h nepasikeitė daugiau kaip 0,2 %. Prieš svėrimą bandiniai buvo atvėsinti iki artimos kambario temperatūros hermetiškame inde arba eksikatoriuje. Tada buvo mirkomi vandenyje 15 minučių, 60 minučių, 24 valandas ir 48 valandas ties kiekvienu laiku bandiniai buvo išimami ir nuo paviršiaus drėgnu skuduriuku nušluostomas vandens perteklius ir sveriami. Po dviejų parų bandiniai buvo sveriami vandenyje hidrostatinėmis svarstyklėmis. Žinant šias bandinių mases apskaičiuojami betono įgėrio ir poringumo parametrai.

Vandens įgėris pagal masę:

$$W_p = \frac{m_{48} - m_s}{m_s} \times 100, \% \quad (1)$$

čia: m_{48} - bandinio masė po 48 val. mirkymo, g;

m_s - sauso bandinio masė ore, g.

Tankis:

$$T = \frac{m_s}{m_{48} - m_v} \times 1000, \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

čia: m_{48} - bandinio masė po 48 val. mirkymo, g;

m_s - sauso bandinio masė ore, g;

m_v – bandinio masė vandenyje po 48 val. mirkymo, g.

Vandens įgėris pagal tūrį :

$$W_{p(t)} = (W_p \times T) / 1000, \% \quad (3)$$

čia: W_p – vandens įgėris pagal masę, %;

T – tankis, kg/m^3 .

Vandens įgėris po 15 min. :

$$W_1 = \frac{m_{15} - m_s}{m_s} \times 100, \% \quad (4)$$

čia: m_{15} - bandinio masė ore po 15 min. mirkymo, g;

m_s - sauso bandinio masė ore, g.

Vandens įgėris po 60 min. :

$$W_2 = \frac{m_{60} - m_s}{m_s} \times 100, \% \quad (5)$$

čia: m_{60} - bandinio masė ore po 60 min. mirkymo, g;

m_s - sauso bandinio masė ore, g.

Santykis :

$$W_{1(s)} = \frac{W_1}{W_p}, \% \quad (6)$$

čia: W_1 – vandens įgėris po 15 min.;

W_p – vandens įgėris pagal masę.

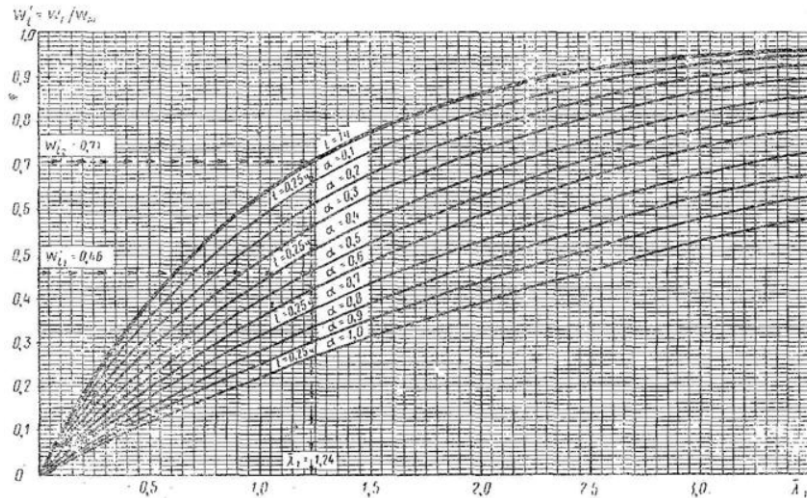
Santykis :

$$W_{2(s)} = \frac{W_2}{W_p}, \% \quad (7)$$

čia: W_2 – vandens įgėris po 60 min.;

W_p – vandens įgėris pagal masę.

Iš standarte GOST 12730.4 – 78 pateiktos nomogramos (14 pav.) tirtam betonui parenkami porų dydį apibūdinantys santykiniai rodikliai: porų vienodumo rodiklis - α , porų pasiskirstymas pagal dydį rodiklis – λ_1 .



Pav. 14. Nomograma vidutinių porų dydžio rodiklio α ir porų vienodumo rodiklio λ_1 nustatymui

Vidutinių porų dydžių rodiklis:

$$\lambda = \lambda_1 (1/\alpha) \quad (8)$$

Bendras poringumas:

$$P_p = \left(1 - \left(\frac{T}{2690}\right)\right) \times 100, \% \quad (9)$$

čia: T – tankis, kg/m^3 .

Atviras poringumas:

$$P_a = W_{p(t)}, \% \quad (10)$$

čia: $W_{p(t)}$ – vandens įgėris pagal tūrį, %.

Uždaras poringumas:

$$P_u = P_p - P_a, \% \quad (11)$$

čia : P_p – bendras poringumas, %;

P_a – atviras betono poringumas, %.

Atsparumo šalčiui kriterijus:

$$K_s = \frac{P_u}{(0,09 \times P_a)} \quad (12)$$

čia : P_u – uždaras betono poringumas (oro kiekis betone), %;

P_a – atviras betono poringumas, %.

Žinant betono atsparumo šalčiui kriterijų K_s galima prognozuoti užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičių, kurį atlaikys betonas pagal empirinę priklausomybę.

4. Susitankinančio betono armuoto plieniniu plaušu savybių tyrimai, kintant stambaus užpildo koncentracijai

4.1 Tiriamieji objektai

Tyrimams buvo naudojamos susitankinančio betono prizmės armuotos plieniniu plaušu, kvadratinio skerspjūvio (100x100x100mm). Bandinių mišinys buvo skirtingas (žiūr. 3 lentelę), kito stambaus užpildo koncentracija betono mišinyje. Nuo kontrolinėje sudėtyje (SSB-100.25) esančio stambių užpildų kiekio buvo imama 0, 33, 66, 133 % stambaus užpildo kitoms sudėtims. Taip pat betono mišinyje kito superplastiklio, stabilizatoriaus, vandens kiekis siekiant suvienodinti mišinių klijumą (žiūr. 2 lentelę). Viena iš priežasčių dėl ko buvo daromi šie bandiniai, buvo surasti optimalią mišinio sudėtį ir ją naudoti tolimesniems eksperimentams.

Lentelė 2. Betono mišinio klijumas.

Sudėties Nr.	Pasklidimas, mm	Pasklidimo laikas iki 500 mm skersmens, s
SSB-0.25	700	0,86
SSB-33.25	620	2,07
SSB-66.25	640	1,16
SSB-100.25	650	1,06
SSB-133.25	645	1,03

Lentelė 3. Betono mišinių sudėtis 1 m³.

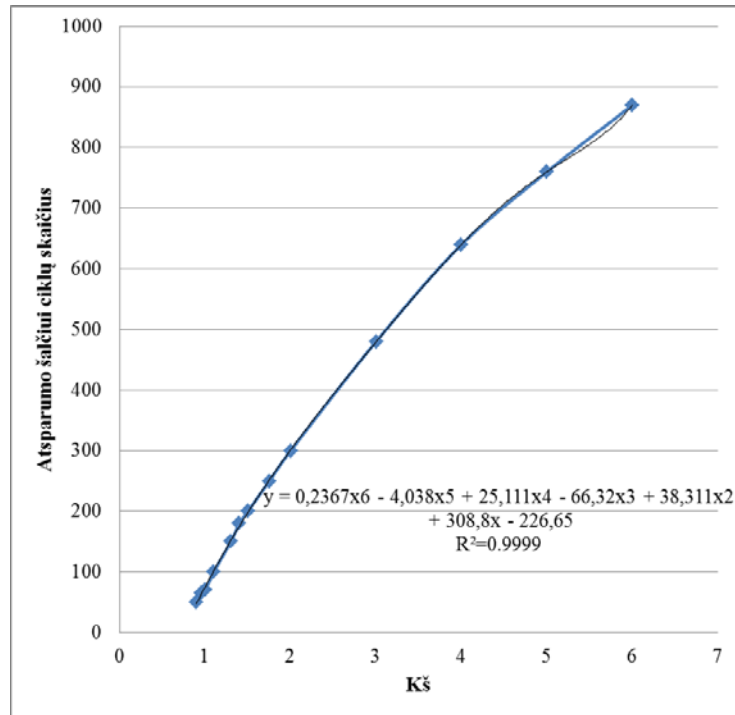
Betono mišinio komponentų kiekis 1m ³					
Mišinio pavadinimas	SSB-0.25	SSB-33.25	SSB-66.25	SSB-100.25	SSB-133.25
Stambių užpildų 4/16 fr. kiekis mišinyje, %	0	33	66	100	133
Cementas, kg.	408,3	410,0	410,00	410,0	410,0
Vanduo, kg.	280,5	225,5	225,50	225,5	225,5
Smėlis 0/1, kg.	0,0	168,8	143,14	116,7	91,0
Smėlis 0/4, kg.	1509,0	1278,1	1083,77	883,5	689,1
Žvirgždas 4/16, kg.	0,0	220,0	440,09	666,8	886,8
Metalinis plaušas, kg.	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Superplastiklis, kg.	14,6	4,9	7,4	4,9	4,9
Stabilizatorius (0,4 %), kg.	1,6	1,64	1,6	1,6	1,6
Iš viso:	2237,4	2334,1	2336,5	2334,1	2334,1
V/C santykis	0,69	0,55	0,55	0,55	0,55
Tūris, l.	1001,3	997,5	999,5	996,8	996,5

4.2 Susitankinąčio betono mišinio armuoto plieniniu plaušu su kintamu stambaus užpildo kiekiu savybių tyrimai

Betono bandinių su skirtinga stambių užpildų koncentracija poringumo parametrai bei vandens įgeriamumas buvo nustatyti pagal vandens įgeriamumo kinetiką (žiūr. 4 lentelę).

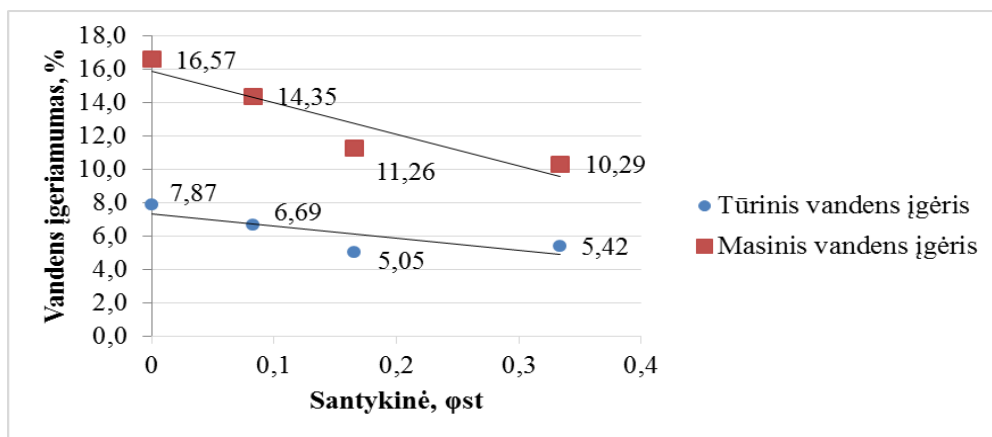
Lentelė 4. Vandens įgėris, poringumas, prognozuojamas atsparumas šalčiui bandiniuose.

Bandinių nr. / Pavadinimas	Bandinio masė, g						Wp, % po 48h	Tankis ρ, kg/m ³ sauso band.	Wp(t), % pagal tūrį	W _{t1} , % po 15min	W _{t2} , % po 1h	W _{t3} , % Po 24h	W _{t1} arba W _t /W _p	W _{t2} arba W ₂ /W _p	λ ₁	α	λ	Bendr. poringumas P, %	Atviras poringumas P _a , %	Uždaras poringumas P _u , %	Atsparumo šalčiui kriterijus K _s	Prognozuojamas atsparumas šalčiui, ciklais F, ciklais
	Masė sauso	Po 15 min	Po 1h	Po 24h	Po 48h	Masė vandenyje																
SSB-0.25-1	2064,8	2107,2	2127,0	2220,0	2228,0	1248,36	7,90	2108	16,66	2,05	3,01	7,52	0,26	0,38	0,48	0,35	0,12	21,65	16,66	4,99	3,33	534
SSB-0.25-2	2075,5	2128,0	2148,8	2243,9	2247,4	1255,76	8,28	2093	17,33	2,53	3,53	8,11	0,31	0,43	0,59	0,30	0,17	22,19	17,33	4,86	3,11	499
SSB-0.25-3	2099,9	2145,2	2159,7	2243,5	2258,0	1264,61	7,53	2114	15,92	2,16	2,85	6,84	0,29	0,38	0,48	0,20	0,03	21,42	15,92	5,50	3,84	616
SSB-0.25-4	2051,5	2097,2	2113,4	2208,4	2218,9	1241,76	8,16	2099	17,13	2,23	3,02	7,65	0,27	0,37	0,47	0,30	0,08	21,95	17,13	4,82	3,13	501
SSB-0.25-5	2081,6	2128,9	2144,8	2235,5	2245,2	1261,36	7,86	2116	16,63	2,27	3,04	7,39	0,29	0,39	0,49	0,25	0,06	21,35	16,63	4,72	3,15	505
SSB.0.25-6	2066,3	2111,2	2124,1	2203,9	2220,6	1241,46	7,47	2110	15,76	2,17	2,80	6,66	0,29	0,37	0,47	0,22	0,03	21,55	15,76	5,79	4,08	652
Vidurkiai							7,87	2107	16,57	2,24	3,04	7,36	0,28	0,39	0,50	0,27	0,08	21,68	16,57	5,11	3,44	551
SSB-33.25-1	2196,1	2231,1	2248,4	2322,5	2349,8	1328,01	7,00	2149	15,04	1,59	2,38	5,76	0,23	0,34	0,42	0,36	0,09	20,10	15,04	5,06	3,74	600
SSB-33.25-2	2149,5	2184,9	2205,2	2278,8	2303,4	1296,16	7,16	2134	15,28	1,65	2,59	6,02	0,23	0,36	0,46	0,40	0,14	20,67	15,28	5,39	3,92	628
SSB-33.25-3	2173,3	2208,8	2226,0	2291,7	2317,2	1305,12	6,62	2147	14,22	1,63	2,42	5,45	0,25	0,37	0,47	0,35	0,12	20,17	14,22	5,95	4,65	724
SSB-33.25-4	2169,8	2205,3	2222,2	2278,9	2299,9	1288,4	6,00	2145	12,86	1,64	2,41	5,03	0,27	0,40	0,51	0,36	0,15	20,26	12,86	7,39	6,39	966
Vidurkiai							6,69	2144	14,35	1,63	2,45	5,56	0,24	0,37	0,47	0,37	0,13	20,30	14,35	5,95	4,67	730
SSB-66.25-2	2205,2	2241,5	2261,4	2315,7	2325,6	1332,76	5,46	2221	12,13	1,65	2,55	5,01	0,30	0,47	0,64	0,41	0,34	17,43	12,13	5,30	4,86	746
SSB-66.25-3	2257,8	2293,8	2313,5	2368,6	2377,7	1360,74	5,31	2220	11,79	1,59	2,47	4,91	0,30	0,46	0,63	0,40	0,32	17,47	11,79	5,68	5,35	790
SSB-66.25-4	2224,8	2260,6	2279,8	2330,8	2340,1	1341,75	5,18	2228	11,55	1,61	2,47	4,76	0,31	0,48	0,65	0,42	0,36	17,16	11,55	5,61	5,40	794
Vidurkiai							5,32	2223,2	11,82	1,62	2,50	4,89	0,30	0,47	0,64	0,41	0,34	17,35	11,82	5,53	5,20	777
SSB-133.25-1	2246,1	2281,8	2297,6	2335,9	2341,7	1349,5	4,26	2264	9,64	1,59	2,29	4,00	0,37	0,54	0,79	0,40	0,55	15,85	9,64	6,21	7,16	1509
SSB-133.25-2	2309,2	2342,3	2360,8	2406,2	2414,7	1398,81	4,57	2273	10,38	1,43	2,23	4,20	0,31	0,49	0,64	0,40	0,33	15,50	10,38	5,11	5,47	801
SSB-133.25-3	2269,5	2304,3	2318,4	2361,1	2368,7	1365,56	4,37	2262	9,89	1,53	2,15	4,04	0,35	0,49	0,64	0,22	0,13	15,90	9,89	6,01	6,75	1141
SSB-133.25-4	2281,1	2322,3	2337,3	2376,2	2382,6	1375,76	4,45	2266	10,08	1,81	2,46	4,17	0,41	0,55	0,81	0,32	0,52	15,78	10,08	5,70	6,28	932
SSB-133.25-5	2279,9	2323,8	2339,9	2381,5	2388,8	1376,85	4,78	2253	10,76	1,93	2,63	4,46	0,40	0,55	0,81	0,33	0,53	16,25	10,76	5,48	5,66	821
SSB-133.25-6	2245,1	2289,6	2306,4	2347,6	2354,4	1359,06	4,87	2256	10,98	1,98	2,73	4,57	0,41	0,56	0,83	0,30	0,54	16,15	10,98	5,17	5,23	780
Vidurkiai							4,55	2262,2	10,29	1,71	2,42	4,24	0,38	0,53	0,75	0,33	0,43	15,90	10,29	5,61	6,09	997

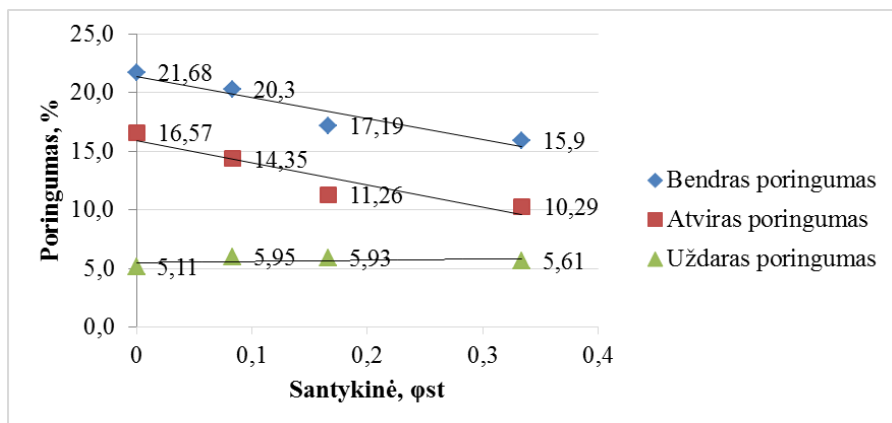


Pav. 15. Betono atsparumo šalčiui priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus Kš

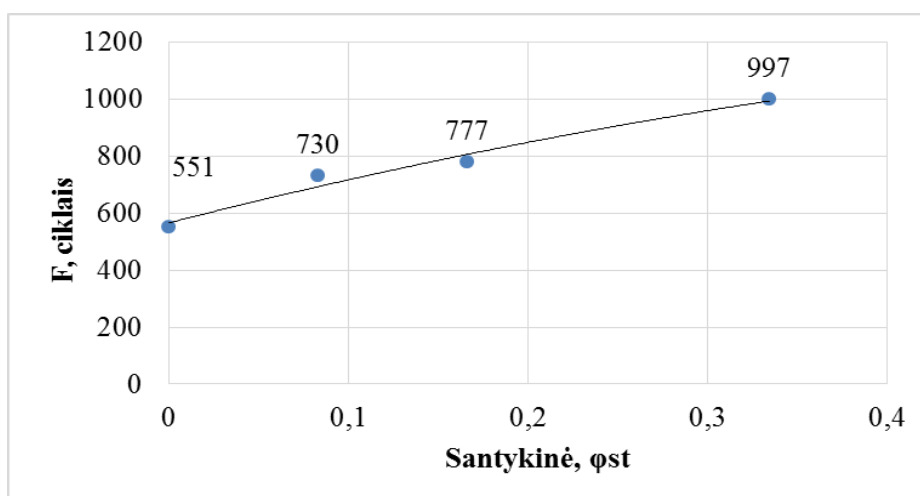
Pagal (15 pav.) gautą empirinę priklausomybę galima prognozuoti betono atsparumą šalčiui. Atsparus šalčiui bus tas betonas, kuriame rezervinių porų tūris bus didesnis už vandens, esančio betono porose, tūrio priaugį, virstant jam ledu.



Pav. 16. Betono vandens įgeriamumo rezultatai



Pav. 17. Betono poringumo rezultatai



Pav. 18. Prognozuojamo atsparumo šalčiui priklausomybė nuo stambaus užpildo kiekio.

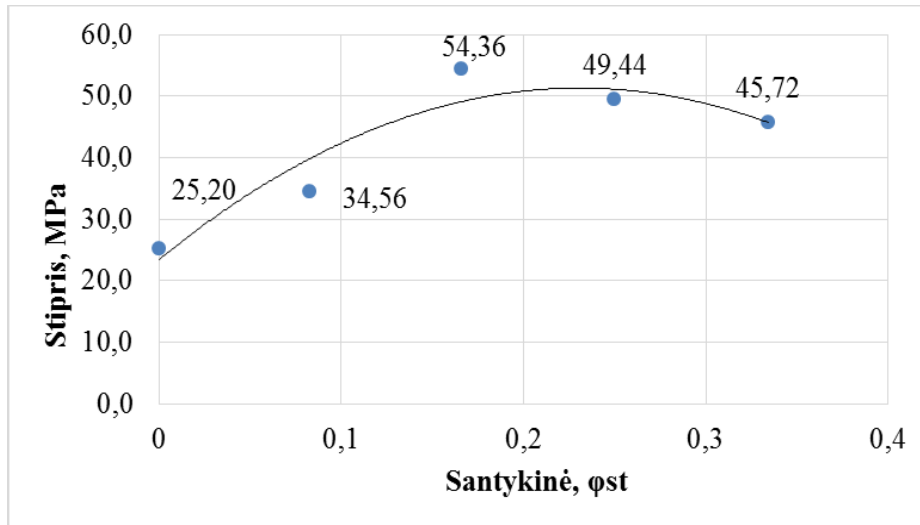
Nustatyta, kad didinant stambių užpildų kiekį betone mišinyje, vandens įgeriamumas mažėja tiesiškai proporcingai įdėtam stambaus užpildo kiekiui (16 pav.). Taip pat matyti, kad didėjant stambių užpildų koncentracijai betone mažėja bendras ir atviras poringumas, o uždaras poringumas didėja, kuris ypač pagerina betono atsparumą šalčiui (17 pav.). Todėl galima daryti išvadą, kad didinant stambių užpildų koncentraciją mišinyje didėja ciklų skaičius, kuriuos atlaikys susitankinantis betonas armuotas plieniniu plaušu veikiamas užšaldymo bei atšildymo (18 pav.).

4.3 Sukietėjusio plieniniu plaušu armuoto betono su kintamu stambaus užpildo kiekiu savybių tyrimai

Bandymų metu buvo siekiama patikrinti kokią įtaką gniuždomajam stipriui turi skirtingas stambaus užpildo kiekis mišiniuose, visi bandiniai buvo sugniuždyti hidrauliniu presu. Gniuždymo rezultatai pateikti 5 lentelėje.

Lentelė 5. Betono stiprio gniuždant tyrimo rezultatai.

Bandinio pavadinimas	Bandinio matmenys, cm		Gniuždymo jėga	Stipris
	Plotis	Ilgis	kN	MPa
SSB-0.25-1	10,08	9,68	253,1	24,70
SSB-0.25-2	10,04	9,79	250,6	24,63
SSB-0.25-3	10,12	9,81	260,3	25,84
SSB-0.25-4	9,74	10,03	250,4	24,46
SSB-0.25-5	10,01	9,79	258,3	25,31
SSB-0.25-6	10,06	9,77	267,4	26,28
Vidurkis:				25,20
SSB-33.25-1	10,02	10,14	347,5	35,31
SSB-33.25-2	10,09	9,90	341,8	34,14
SSB-33.25-3	10,04	10,01	349,1	35,08
SSB-33.25-4	10,03	9,90	339,4	33,70
Vidurkis:				34,56
SSB-66.25-1	10,01	10,02	486,7	48,82
SSB-66.25-2	10,02	9,80	763,0	74,92
SSB-66.25-3	10,04	9,94	471,2	47,02
SSB-66.25-4	10,04	9,82	473,3	46,66
Vidurkis:				54,36
SSB-100.25-1	10,83	9,97	457,5	49,40
SSB-100.25-2	9,96	9,88	502,8	49,48
Vidurkis:				49,44
SSB-133.25-1	9,83	10,03	459,1	45,26
SSB-133.25-2	10,06	10,08	443,4	44,96
SSB-133.25-3	9,94	10,02	451,8	45,00
SSB-133.25-4	10,01	10,09	459,3	46,39
SSB-133.25-5	9,99	10,11	470,1	47,48
SSB-133.25-6	9,90	10,11	451,9	45,23
Vidurkis:				45,72



Pav. 19. Betono gniuždymo stiprio priklausomybė nuo stambiaus užpildo kiekio.

Iš atliktų bandymo rezultatų galima teigti, kad stambių užpildų kiekis mišinyje turi įtakos gniuždymo stipriui. Betono gniuždymo stipris didėja iki tam tikros stambių užpildų tūrinės koncentracijos, o paskui pradeda mažėti. Didžiausias gniuždymo stipris gautas bandinio SSB-66.25 (54,36 MPa), o stambių užpildų tūrinė koncentracija šiame mišinyje yra 44 %. G. Skripkiūnas ir kiti autoriai yra aprašę, kad didžiausias gniuždymo stipris turėtų būti gaunamas, kai stambių užpildų tūrinė koncentracija betone yra apie 50 % (Skripkiūnas *et. al.* 2004; Gumuliauskas *et. al.* 2001).

5. Susitankinančio betono mišinio tėkmės įtakos plieninių plaušų orientavimuisi ir koncentracijai tyrimai

5.1 Tiriamieji objektai

Tyrimamas buvo naudojami betoniniai bandiniai (130x15x15 cm). Betono mišinių sudėtys buvo naudojamos analogiškos kaip prieš tai naudotiems tyrimams (žiūr. 3 lentelę). Tačiau kadangi mišinio klijumas turi įtakos plieninio plaušo orientacijai ir koncentracijai, maišant betono mišinį jis buvo koreguojamas įdedant papildomai superplastiklio ir stabilizatoriaus, kad mišinio pasklidimo laikas iki 500 mm skersmens būtų gautas kuo panašesnis ir tyrimų rezultatus būtų galima lyginti tarpusavyje. Gauti betono mišinių klijumo rezultatai pateikti 6 lentelėje, o perskaičiuotos koreguotos betono mišinio sudėtys 7 lentelėje.

Lentelė 6. Betono mišinių klijumas.

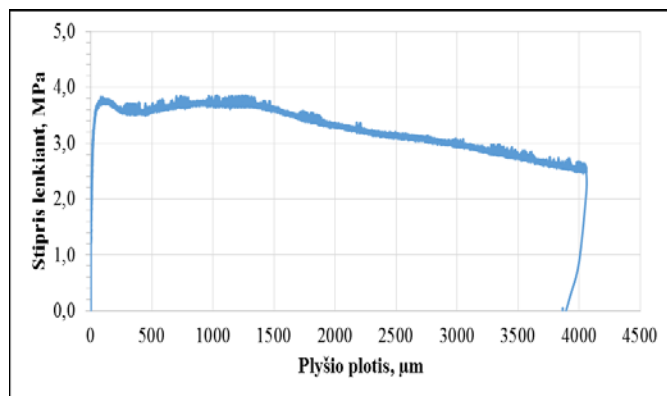
Sudėties Nr.	Pasklidimas, mm	Pasklidimo laikas iki 500 mm skersmens, s
SSB-0.25	700	1,11
SSB-33.25	620	1,24
SSB-66.25	660	1,29
SSB-100.25	650	1,06
SSB-133.25	645	1,00

Lentelė 7. Pakoreguota betono mišinių sudėtis 1 m³.

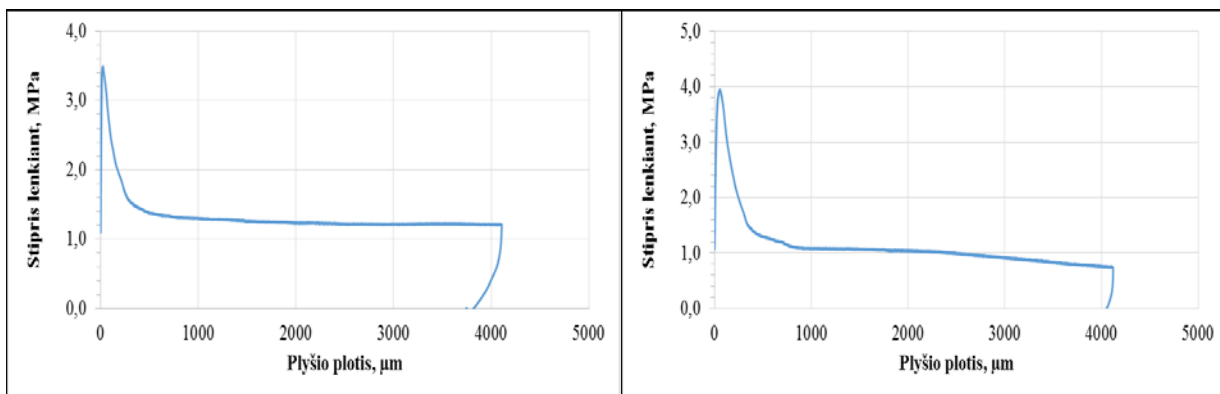
Betono mišinio komponentų kiekis 1m ³					
Mišinio pavadinimas	SSB-0.25	SSB-33.25	SSB-66.25	SSB-100.25	SSB-133.25
Stambių užpildų 4/16 fr. kiekis mišinyje, %	0	33	66	100	133
Cementas, kg.	410,0	410,0	410,00	410,0	410,0
Vanduo, kg.	225,5	225,5	225,50	225,5	225,5
Smėlis 0/1, kg.	0,0	168,8	143,14	116,7	91,0
Smėlis 0/4, kg.	1509,0	1278,1	1083,77	883,5	689,1
Žvirgždas 4/16, kg.	0,0	220,0	440,09	666,8	886,8
Metalinis plaušas, kg.	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Superplastiklis, kg.	14,6	7,4	7,4	4,9	4,9
Stabilizatorius (0,4 %), kg.	1,6	1,64	1,6	1,6	1,6
Iš viso:	2237,4	2336,61	2336,5	2334,1	2334,1
V/C santykis	0,69	0,55	0,55	0,55	0,55
Tūris, l.	1001,3	999,8	999,5	996,8	996,5

5.2 Eksperimento eiga ir tyrimo rezultatai

Atliekant eksperimentą betono mišinys buvo pilamas į formas per plastikinį vamzdį 110 mm skersmens, jį pavertus 30^o kampu, kad mišinio tekėjimo kryptimi plieninis plaušas susiorientuotų kryptingai. Suformuoti bandiniai buvo uždengti ir 2 paras kietinami natūraliose sąlygose 20^oC temperatūroje, po to išformuojami ir dar 28 paroms paliekami kietinimui standartinėmis kietinimo sąlygomis vonelėje su vandeniu. Po to pagal skyriuje 3.2.1 patektą metodiką nustatomi visų prizmių lenkimo stipriai (20 – 24 pav.).



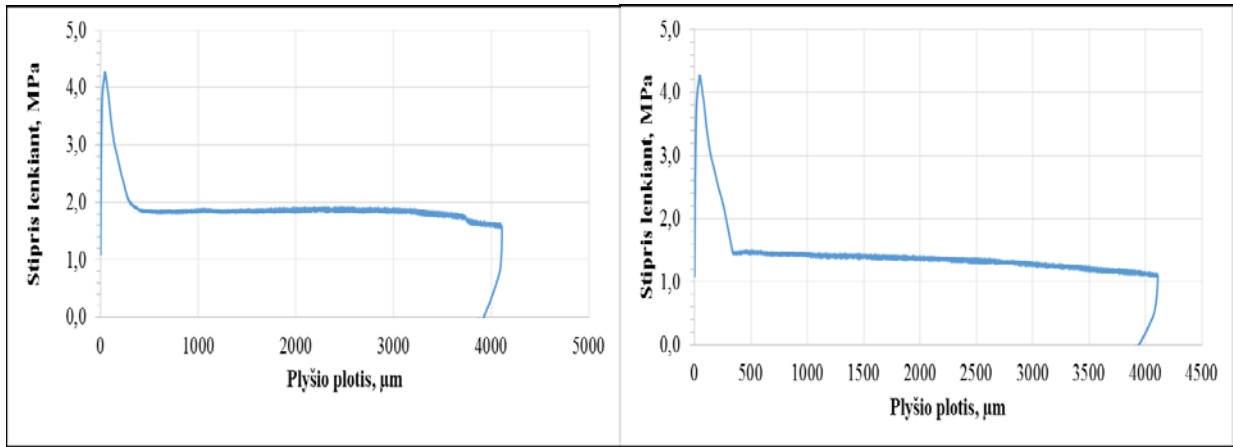
Pav. 20. Lenkimo σ - ϵ diagrama SSB-0.25-2 bandinio



a)

b)

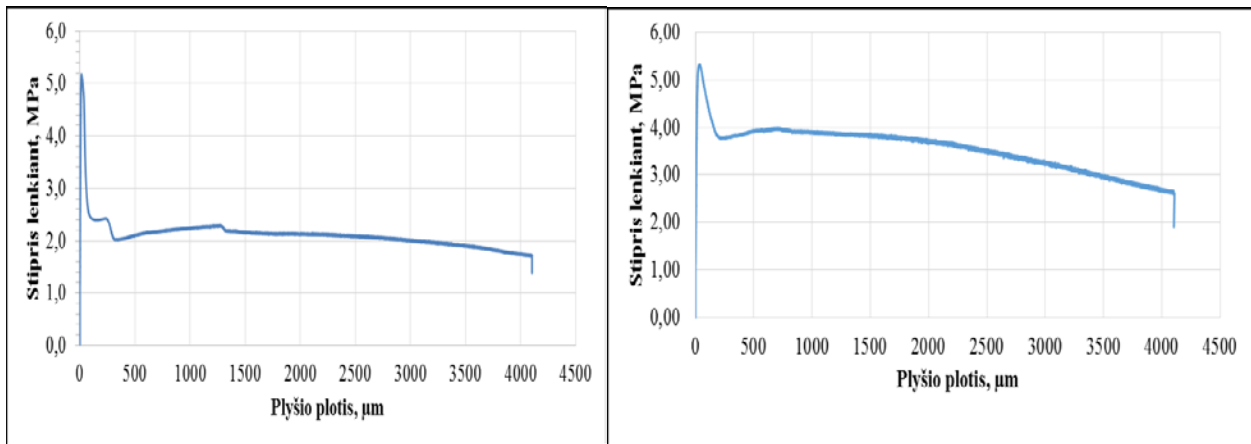
Pav. 21. Lenkimo σ - ϵ diagrama: a) SSB-33.25-1 bandinio, b) SSB-33.25-2 bandinio



a)

b)

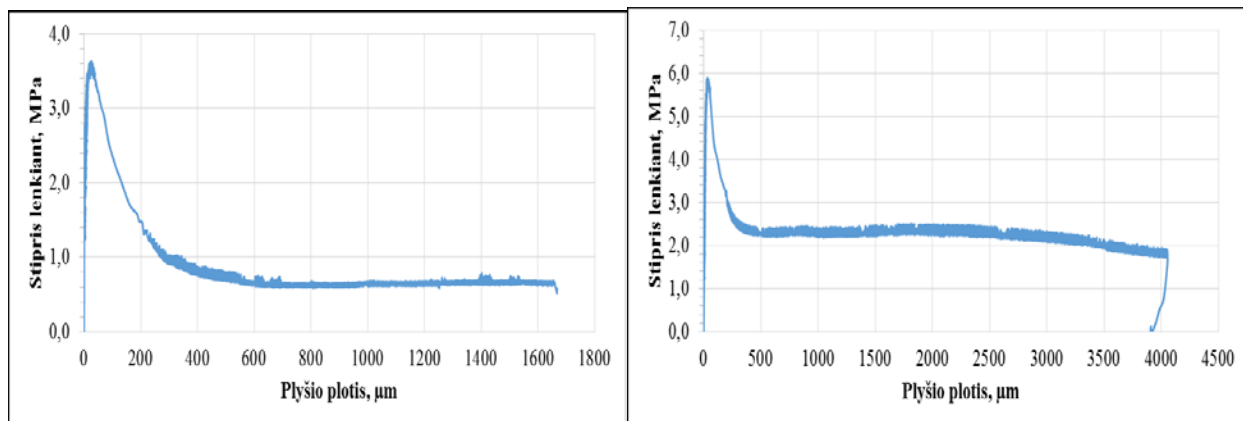
Pav. 22. Lenkimo σ - ε diagrama: a) SSB-66.25-1 bandinio, b) SSB-66.25-2 bandinio



a)

b)

Pav. 23. Lenkimo σ - ε diagrama: a) SSB-100.25-1 bandinio, b) SSB-100.25-2 bandinio



a)

b)

Pav. 24. Lenkimo σ - ε diagrama: a) SSB-133.25-1 bandinio, b) SSB-133.25-2 bandinio

Ekspimento metu elektromagnetinės indukcijos principu veikiančiu prietaisu BSM-100 buvo nustatoma visų prizmių plieninio plaušo orientacija ir koncentracija trimis skirtingomis kryptimis, pagal 3.23 skyrių. Tyrimo duomenys pateikti 8-12 lentelėse.

Lentelė 8. SSB-0.25 bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos tyrimo rezultatai.

Bandinio pavadinimas	Plieninio plaušo koncentracija, kg/m ³	Plieninio plaušo kryptingumas, %				Bandinio matmenys plotis, aukštis, ilgis (mm)	Masė, g	Tūris, l	Tankis, kg/m ³	Bandinių tankį įvertinantis koeficientas	Bandinių dydį įvertinantis koeficientas	Perskaičiuota plaušo koncentracija, kg/m ³		
		X	Y	Z	Suma									
SSB-0.25-1	11,10	37,50	49,20	13,30	100	-	-	-	5776,0	-	-	2,64	1,280	14,21
SSB-0.25-2	11,60	22,20	51,10	26,70	100	115,59	149,18	150,41	5739,0	2,594	2212,73	2,62	1,289	14,95
SSB-0.25-3	16,70	16,40	36,60	47,00	100	-	-	-	5739,0	-	-	2,62	1,289	21,52
SSB-0.25-4	17,60	17,10	36,40	46,50	100	116,12	150,91	151,23	5779,0	2,650	2180,67	2,64	1,280	22,52
SSB-0.25-5	15,70	26,40	31,90	41,70	100	-	-	-	6074,0	-	-	2,77	1,217	19,11
SSB-0.25-6	22,00	25,20	31,20	43,60	100	-	-	-	6034,0	-	-	2,75	1,226	26,96
SSB-0.25-7	20,50	29,60	26,10	44,30	100	113,45	149,28	150,76	5617,0	2,553	2199,95	2,56	1,317	26,99
SSB-0.25-8	19,40	40,00	18,10	41,90	100	-	-	-	5649,0	-	-	2,58	1,309	25,40
SSB-0.25-9	16,20	29,40	23,30	47,30	100	115,78	149,95	150,21	5662,0	2,608	2171,16	2,58	1,306	21,16
SSB-0.25-10	20,60	34,30	31,50	34,20	100	-	-	-	5407,0	-	-	2,47	1,368	28,17
Vidurkis:									2191,13				22,10	

Lentelė 9. SSB-33.25 bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos tyrimo rezultatai.

Bandinio pavadinimas	Plieninio plaušo koncentracija, kg/m ³	Plieninio plaušo kryptis				Bandinio matmenys plotis, aukštis, ilgis (mm)	Masė, g	Tūris, l	Tankis, kg/m ³	Bandinių tankį įvertinantis koeficientas	Bandinių dydį įvertinantis koeficientas	Perskaičiuota plaušo koncentracija, kg/m ³		
		X	Y	Z	Suma									
SSB-33.25-1	17,30	42,2	47,6	10,2	100	124,23	154,87	159,04	6953,0	3,060	2272,20	3,06	1,102	19,06
SSB-33.25-2	31,40	39,1	41,8	19,1	100	131,49	154,58	159,79	7478,0	3,248	2302,36	3,29	1,024	32,16
SSB-33.25-3	30,90	31,8	37,6	30,6	100	124,11	154,50	159,38	6987,0	3,056	2286,27	3,08	1,096	33,88
SSB-33.25-4	31,30	34,5	29,3	36,2	100	132,02	154,73	161,15	7530,0	3,292	2287,32	3,32	1,017	31,84
SSB-33.25-5	23,20	40,3	21,5	38,2	100	124,07	154,36	160,91	7057,0	3,082	2289,87	3,11	1,085	25,18
SSB-33.25-6	20,60	43,4	24,5	32,1	100	123,37	155,23	162,69	7045,0	3,116	2261,28	3,10	1,087	22,40
SSB-33.25-7	20,90	46,7	18,1	35,2	100	128,97	155,59	160,97	7322,0	3,230	2266,87	3,23	1,046	21,86
SSB-33.25-8	17,70	47,2	18,1	34,7	100	127,48	155,70	161,06	7085,0	3,197	2216,20	3,12	1,081	19,14
SSB-33.25-9	15,60	55,3	19,0	25,7	100	131,55	156,89	160,12	7494,0	3,305	2267,65	3,30	1,022	15,95
SSB-33.25-10	10,70	48,2	25,1	26,7	100	124,83	156,11	159,46	6979,0	3,107	2245,84	3,07	1,098	11,74
Vidurkis:									2269,59				23,32	

Lentelė 10. SSB-66.25 bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos tyrimo rezultatai.

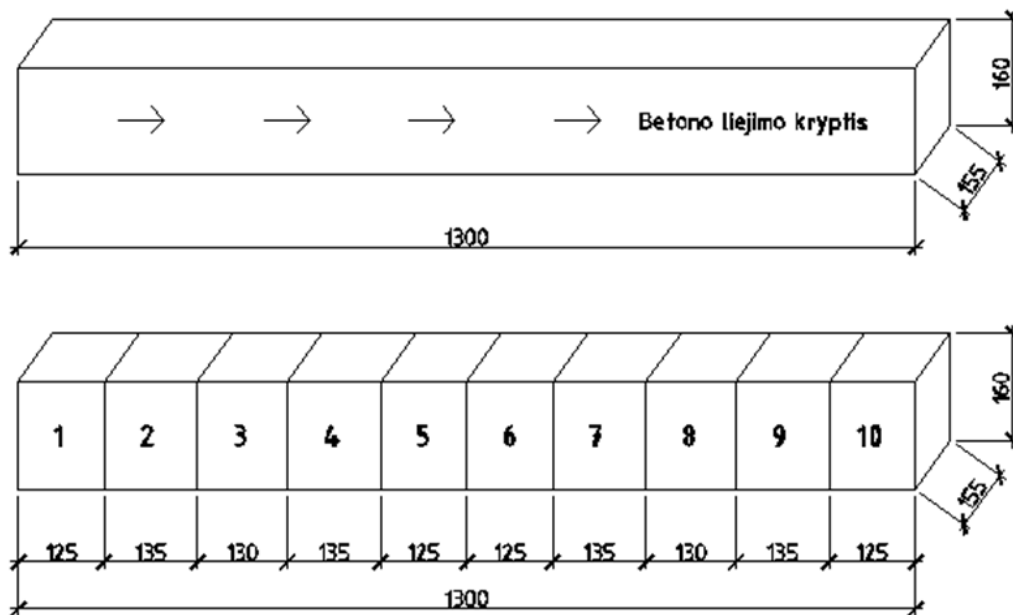
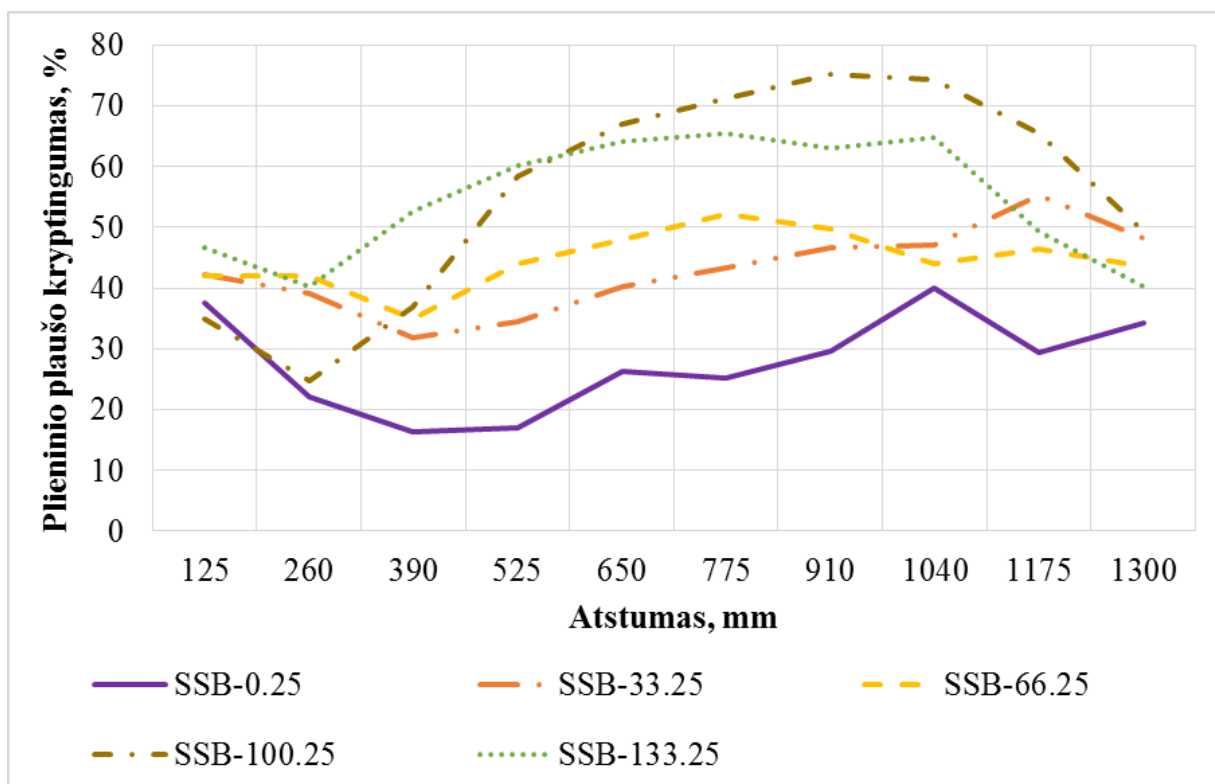
Bandinio pavadinimas	Plieninio plaušo koncentracija, kg/m ³	Plieninio plaušo kryptingumas, %				Bandinio matmenys plotis, aukštis, ilgis (mm)			Masė, g	Tūris, l	Tankis, kg/m ³	Bandinių tankį įvertinantis koeficientas	Bandinių dydį įvertinantis koeficientas	Perskaičiuota plaušo koncentracija, kg/m ³
		X	Y	Z	Suma									
SSB-66.25-1	22,30	41,9	44,5	13,6	100	122,18	159,59	155,11	6935,3	3,024	2293,08	3,05	1,105	24,64
SSB-66.25-2	33,20	42,0	33,6	24,4	100	135,98	159,71	154,67	7797,9	3,359	2321,48	3,43	0,983	32,63
SSB-66.25-3	28,00	35,0	28,4	36,6	100	120,75	160,25	154,31	6813,9	2,986	2282,00	3,00	1,125	31,49
SSB-66.25-4	24,90	44,1	21,3	34,6	100	129,04	160,05	154,47	7393,6	3,190	2317,56	3,26	1,037	25,81
SSB-66.25-5	18,20	48,0	25,8	26,2	100	124,72	160,71	153,79	7122,0	3,083	2310,44	3,14	1,076	19,58
SSB-66.25-6	17,20	52,2	20,1	27,7	100	125,26	160,40	154,64	7098,5	3,107	2284,69	3,13	1,080	18,57
SSB-66.25-7	20,40	49,8	21,1	29,1	100	130,83	160,53	154,67	7483,1	3,248	2303,63	3,30	1,024	20,89
SSB-66.25-8	17,30	43,9	22,1	34,0	100	122,69	161,17	153,49	6826,4	3,035	2249,15	3,01	1,123	19,42
SSB-66.25-9	19,90	46,4	21,4	32,2	100	134,38	161,74	153,11	7566,7	3,328	2273,79	3,33	1,013	20,16
SSB-66.25-10	18,20	43,5	26,8	29,7	100	122,92	160,61	153,52	6279,4	3,031	2071,85	2,77	1,220	22,21
Vidurkis:											2270,77			23,54

Lentelė 11. SSB-100.25 bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos tyrimo rezultatai.

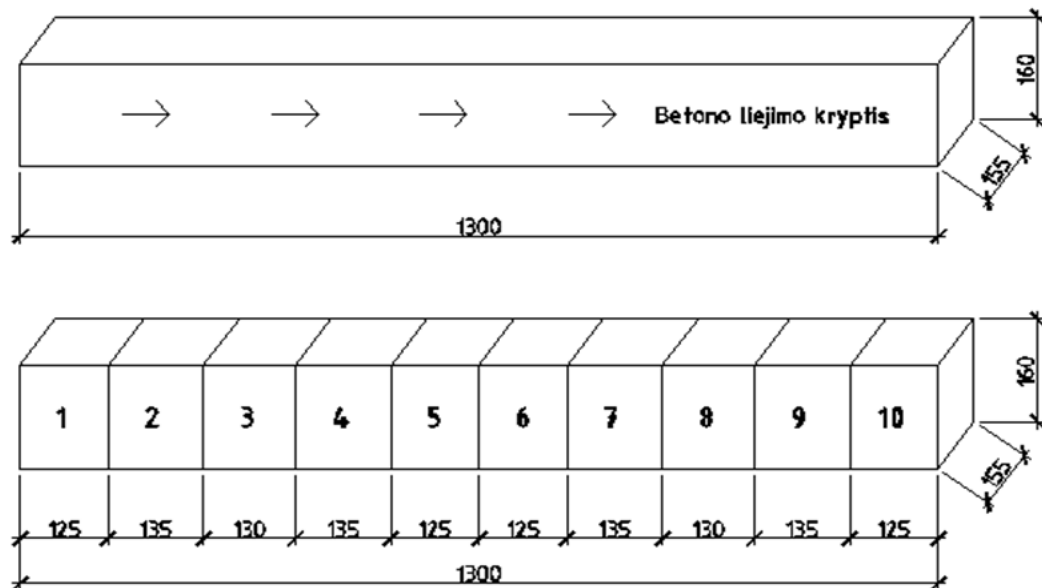
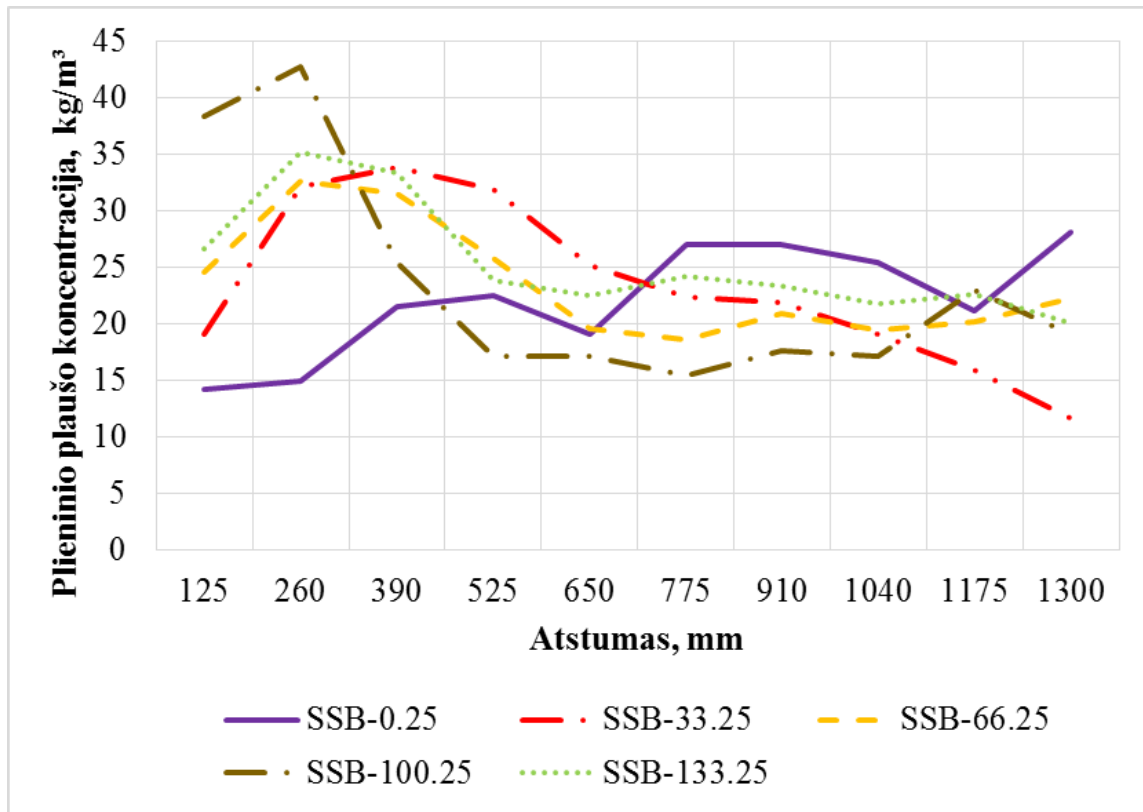
Bandinio pavadinimas	Plieninio plaušo koncentracija, kg/m ³	Plieninio plaušo kryptingumas, %				Bandinio matmenys plotis, aukštis, ilgis (mm)			Masė, g	Tūris, l	Tankis, kg/m ³	Bandinių tankį įvertinantis koeficientas	Bandinių dydį įvertinantis koeficientas	Perskaičiuota plaušo koncentracija, kg/m ³
		X	Y	Z	Suma									
SSB-100.25-1	24,50	35,0	48,4	16,6	100	99,63	149,04	143,99	4997,0	2,138	2337,41	2,16	1,564	38,32
SSB-100.25-2	37,30	24,7	34,0	41,3	100	135,06	149,52	144,01	6819,0	2,908	2345,03	2,94	1,146	42,76
SSB-100.25-3	19,70	36,9	26,4	36,7	100	121,96	150,15	144,83	6043,0	2,652	2278,59	2,61	1,294	25,48
SSB-100.25-4	14,90	58,4	17,9	23,7	100	134,08	150,80	145,42	6781,0	2,940	2306,32	2,93	1,153	17,18
SSB-100.25-5	11,50	66,9	16,1	17,0	100	101,98	150,19	146,02	5222,0	2,236	2335,06	2,25	1,497	17,21
SSB-100.25-6	10,70	71,3	14,2	14,5	100	106,96	150,01	146,25	5402,0	2,346	2302,33	2,33	1,447	15,48
SSB-100.25-7	15,60	75,2	13,4	11,4	100	137,09	150,25	146,22	6926,0	3,012	2299,78	2,99	1,129	17,61
SSB-100.25-8	13,20	74,3	14,6	11,1	100	120,14	150,63	146,15	6015,0	2,645	2274,25	2,60	1,300	17,15
SSB-100.25-9	19,60	65,4	14,0	20,6	100	130,21	150,69	145,78	6677,0	2,860	2334,29	2,88	1,171	22,95
SSB-100.25-10	13,10	49,4	25,8	24,8	100	103,72	150,54	145,79	5344,0	2,276	2347,60	2,31	1,463	19,16
Vidurkis:											2316,06			23,33

Lentelė 12. SSB-133.25 bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos tyrimo rezultatai.

Bandinio pavadinimas	Plieninio plaušo koncentracija, kg/m ³	Plieninio plaušo kryptingumas, %				Bandinio matmenys plotis, aukštis, ilgis (mm)			Masė, g	Tūris, l	Tankis, kg/m ³	Bandinių tankį įvertinantis koeficientas	Bandinių dydį įvertinantis koeficientas	Perskaičiuota plaušo koncentracija, kg/m ³
		X	Y	Z	Suma									
SSB-133.25-1	19,00	46,7	44,7	8,6	100	-	-	-	5675,0	-	-	2,41	1,401	26,62
SSB-133.25-2	24,80	40,3	44	15,7	100	115,91	135,05	151,18	5601,0	2,367	2366,77	2,38	1,420	35,21
SSB-133.25-3	23,50	52,7	34,9	12,4	100				5610,0	-	-	2,38	1,417	33,31
SSB-133.25-4	17,40	60,1	30,4	9,5	100	117,91	138,24	152,75	5791,0	2,490	2325,88	2,46	1,373	23,89
SSB-133.25-5	15,50	64,2	25,6	10,2	100	-	-	-	5470,0	-	-	2,32	1,454	22,53
SSB-133.25-6	18,20	65,5	24,6	9,9	100	-	-	-	5982,0	-	-	2,54	1,329	24,19
SSB-133.25-7	17,20	63,1	23,8	13,1	100	117,02	140,68	150,7	5840,0	2,481	2354,00	2,48	1,362	23,42
SSB-133.25-8	15,60	64,9	20,2	14,9	100	-	-	-	5687,0	-	-	2,41	1,398	21,81
SSB-133.25-9	16,70	49,4	30,1	20,5	100	116,74	140,47	150,44	5864,0	2,467	2376,99	2,49	1,356	22,64
SSB-133.25-10	14,00	40,3	24,9	34,8	100	-	-	-	5547,0	-	-	2,35	1,433	20,07
Vidurkis:											2355,91		25,37	



Pav. 25. Plienio plaušo kryptingumo priklausomybė nuo prizmės ilgio betono mišinio tekėjimo kryptimi bandiniuose



Pav. 26. Plieninio plaušo koncentracijos priklausomybė nuo prizmės ilgio betono mišinio tekėjimo kryptimi bandiniuose

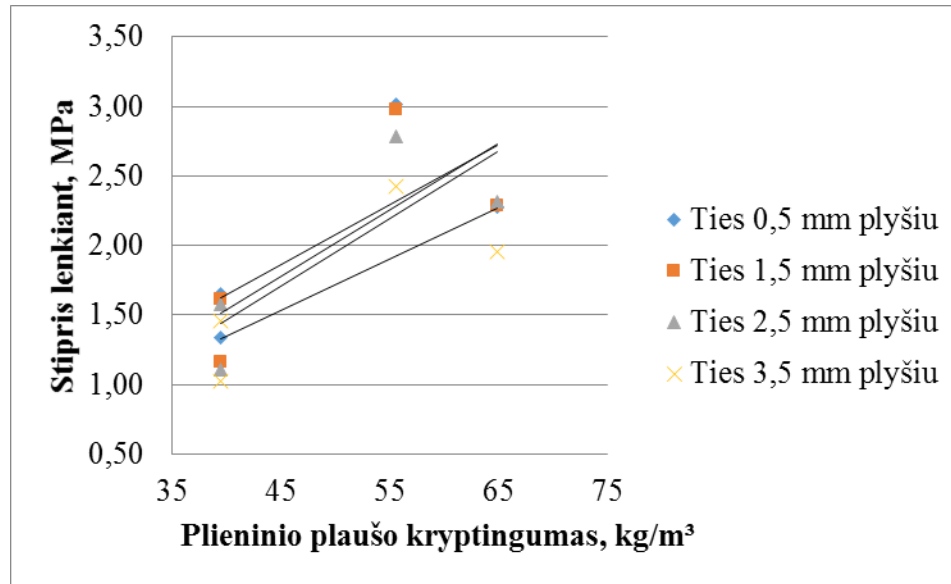
Iš 25 pav. galima teigti, kad plieninio plaušo kryptingumui įtakos turi mišinio nutekėtas atstumas nuo jo pradinio užpylimo taško. Užpylimo pradiniam taške (iki 300mm) plieninis plaušas yra išsidėstęs chaotiškai ir kryptingumas visų kordinačių ašių atžvilgiu yra panašūs (beveik vienodas). Susiformavusioje betono mišinio tēkmėje plieninis plaušas pradeda susiorientuoti kryptingiau tēkmės kryptimi ir maksimalus orientavimasi x ašies atžvilgiu pasiekiamas po 90...100 cm tekėjimo atstumo nuo formos pradžios. Formos gale betono mišinio tēkmė sustoja ir vėl pastebimas mažesnis fibrų orientavimasis x ašies atžvilgiu. Taip pat matoma, kad didėjant stambių užpildų koncentracijai betono mišinyje plieninis plaušas susiformuoja kryptingiau.

Iš 26 pav. pateiktų duomenų galima teigti, kad plieninio plaušo koncentracijai įtakos turi mišinio užpylimo atstumas nuo jo užpylimo pradinio taško, nes didėjant atstumui plieninio plaušo koncentracija mažėja. Taip pat galima daryti išvada, kad kuo daugiau yra stambių užpildų mišinyje tuo netolygiau pasiskirsto plieninis plaušas bandinio ilgyje. Išskyrus bandinį, kuriame nėra stambių užpildų.

Apibendrintus lenkiamojo stiprio ir plieninio plaušo kryptingumo, koncentracijos gautus betono tyrimo rezultatus su kintama stambių užpildų koncentracija pateikiame 13 lentelėje.

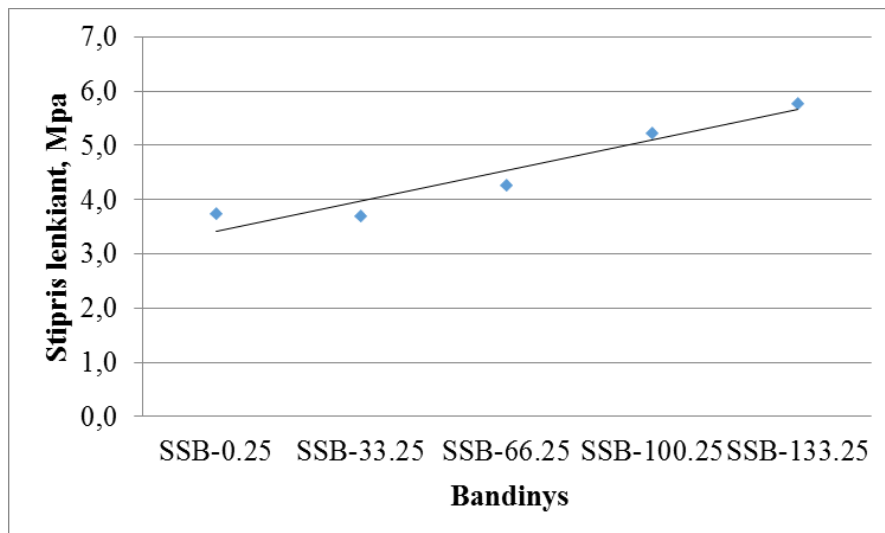
Lentelė 13. Lenkiamojo stiprio, plieninio plaušo kryptingumo ir koncentracijos ties 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 tyrimo duomenys.

Bandinio pavadinimas	Lenkimo stipis, MPa				Bandinio 3 arba 8 plaušo kryptingumas X kryptimi	Plieninio plaušo koncentracija, kg/m ³
	Ties 0,5 mm plyšiu	Ties 1,5 mm plyšiu	Ties 2,5 mm plyšiu	Ties 3,5 mm plyšiu		
SSB-0.25-1	3,60	3,62	3,14	2,74	16,4	21,52
SSB-33.25-1	1,38	1,26	1,22	1,22	31,8	33,88
SSB-33.25-2	1,30	1,07	0,99	0,83	47,2	19,14
SSB-66.25-1	1,85	1,83	1,84	1,75	35,0	31,49
SSB-66.25-2	1,45	1,39	1,31	1,17	43,9	19,42
SSB-100.25-1	2,10	2,15	2,09	1,91	36,9	25,48
SSB-100.25-2	3,92	3,81	3,48	2,95	74,3	17,15
SSB-133.25-2	2,28	2,29	2,32	1,96	64,9	21,81



Pav. 27. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo plieninio pluošto kryptingumo.

Iš 27 pav. matoma, kad lenkimo stipriui įtakos turi plieninio plaušo kryptingumas bandinyje. Didėjant plieninio plaušo kryptingumui, tuo pačiu didėja ir stipris lenkiant.



Pav. 28. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo plieninio pluošto kryptingumo.

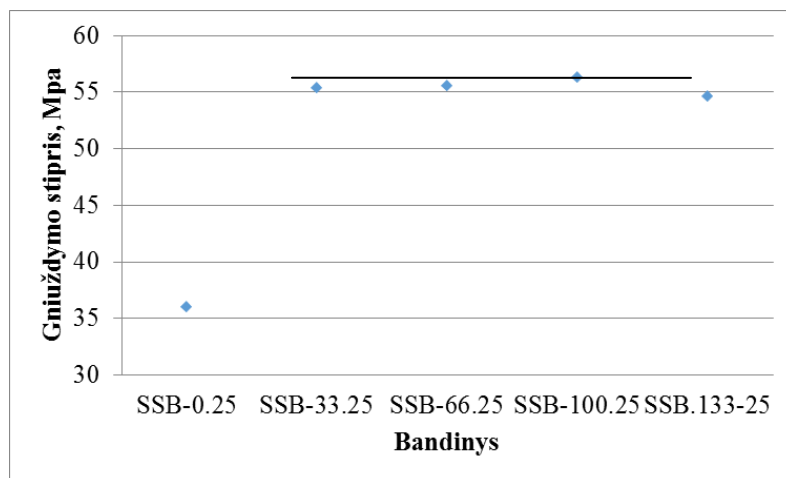
Iš 28 pav. matoma, kad didėjant stambių užpildui kiekiui mišinyje, didėja stipris lenkiant. Tačiau prieš tai buvo pastebėta tendencija, kad didėjant stambių užpildų koncentracijai mišinyje, metalinis plaušas išsidėsto kryptingiau. Todėl galima daryti išvadą, kad plieninio plaušo

kryptingumas turi reikšmingą įtaką lenkimo stipriui ir kuo jis didesnis tuo lenkimo stipris didesnis.

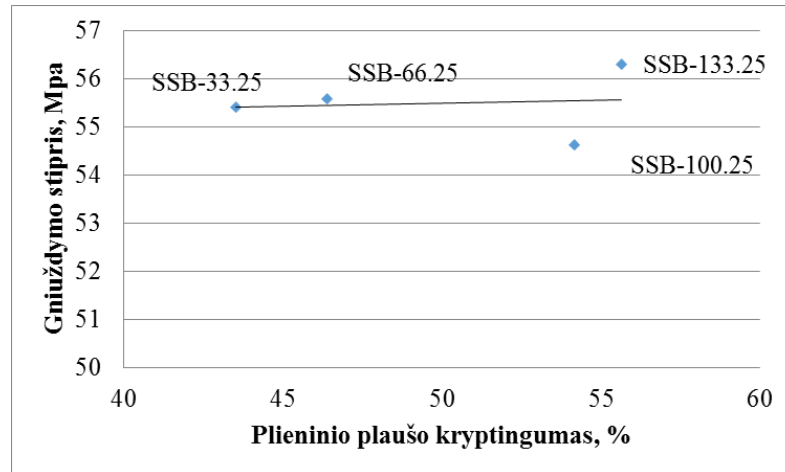
Eksperimentų metu siekiant išsiaiškinti ar kryptingas plieninio plaušo išsidėstymas turi įtakos gniuždymo stipriui, keli bandiniai iš prizmės (130x15x15) buvo sugniuždyti hidrauliniu presu (žiūr. 14 lentelę).

Lentelė 14. Bandinių gniuždymo rezultatai.

Bandinio pavadinimas	Bandinio matmenys, cm		Gniuždymo jėga, kN	Stipris, MPa
	Plotis	Ilgis		
SSB-0.25	115,73	148,94	621,23	36,07
SSB-33.25	126,1	160,15	1116,33	55,40
SSB-66.25	123,62	154,43	1060,75	55,59
SSB-100.25	103,52	146,13	852,94	56,31
SSB-133.25	114,18	137,93	863,33	54,63



Pav. 29. Bandinių gniuždymo stiprio palyginimas.



Pav. 30. Gniuždymo stiprio priklausomybė nuo plieninio plaušo kryptingumo.

Bandiniuose SSB-33.25, SSB-66.25, SSB-100.25, SSB-133.25 kinta stambaus užpildo kiekis mišinyje ir plieninio plaušo kryptingumas. Bandinys SSB-0.25 yra be stambaus užpildo. Todėl galima teigti, kad plieninio plaušo kryptingumas neturi pastebimos įtakos gniuždomajam stipriui. Gniuždymo stipriui įtakos turi stambaus užpildo koncentracija mišinyje. Nustatyta, kad nesant stambaus užpildo mišinyje gniuždymo stipris sumažėjo 1.6 karto.

6. Plieninio plaušo koncentracijos ir orientacijos įtakos betono lenkiamajam stipriui tyrimai

6.1 Tiriamieji objektai

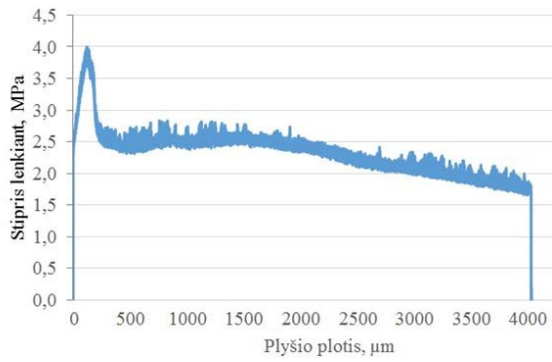
Šio eksperimento tikslas buvo išsiaiškinti ar kintanti plieninio plaušo koncentracija turi įtakos plieninio plaušo kryptingumui ir betono stiprumo savybėms. Buvo pasirinkta iš 5.1 skyriaus viena betono mišinio sudėtis (SSB-66.25), kuri buvo pakoreguota. Vietoje 25 kg/m^3 plieninio plaušo, buvo daromi 4 skirtingi betono mišiniai su $35, 55, 75, 95 \text{ kg/m}^3$ plieninio plaušo kiekiu. Kiekvienam betono mišiniui buvo suformuoti 2 bandiniai ($400 \times 15 \times 15 \text{ cm}$).

Taip pat įstiprinti ar prieš tai skyriuje gauta išvada, kad didėjant plieninio plaušo kryptingumui, didėja lenkiamasis stipris yra teisinga. Buvo paimta betono mišinio sudėtis su 55 kg/m^3 plieninio plaušo ir padaryti trys skirtingi bandiniai (po 2 vienetus) su didėjančiu plieninio plaušo kryptingumu. Į visus bandinius plieninis plaušas buvo sudėtas rankiniu būdu, kad būtų gautas didėjantis kryptingumas. Visų bandinių matmenys – $400 \times 15 \times 15 \text{ cm}$.

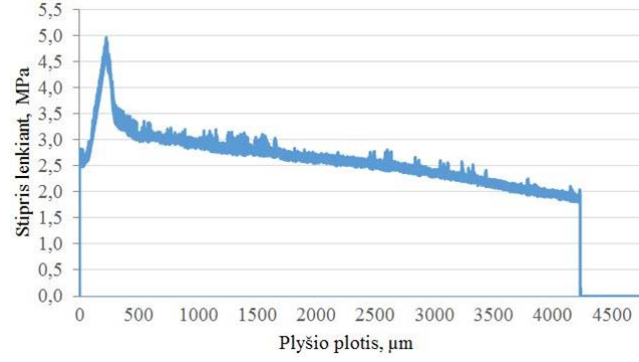
Pakoreguotas prieš tai užduotas bandinių išskirtinis kodas, prirašant raidę B,V,G. B – blogas plieninio plaušo susiorientavimas, V – vidutinis plieninio plaušo susiorientavimas, G – geras plieninio plaušo susiorientavimas.

6.2 Eksperimento eiga ir tyrimo rezultatai

Atliekant eksperimentą buvo suformuoti bandiniai, kurie buvo uždengti ir 2 paras kietinami natūraliose sąlygose 20°C temperatūroje, po to išformuojami ir dar 28 paras paliekami kietinimui standartinėmis kietinimo sąlygomis vonelėje su vandeniu. Gauti visų prizmių lenkimo rezultatai pateikti 31-36 paveikslėliuose.

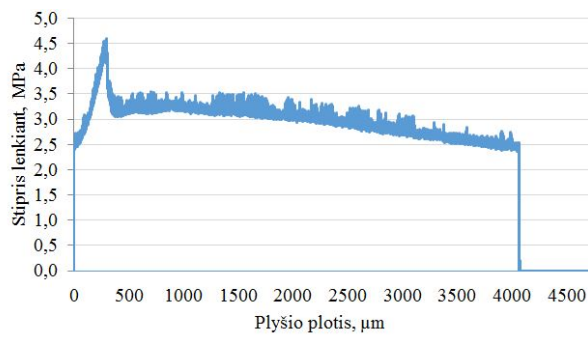


a)

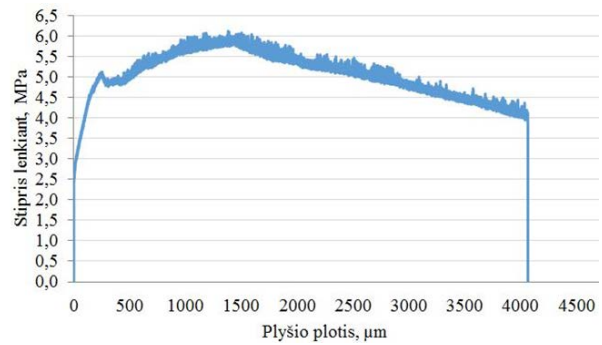


b)

Pav. 31. Lenkimo σ - ε diagrama: a) SSB-66.35-B(1) bandinio, b) SSB-66.35-B(2) bandinio

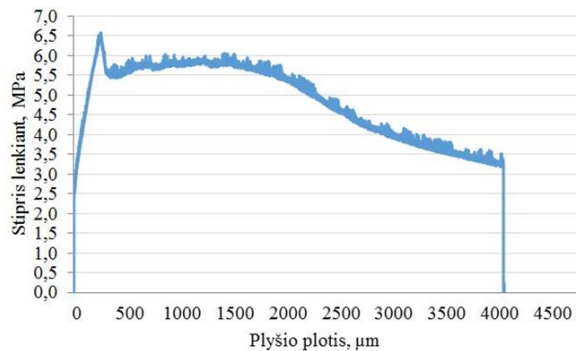


a)

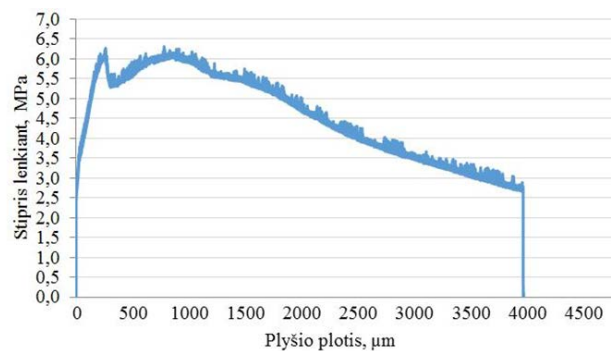


b)

Pav. 32. Lenkimo σ - ε diagram: a) SSB-66.55-B(1) bandinio, b) SSB-66.55-B(2) bandinio

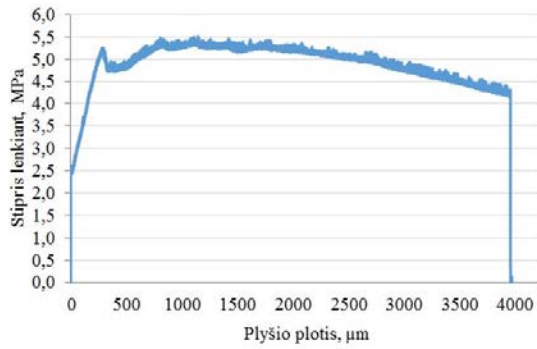


a)

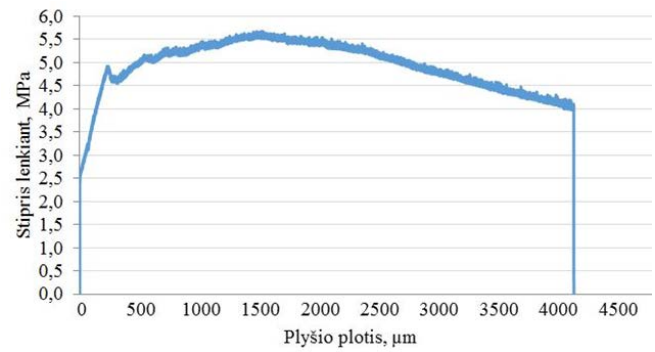


b)

Pav. 33. Lenkimo σ - ε diagrama: a) SSB-66.55-V(1) bandinio, b) SSB-66.55-V(2) bandinio

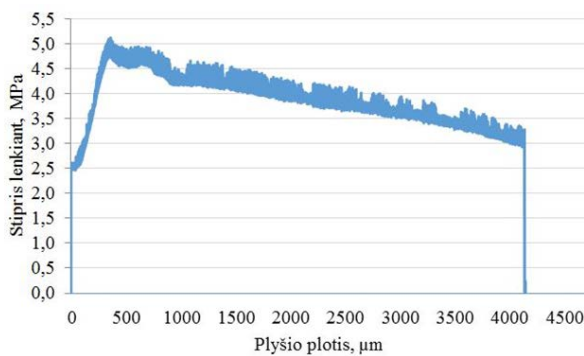


a)

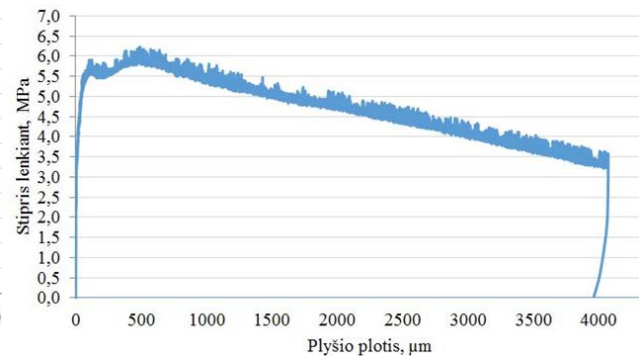


b)

Pav. 34. Lenkimo σ - ε diagrama: a) SSB-66.55-G(1) bandinio, b) SSB-66.55-G(2) bandinio

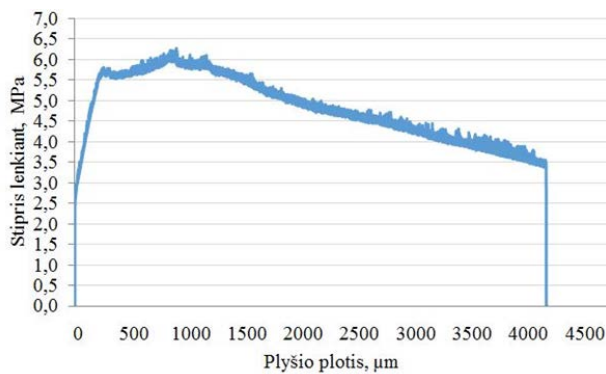


a)

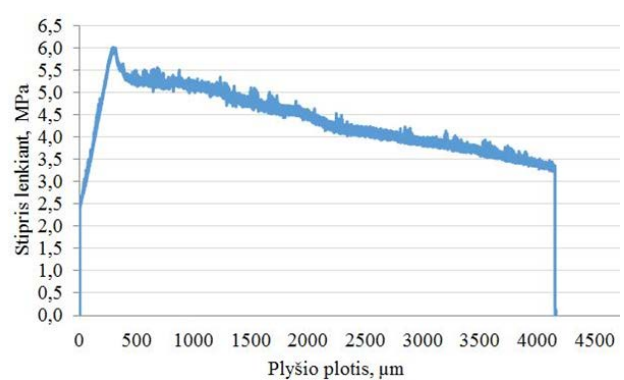


b)

Pav. 35. Lenkimo σ - ε diagrama: a) SSB-66.75-B(1) bandinio, b) SSB-66.75-B(2) bandinio



a)



b)

Pav. 36. Lenkimo σ - ε diagrama: a) SSB-66.95-B(1) bandinio, b) SSB-66.95-B(2) bandinio

Eksperto metu elektromagnetinės indukcijos principu veikiančiu prietaisu BSM-100 buvo nustatoma visų prizmių plieninio plaušo orientacija ir koncentracija, kaip aprašyta 3.23 skyriuje. Tyrimo duomenys pateikti 15 – 18 lentelėse.

Lentelė 15. SSB-66.35-B(1) ir SSB-66.35-B(2) bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos rezultatai.

Bandino pavadinimas	Plieninio plaušo koncentracija, kg/m ³	Plieninio plaušo kryptingumas, %				Bandinio matmenys plotis, aukštis, ilgis (mm)			Masė, g	Tūris, l	Tankis, kg/m ³	Bandinių tūrį nuo tankio vidurkio įvertinantis koeficientas	Bandinių dydį įvertinantis koeficientas	Perskaičiuota plaušo koncentracija, kg/m ³
		X	Y	Z	Suma									
SSB-66.35-B(1)-1	10,40	55,7	31,9	12,4	100,0	129,78	97,42	100,33	2900	1,268	2286,18	1,271	2,656	33,15
SSB-66.35-B(1)-2	11,20	66,6	17,9	15,6	100,1	-	-	-	3084	-	-	1,351	2,498	33,57
SSB-66.35-B(1)-3	11,80	58,7	24,7	16,5	99,9	125,37	97,99	100,38	2836	1,233	2299,77	1,243	2,716	38,46
SSB-66.35-B(2)-1	9,80	47,6	35,7	16,8	100,1	130,40	95,79	101,27	2858	1,265	2259,35	1,252	2,695	31,70
SSB-66.35-B(2)-2	11,00	54,5	35,1	10,4	100,0	-	-	-	2960	-	-	1,297	2,602	34,35
SSB-66.35-B(2)-3	12,40	38,2	43,9	17,9	100,0	129,72	96,58	101,18	2896	1,268	2284,60	1,269	2,660	39,58
Vidurkis:											2282,47			35,14

Lentelė 16. SSB-66.75-B(1) ir SSB-66.75-B(2) bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos rezultatai.

Bandino pavadinimas	Plieninio plaušo koncentracija, kg/m ³	Plieninio plaušo kryptingumas, %				Bandinio matmenys plotis, aukštis, ilgis (mm)			Masė, g	Tūris, l	Tankis, kg/m ³	Bandinių tūrį nuo tankio vidurkio įvertinantis koeficientas	Bandinių dydį įvertinantis koeficientas	Perskaičiuota plaušo koncentracija, kg/m ³
		X	Y	Z	Suma									
SSB-66.75-B(1)-1	23,00	48,10	29,60	22,30	100,0	128,77	98,05	100,76	2986	1,272	2347,14	1,268	2,662	73,47
SSB-66.75-B(1)-2	24,00	50,80	30,10	19,10	100,0	-	-	-	3110	-	-	1,320	2,556	73,61
SSB-66.75-B(1)-3	25,30	43,90	30,50	25,60	100,0	128,10	96,18	99,83	2912	1,230	2367,53	1,236	2,730	82,88
SSB-66.75-B(2)-1	24,50	47,20	27,80	25,00	100,0	129,19	96,74	101,23	2972	1,265	2349,12	1,262	2,675	78,63
SSB-66.75-B(2)-2	24,40	57,30	26,20	16,60	100,1	-	-	-	3130	-	-	1,329	2,540	74,36
SSB-66.75-B(2)-3	26,20	50,30	31,40	18,20	99,9	128,59	97,19	102,35	3014	1,279	2356,28	1,280	2,637	82,92
Vidurkis:											2355,27			77,65

Lentelė 17. SSB-66.55-B(1), SSB-66.55-B(2), SSB-66.55-V(1), SSB-66.55-V(2), SSB-66.55-G(1) ir SSB-66.55-G(2) bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos rezultatai.

Bandino pavadinimas	Plieninio plaušo koncentracija, kg/m ³	Plieninio plaušo kryptingumas, %				Bandinio matmenys plotis, aukštis, ilgis (mm)			Masė, g	Tūris, l	Tankis, kg/m ³	Bandinių tūri nuo tankio vidurkio įvertinantis koeficientas	Bandinių dydį įvertinantis koeficientas	Perskaičiuota plaušo koncentracija, kg/m ³
		X	Y	Z	Suma									
SSB-66.55-G(1)-1	20,60	91,9	4,5	3,6	100,0	138,54	97,13	101,64	3182	1,368	2326,52	1,368	2,468	61,00
SSB-66.55-G(1)-2	18,50	91,4	4,7	4,0	100,1	-	-	-	2936	-	-	1,262	2,675	59,38
SSB-66.55-G(1)-3	19,20	91,2	4,8	4,0	100,0	139,48	95,31	100,76	3188	1,339	2380,02	1,370	2,463	56,75
SSB-66.55-B(1)-1	18,70	50,7	36,4	13,0	100,1	129,44	97,86	100,44	2948	1,272	2317,11	1,267	2,664	59,77
SSB-66.55-B(1)-2	15,30	62,9	24,3	12,8	100,0	-	-	-	3118	-	-	1,340	2,518	46,24
SSB-66.55-B(1)-3	12,70	55,8	33,2	11,0	100,0	128,41	99,11	101,30	3000	1,289	2327,00	1,289	2,618	39,89
SSB-66.55-B(2)-1	22,00	53,4	27,3	19,3	100,0	129,40	96,84	100,70	2926	1,262	2318,76	1,258	2,684	70,85
SSB-66.55-B(2)-2	20,50	59,1	23,1	17,8	100,0	-	-	-	3088	-	-	1,327	2,543	62,56
SSB-66.55-B(2)-3	20,00	48,5	32,6	18,9	100,0	128,28	98,45	100,11	2976	1,264	2353,86	1,279	2,639	63,33
SSB-66.55-V(1)-1	22,10	81,3	14,5	4,2	100,0	142,87	101,93	101,96	3418	1,485	2301,97	1,469	2,297	60,93
SSB-66.55-V(1)-2	17,40	82,9	12,7	4,4	100,0	-	-	-	2966	-	-	1,275	2,648	55,28
SSB-66.55-V(1)-3	18,20	83,1	12,5	4,3	99,9	138,38	101,47	101,53	3308	1,426	2320,39	1,422	2,374	51,84
SSB-66.55-V(2)-1	18,20	81,2	13,9	4,9	100,0	140,13	105,55	101,22	3438	1,497	2296,41	1,478	2,284	49,88
SSB-66.55-V(2)-2	19,00	83,0	12,5	4,5	100,0	-	-	-	3128	-	-	1,344	2,510	57,24
SSB-66.55-V(2)-3	20,50	79,7	16,1	4,2	100,0	138,12	104,93	100,77	3370	1,460	2307,50	1,448	2,330	57,32
SSB-66.55-G(2)-1	18,00	91,6	4,9	3,5	100,0	140,52	98,07	101,43	3240	1,398	2317,95	1,393	2,424	52,35
SSB-66.55-G(2)-2	19,00	91,8	4,4	3,9	100,1	-	-	-	2960	-	-	1,272	2,653	60,49
SSB-66.55-G(2)-3	20,80	90,6	5,2	4,2	100,0	137,25	98,25	100,62	3192	1,357	2352,52	1,372	2,460	61,40
Vidurkis:											2326,67			57,03

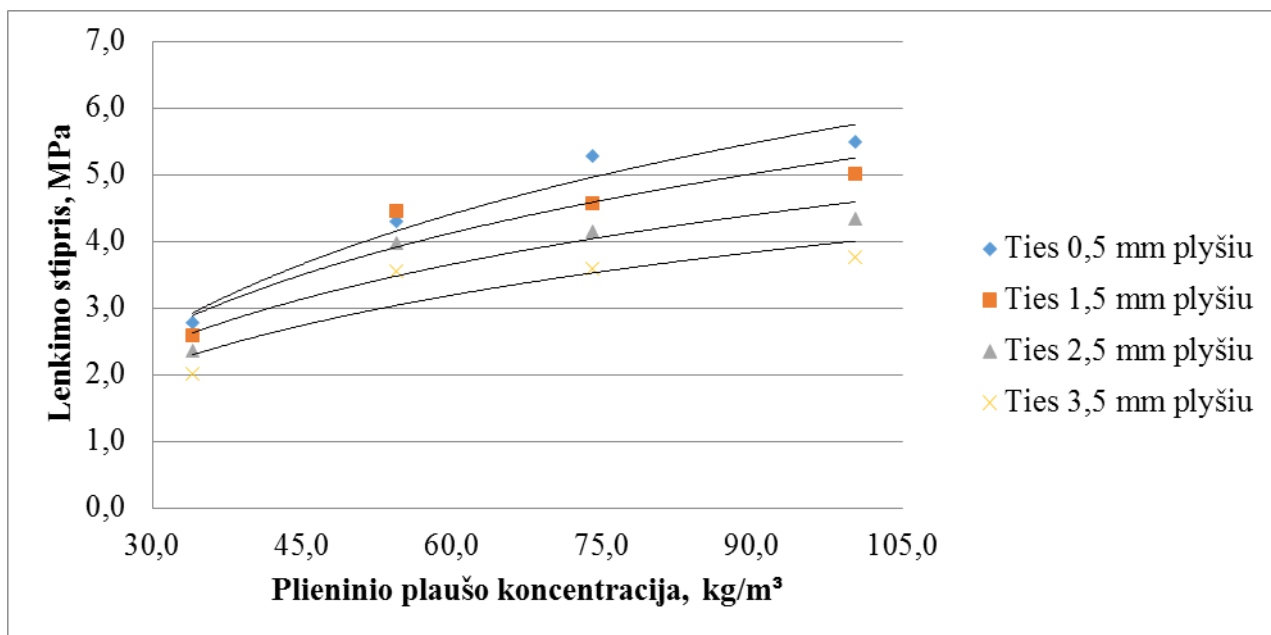
Lentelė 18. SSB-66.95-B(1) ir SSB-66.95-B(2) bandiniuose esančio plieninio plaušo orientacijos ir koncentracijos rezultatai.

Bandino pavadinimas	Plieninio plaušo koncentracija, kg/m ³	Plieninio plaušo kryptingumas, %				Bandinio matmenys plotis, aukštis, ilgis (mm)			Masė, g	Tūris, l	Tankis, kg/m ³	Bandinių tūrį nuo tankio vidurkio įvertinantis koeficientas	Bandinių dydį įvertinantis koeficientas	Perskaičiuota plaušo koncentracija, kg/m ³
		X	Y	Z	Suma									
SSB-66.95-B(1)-1	30,4	48,9	33	18,2	100,1	128,64	100,49	102,12	3092	1,320	2342,23	1,317	2,562	93,45
SSB-66.95-B(1)-2	36,2	50,7	36,5	12,7	99,9	-	-	-	3266	-	-	1,392	2,425	105,35
SSB-66.95-B(1)-3	29,9	48,2	38	13,8	100,0	126,23	100,03	100,59	2948	1,270	2321,03	1,256	2,687	96,41
SSB-66.95-B(2)-1	28,6	53,3	31,4	15,3	100,0	129,05	98,22	100,55	2970	1,275	2330,32	1,265	2,667	91,53
SSB-66.95-B(2)-2	31,9	53,8	30,8	15,4	100,0	-	-	-	3190	-	-	1,359	2,483	95,05
SSB. /66.95-B(2)-3	25,2	51,7	35,8	12,4	99,9	127,32	98,41	101,07	3032	1,266	2394,26	1,292	2,612	79,00
Vidurkis:											2346,96			93,47

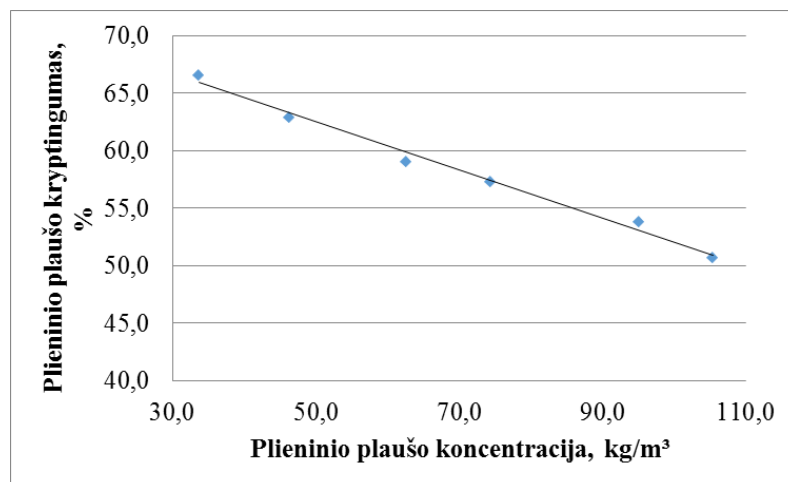
Apibendrinti lenkiamojo stiprio ir plieninio plaušo kryptingumo, koncentracijos gauti rezultatai pateikiami 19 lentelėje.

Lentelė 19. Lenkiamojo stiprio, plieninio plaušo kryptingumo ir koncentracijos ties 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 plyšiu tyrimo duomenys.

Bandinio pavadinimas	Lenkimo stipris, MPa				Bandinio plieninio plaušo kryptingumas X kryptimi	Plieninio plaušo koncentracija
	Ties 0,5 mm plyšiu	Ties 1,5 mm plyšiu	Ties 2,5 mm plyšiu	Ties 3,5 mm plyšiu		
SSB/66.35-B1	2,51	2,51	2,23	1,90	66,60	33,57
SSB/66.35-B2	3,02	2,66	2,44	2,10	54,50	34,35
Vidurkis:	2,77	2,59	2,34	2,00	60,55	33,96
SSB/66.55-B1	3,21	3,23	2,91	2,58	62,90	46,24
SSB/66.55-B2	5,37	5,68	5,00	4,50	59,10	62,56
Vidurkis:	4,29	4,46	3,96	3,54	61,00	54,40
SSB/66.75-B1	4,58	4,12	3,73	3,42	50,08	73,61
SSB/66.75-B2	5,94	5,03	4,51	3,73	57,30	74,36
Vidurkis:	5,26	4,58	4,12	3,58	53,69	73,99
SSB/66.95-B1	5,76	5,36	4,60	3,89	50,70	105,35
SSB/66.95-B2	5,20	4,68	4,05	3,61	53,80	95,05
Vidurkis:	5,48	5,02	4,33	3,75	52,25	100,20



Pav. 37. Lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo plieninio plaušo koncentracijos ties 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 plyšiu.



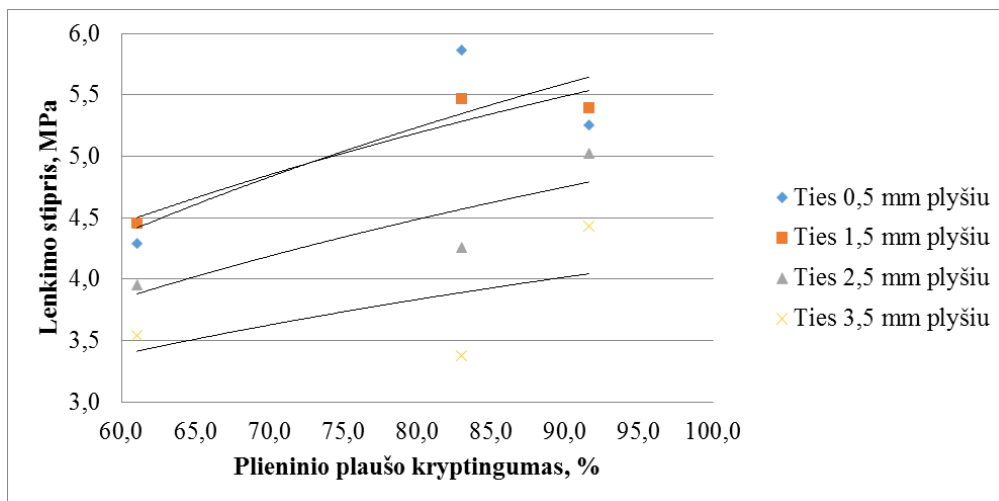
Pav. 38. Plieninio plaušo kryptingumo priklausomybė nuo plienio plaušo koncentracijos.

Matoma (37 pav), kad plieninio plaušo koncentracija turi reikšmingą įtaką betono lenkimo stipriui. Didėjant plieninio plaušo koncentracijai bandiniuose, taip pat didėja ir betono lenkimo stipris. Taip pat iš 38 pav. galima daryti išvada, kad plieninio plaušo koncentracija neigiamai įtakoja plieninio plaušo kryptingumą. Kuo didesnė koncentracija, tuo plieninis plaušas išsidėsto netvarkingiau.

Apibendrinant lenkiamojo stiprio ir plieninio plaušo kryptingumo, koncentracijos gautus tyrimo rezultatus su skirtinga plieninio plaušo orientacija pateikiama 20 lentelėje.

Lentelė 20. Lenkiamojo stiprio, plieninio plaušo kryptingumo ir koncentracijos ties 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 plyšiu tyrimo duomenys.

Bandinio pavadinimas	Lenkimo stipis, MPa				Bandinio plieninio plaušo kryptingumas X kryptimi	Plieninio plaušo koncentracija
	Ties 0,5 mm plyšiu	Ties 1,5 mm plyšiu	Ties 2,5 mm plyšiu	Ties 3,5 mm plyšiu		
SSB/66.55-B1	3,21	3,23	2,91	2,58	62,90	46,24
SSB/66.55-B2	5,37	5,68	5,00	4,50	59,10	62,56
Vidurkis:	4,29	4,46	3,96	3,54	61,00	54,40
SSB/66.55-V1	5,73	5,63	4,52	3,60	82,90	55,28
SSB/66.55-V2	6,00	5,31	4,00	3,15	83,00	57,24
Vidurkis:	5,87	5,47	4,26	3,38	82,95	56,26
SSB/66.75-G1	5,28	5,30	5,04	4,50	91,40	59,38
SSB/66.75-G2	5,23	5,49	5,01	4,37	91,80	60,49
Vidurkis:	5,26	5,40	5,03	4,44	91,60	60,49



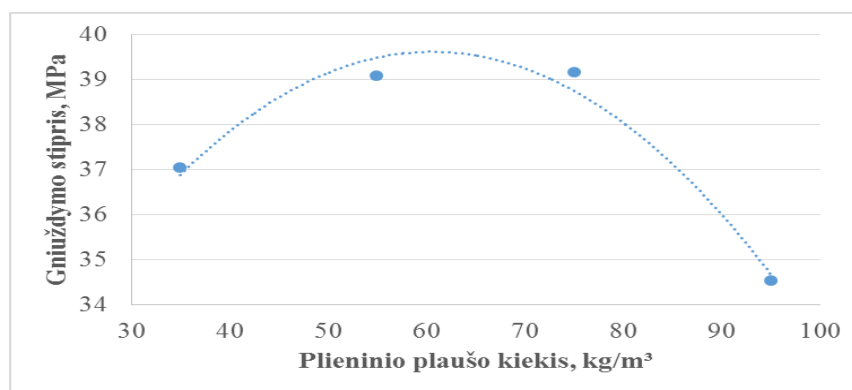
Pav. 39. Lenkimo stiprio priklausomybė nuo plieninio plaušo kryptingumo ties 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 plyšiu.

Plieninio plaušo kryptingumas įtakoja betono lenkiamąjį stiprį. Didėjant kryptingumui, proporcingai didėja ir betono lenkiamasis stipris (39 pav.). Šie rezultatai atitinka 5.2 skyriui gauta išvada, todėl betonavimui naudojant susitankinantį betoną armuota plieniniu plaušu reiktų siekti, kad plieninis plaušas išsidėstytų orientuotai.

Nustačius lenkiamąjį ir plieninio plaušo kryptingumą bei orientaciją visi bandiniai buvo dar sugniuždyti hidrauliniu presu, siekiant įvertinti plieninio plaušo koncentracijos ir orientacijos betono gniuždomajam stipriui įtaką. Gniuždymo rezultatai bandinių su skirtingu plieninio plaušo koncentracija pateikti 21 lentelėje.

Lentelė 21. Bandinių SSB-66.35-B(1,2), SSB-66.55-B(1,2), SSB-66.75-B(1,2), SSB-66.95-B(1,2), gniuždymo rezultatai.

Bandinio pavadinimas	Bandinio matmenys		Gniuždymo jėga kN	Stipris MPa
	Plotis, mm	Ilgis, mm		
SSB-66.35-B(1)-1	129,78	97,42	532,80	42,14
SSB-66.35-B(1)-3	125,37	97,99	404,90	32,96
SSB-66.35-B(2)-1	130,04	95,79	483,00	38,77
SSB-66.35-B(2)-3	129,72	96,58	428,90	34,23
Vidurkis:				37,03
SSB-66.55-B(1)-1	129,44	97,86	523,30	41,31
SSB-66.55-B(1)-3	128,41	99,11	418,30	32,87
SSB-66.55-B(2)-1	129,40	96,84	519,80	41,48
SSB-66.55-B(2)-3	128,28	98,45	513,20	40,64
Vidurkis:				39,07
SSB-66.75-B(1)-1	128,77	98,05	411,10	32,56
SSB-66.75-B(1)-3	128,10	96,18	491,10	39,86
SSB-66.75-B(2)-1	129,19	96,74	534,50	42,77
SSB-66.75-B(2)-3	129,19	96,74	518,20	41,46
Vidurkis:				39,16
SSB-66.95-B(1)-1	128,64	100,49	524,10	40,54
SSB-66.95-B(1)-3	126,23	100,03	393,00	31,12
SSB-66.95-B(2)-1	129,05	98,22	394,20	31,10
SSB-66.95-B(2)-3	127,32	98,41	443,20	35,37
Vidurkis:				34,53



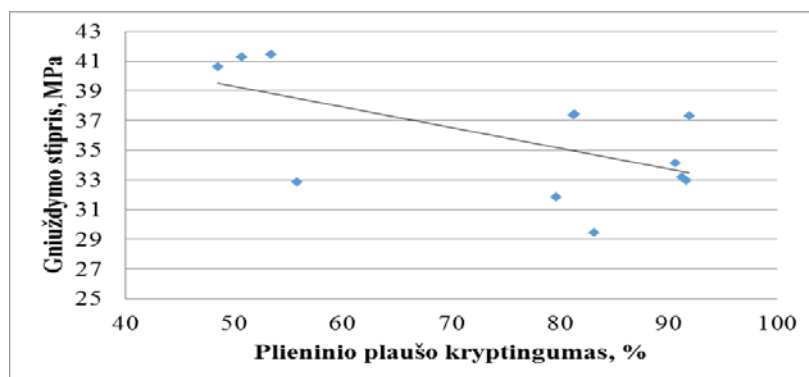
Pav. 40. Gniuždymo stiprio priklausomybė nuo plieninio plaušo koncentracijos.

Gauti rezultatai (40 pav.) parodė, kad plieninio plaušo koncentracija įtakoja gniuždymo stiprį. Esant per dideliam arba mažam plieno plaušo koncentracijai betono gniuždymo stipris mažėja.

Gniuždymo rezultatai bandinių su kintamu plieninių plaušų orientacija pateikta 22 lentelėje.

Lentelė 22. Bandinių SSB-66.55-B(1,2), SSB-66.55-V(1,2), SSB-66.55-G(1,2) gniuždymo rezultatai.

Bandinio pavadinimas	Bandinio matmenys, mm		Gniuždymo jėga kN	Stipris MPa
	Plotis	Ilgis		
SSB-66.55-B(1)-1	129,44	97,86	523,3	41,31
SSB-66.55-B(1)-3	128,41	99,11	418,3	32,87
SSB-66.55-B(2)-1	129,4	96,84	519,8	41,48
SSB-66.55-B(2)-3	128,28	98,45	513,2	40,64
Vidurkis:				39,07
SSB-66.55-V(1)-1	142,87	101,93	545,5	37,46
SSB-66.55-V(1)-3	138,38	101,47	413,7	29,46
SSB-66.55-V(2)-1	140,13	105,55	553,4	37,42
SSB-66.55-V(2)-3	138,12	104,93	461,8	31,86
Vidurkis:				34,05
SSB-66.55-G(1)-1	138,54	97,13	502,7	37,36
SSB-66.55-G(1)-3	139,48	95,31	441,8	33,23
SSB-66.55-G(2)-1	140,52	98,07	454,5	32,98
SSB-66.55-G(2)-3	137,25	98,25	460,7	34,16
Vidurkis:				34,43



Pav. 41. Gniuždymo stiprio priklausomybė nuo plieninio plaušo kryptingumo.

Iš 41 pav. galima teigti, kad plieninio plaušo kryptingumas įtakoja gniuždymo stiprį. Didėjant plieninio plaušo kryptingumui, gniuždymo stipris mažėja.

7. Magistrinio darbo išvados

1. Nustatyta, kad didinant stambių užpildų koncentraciją susitankinančiame armuotame plieniniu plaušu betone didėja jo uždaras poringumas ir atsparumas šalčiui iki 1,8 karto.
2. Stambių užpildų koncentracija mišinyje įtakoja betono gniuždomąjį stiprį ir iki 44 % stambių užpildų tūrinės koncentracijos mišinyje gniuždomasis stipris didėja, ją didinant pradeda mažėti. Didžiausias gniuždymo stipris (54,36 MPa) gautas mišinio, SSB-66.25, kurio stambių užpildų tūrinė koncentracija yra 44 %.
3. Nustatyta, kad plieninio plaušo kryptingumui įtakos turi mišinio tekėjimo atstumas nuo jo pradinio taško. Didėjant atstumui plieninis plaušas kryptingiau susiorientuoja mišinio tėkmės kryptimi. Didžiausias plieninio plaušo orientacija X ašiai gauta 75,2 %, esant 100 cm atstumui nuo pradinio betono mišinio užpylimo taško.
4. Tyrimo metu nustatyta, kad didėjant stambių užpildų koncentracijai mišinyje plieninio plaušo kryptingumas didėja ir gali susiorientuoti X kryptimi iki 2 kartų geriau. Bandinio SSB/0.25 plieninio plaušo orientacija X kryptimi 27,8 %, o bandinio SSB/133.25 54,7 %. Tačiau kuo daugiau yra stambių užpildų mišinyje tuo netolygiau pasiskirsto plieninis plaušas visame formos ilgyje.
5. Nustatyta tendencija, kad didėjant plieninio plaušo kryptingumui didėja lenkiamasis stipris ir jeigu plieninis plaušas išsidėsto kryptingai lenkimo stipris padidėja 1,6 karto. Bandinio SSB/33.25 lenkimo stipris 3,7 MPa, plieninio plaušo orientacija X kryptimi 39,5 %, bandinio SSB/133.25 lenkimo stipris 5,8 MPa, plieninio plaušo orientacija X kryptimi 58,8 %.
6. Iš gautų tyrimo rezultatų galima daryti išvada, kad kryptingas plieninių plaušų susiorientavimas neigiamai įtakoja gniuždymo stiprį ir esant neorientuotam plieniniui plaušui gniuždymo stipris yra gaunamas didesnis. Taip pat gniuždymo stiprį įtakoja plieninio plaušo koncentracija mišinyje ir iki 75 kg/m³ plieninio plaušo koncentracijos stipris didėja.
7. Naudojant betonavimo darbams susitankinantį armuotą plieniniu plaušu betono mišinį, būtina įvertinti jo užpylimo sąlygas, nes mišinio tėkmėje gali susiformuoti didesnė plieninio plaušo orientacija mišinio tėkmės kryptimi, gali ženkliai kisti plieninio plaušo koncentracija gaminio skirtingose vietose. Šie veiksniai gali turėti tiek neigiamos tiek teigiamos įtakos gelžbetoninių konstrukcijų mechanėms savybėms, todėl juos būtina įvertinti betono mišinio formavimo metu ir tikslingai sumodeliuoti norint pasiekti efektyvų rezultatą.

Literatūra

1. Gintaris Kaklauskas, Darius Bačinskas, Viktor Gribniak, Ronaldas Jakubovskis, Darius Ulbinas, Eugenijus Gudonis, Adas Meškėnas, Edgaras Timinskas, Aleksandr Sokolov “Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos” vadovėlis;
2. Klaus Holschemacher, Torsten Müller “Influence of fibre type on hardened properties of steel, fibre reinforced concrete”. Leipzig University of Applied Sciences (HTWK Leipzig), Department of civil Engineering;
3. E. V. Sarmiento, M. A. N. Hendriks, T. Kanstad “Accounting for the fibre orientation on the structural performance of fibre reinforced concrete”. Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU);
4. Švec O., Žirgulis G., Bolander J. E., and Stang H. „Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements“. Cement and Concrete Composites, 2014.Vol. 50: p. 60-72.;
5. Giedrius Žirgulis, Oldrich Švec, Mette Rica Geiker, Andrzej Cwirzen, Terje Kanstad “Influence of reinforcement bar layout on fibre orientation and distribution in slabs cast from fibre – reinforced self - compacting concrete”. Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU);
6. A. Miettinen, C. L. Luengo Hendriks, G. Chinga-Carrasco, E.K. Gamstedt, and M. Kataja, “A non-destructive X-ray microtomography approach for measuring fibre length in short-fibre composites,” Compos. Sci. Technol., vol. 72, no. 15, pp. 1901–1908, Oct. 2012;
7. A. Orbe, E. Rojí, R. Losada, and J. Cuadrado “Calibration patterns for predicting residual strengths of steel fibre reinforced concrete (SFRC),” Compos. Part B Eng., vol. 58, pp. 408–417, Mar. 2014;
8. D. Dupont and L. Vandewalle “Distribution of steel fibres in rectangular sections,” Cem. Concr. Compos., vol. 27, no. 3, pp. 391–398, Mar. 2005;
9. Martinie L, Roussel N. “Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice”. Cem Concr Res 2011;41(10):993–1000;

10. D.Y. Yoo, S.T. Kang, and Y.S. Yoon, "Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC," *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 67–81, Aug. 2014;
11. M. C. Torrijos, B. E. Barragán, and R. L. Zerbino, "Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 6, pp. 1078–1085, Jun. 2010;
12. B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, and S. Amziane, "Flowability of fibereinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 9, pp. 1664–1671, Sep. 2010;
13. LST EN 12390-1:2012 "Sukietėjusio betono bandymai. 1 dalis. Pavidalas, matmenys ir kiti bandinių bei liejimo formų reikalavimai";
14. LST EN 14651 +A1:2007 "Betono su metaliniu pluoštu bandymo metodas. Tempiamojo stiprio lenkiant matavimas (porcingumo riba (LOP), liekamasis stipris)";
15. GOST 12730.4 „Бетоны. Методы определения показателей пористости“.