



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Plieno plaušu armuotų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų analizė

Baigiamasis magistro darbas

Darius Valiukonis

Projekto autorius

Doc. Mindaugas Augonis

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Plieno plaušu armuotų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų analizė

Baigiamasis magistro studijų projektas
Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Darius Valiukonis
Projekto autorius

Doc. Mindaugas Augonis
Vadovas

Lekt. Tadas Zingaila
Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Darius Valiukonis

Plieno plaušu armuotų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Darius Valiukonis, baigiamasis projektas tema „Plieno plaušu armuotų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų analizė“ 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)

Valiukonis Darius. Plieno plaušu armuotų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų analizė. Magistro baigiamasis projektas, vadovas doc. Mindaugas Augonis; Kauno technologijos universitetas, statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerija, statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: dispersiškai armuotas betonas, plieninės fibros, plieno plaušas, liekamieji tempimo stipriai, liekamieji tempimo įtempiai.

Kaunas, 2020. 49 p.

Santrauka

Plieno plaušo panaudojimas betone pasireiškia geresnėmis mechaninėmis savybėmis taip pat suteikia betonui liekamąjį tempimo stiprį po plyšio atsivėrimo. Tačiau kol kas nėra vieningo skaičiavimo metodo skirtu nustatyti liekamuosius stiprius neatliekant tiesioginių ar netiesioginių bandymų.

Magistro baigiamajame projekte atliekama plieno plaušu armuoto betono (Steel fiber reinforced concrete SFRC) liekamųjų tempimo įtempių nustatymo be eksperimentinių bandinių analizė. Remiantis skirtingų autorių atliktų bandymų rezultatais siūlomi pataisos koeficientai dviem skaičiavimo metodams nustatant liekamųjų tempimo stiprių reikšmes po plyšio atsivėrimo.

Darbą sudaro įvadas, dėstymas, susidedantis iš trijų skyrių: literatūros analizės, duomenų analizės ir metodų taikymo, taip pat pateiktos išvados, literatūros sąrašas ir priedai. Įvade bendrai aptariamas plieno plaušo panaudojimas, suformuluojamas darbo tikslas, uždaviniai ir minimos kelios darbui aktualių pritaikomumo pavyzdžių.

Valiukonis Darius. Steel fiber reinforced concrete structure analysis. Master's Final Degree Project supervisor associate professor, Mindaugas Augonis; faculty of civil engineering and architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): engineering, civil engineering (E05).

Keywords: Steel fiber reinforced concrete, Steel fibers, Residual tensile strength, Residual tensile stress.

Kaunas, 2020. 49 p.

Summary

Steel fiber reinforced concrete (SFRC) is distinguished from regular concrete by its enhanced mechanical properties and gives residual tensile strength to concrete. Because of the natural chaotic dispersion of steel fibers it is hard to determine the residual tensile strength of concrete without performing additional tests.

This masters thesis presents the calculation method of residual tensile strength using an analytical and an empirical calculation method without performing additional tests. Relying on the use of other authors test results safety factors are derived by comparing test and theoretical calculation results of residual tensile strength.

This work consists of an introduction, a body that consists of three parts: literature analysis, data analysis and application of calculation methods, after that conclusions of calculations are remarked, referenced are mentioned and a couple of annexes are presented. The introduction gives a view of general use of steel fibers, this works purpose, the tasks to achieve it and a short list of residual tensile strength application examples.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas	9
1. Literatūros analizė	11
1.1. Plieno plaušo armuoto betono mechaninės savybės	11
1.2. Lenkimo bandymas	14
1.3. A. E. Naaman'o metodas	16
1.4. C. Sujivorakul'o metodas	16
1.5. Fib model code 2010 metodas	17
1.6. Siūlomas metodas.....	18
1.7. Charakteristiniai dydžiai.....	19
1.8. Pritaikomumas	20
1.8.1. $f_{R,2}$ ir $f_{R,4}$ pritaikomumas.....	20
1.8.2. $f_{R,1}$ ir $f_{R,3}$ pritaikomumas.....	21
1.9. Apibendrinimas	21
2. Duomenų analizė	23
3. Metodo taikymas	24
3.1. Duomenų gavimas.....	24
3.2. Metodų liekamųjų įtempių skaičiavimas.....	28
3.3. Koeficientų skaičiavimas.....	30
3.4. Charakteristinės reikšmės	30
3.5. Fib Model Code 2010 rezultatai	35
Išvados	39
Literatūros sąrašas	40
Priedai	43
1 priedas. Lenkimo bandymo duomenų suvestinė	43
2 priedas. Charakteristinių reikšmių pagal Bayesian'o metodą suvestinė	47
3 priedas. Fib Model Code 2010 metodo apskaičiuotų stiprių reikšmės	49

Lentelių sąrašas

1 lentelė Įtempių santykių klasifikavimas	21
2 lentelė Fibros parametru suvestinė	23
3 lentelė Lenkimo bandymo duomenų suvestinė	23
4 lentelė Gniuždymo bandinių suvestinė	23
5 lentelė A.E. Naaman'o metodu nustatytų įtempių suvestinė	29
6 lentelė Siūlomi k_p ir k_{pc} koeficientai ir jų paklaidos (charakteristinių reikšmių $f_{Rk,i}$)	33
7 lentelė Paklaidos skaičiuojant pagal Fib Model Code 2010	35
8 lentelė Siūlomi k_p ir k_{pc} koeficientai ir jų paklaidos (vidutinių reikšmių $f_{Rm,i}$).....	37
9 lentelė Fibros duomenų suvestinė	43
10 lentelė Lenkimo bandymų rezultatų suvestinė	44
11 lentelė Gniuždymo bandimų rezultatų suvestinė.....	45
12 lentelė bandinių serijų liekamųjų stiprių standartinės deviacijos	46
13 lentelė Siūlomi k_p ir k_{pc} koeficientai ir jų paklaidos (charakteristinių reikšmių $f_{Rk,i}$)	47
14 lentelė Fib Model Code 2010 metodo liekamųjų tempimo stiprio reikšmių suvestinė	49

Paveikslų sąrašas

1 pav. Plieno plaušo armuoto betono dedamųjų įtaką įtempių grafikui.....	11
2 pav. Plieno plaušu armuotos konstrukcijos plyšio atsivėrimas	12
3 pav. σ - ε priklausomybės grafikas plieno plaušu armuotame betone pagal RILEM TC 162 TDF [27]	12
4 pav. CMOD ir apkrovos F priklausomybės grafikas	12
5 pav. Įtempių pasiskirstymai skerspjūvyje ties σ_2 ir σ_3 įtempių reikšmėmis.....	13
6 pav. Apkrovos ir įlinkio diagramos: a) įtempius mažinantis irimas b) įtempius didinantis irimas	14
7 pav. Apkrovos F ir įlinkio δ priklausomybės grafikas	15
8 pav. Standartinio plaušu armuotos gelžbetoninės sijos matavimo įrangos išdėstymas	16
9 pav. Fibros su skirtingais užlenktais galais	18
10 pav. Teorinių modelių įtempių kreivė.....	19
11 pav. Plieno plaušu armuoto betono klasifikavimo pavyzdys	21
12 pav. Liekamųjų tempimo stiprių reikšmių grafikas	25
13 pav. Vidutinės gniuždomų cilindrų stiprių reikšmės serijoje	25
14 pav. Fibrų kiekis bandinio serijoje, tūrine išraiška	25
15 pav. Fibrų kiekis bandinio serijoje, procentinę išraiška	26
16 pav. Fibros ilgio ir diametro santykiai serijoje	26
17 pav. Betono gniuždomojo stiprio įtaka SFRC liekamiesiems tempimo stipriams	27
18 pav. Betono armavimo koeficiento įtaka SFRC liekamiesiems tempimo stipriams.....	27
19 pav. Priklausomybė tarp CoV ir $f_{R,2}$	31
20 pav. Priklausomybė tarp CoV ir $f_{R,3}$	31
21 pav. Priklausomybė tarp CoV ir $f_{R,4}$	31
22 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC liekamųjų tempimo įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai CMOD ₂	33
23 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC liekamųjų tempimo įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai CMOD ₃	34
24 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC liekamųjų tempimo įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai CMOD ₄	34
25 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC $f_{R,1}$ santykiai, kai CMOD ₁ (vidutinių reikšmių)	35
26 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC $f_{R,2}$ santykiai, kai CMOD ₂ (vidutinių reikšmių)	36
27 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC $f_{R,3}$ santykiai, kai CMOD ₃ (vidutinių reikšmių)	36
28 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC $f_{R,4}$ santykiai, kai CMOD ₄ (vidutinių reikšmių)	36
29 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC σ_{fb} santykiai, kai CMOD ₂ (vidutinių reikšmių $f_{Rm,2}$)	37
30 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC σ_{fb} santykiai, kai CMOD ₃ (vidutinių reikšmių $f_{Rm,3}$)	38
31 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC σ_{fb} santykiai, kai CMOD ₄ (vidutinių reikšmių $f_{Rm,4}$)	38
32 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai CMOD ₂	47
33 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai CMOD ₃	48
34 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai CMOD ₄	48

Įvadas

Darbo aktualumas

Pasaulyje sparčiai besivystant technologijoms ir gyvenimo tempui auga poreikis naujiems inžineriniams medžiagų mokslo sprendiniams, viena iš perspektyvių sričių yra plieno plaušu armuotas betonas (angl. SFRC – Steel fiber reinforced concrete). Nuo XX a. gelžbetonis tapo labiausiai naudojama medžiaga statybose, ypač specialiosios paskirties pastatuose: tiltų, viadukų, hidrotechninių pastatų ir t. t. statybai. Plaušu armuotos konstrukcijos, kaip koncepcija, naudojama nuo senų laikų, kai natūralus plaušas, pvz., šiaudas, buvo įmaišomas su moliu, siekiant sumažinti susitraukimo deformacijas ir atsiveriančius plyšius. Betonas pasižymi trapią deformacija ir turi labai mažą tempiamąjį stiprumą palyginus su gniuždomuoju stipriu. Plieno plaušas, kaip ir strypinė armatūra, papildo betono silpnąją vietą ir suteikia stiprumo tempiamoje zonoje. Plieno fibromis armuotas betonas pranašesnis už įprastai armuotą, kadangi betonui suteikia plastiškumo ir geba varžyti atsiveriančių plyšių vystymąsi.

Plaušu armuotas gelžbetonis daugiausiai naudojamas pramoninėse monolitinėse grindyse, torkretuojant, plonasieniuose elementuose. Fibros gali skirtis priklausomai nuo jų panaudojimo kiekio, geometrinių dydžių, formos ar medžiagos savybių. Dažniausiai yra naudojamos plieninės fibros, kadangi šios suteikia plastiškumo efektą betono mechaninėms savybėms (liekamasis tempiamasis stipris, plastiškos deformacijos). Betonui įtrūkus, fibros, veriančios plyšį, perima tempimą ir pasiskirsto įtempius į tempiamą betono skerspjuvį per plyšio plotą veriančių fibrų kiekį. Dėl dispersiškai išsidėsčiusios fibrų konstrukcijos tūryje, garantuota, jog atsivėrus plyšiui, fibra kirs įtrūkimą statmenai ar kampu per jos įtrūkimą. Pleišėjimo mažinimas gaminyje priklauso nuo panaudoto plaušo kiekio, fizikinių savybių (pvz.: fibros geometrinių rodiklių) ir nuo mechaninių savybių (fibrų tempimo stiprumo, betono gniuždymo stiprumo).

Plaušu armuotos konstrukcijos šiuo metu dažniausiai naudojamas nelaikančiose konstrukcijose, tai yra dėl chaotiško fibros išsidėstymo konstrukcijos tūryje, kuris priklauso nuo aibės technologinių sprendimų ruošiant betoną. Lietuviškose ir Europinėse gelžbetonio projektavimo normose STR 2.05.05:2005 ir EN-1992-1-1:2005 iki dabar nėra jokių projektavimų normų, susietų su SFRC, nors yra ne vienas siūlomas skaičiavimo modelis mokslinėje literatūroje. JAV savo statybų normose turi skyrių ACI-544.4R-88, kuris įvertina fibros įtaką betonui, tačiau šios normos ne viename moksliniame šaltinyje kritikuojamos kaip netikslios ir dažnai neatitinkančios eksperimentinių verčių.

Baigiamajame darbe siūlomas būdas kaip įvertinti plieno plaušu armuoto betono liekamąjį stiprumą $f_{R,i}$ trijuose plyšio pločio atsivėrimo taškuose – $CMOD_i$ (angl. Crack mouth opening displacement) kai $i = 2,3,4$ ($CMOD_2 = 1,5$, $CMOD_3 = 2,5$, $CMOD_4 = 3,5$). Skaičiavimo metodas aktualus, nes nereikia atlikinėti tiesioginio bandymo tempiant gelžbetoninį elementą ar netiesioginio – lenkiant kompozitinę siją, siekiant gauti liekamuosius įtempius reikšmes skirtingų plyšio pločių taškuose.

Tikslas

Pritaikant C. Sujivorakul'o (2012) ir A. E. Naaman'o (2003) metodikas, apskaičiuoti po plyšio atsivėrimo susidariusius liekamuosius įtempius ir nustatyti patikimumo koeficientus k_p ir k_{pc} .

Darbo uždaviniai:

1. Atliekama literatūros analizė, skirta įsigilinti į C. Sujivorakul'o (2012) ir A. E. Naaman'o (2003) liekamųjų tempimo įtempių nustatymo metodus be eksperimentinių duomenų.
2. Surinkti duomenis apie lenkimo bandymą pagal standartą EN-14651+A1:2007 [1] ir juos struktūrizuoti.
3. Susieti eksperimentinius duomenis su teoriniais skaičiavimais ir išvesti pataisos koeficientus kiekvienai stiprumo reikšmei gauti.
4. Palyginti gautas teorines stiprių reikšmes su eksperimentinėmis vertėmis.

Mokslinis naujumas

Šiame baigiamajame darbe surinkta medžiaga suteikia galimybę nustatyti plieno plaušu armuotos sijos, pagal standartą EN-14651+A1:2007, liekamuosius stiprius $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ ir $f_{R,4}$, neatliekant bandymų laboratorijose.

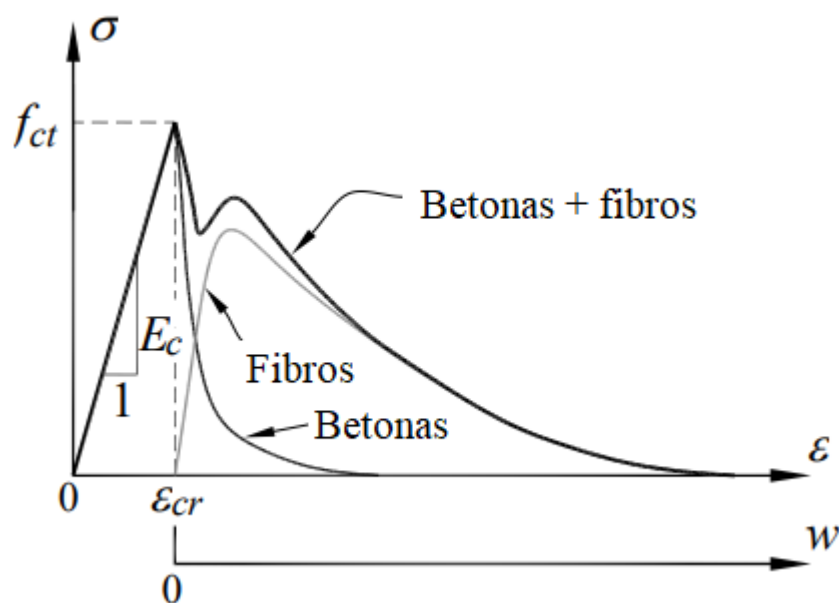
Pritaikomumas

- $f_{R,2}$, $f_{R,4}$ – liekamųjų lenkiamo plieno plaušu armuoto betono stipriai taikomi atvirkštinės analizės būdu skaičiuojant plyšio pločio dydį. Šios $f_{R,i}$ reikšmės, atitinkančios $CMOD_2$ ir $CMOD_4$ parinktos, kad būtų įvertinamas visas aktualus plotas, esantis nuo neutraliosios ašies tempiamoje zonoje, kurį galima pritaikyti skaičiuojant saugos ir tinkamumo ribinius būvius. $CMOD_2$ taškas parinktas taip, kad neištrūkusio betono sritis nedarytų įtakos fibros dirbamame plote [3], [12].
- $f_{R,3}$ – charakteristinė liekamojo plieno fibros armuoto betono stiprio išraiška gali būti taikoma su $f_{Rk,1}$ klasifikuojant SFRC betoną pagal šių verčių santykį $f_{Rk,3}/f_{Rk,1}$ [25]. Šios vertės parinktos klasifikuoti plaušu armuotą betoną kadangi didėjant plyšio pločio atsivėrimui $CMOD$ (ar įlinkiui δ) įtempių kreivė po plyšio atsivėrimo gali didėti arba mažėti. $f_{Rk,1}$ reikšmingas dydis skaičiuojant pagal tinkamumo ribinį būvį, $f_{Rk,3}$ – įtakingas dydis atliekant skaičiavimus pagal saugos ribinį būvį. Šaltinyje [25] pateikiamos minimalios stiprių santykių sąlygos, kuomet plaušas gali būti naudojamas kartu su strypine armatūra ar net iš dalies ją pakeičiant.

1. Literatūros analizė

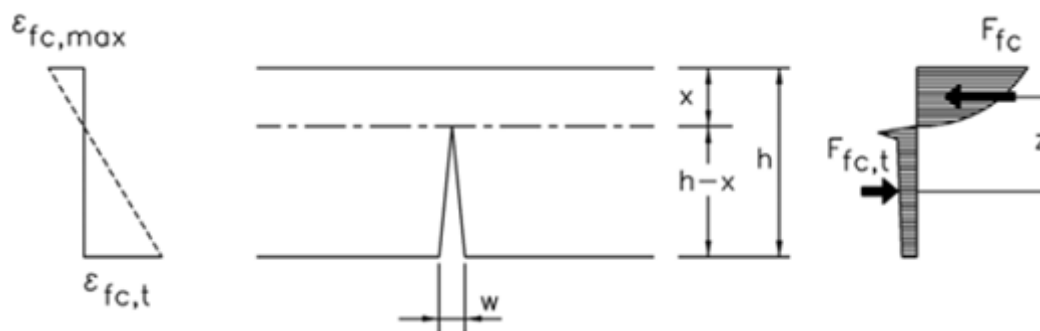
Fibromis armuotas betonas (angl. FRC – fiber reinforced concrete) gaunamas betono mišinyje įmaišant fibras. Fibros gali būti organinės ar sintetinės kilmės, pvz., PVC. Tačiau dažniausiai plaušu armuotame betone naudojamos plieninės fibros, tai yra dėl plieninės fibros savybės priešintis makroplyšių atsivėrimui. Kuomet plyšio plotis yra mažas, palyginus su fibros ilgiu, fibros, kertančios plyšio plotį, perima tempimo įtempius ir juos paskirsto per plyšio plotį. Ši plieno plaušu armuoto betono savybė apibrėžiama kaip plieno plaušu armuoto betono liekamasis tempimo stipris – f_R , kuris suteikia elementui plastišką suirimą (1 pav.) [14], [26].

1.1. Plieno plaušo armuoto betono mechaninės savybės



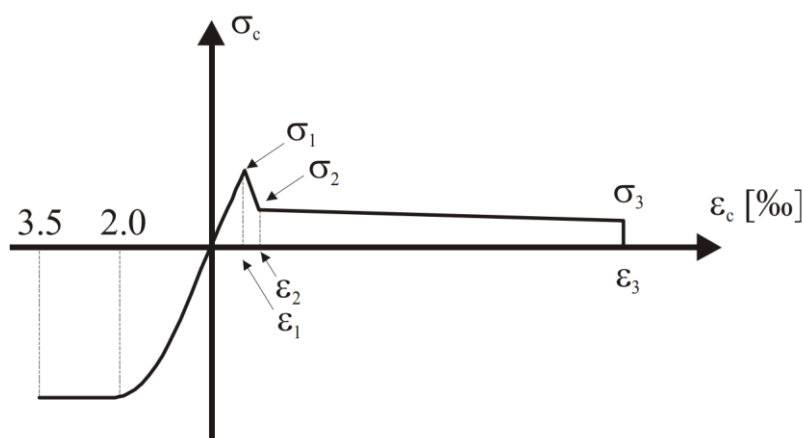
1 pav. Plieno plaušo armuoto betono dedamųjų įtaką įtempių grafikui

Šiuo metu plieninės fibros dažniausiai naudojamos monolitinėse grindyse, naudojant SFRC galima daryti didesnius deformacinius blokus, taip yra dėl plaušu armuoto betono savybės priešintis plyšių atsivėrimui, kai betonas deformuojasi kietėjimo metu. Tačiau plieno plaušo pritaikomumas yra labai ribotas ir tam priežastis yra liekamojo tempiamojo stiprumo $f_{R,i}$ reikšmių nustatymas. Šioms stiprumo reikšmėms didelę įtaką daro: plieno plaušo forma (gofruotas, užlenktais galais, inkariniais galais, tiesūs), plaušo geometrinės savybės (ilgis, skersmuo), fibrų kiekis ir chaotiškas plaušo išsidėstymas betono tūryje, kuris atitinkamai priklauso nuo užpildų granulometrijos sudėties, mišinio paruošimo ir užpylimo klojinyje [13], [16], [19]. Dauguma SFRC plyšio pločio skaičiavimo metodikų [29], [12], [3] pasikliauna šiomis stiprumo reikšmėmis ir jas paprastai gauna atliekant bandymus. Dažniausiai liekamieji tempiamieji stipriai gaunami netiesiogiai, atliekant lenkimo bandymą pagal standartą EN-14651+A1:2007. Dėl šios priežasties sunku pritaikyti fibromis armuotą betoną praktikoje, kadangi reikia atlikti bandymus projektavimo metu, kuomet laikas ir biudžetas būna labai ribotas.

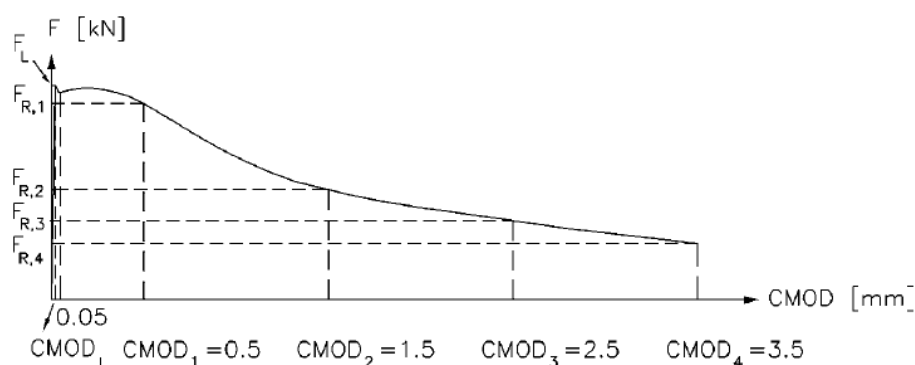


2 pav. Plieno plaušu armuotos konstrukcijos plyšio atsivėrimas

$f_{R,i}$ – plieno plaušu armuoto betono liekamasis stipris (angl. SFRC Residual flexural tensile strength) apibūdina tempimo stiprumą, susidariusį po plyšio atsivėrimo. Lenkiamos sijos tempiamajame sluoksnyje, fibros sukimba su betono matrica ir paskirsto įtempius σ_2 ir σ_3 (3 pav.) tiesiška priklausomybe per visą trūkio plotį [27] (2 pav.). Ties įtempių tašku σ_1 pasiekama betono tempimo stiprumo riba kuomet betonas nebeatlaiko apkrovos ir atsiveria pagrindinis plyšys. Plyšiui atsivėrus ir deformacijoms pasiekus ϵ_2 ribą fibros pradeda inkaruotis į betono matricą. Nuo šio taško fibros perima tempimą plyšio plotyje ir jos išskirstomos per supleišėjusią skerspjūvio dalį.



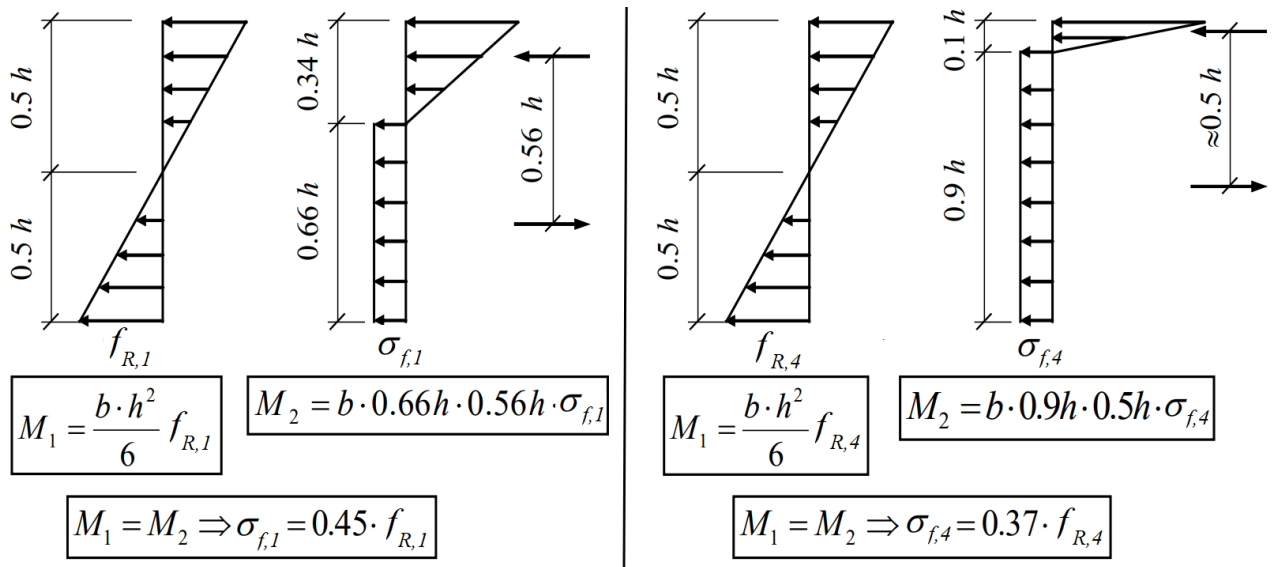
3 pav. σ - ϵ priklausomybės grafikas plieno plaušu armuotame betone pagal RILEM TC 162 TDF [27]



4 pav. CMOD ir apkrovos F priklausomybės grafikas

Grafike (3 pav.) σ_1 atitinka $CMOD_L$ vertę kuri lygi betono stiprumo ribai tempiant, o σ_2 ir σ_3 atitinka įtempių reikšmes, esančias ties $CMOD_1$ ir $CMOD_4$ taškais (4 pav.). Įtempiai lenkiamos sijos

skerspjūvyje pagal RILEM TC 162-TDF [27] metodiką pasiskirsto pagal (5 pav.) ir apskaičiuojami pagal formules (1.1.1-1.1.4).



5 pav. Įtempių pasiskirstymai skerspjūvyje ties σ_2 ir σ_3 įtempių reikšmėmis

$$\sigma_{f,1} = 0,45 \cdot f_{R,1}; \quad (1.1.1)$$

$$\sigma_{f,4} = 0,37 \cdot f_{R,4}. \quad (1.1.2)$$

Dėl tiesiško pasiskirstymo tarp σ_2 ir σ_3 įtempių σ - ε grafike tarp taškų ε_2 ir ε_3 , plaušo veikiamoje zonoje, galima lengvai išvesti $\sigma_{f,2}$ ir $\sigma_{f,3}$ išraiškas kurios atitinka $CMOD_2$ ir $CMOD_3$ reikšmes:

$$\sigma_{f,2} = 0,397 \cdot f_{R,2}; \quad (1.1.3)$$

$$\sigma_{f,3} = 0,423 \cdot f_{R,3}; \quad (1.1.4)$$

Šios įtempių išraiškos taikytinos tik standartinėse prizmėse, nes baigiamajame darbe magrinėjamos sijos kurios atitinką [28] šaltinio keliamus reikalavimus. Skirtingų dydžių bandiniuose pastebėta, kad labai pervertinamos liekamųjų stiprių vertės. Konkreti priežastis, dėl kurios atsiranda neatitikimų tarp skirtingų gabaritų prizmių, nėra žinoma [27], [11]. Dėl šios priežasties išvestas gabarito koeficientas κ_h :

$$\kappa_h = 1,0 - 0,6 \cdot \frac{h[cm]-12,5}{47,5}; \quad (1.1.5)$$

$$\kappa_h = 1,0 - 0,6 \cdot \frac{12,5 - 12,5}{47,5} = 1,0 - 0 = 1,0; \quad (1.1.6)$$

čia $h = h_{sp} = 12,5$ cm (skerspjūvio aukštis ties įpjova) koeficientas neminimas skaičiavimuose, kadangi standartiniuose bandiniuose jis lygus vienam.

Skaičiuojant skerspjūvio stiprumą daromos prielaidos:

- lenkimo skerspjūvis deformuojasi plokštumai;
- lenkime gniuždymo ir tempimo įtempiai plaušu armuotame skerspjūvyje pasiskirsto pagal σ - ε (3 pav.) grafiką;

- siekiant užtikrinti pakankamą fibros inkaravimosi ilgį, plyšio plotis apribojamas iki 3,5 mm pločio. Jei naudojamas didesnis plyšio plotis, tai atitinkantis liekamasis stipris tam plyšio pločiui sulyginamas su $f_{R,4}$, tuomet apskaičiuojami įtempiai pagal σ_3 reikšmę iš σ - ε grafiko. Rekomenduotina, kad f_R reikšmė, kuri pakeičia $f_{R,4}$, nebūtų mažesnė negu 1 N/mm^2 .

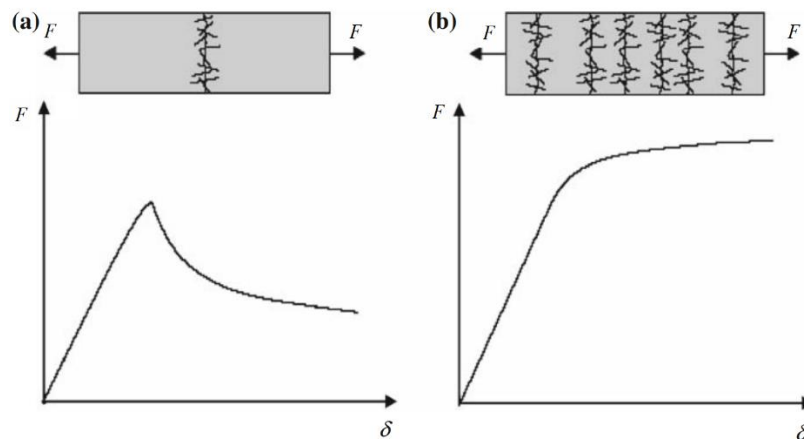
Diduma autorių, kurie atlieka lenkimo bandymus, savo tyrimuose naudoja apkrovos ir plyšio pločio dydžio (F-CMOD) priklausomybės arba apkrovos ir įlinkio priklausomybės grafikus (F- δ) aprašant rezultatus. Liekamosios tempimo stiprių reikšmės $f_{R,i}$ apskaičiuojamos pagal (1.1.7) formulę:

$$f_{R,i} = \frac{3 * F_{R,i} * l}{2 * b * h_{sp}^2}; \quad (1.1.7)$$

Čia $F_{R,i}$ – apkrova, atitinkanti plyšio pločio atsivėrimą ties dydžiu $CMOD_i$ ($i = 1,2,3,4$); l – atstumas tarp atramų; b – sijos plotis; h_{sp} – aukštis nuo įpjovos viršaus iki sijos viršaus.

Plaušu armuotas betonas gali suirti dviem būdais pagal grafikus F- δ (6 pav.): kai plyšio atsivėrimo įtempiai yra didesni negu po plyšio susidarymo susidarę tempimo įtempiai ($\sigma_{cc} > \sigma_{pc}$), kai įtempiai po plyšio atsivėrimo yra didesni nei plyšio atsivėrimo įtempiai ($\sigma_{cc} < \sigma_{pc}$) [21]. Pastarasis atvejis yra būdingas ypač stipriam plieno plaušu armuotam betonui (angl. HPFRC – High performance fiber reinforced concrete). HPFRC fibros ištraukimo (angl. Pull-out) ir fibros su cementinės matricos sukibimo įtaka liekamajam stipriui yra didesnė nei betono tempimo stipris plyšio atsiradimo metu [22].

Pagal (6 pav. (a)) grafike pavaizduotą $\sigma_{cc} > \sigma_{pc}$ priklausomybę suirimas pasireiškia viename lokalizuotame plyšyje per visą bandinio ilgį, o grafikas (b) vaizduoja priklausomybę $\sigma_{cc} < \sigma_{pc}$, jo suirimas pirmiausia pasireiškia per visą bandinio ilgį susidarant daug mažų įtrūkimų, o galiausiai bandinys lūžta per vieną lokalizuotą plyšį [25].



6 pav. Apkrovos ir įlinkio diagramos: a) įtempius mažinantis irimas b) įtempius didinantis irimas

1.2. Lenkimo bandymas

Baigiamojo darbo tiriamasis objektas trimis taškais lenkiamas plieno plaušu armuotos gelžbetoninės sijos, 150x150 mm skerspjūvio ir ≥ 550 mm ilgio. Naudojamos plieninės fibros turi būti iki 60 mm ilgio ir užpildų skersmuo iki 32 mm. Klojinys užpilamas mišiniu iki viršaus, nulygiuojamas su kraštais, po to tankinamas vibravimu. Jei naudojamas savaimė susitankinantis betonas, tai klojinys užpildomas iki viršaus, nulygiuojamas ir paliekamas sukietėti. Leidžiamos gabaritinės sijos paklaidos

iki 2 mm iš visų pusių, tačiau ne daugiau kaip 3 mm sudėjus priešingų pusių paklaidas. Visa detali informacija apie lenkimo bandymą aprašyta standarte EN-14651+A1:2007.

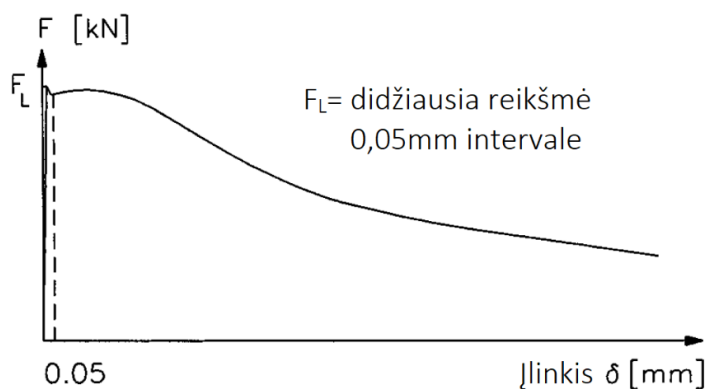
Šio bandymo rezultatuose gaunamos apkrovos (F) ir įlinkio (δ) priklausomybės grafikas arba apkrovos (F) ir plyšio pločio (CMOD) priklausomybė, jei matuojama plyšio pločio pokyčio dydis. Matuojant deformacijas ties liekamųjų stiprių $f_{R,i}$ charakteringais taškais iškeliamos priklausomybės tarp $\delta_{R,i}$ ir CMOD_i:

- $\delta_{R,1} = 0,46$, kai CMOD₁ = 0,5 mm,
- $\delta_{R,2} = 1,31$, kai CMOD₂ = 1,5 mm,
- $\delta_{R,3} = 2,15$, kai CMOD₃ = 2,5 mm,
- $\delta_{R,4} = 3,00$, kai CMOD₄ = 3,5 mm.

Taip pat pagal standartą galima išsireikšti plyšio pločio pokyčio dydį CMOD žinant įlinkį iš priklausomybės:

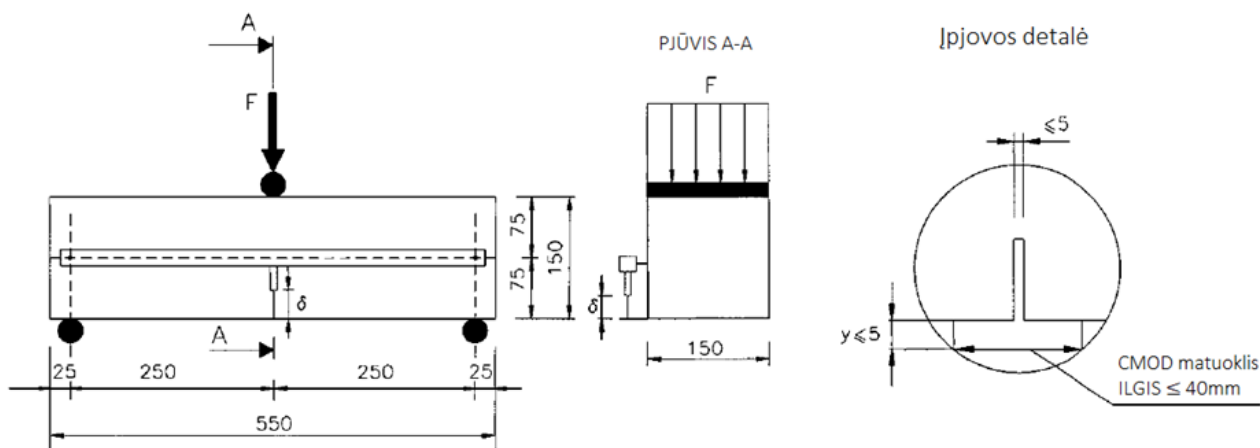
$$CMOD = 1,18 * \delta + \beta; \quad (1.2.1)$$

Čia: $\beta = -0,0416$ mm. Svarbu pabrėžti jog ši išraiška taikytina tik nuo didžiausios apkrovos F_L grafike



7 pav. Apkrovos F ir įlinkio δ priklausomybės grafikas

Principinė apkrovimo schema pavaizduota (8 pav.). Sija atremiama ant dviejų metalinių šarnyrų prie kurių sija nepritvirtinama. Naudojamas presas turi sukelti pastovų įlinkį (δ) arba pastovų plyšio pločio didėjimą (CMOD) per visą bandymo laikotarpį, geriausia naudoti uždaro ciklo veikimo presą. Aparatūra turi veikti sklandžiai, kad rezultatų grafikai turėtų kuo mažesnius nuokrypius ar visai neturėtų jų dėl įrangos poveikio. Reikalaujama jog apkrovą matuojančios įrangos tikslumas būtų dešimtųjų kilo Niutono (0,1 kN) tikslumo. Įlinkio ir plyšio atsivėrimo matavimo įrangos tikslumas turi būti šimtosios milimetro (0,01 mm) tikslumo [28].



8 pav. Standartinio plaušu armuotos gelžbetoninės sijos matavimo įrangos išdėstymas

1.3. A. E. Naaman'o metodas

Analitinis skaičiavimo metodas skirtas apskaičiuoti liekamąjį stiprį po plyšio atsivėrimo. Formulė 1.3.1 naudojama skaičiuojant maksimalų tempimo įtempį kai fibros yra apvalaus skerspjūvio. A. E. Naaman'o (2003) metodu galima skaičiuoti įtempius kai plieno plaušo armuotame betone pasireiškia takumas ($\sigma_{pc} > \sigma_{pc}$) ir kai jo nebūna ($\sigma_{pc} < \sigma_{pc}$) [21, 23, 20].

$$\sigma_{pc} = \lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \tau * \frac{l_{fb}}{l_{fb}} * V_f; \quad (1.3.1)$$

čia: λ_1 – fibros inkaravimosi ilgio koeficientas 0,25; λ_2 - fibros orientacijos plyšio zonoje koeficientas 1,2; λ_3 – plaušo tarpusavio sąveika 1,0; τ – fibros ir betono matricos sukibimo stiprumas. l_{fb} – fibros ilgis; d_{fb} – fibros diametras; V_f fibros kiekis turine išraiška.

Formulė taikytina kai šios sąlygos tenkinamos: 1) plyšys atsivėręs visame tempiamajame sluoksnyje, 2) plyšys atsiveria statmenai tempimo įtempių kryptiai, 3) betono matricos įtaka nevertinama.

1.4. C. Sujivorakul'o metodas

Empirinis skaičiavimo metodas skirtas apskaičiuoti tempimo įtempius plyšiui pradėjus vertis. Metodas taikomas plieno fibromis armuotame betone kai įtempiai σ - ϵ grafiko kreivėje pasiskirsto be takumo aikštelės [15] (5 pav. (b)). Autorius pabrėžia jei įtempiai pasiskirsto su takumo aikštele σ - ϵ kreivėje tokiu atveju reikia tempimo įtempius po plyšio atsivėrimo prilyginti SFRC tamprumo ribos stipriui. Detaliau metodas aptariamasis šaltinyje [15]. Įtempių išraiškos pateiktos (1.4.1) ir (1.4.2) formulėse gautos iš 117 tiesioginių tempimo bandymų atliktų su 500x50x50 mm dydžio sijelėmis stebint SFRC liekamuosius tempimo stiprius σ - ϵ grafikuose kiekvieno bandinio. Autorius tyrimo metu išbandė tris skirtingas užlenktų galų fibrų tipus ir tris skirtingas betonų klases. Bendrai sudėjus buvo daromos bandinių kombinacijos naudojant 3 užlenktų galų fibrų tipus, 3 skirtingas betono mišinių klases ir 4 skirtingas fibrų kiekius. Kiekvienos seriją bandinių sudarė po 3 sijeles.

$$\sigma_p = \sqrt{f'_c} * (-0,0014 * V_f + 0,0046V_f) * \frac{L_f}{d} * L_f^{0,2}; \quad (1.4.1)$$

$$\sigma_p = \sqrt{f'_c} * (-0,001 * V_f + 0,0038V_f) * \frac{L_f}{d} * L_f^{0,2}; \quad (1.4.2)$$

Čia f'_c – charakteristinis betoninio cilindro gniuždomasis stipris;

Pirma formulė skirta apskaičiuoti vidutinę liekamojo tempimo stiprumo reikšmę, antra – apatinės ribos, su 95 % patikimumu, liekamojo tempimo stiprumo reikšmei apskaičiuoti.

1.5. Fib model code 2010 metodas

Šis skaičiavimo metodas sukurtas atlikus 69 trijų taškų lenkimo bandymus su plieno plaušu armuoto betono sijelėmis, pagal standarta EN-14651 [1]. Atliktų bandymų rezultatai fiksuoti lenkimo įtempių ir plyšio pločio CMOD priklausomybės grafikais. Remiantis lenkimo bandymo rezultatais kelios regresinės analizės buvo atliktos, kad empirinis skaičiavimo modelis būtų išvestas iš duomenų. Šie rezultatai lyginami su kitų autorių lenkimo bandymo rezultatais taip patvirtinant patikimumą šio skaičiavimo metodo [30].

Šiame skaičiavimo metode pateiktos atskiros formulės skirtos apskaičiuoti plieno plaušu armuotame betone liekamųjų tempimo stiprių vidutines reikšmes ($f_{R,i}$ kai $i = 1, 2, 3, 4$):

$$f_{R,1} = \psi * \left[0.320(f'_c)^{0.5} + 6.214(RI) + 0.034N^2 \right]; \quad (1.5.1)$$

$$f_{R,2} = \psi * \left[0.353(f'_c)^{0.5} + 7.337(RI) + 0.300N^2 \right]; \quad (1.5.2)$$

$$f_{R,3} = \psi * \left[0.300(f'_c)^{0.5} + 7.629(RI) + 0.373N^2 \right]; \quad (1.5.3)$$

$$f_{R,4} = \psi * \left[0.284(f'_c)^{0.5} + 7.018(RI) + 0.343N^2 \right]; \quad (1.5.4)$$

Fib model code 2010 šaltinyje pateiktos ir liekamųjų tempimo stiprių charakteristinių išraiškų vertės ($f_{Rk,i}$ kai $i = 1, 2, 3, 4$):

$$f_{Rk,1} = \psi * \left[0.226(f'_c)^{0.5} + 5.447(RI) - 0.149N^2 \right]; \quad (1.5.5)$$

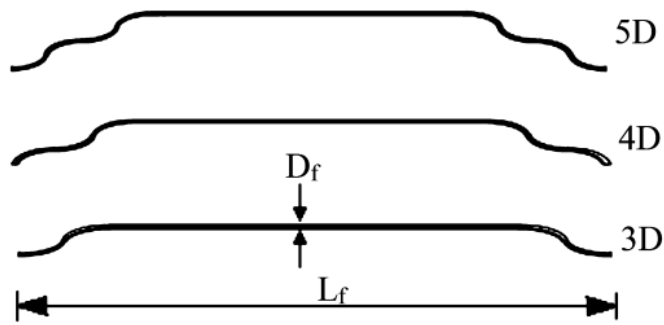
$$f_{Rk,2} = \psi * \left[0.250(f'_c)^{0.5} + 6.506(RI) + 0.102N^2 \right]; \quad (1.5.6)$$

$$f_{Rk,3} = \psi * \left[0.201(f'_c)^{0.5} + 6.830(RI) + 0.182N^2 \right]; \quad (1.5.7)$$

$$f_{Rk,4} = \psi * \left[0.177(f'_c)^{0.5} + 6.151(RI) + 0.137N^2 \right]; \quad (1.5.8)$$

Čia: ψ – koeficientas įvertinantis fibros ilgio įtaką SFRC liekamajam tempimo stipriui; f'_c – charakteristinis betoninio cilindro gniuždomasis stipris; RI (angl.: Reinforcing Index) – armavimo rodiklis priklausantis nuo fibros tūrio betone, fibros ilgio ir diametro santykio; N – fibros užlenktų galų skaičius (3D – 1,0, 4D – 1,5 ir 5D – 2,0) (baigiamajame darbe surinkti duomenys apie vieno užlenkimo fibras 3D (9 pav.)).

$$\psi = \left(1 + \frac{l_f}{100} \right)^{0.5} \quad (1.5.9)$$



9 pav. Fibros su skirtingais užlenktais galais

Fib Model code 2010 atlikta duomenų analizė ir padarytos išvados jog betono gniuždomajam stipriui (f'_c) kintant nuo 20 iki 65 MPa: betono tempiamasis stipris ties proporcingumo riba f_L (angl.: LOP – Limit of Proportionality) padidėja 68 %, SFRC liekamųjų tempimo stiprių reikšmės $f_{R,1}$ ir $f_{R,2}$ didėja 25-30 %, $f_{R,3}$ ir $f_{R,4}$ liekamasis tempimo stipris didėja 18-23 %. Naudojant 4D ir 5D fibras pastebimas didesnis betono tempiamasis stipris proporcingumo riboje ir ties pirmomis liekamųjų tempimo stiprių reikšmėmis, tačiau mažesnis procentas padidėjusių stirpių ties $f_{R,3}$ ir $f_{R,4}$.

Armavimo rodikio (RI), kai betono gniuždomasis stipris 35 MPa, įtaka betono tempimo stiprumui ties proporcingumo riba yra gana maža, tačiau labai įtakoja liekamųjų tempimo stiprių reikšmėms. RI padidinus nuo 0,2 iki 1,0 liekamųjų tempimo stiprių reikšmės padidėja 6-7,5 MPa, tai tyrime prilygsta 120-165 % stiprumo reikšmių padidėjimui.

Fibros užlenktų galų skaičius betono tempimo stipriui ties proporcingumo riba ir liekamajam tempimo stipriui $f_{R,1}$ poveikio neturi. Likusios liekamųjų tempimo stiprių reikšmės (kai $i = 2, 3, 4$) padidėja 1-1,5 MPa (9-12 %), kai pakeičiamos fibros iš 3D į 5D. Fibrų užlenktų galų įtaka mažėja kuomet yra naudojamas betonas su didesniu gniuždomuoju stipriu (f'_c) ir armavimo rodikliu (RI).

Fibros ilgio įtaka visoms liekamųjų tempimo stiprių vertėms yra vienoda, kadangi ψ (1.5.9) išraiška naudojama formulėse (1.5.1-1.5.8) yra nekintanti nuo skaičiuojamo stiprio kai $CMOD_i$. Kai armavimo indeksas RI yra 0,4, betono gniuždomasis stipris 35 MPa, tuomet liekamasis stipris padidėja 0,45-0,65 MPa (apie 9 %) kai fibros ilgis pakeičiamas iš 35 mm į 60 mm [30].

1.6. Siūlomas metodas

Baigiamojo darbo metu buvo surasti duomenys apie 138 atliktus lenkimo bandymus iš 9 skirtingų šaltinių kurie buvo pritaikyti skaičiuojant pataisos koeficientus skirtus nustatyti liekamuosius tempiamuosius stiprius plaušu armuotame betone. Darbe atliekama lyginamoji analizė tarp eksperimentinių liekamųjų stiprių reikšmių ir teorinių stiprių dydžių, gautų taikant aptartus metodus 1.3 ir 1.4 skyriuose, pritaikant pataisos koeficientus pagal formules (1.6.1) ir (1.6.2). Tokia pati analizė $f_{R,1}$ stirpio jau buvo atlikta 2015 m KTU universitete [7], tačiau tyrime nepateikiami pataisų koeficientai skirti apskaičiuoti likusias liekamųjų tempimo plieno plaušu armuoto betono stiprių reikšmėms $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ ir $f_{R,4}$.

$$\sigma_{fb} = k_{pc,i} * \sigma_{pc}; \quad (1.6.1)$$

$$\sigma_{fb} = k_{p,i} * \sigma_p; \quad (1.6.2)$$

Čia: $k_{pc,i}$, $k_{p,i}$ – pataisos koeficientai A. E. Naaman'o (2003) ir C. Sujivorakul'o (2012) įtempimų skaičiavimo metodams ($i = 2, 3, 4$).

Skaičiuojant tempimo įtempius SFRC pagal A. E. Naaman'o (2003) metodą priimama: $\lambda_1 = 0,25$, $\lambda_2 = 1,2$, $\lambda_3 = 1,0$ ir $\tau = 2 \cdot f_{ctm}$ [21], čia f_{ctm} – vidutinis betono tempiamasis stipris apskaičiuojamas pagal formulę (kai betono charakteristinis gniuždomasis stipris $f_{ck} \leq C50/60$):

$$f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}}; \quad (1.6.3)$$

$$f_{ck} = f_{cm} - 8; \quad (1.6.4)$$

$$f_{cm} = 0,81 * f_{cm,cube,150}; \quad (1.6.5)$$

$$f_{cm} = 0,81 * 0,95 * f_{cm,cube,100}; \quad (1.6.6)$$

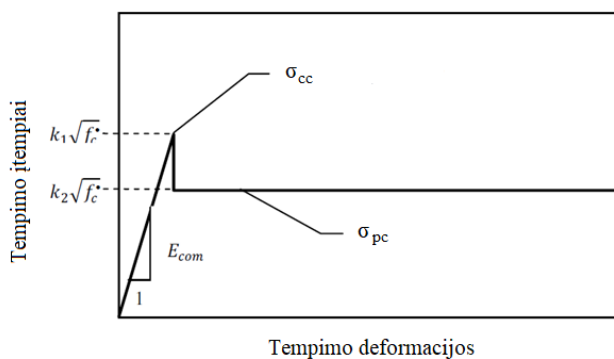
$$f_{cm} = f_{cm,fb} - 3,51RI; \quad (1.6.7)$$

$$f_{cm} = f_{cm,fb} - 2,1604RI; \quad (1.6.8)$$

Čia: f_{cm} – vidutinis betono gniuždomasis stipris į cilindrą ((1.6.7) formulė taikoma kai naudojamos plieninės fibros užlenktais galais, (1.6.8) – kai naudojamos gofruotos plieninės fibros [10, 24, 8]); $f_{cm,cube}$ – vidutinis betono gniuždomasis stipris į standartinį kubelį; $f_{cm,fb}$ – vidutinis plieninėmis fibromis armuoto betono gniuždomasis stipris; RI – armavimo rodiklis:

$$RI = 3,2 * V_f * \frac{l_f}{d}; \quad (1.6.9)$$

Kiekvienai įtempių reikšmei reikia skaičiuoti po atskirą pataisos koeficientą kadangi aptartuose teoriniuose įtempių skaičiavimo modeliuose įtempių kreivės, σ - ϵ diagramoje, po plyšio atsivėrimo yra nekintančios deformavimo metu, dėl vertinamų nekintančių dydžių (λ , τ , f_c^* , V_f , d , L_f) (10 pav.). [27, 14].



10 pav. Teorinių modelių įtempių kreivė

1.7. Charakteristiniai dydžiai

Skaičiuojant plieno plaušu armuotos betoninės (arba dalinai plaušu ir strypine armatūra armuotos) konstrukcijos plyšio pločio dydį ar įlinkį reikalingos būna charakteristinės medžiagų parametru išraiškos [30]. Medžiagų charakteristinės vertės apskaičiuojamos vadovaujantis ISO 12491:1997 [2] standartu. Statistinis duomenų patikimumas yra nusakomas fraktiliu ir patikimumo lygiu, baigiamajame darbe pasirinkta naudoti 5 % fraktilį ir 95 % patikimumą. Šiame dokumente aprašomi statistiniai metodai skirti užtikrinti statybinių medžiagų kokybę. Pagal šį standartą buvo apskaičiuotos charakteristinės liekamojo SFRC tempimo stiprio reikšmės priimant jog yra normalus duomenų

skirstinys. Charakteristiniai dydžiai apskaičiuojami taikant klasikinį ir Bayesian'o metodus. Klasikinis skaičiavimo metodas:

$$X_{k,est} = m_x \pm k_s * s_x; \quad (1.7.1)$$

Čia $X_{k,est}$ – charakteristinė reikšmė pagal klasikinį metodą; m_x – vidutinė reikšmė; s_x – standartinė deviacija; k_s – koeficientas parenkamas iš standarto kuris priklauso nuo bandinių kiekio serijoje, pasirenkamo fraktilio ir patikimumo lygiu. Bayesian'o skaičiavimo metodas charakteristinėms dydžiams:

$$X_{p,pred} = m_x \pm t_p * s_x * \sqrt{1 + \frac{1}{n}}; \quad (1.7.2)$$

Čia $X_{k,pred}$ – charakteristinė reikšmė pagal Bayesian metodą; t_p – koeficientas parenkamas iš standarto kuris priklauso nuo pasirenkamo fraktilio, patikimumo lygio ir laisvės laipsnio ν (angl. Degrees of Freedom):

$$\nu = n - 1; \quad (1.7.3)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N_{int}} * (x_t - m_x)^2}{N_{int} - 1}}; \quad (1.7.4)$$

Čia x_t – serijos bandinio dydis; N_{int} – duomenų kiekis serijoje.

Šių skaičiavimo metodų koeficientų reikšmės t_p ir k_s parenkamos priklausomai ar yra žinomi visų bandinių serijų standartinės deviacijos ir kai jos nežinomos.

1.8. Pritaikomumas

1.8.1. $f_{R,2}$ ir $f_{R,4}$ pritaikomumas

Daugeliu atveju plieno plaušo armuoto betono atsparumas kirpimui skaičiuojamas naudojant empirines lygtis kuriuose fibra ir betonas yra traktuojama kaip unikali medžiaga. Dėl šios priežasties fibros ir betono poveikis plieno plaušu armuoto betono kerpamajam stiprumui vertinamas bendrai arba šių SFRC dedamųjų dalių įtaka vertinama atskirai ir jos išreikiamos nevertinant tarpusavio sąveikos poveikio. Fib Model Code 2010 pateikiamas skaičiavimo metodas skirtas įvertinti tarpusavio sąveiką tarp fibros ir betono, plačiau apie tai straipsnyje [12]. Plieno plaušu armuoto betono kerpamasis stiprumas:

$$\phi V_u = \phi * (V_{uc} + V_{us} + V_{uf}) \geq \gamma * V_d; \quad (1.8.1)$$

Čia ϕ – saugos koeficientas; V_{uc} – betono įtaka kerpamajam stiprumui; V_{us} – armatūros įtaka kerpamajam stiprumui; V_{uf} plieno plaušo įtaka kerpamajam stiprumui; V_d - skaičiuojamasis kerpamasis stipris; γ – dalinis patikimumo koeficientas.

Skaičiuojant plieno plaušo poveikį kerpamajam stiprumui įvertinami šie parametrai: fibros orientacija ir dispersinio armavimo kintamumas K_s , SFRC liekamieji tempimo stipriai f_{tf} esant plyšio pločiui w , sijos plotis įvertinant ribinio ploto poveikį b_w :

$$V_{uf} = K_s * f_{tf} * (w) * b_w * z * \cot\theta; \quad (1.8.2)$$

Plieno plaušu armuoto betono liekamųjų stiprių įtaka kerpamajam stiprumui apskaičiuojama taip:

$$f_{tf} = K_G [0,4 * f_{R2} + 1,2 * \xi(w) * (f_{R4} - f_{R2})]; \quad (1.8.3)$$

Čia $\xi(w)$ – plyšio plošio funkcija; K_G – koeficientas priklausantis nuo kelių dedamųjų:

$$K_G = k_c * k_b * k_n; \quad (1.8.4)$$

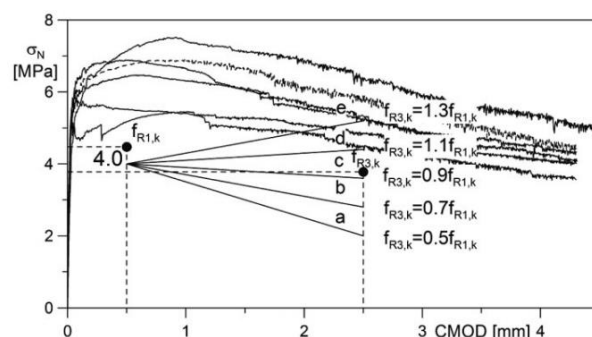
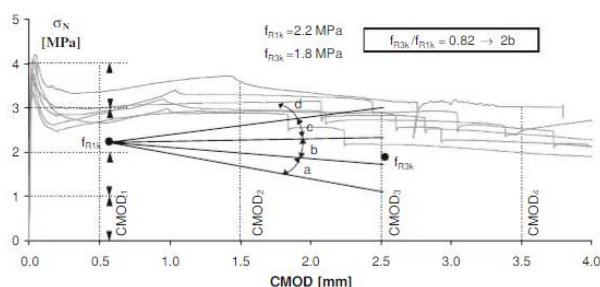
Čia k_n – įpjovos įtakos koeficientas; k_b - ribojamo skaičiuojamojo skerspjūvio ploto įtakos koeficientas; k_c – fibros orientacijos erdvėje dėl betono liejimo formoje koeficientas.

1.8.2. $f_{R,1}$ ir $f_{R,3}$ pritaikomumas

Plieno plaušu armuoto betono stiprio klasifikavimas pagal charakteristinį liekamąjį tempimo stiprį $f_{Rk,1}$: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0 (MPa). Įtempių pasiskirsymą σ -CMOD priklausomybės kreivėje nusako charakteristinių liekamųjų tempimo stiprių $f_{Rk,3}$ ir $f_{Rk,1}$ reikšmių, atitinkamai būdingų saugos (ULS) ir tinkamumo ribiniams (SLS) būviams, santykis.

1 lentelė Įtempių santykių klasifikavimas

a) M. D. Prisco, M. Columbo ir D. Dozio [25]	b) fib Model Code 2010 [26]
<ul style="list-style-type: none"> – A jei $0,5 \leq f_{Rk,3}/f_{Rk,1} < 0,8$ – B jei $0,8 \leq f_{Rk,3}/f_{Rk,1} < 1,1$ – C jei $1,1 \leq f_{Rk,3}/f_{Rk,1} < 1,4$ – D jei $1,4 \leq f_{Rk,3}/f_{Rk,1}$ 	<ul style="list-style-type: none"> – a jei $0,5 \leq f_{Rk,3}/f_{Rk,1} < 0,7$ – b jei $0,7 \leq f_{Rk,3}/f_{Rk,1} < 0,9$ – c jei $0,9 \leq f_{Rk,3}/f_{Rk,1} < 1,1$ – d jei $1,1 \leq f_{Rk,3}/f_{Rk,1} < 1,3$ – e jei $1,3 \leq f_{Rk,3}/f_{Rk,1}$



11 pav. Plieno plaušu armuoto betono klasifikavimo pavyzdys

Siekiant užtikrinti jog konstrukcijoje nepasireikštų trapios deformacijos [25], [26] šaltiniuose minima sąlyga kada galima dalinai ar pilnai pakeisti strypinę armatūrą arba armatūros tinklą konstrukcijoje, saugos ribiniam būviui (ULS): $f_{Rk,1}/f_{Lk} > 0,4$, $f_{Rk,3}/f_{Rk,1} > 0,5$, čia f_{Lk} – betono charakteristinis tempimo stipris, ties proporcingumo riba (LOP), kuris atitinka didžiausią apkrovą esant 0-0,05 mm CMOD vertei.

1.9. Apibendrinimas

Naaman'o (2003) ir Sujivorakul'o (2012) skaičiavimo metoduose skaičiuojant SFRC liekamuosius įtempius tempime vertinami tik keli rodikliai kurie daro įtaką betono armuoto plieno plaušu mechaninėms savybėms. Vertinami rodikliai Sujivorakul'o (2012) metodikoje: plaušų geometriniai

parametrai, fibros ilgio-pločio santykis, betono gniuždomasis stiprumas, Naaman'o (2003) metodikoje taip pat taikomi šie rodikliai ir patikimumo koeficientai λ priklausantys nuo fibrų inkaravimosi, fibrų orientacijos plyšio zonoje, fibrų tarpusavio sąveikos. Tačiau yra daug skirtingų technologinių betono parametrų kurie neįvertinami: betono tankinimo būdas ir laikas, granulimetrinė santykiai tarp užpildų mišinyje, betono sudėtis.

2. Duomenų analizė

Baigiamojo darbo metu buvo atliekama duomenų analizė renkant lenkimo bandymų duomenis, pagal standartą EN-14651+A1:2007. Šie duomenys renkami darbe ir struktūrizuojami į keturias dalis, atsižvelgiant į ribojimus aprašomus RILEM TC 162-TDF tyrimuose [27, 28]. Pilna duomenų suvestinė supildyta 1 priede. Duomenų šaltiniai [4, 5, 6, 9, 17, 18, 30, 31, 34].

2 lentelė Fibros parametrų suvestinė

Fibros								
Medžiaga	Forma	Bandinių sk. n	V_{fb} , %	V_{fb} , kg/m^3	l_{fb} , mm	d_{fb} , mm	l_{fb}/d_{fb}	f_y , MPa

- Medžiaga – turi būti naudojamos plieninės fibros.
- Forma – fibros forma gali būti: užlenktais galais.
- Bandinių skaičius – turi būti atlikti mažiausiai 3 lenkimo bandiniai vieno plieno plaušo armuoto betono mišinio serijoje.
- Fibrų kiekis betono tūryje V_{fb} , % arba kg/m^3 – lenkimo bandymų duomenų ataskaitose fibros kiekis tūryje gali būti pateikiamas procentalia arba tankiu, pastaruoju atveju reikia perskaičiuoti į procentinę išraišką, kadangi taikomiems metodams tai yra aktualiau.
- Fibros ilgis - l_{fb} , mm.
- Fibros diametras - d_{fb} , mm.
- Fibros ilgio ir diametro santykis - l_{fb}/d_{fb} .
- Plieno charakteristinis stiprumas pagal takumo ribą - f_y , MPa.

3 lentelė Lenkimo bandymo duomenų suvestinė

Lenkimo bandymas							
$f_{R,1}$ MPa	$f_{R,2}$ MPa	$f_{R,3}$ MPa	$f_{R,4}$ MPa	l , mm	h_{sp} , mm	h , mm	b , mm

- Liekamasis lenkiamo plieno plaušu armuoto betono stipris – $f_{R,i}$, MPa.
- Prizmės atstumas tarp atramų – l , mm turi būti lygus 500 mm, pati prizmė gali būti 550, 600 mm ilgio.
- Prizmės aukštis ties išplova – h_{sp} , mm turi būti 125 mm aukščio, pats įpjovimas turi būti 25 gylio ir ≤ 5 mm pločio.
- Prizmės geometrija – aukštis h ir plotis b turi būti 150 mm pagal standartą.

4 lentelė Gniuždymo bandinių suvestinė

Betono tipas	Kubeliai						Cilindras				
	n	b_{cub} , mm	l_{cub} , mm	h_{cub} , mm	$f_{ck,cube}$, MPa	$f_{cm,cube}$, MPa	n	h , mm	d , mm	f_{ck} , MPa	f_{cm} , MPa

- Betono tipas – savaime susitankinantis arba mechaniškai tankinamas betonas.
- Bandinių skaičius – n.
- Kubelio geometrija – b_{cub} , l_{cub} ir h_{cub} 150 arba 100 mm.
- Betono charakteristinis stiprumas – f_{ck} , MPa.
- Vidutinis betono gniuždomasis stipris – f_{cm} , MPa.
- Cilindro geometrija – h_d ir d_d santykis turi būti 2:1.

3. Metodo taikymas

3.1. Duomenų gavimas

Šiuo metu yra surinktos 30 serijos badinių serijų iš 9 skirtingų literatūros šaltinių. Mažiausiais atliktų lenkimo bandymų skaičius serijoje 3, daugiausiai – 7. Sudėjus visus serijų bandymus, nagrinėta buvo 138 prizmės. Bandymai atlikti naudojant skirtingo stiprumo betonus, skirtingų parametrų plieninės fibros. Darbe vertinami buvo tik mechaniškai tankinti betonai, kadangi savaime susitankinančio betono atliktų bandymų šaltinių rastas tik vienas tinkamas.

Skirtinguose šaltiniuose fibrų kiekis V_f pateikiamas masės tūryje išraiška ir ją reikia paversti į procentinę išraišką, kad galima būtų pritaikyti skaičiavimo metodams 1.3 ir 1.4 poskyriuose. V_f procentinė išraiška apibūdina koks yra fibros tūrio santykis su betonu. Fibros tūris išskaičiuojamas žinant koks yra plieno tankis ir kiek kilogramų plieno plaušo buvo panaudota vienam kubiniam metrui betono. Šie duomenys buvo skaičiuojami 2-3, 10-11 ir 19-22 bandinių serijose:

$$V_f(\%) = \frac{V_{f, fib}}{V_{f, sija}} * 100 \%; \quad (3.1.1)$$

$$V_{f, fib} = m_f * \rho_s; \quad (3.1.2)$$

$$m_f = V_f(kg/m^3) * V_{f, sija}; \quad (3.1.3)$$

Čia $V_{f, fib}$ – plieninės fibros tūris sijoje, $V_{f, sija}$ – SFRC sijos tūris, m_f – fibros masė bandinyje, ρ_s – plieno tankis (priimamas 7850 kg/m^3).

Siekiant užpildyti pilnai duomenų lenteles taip pat buvo skaičiuojamas fibros kiekis kilogramais kubiniame metre, šių duomenų trūko 4-7, 18 serijos bandiniams:

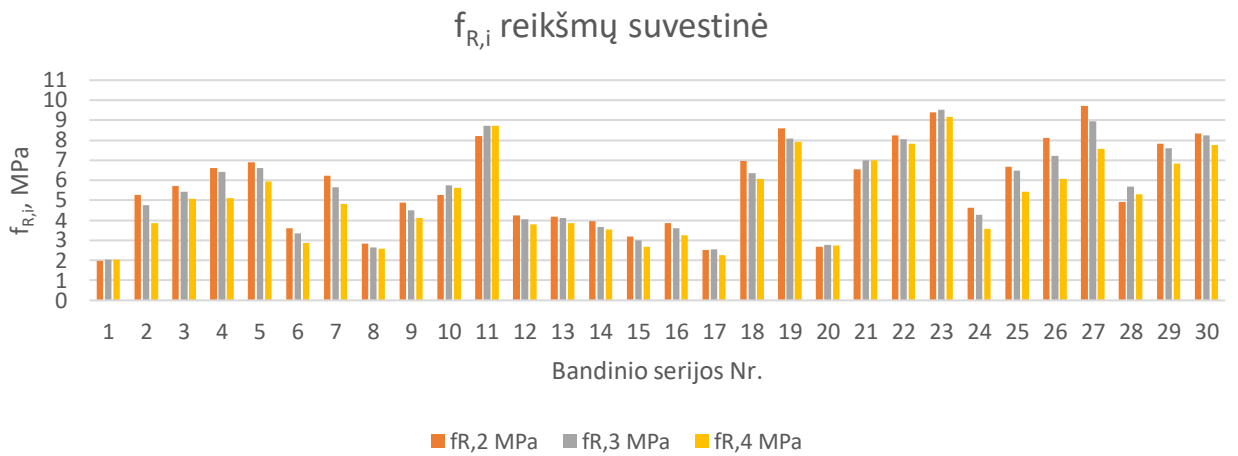
$$V_f(kg/m^3) = \frac{V_{f, fib} * \rho_s}{V_{f, sija}}; \quad (3.1.4)$$

$$V_{f, fib} = \frac{V_f(\%)}{100} * V_{f, sija}; \quad (3.1.5)$$

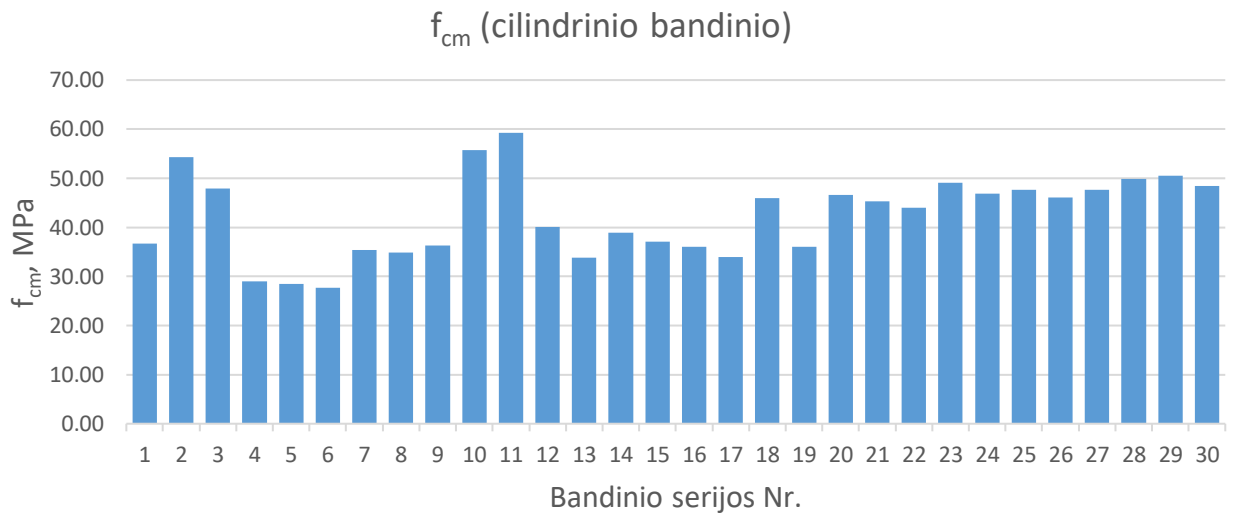
Su kiekvienu lenkimo bandymo serija lygiagrečiai buvo atliekami betono gniuždymo bandymai. Visos charakteristinės ir vidutinės betono gniuždymo stipriai apskaičiuoti taikant 1.5.4 ir 1.5.5 formules.

Liekamosios tempimo stiprio reikšmės lenkiant SFRC serijose gautos iš: 1 – $f_i/f_{ct,L}^f$ (plieno plaušu armuoto betono tempimo stipris pasiekus proporcingumo ribą) priklausomybės grafikų; 2-11 – $f_{R,i}$ stipriai apskaičiuoti pagal 1.1.7 formulę, apkrova gauta iš F-CMOD priklausomybės grafikų; 23-24 – $f_{R,i}$ stipriai apskaičiuoti pagal 1.1.7 formulę, apkrova gauta iš F- δ priklausomybės grafikų; likusios nepaminėtos bandinių serijų duomenys buvo pateikti tekste ar lentelėse.

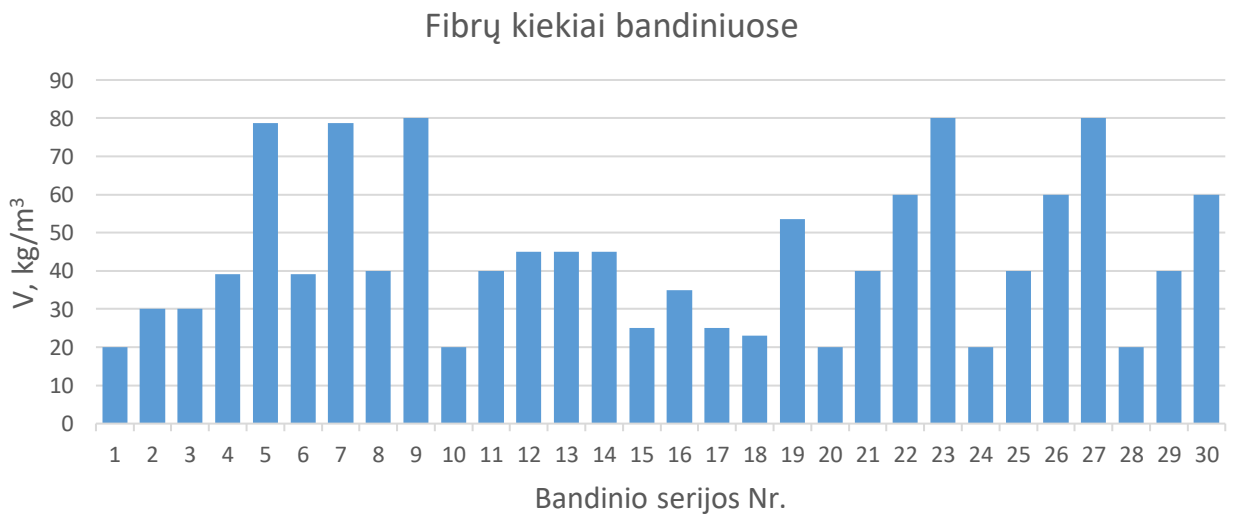
Surinkti duomenys (priedas 1) toliau taikomi skaičiuojant SFRC tempimo įtempius pagal Sujivorakul'o (2012) ir Naaman'o (2003) metodus (1.3.1, 1.4.1 ir 1.4.2 formulės). Bandymais nustatytos liekamųjų stiprių reikšmės perskaičiuojamos į įtempius taikant formules aprašytas 1.1 skyriuje ir laikantis jog plaušu armuotame betone įtempiai pasiskirsto pagal grafiką (3 pav.). Apskaičiuoti teoriniai įtempiai toliau yra lyginami su eksperimentiniais duomenimis (8 lentelė).



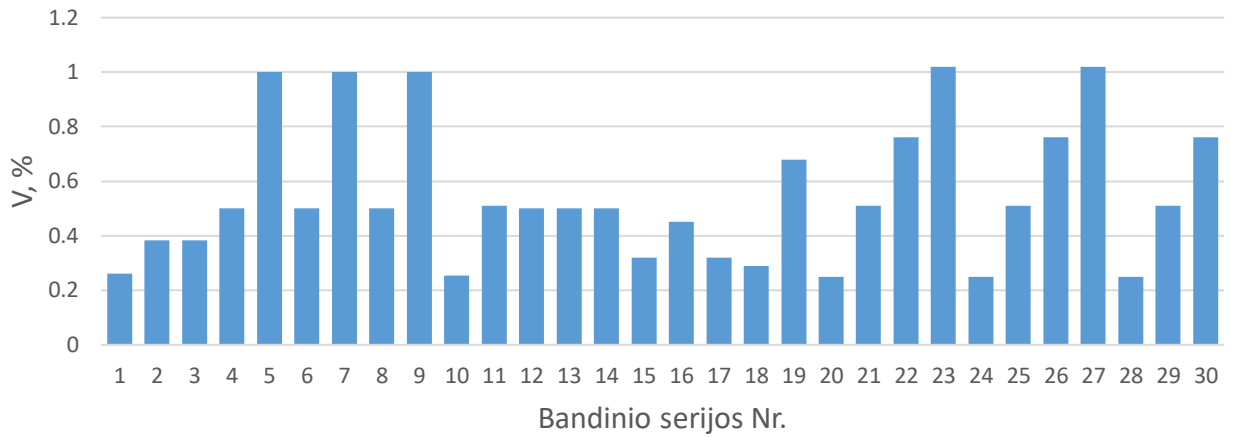
12 pav. Liekamųjų tempimo stiprių reikšmių grafikas



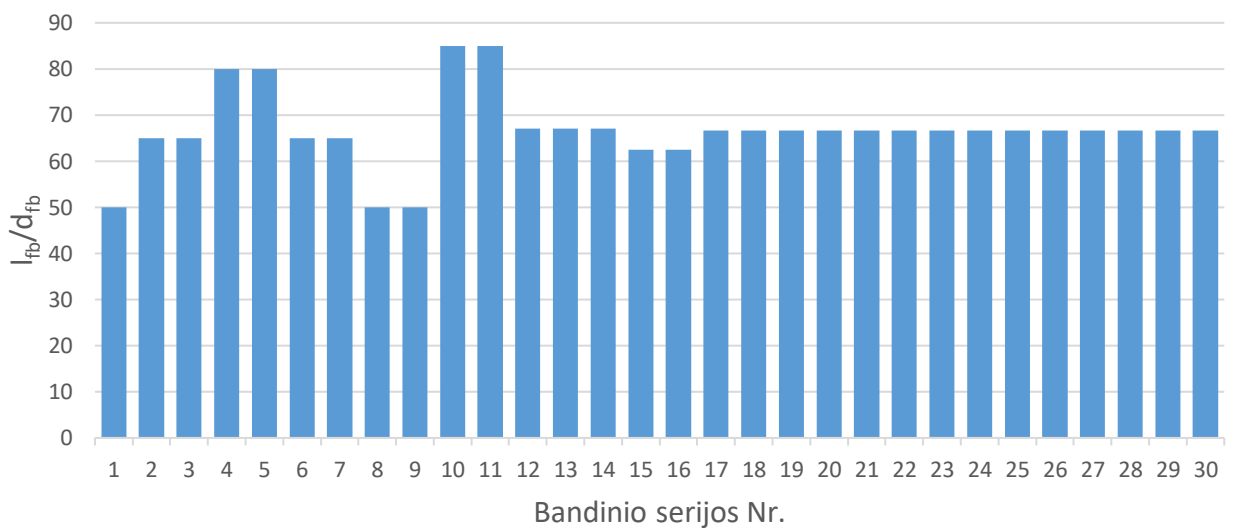
13 pav. Vidutinės gniuždomų cilindų stiprių reikšmės serijoje



14 pav. Fibrų kiekis bandinio serijoje, tūrine išraiška



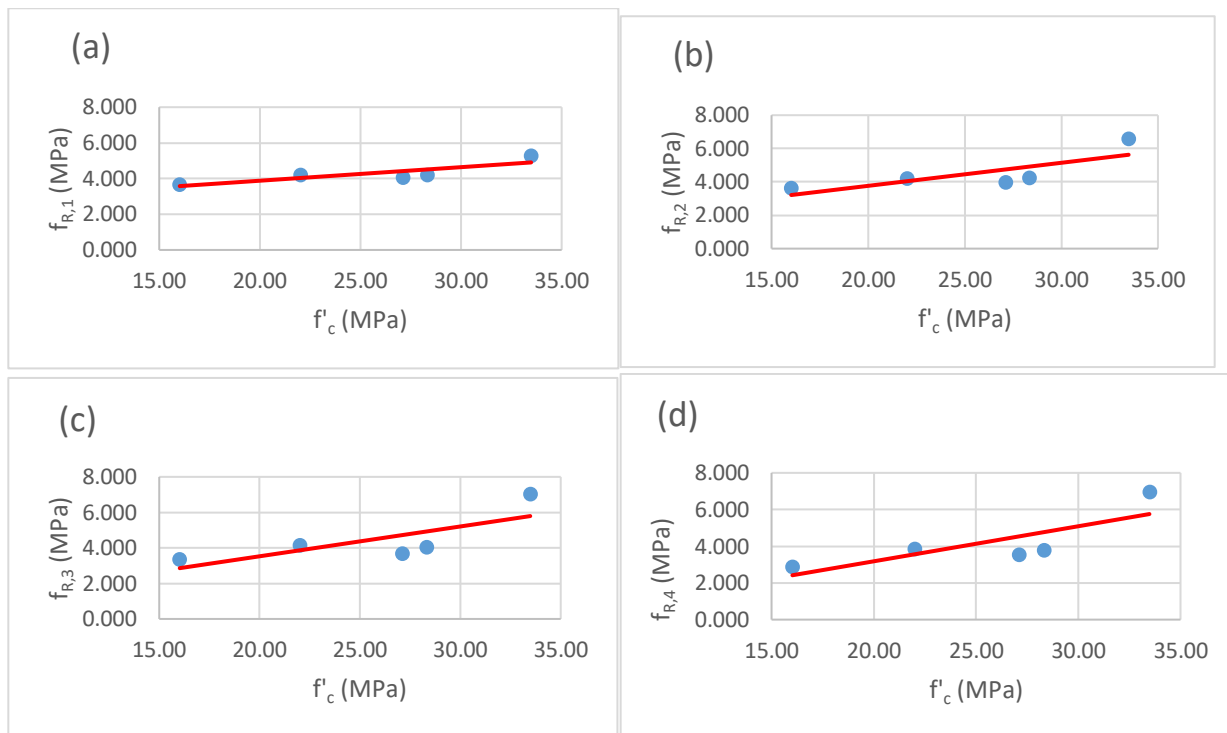
15 pav. Fibrų kiekis bandinio serijoje, procentinę išraiška



16 pav. Fibrų ilgio ir diametro santykiai serijoje

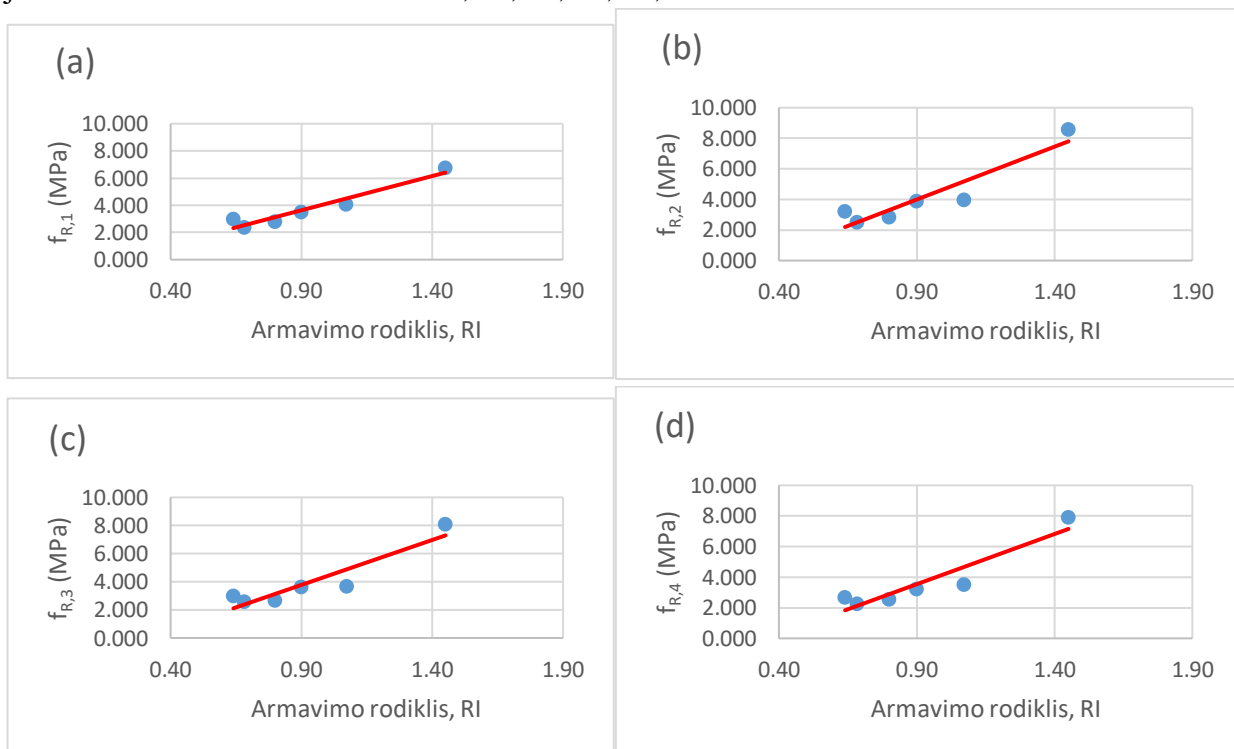
Apibendrinant surinktus duomenis: vidutinis fibrų ilgio ir diametro santykis $l_{fb}/d_{fb} = 66,9$, vidutinis fibrų kiekis $V_f = 44,7 \text{ kg/m}^3$ ($V_f = 0,56 \%$) ir vidurkis vidutinių plieno plaušu armuoto betono stipris $39,35 \text{ MPa}$. Vidutinės liekamojo tempimo stiprio reikšmės: $f_{R,2} = 5,360 \text{ MPa}$, $f_{R,3} = 5,361 \text{ MPa}$ ir $f_{R,4} = 4,952 \text{ MPa}$.

Žemiau pateiktos priklausomybės (17 pav.) tarp betono gniuždomojo stiprumo f'_c ir SFRC liekamųjų tempimo stiprių reikšmių tarp serijos duomenų (6, 12, 13, 14, 20) kurių armavimo koeficientai sutapo ($RI = 0,33-0,34$). Pastebimas atvirkščias dėsningumas negu 1.5 skyriuje minėtoje priklausomybėje, didėjant CMOD reikšmei betono gniuždomasis stipris turi didesnę įtaką liekamiesiems stipriams.



17 pav. Betono gniuždomojo stiprio įtaka SFRC liekamiesiems tempimo stipriams

Toliau pateiktos priklausomybės (18 pav.) tarp betono armavimo koeficiento (RI) ir liekamųjų tempimo stiprių reikšmių ($f_{R,i}$) kai betono charakteristinis gniuždymo stipris yra 25 MPa. Duomenų serijos kurios atitinka $f'_c = 25$ MPa – 8, 14, 15, 16, 17, 18.



18 pav. Betono armavimo koeficiento įtaka SFRC liekamiesiems tempimo stipriams

3.2. Metodų liekamųjų įtempių skaičiavimas

Taikant 1.3 ir 1.4 poskyriuose aptartus skaičiavimo metodus iš turimų duomenų apskaičiuotos plieno plaušo armuoto betono liekamųjų tempimo įtempių reikšmės pagal empirinį C. Sujivorakul'o ir analitinį A. E. Naaman'o metodus. Skaičiuotų liekamųjų tempimo įtempių reikšmės pateikiamos su aktualiais duomenimis iš taikomų formulių. Rezultatai pateikti 5 ir 6 lentelėje.

C. Sujivorakul'o metode naudojamas vidutinis betono gniuždomasis stipris be fibros, ši vertė apskaičiuojama taikant 1.6.7 formulę, kur armavimo indeksas yra lygus 1.6.9 formulei, o betono gniuždomasis charakteristinis stipris yra lygus 1.6.4 [7]. C. Sujivorakul'o metodo aprašyme [15] matyti iš įtempių ir deformacijų (σ - δ) grafiko jog vertinamos yra įtempių reikšmės kurios yra nuo 0,5 ‰ iki 2‰ deformacijų (0,1 mm ir 0,4 mm plyšio pločio dydžio CMOD). Tai reiškia jog $f_{R,1}$ (kuris atitinka $CMOD_1 = 0.5$) liekamasis tempimo stipris bus taikliausiai reprezentuotas šio metodo skaičiavimų. To pasekoje, skaičiuojama liekamųjų tempimo įtempių reikšmė $\sigma_{p,4}$ bus netaikliausiai atspindėtos formulėse kadangi tai yra tolimiausia vertinama reikšmė $CMOD_4 = 3,5$ mm. C. Sujivorakul'o metodas tinkamas skaičiuoti liekamuosius įtempius kai plyšio atsivėrimo įtempis yra didesnis negu po plyšio atsivėrimo susidariusius įtempius tempime.

5 lentelės C. Sujivorakul'o metodu nustatytų įtempių suvestinė

Serijos Nr.	f_{cm} , MPa	RI	$f'c$	σ_p	
	$f_{cm} = f_{cm,fb} - 3.51 \cdot RI$	$RI \approx 3.2 \cdot \sqrt{V_f} \cdot l/d$	$f'c \approx f_{ck} = f_{cm} - 8$	Vidutinių reikšmių įtempiai	Skaičiuojamų reikšmių įtempiai
1	35.29	0.42	27.29	0.629	0.526
2	51.56	0.79	43.56	1.269	1.067
3	45.16	0.79	37.16	1.396	1.174
4	24.51	1.28	16.51	1.437	1.216
5	19.51	2.56	11.51	1.970	1.724
6	24.02	1.04	16.02	1.033	0.874
7	28.03	2.08	20.03	1.895	1.659
8	30.67	1.60	22.67	1.666	1.458
9	53.30	0.69	45.30	1.403	1.172
10	54.43	1.39	46.43	2.601	2.202
11	36.33	1.07	28.33	1.521	1.287
12	30.01	1.07	22.01	1.340	1.134
13	35.12	1.07	27.12	1.488	1.259
14	34.85	0.64	26.85	0.941	0.789
15	32.89	0.90	24.89	1.218	1.028
16	43.83	0.62	35.83	1.101	0.921
17	30.91	1.45	22.91	1.795	1.535
18	44.73	0.53	36.73	0.974	0.813
19	41.48	1.09	33.48	1.734	1.468
20	38.31	1.62	30.31	2.237	1.923
21	41.46	2.18	33.46	2.830	2.480
22	45.03	0.53	37.03	0.978	0.817

5 lentelė C. Sujivorakul'o metodu nustatytų įtampių suvestinės pratęsimas

Serijos Nr.	f_{cm} , MPa	RI	$f'c$	σ_p	
	$f_{cm} = f_{cm,fb} - 3.51 * RI$	$RI \approx 3.2 * V_f * l / d$	$f'c \approx f_{ck} = f_{cm} - 8$	Vidutinių reikšmių įtempiai	Skaičiuojamų reikšmių įtempiai
23	43.88	1.09	35.88	1.795	1.520
24	40.41	1.62	32.41	2.313	1.989
25	40.06	2.18	32.06	2.770	2.428
26	48.03	0.53	40.03	1.016	0.849
27	46.68	1.09	38.68	1.864	1.578
28	42.71	1.62	34.71	2.394	2.058
29	35.29	0.42	27.29	0.629	0.526
30	51.56	0.79	43.56	1.269	1.067

5 lentelė A.E. Naaman'o metodu nustatytų įtampių suvestinė

Serijos Nr.	$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$	$\tau = 2 * f_{ctm}$	$f_{ctm} = 0.3 * f_{ck}^{(2/3)}$	σ_{pc} , MPa
	λ	τ , MPa	f_{ctm} , MPa	Teorinės
1	0.3	5.44	2.72	0.212
2	0.3	7.43	3.71	0.554
3	0.3	6.68	3.34	0.498
4	0.3	3.89	1.94	0.467
5	0.3	3.06	1.53	0.734
6	0.3	3.81	1.91	0.372
7	0.3	4.43	2.21	0.863
8	0.3	4.81	2.40	0.721
9	0.3	7.62	3.81	0.495
10	0.3	7.75	3.88	1.007
11	0.3	5.58	2.79	0.560
12	0.3	4.71	2.36	0.474
13	0.3	5.42	2.71	0.544
14	0.3	5.38	2.69	0.323
15	0.3	5.11	2.56	0.432
16	0.3	6.52	3.26	0.378
17	0.3	4.84	2.42	0.658
18	0.3	6.63	3.31	0.331
19	0.3	6.23	3.12	0.636
20	0.3	5.83	2.92	0.887
21	0.3	6.23	3.12	1.271
22	0.3	6.67	3.33	0.333
23	0.3	6.53	3.26	0.666
24	0.3	6.10	3.05	0.927
25	0.3	6.06	3.03	1.235

6 lentelė A.E. Naaman'o metodu nustatytų įtempių suvestinės pratęsimas

Serijos Nr.	$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$	$\tau = 2 * f_{ctm}$	$f_{ctm} = 0.3 * f_{ck}^{(2/3)}$	σ_{pc} , MPa
	λ	τ , MPa	f_{ctm} , MPa	Teorinės
26	0.3	7.02	3.51	0.351
27	0.3	6.86	3.43	0.700
28	0.3	6.38	3.19	0.970
29	0.3	5.44	2.72	0.212
30	0.3	7.43	3.71	0.554

3.3. Koeficientų skaičiavimas

Koeficientai k_p ir k_{pc} yra išvedami taikant minimizavimo funkciją. Šis metodas taikomas siekiant surasti geriausią sietį tarp visų serijų apskaičiuotų liekamųjų įtempių ir vieno koeficiento. Koeficientas dauginamas iš kiekvienos serijos apskaičiuotų įtempių verčių ir lyginami su eksperimentiniais duomenimis. Teorinių ir eksperimentinių įtempių vertės ties kiekviena stiprio reikšme (kai $i = 2, 3, 4$) serijoje viena iš kitos atimamos ir keliama kvadratu, tuomet visų serijų vertės sudedamos. Koeficientas turintis mažiausią sumą neatitikimų tarp serijų laikomas tiksliausias pagal turimus duomenis. 8 lentelėje pateikta duomenų suvestinė visų koeficientų, jų paklaidų ir variacijos koeficientų.

$$e_{i,j} = f_{calc,i} * k_p(k_{pc}) - f_{exp,i} * k_i; \quad (3.3.1)$$

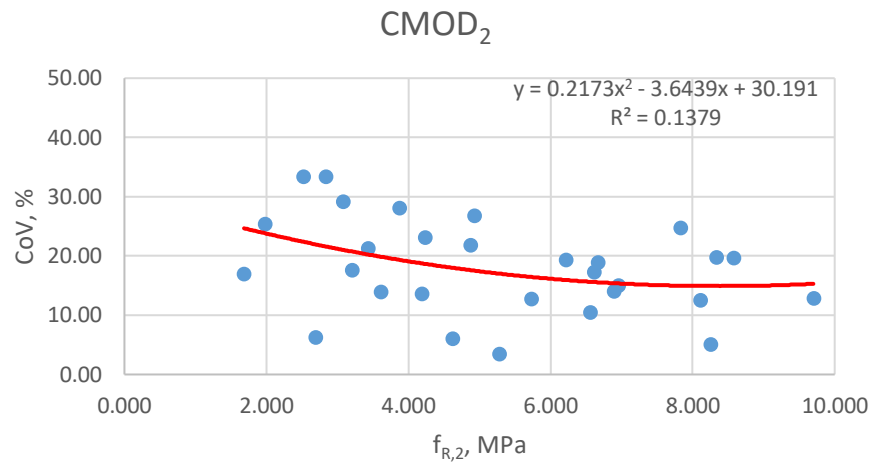
$$S = \sum_{j=1}^N e_{i,j}^2; \quad (3.3.2)$$

Čia $e_{i,j}$ – j serijos numeris (kai $i = 2, 3$ ir 4); N – serijų skaičius; f_{calc} – apskaičiuotas liekamasis plieno plaušu armuoto betono tempimo stipris lenkime; f_{exp} – bandymu nustatytas liekamasis SFRC tempimo stipris; S – suma serijos paklaidų.

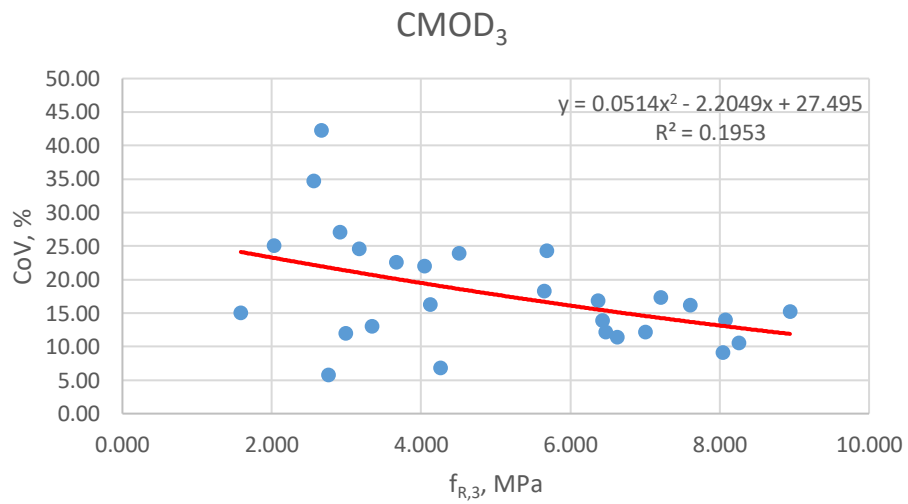
Suradus koeficientus Sujivorakul'o (2012) ir Naaman'o (2003) metodams su kuriais sumos paklaidų pagal 3.2.1 ir 3.2.2 gaunamos mažiausios rezultatai teorinių įtempių yra lygiamos su eksperimentinėmis vertėmis ir ieškomos mažiausios, didžiausios paklaidos ir variacijos koeficientai. Rezultatai vidutinių liekamųjų tempimo įtempių pateikti 8 lentelėje ir 29, 30 ir 31 pav. grafikuose.

3.4. Charakteristinės reikšmės

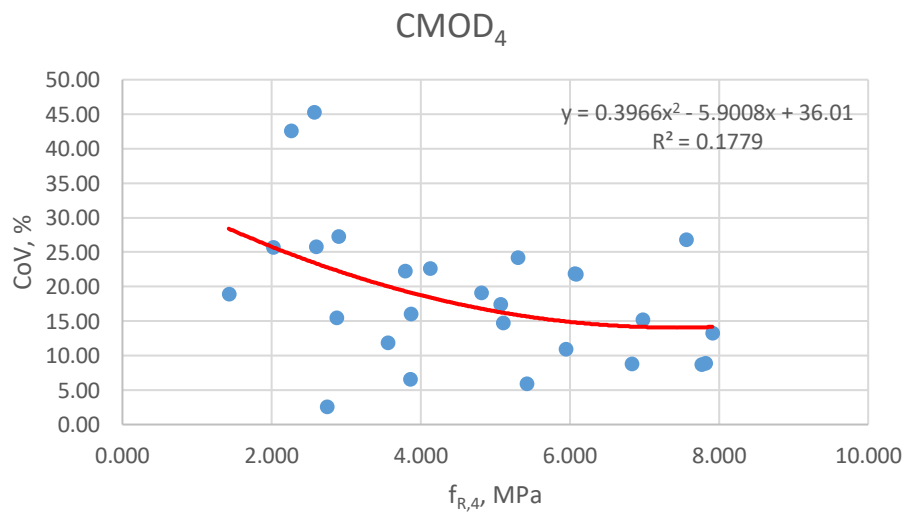
Skaičiuojant SFRC liekamųjų tempimo stiprių charakteristines reikšmes ne visų serijų bandymų rezultatuose buvo pateikiamos standartinės deviacijos, kai kurie rezultatai aprašyti tik vidutinėm stiprumo reikšmėm be individualių bandymų rezultatų. Bandinių serijose 10, 11 ir 23 nebuvo priemonių kaip išsivesti liekamųjų stiprių standartines deviacijas, o bandinių serijose 2, 3, 15, 16 negalima buvo išvesti $f_{R,3}$ arba $f_{R,4}$ stiprių standartinių deviacijų. Iš turimų standartinių deviacijų išvestos trys liekamųjų stiprių ir variacijos koeficientų priklausomybių kreivės atitinkančios $CMOD_2$, $CMOD_3$ ir $CMOD_4$ (18, 19, 20 pav.). Į kreivių formules įsistačius atitinkamas stiprių reikšmes, galima išsivesti trūkstamas deviacijų reikšmes (12 lentelė).



19 pav. Priklausomybė tarp CoV ir $f_{R,2}$



20 pav. Priklausomybė tarp CoV ir $f_{R,3}$



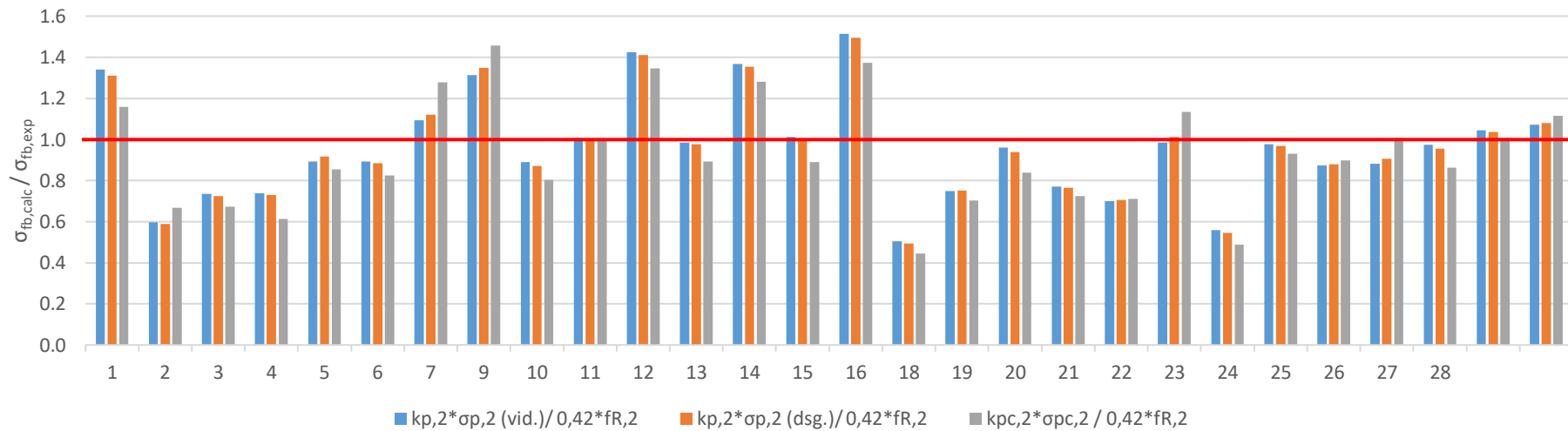
21 pav. Priklausomybė tarp CoV ir $f_{R,4}$

Rezultatų suvestinės ir grafikai klasikinio metodo pateikiami 6 lentelėje ir 22, 23, 24 pav., o Bayesian'o rezultatų suvestinė pateikta 2 priede. 8 ir 17 serijų rezultatai nepateikiami kadangi paklaidos gautos iš šių bandinių serijų yra kelis kartus didesnės nei likusių serijų paklaidos lyginant charakteristinių reikšmių teorinius ir eksperimentinius duomenis. Lyginant klasikinio ir Bayesian'o metodų gautus rezultatus matyti jog skaičiuojant pagal klasikinį metodą gaunamos minimalios, maksimalios paklaidos ir variacijos koeficientai yra mažesni.

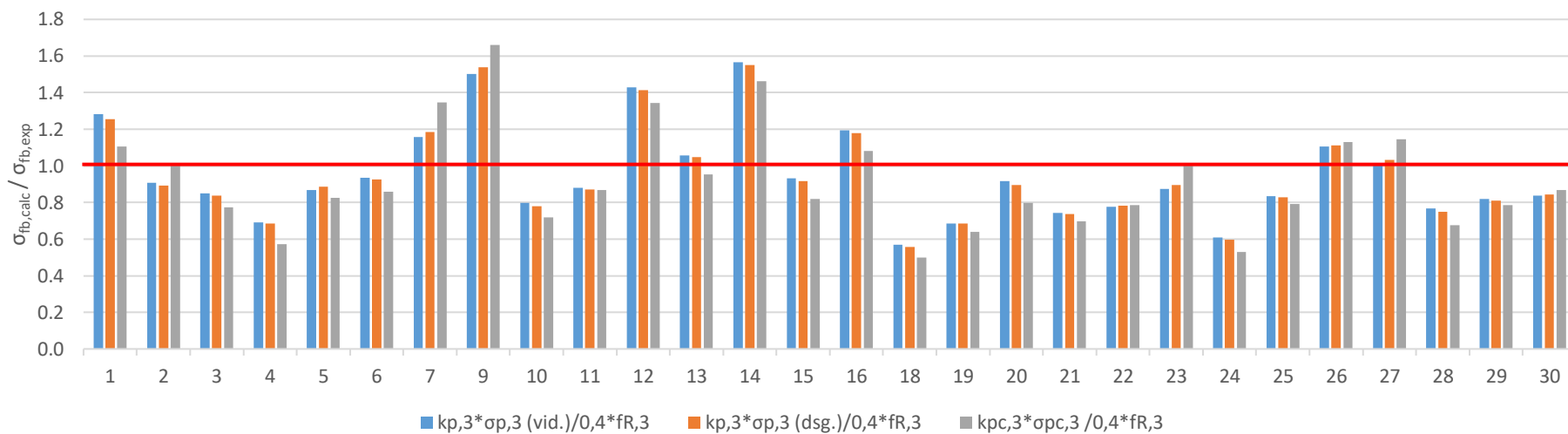
Pagal klasikinį charakteristinių duomenų skaičiavimo metodą gauta jog maksimalus perversinimas teorinių įtempių yra 94 %, didžiausias teorinio charakteristinio įtempio nuvertinimas: 56 %. Mažiausia nesutaptis tarp teorinio ir faktinio dydžių gauta 35 %.

6 lentelė Siūlomi k_p ir k_{pc} koeficientai ir jų paklaidos (charakteristinių reikšmių $f_{Rk,i}$)

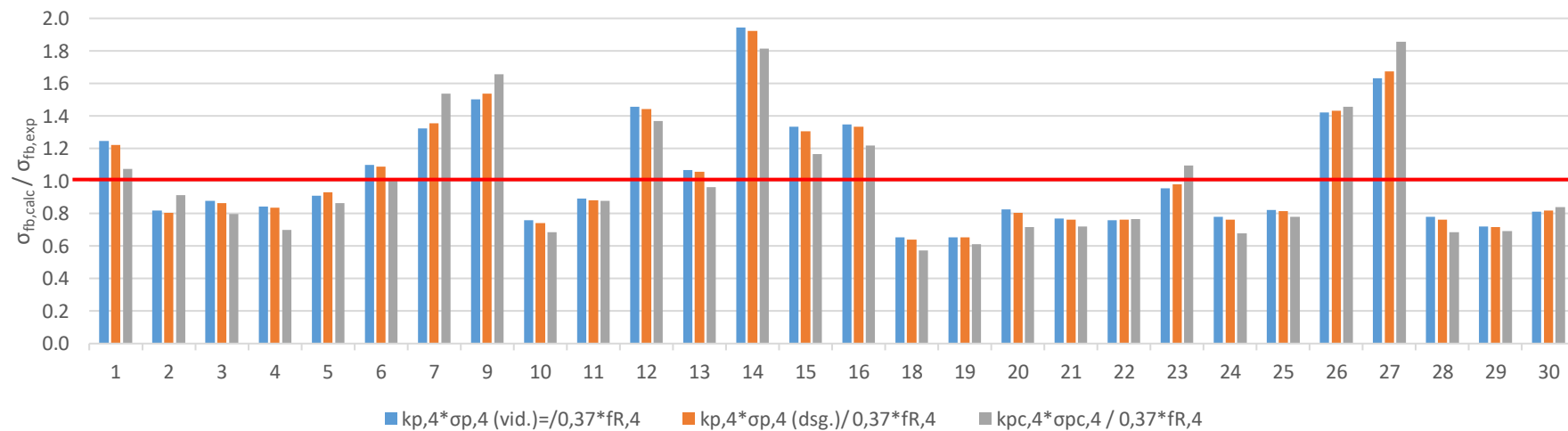
Paklaidos, %	σ_p		σ_{pc}	Paklaidos, %	σ_p		σ_{pc}	Paklaidos, %	σ_p		σ_{pc}
	$\sigma_{p,2}$ (vid.)	$\sigma_{p,2}$ (dsg.)	$\sigma_{pc,2}$		$\sigma_{p,3}$ (vid.)	$\sigma_{p,3}$ (dsg.)	$\sigma_{pc,3}$		$\sigma_{p,4}$ (vid.)	$\sigma_{p,4}$ (dsg.)	$\sigma_{pc,4}$
k	0.981	1.149	2.514	k	0.926	1.084	2.365	k	0.816	0.955	2.082
MIN	50	51	56	MIN	43	44	50	MIN	35	36	43
MAX	51	50	46	MAX	56	55	66	MAX	94	92	86
CoV %	26.74	26.84	28.55	CoV %	26.94	27.35	30.83	CoV %	32.64	33.22	37.10



22 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC liekamųjų tempimo įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai $CMOD_2$



23 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC liekamųjų tempimo įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai CMOD₃



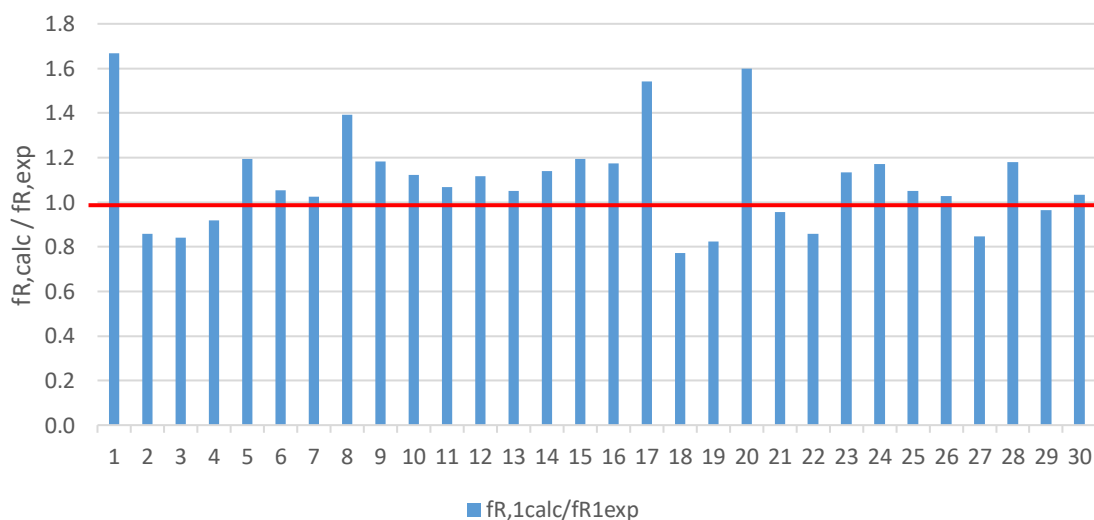
24 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC liekamųjų tempimo įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai CMOD₄

3.5. Fib Model Code 2010 rezultatai

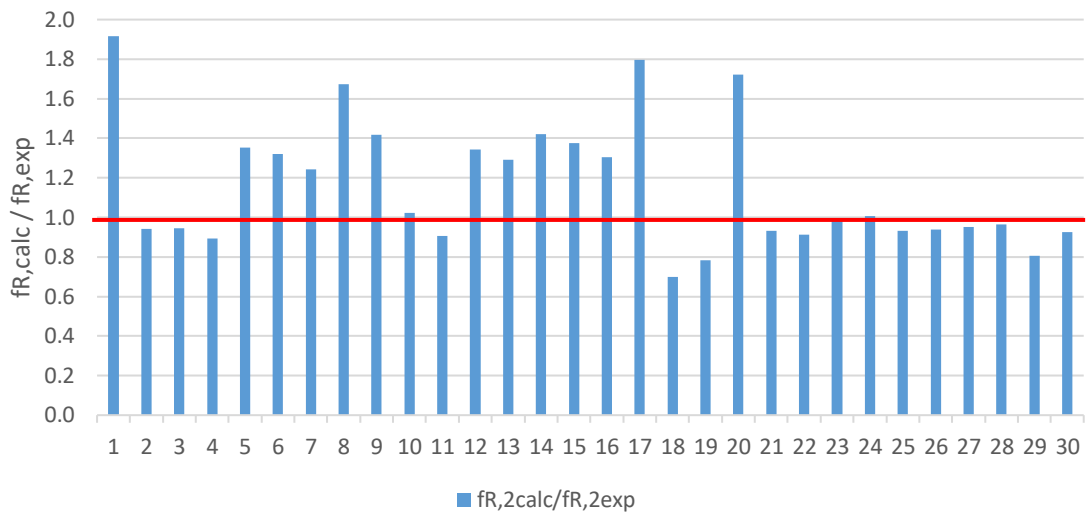
Aptartas skaičiavimo metodas 1.5 skyriuje yra skirtas apskaičiuoti plieno plaušo armuoto betono liekamuosius tempimo stiprius be bandymo. Šis skaičiavimo metodas taikomas palyginti vidutinių liekamųjų stiprių rezultatus gaunamus šiuo metodu su eksperimentiniais duomenimis iš surinktų šaltinių. Rezultatuose matyti (7 lentelė), kad apskaičiuotų stiprių reikšmės stipriai pervertina eksperimentinių duomenų stiprius, šis dėsningumas mažiausias su $f_{R,1}$ reikšmėmis (25 pav.), o labiausiai ryškus su $f_{R,4}$ reikšmėmis (28 pav.). Taikant Fib Model Code 2010 skaičiavimo metodą teorinių duomenų nuvertinimas lyginant su eksperimentinėmis vertėmis gavosi nuo 23 %, kai $CMOD = 0,5$ mm, iki 30 %, kai $CMOD = 1,5$ mm (7 lentelė).

7 lentelė Paklaidos skaičiuojant pagal Fib Model Code 2010

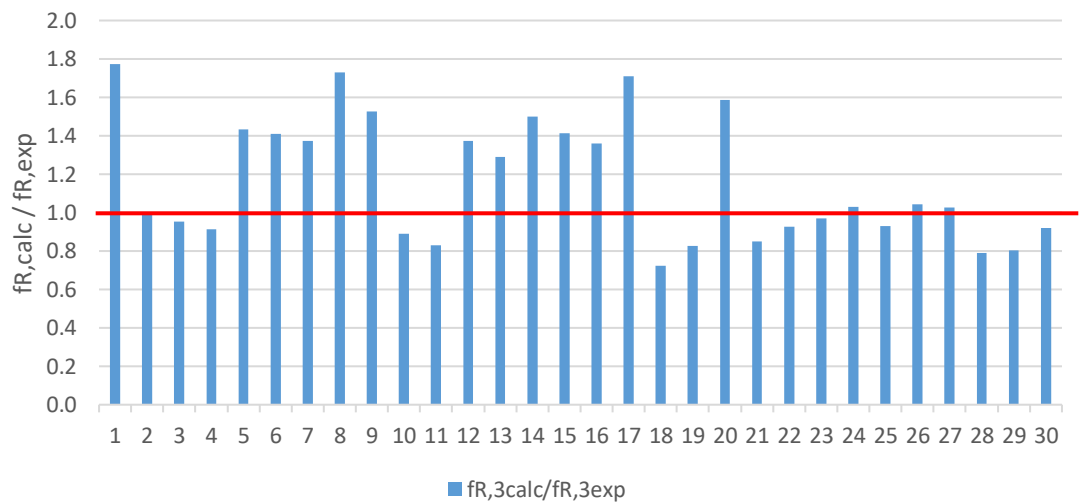
Paklaidos, %	$CMOD0.5$	$CMOD1.5$	$CMOD2.5$	$CMOD3.5$
MIN	23	30	28	29
MAX	67	92	77	80
CoV %	20.19	27.85	27.67	27.30



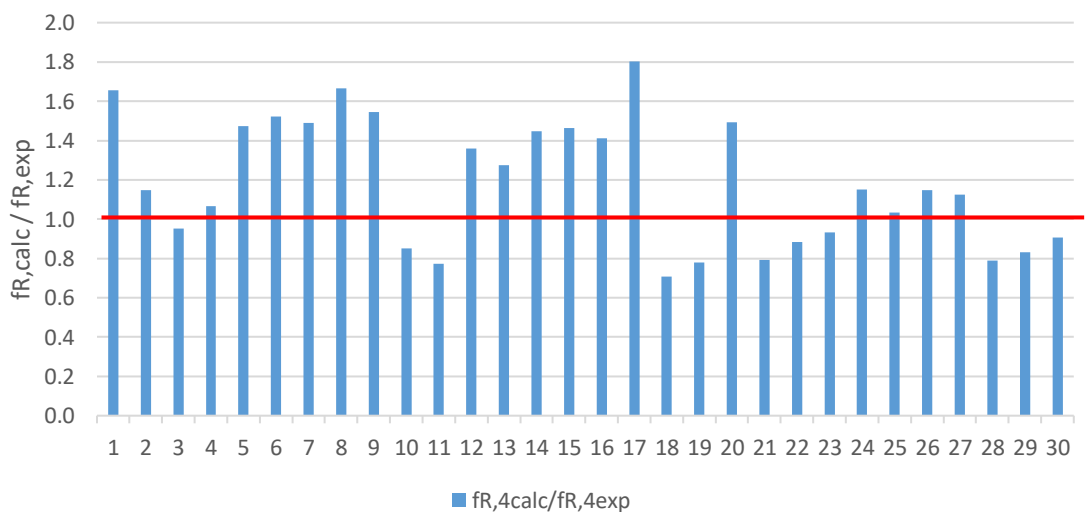
25 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC $f_{R,1}$ santykiai, kai $CMOD_1$ (vidutinių reikšmių)



26 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC $f_{R,2}$ santykiai, kai $CMOD_2$ (vidutinių reikšmių)



27 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC $f_{R,3}$ santykiai, kai $CMOD_3$ (vidutinių reikšmių)

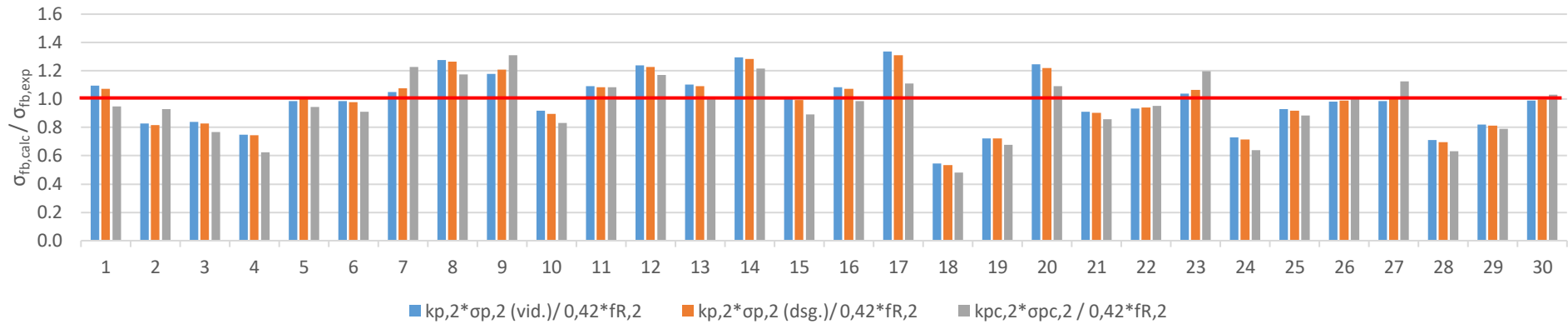


28 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC $f_{R,4}$ santykiai, kai $CMOD_4$ (vidutinių reikšmių)

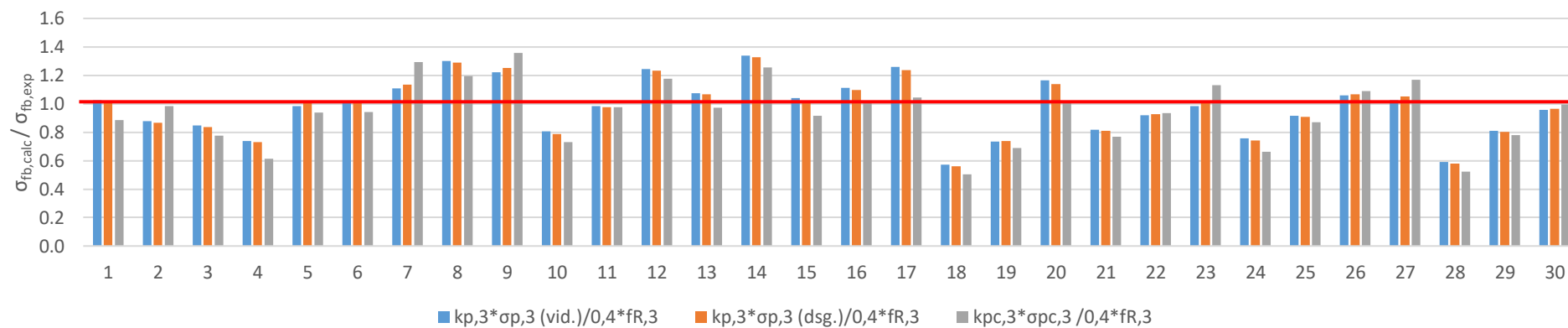
8 lentelė Siūloni k_p ir k_{pc} koeficientai ir jų paklaidos (vidutinių reikšmių $f_{Rm,i}$)

Paklaidos, %	σ_p		σ_{pc}	Paklaidos, %	σ_p		σ_{pc}	Paklaidos, %	σ_p		σ_{pc}
	$\sigma_{p,2}$ (vid.)	$\sigma_{p,2}$ (dsg.)	$\sigma_{pc,2}$		$\sigma_{p,3}$ (vid.)	$\sigma_{p,3}$ (dsg.)	$\sigma_{pc,3}$		$\sigma_{p,4}$ (vid.)	$\sigma_{p,4}$ (dsg.)	$\sigma_{pc,4}$
<i>CMOD1.5</i>				<i>CMOOD2.5</i>				<i>CMOD3.5</i>			
k	1.406	1.259	1.07	k	1.653	1.479	1.256	k	3.666	1.301	1.03
MIN	45	46	52	MIN	43	44	50	MIN	43	45	51
MAX	34	31	31	MAX	34	33	36	MAX	36	30	41
CoV	19.51	19.64	21.73	CoV %	20.28	20.58	23.40	CoV %	20.47	20.87	24.44

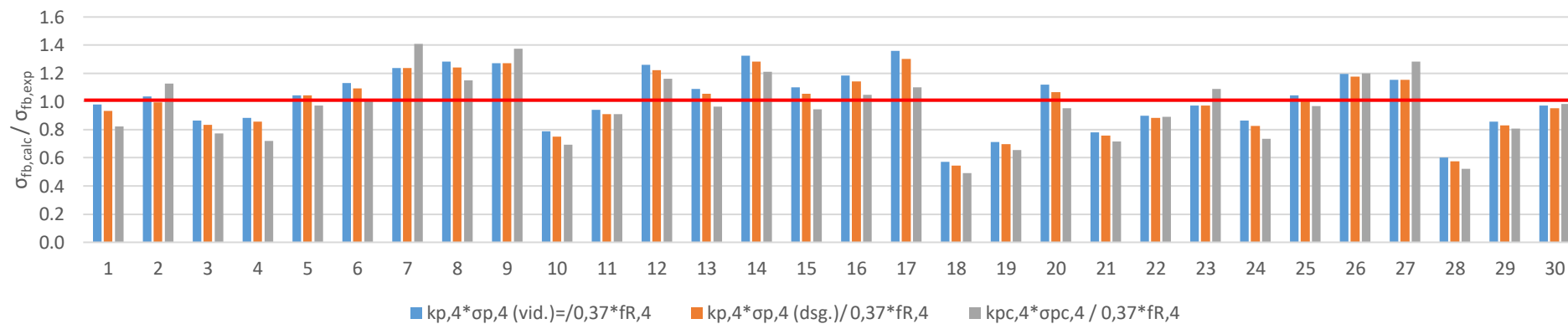
- CoV – Variacijos koeficientas paskaičiuotas iš neatitikimų tarp teorinių ir eksperimentinių verčių.



29 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC σ_{fb} santykiai, kai $CMOD_2$ (vidutinių reikšmių $f_{Rm,2}$)



30 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC σ_{fb} santykiai, kai $CMOD_3$ (vidutinių reikšmių $f_{Rm,3}$)



31 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC σ_{fb} santykiai, kai $CMOD_4$ (vidutinių reikšmių $f_{Rm,4}$)

Išvados

1. Baigiamajame magistro darbe pateikti plieno plaušu armuoto betono įtempių nustatymo būdai kuriuos taikant su pataisos koeficientais k_p ir k_{pc} galima teoriškai nustatyti įtempių vertes susidariusias kai plyšio pločio atsivėrimo dydžiai CMOD yra lygus 1,5, 2,5 ir 3,5 mm.
2. Rezultatuose gauta jog skaičiuojant vidutines liekamojo tempimo stiprių reikšmes didžiausias teorinių įtempių pervertinimas gavosi 41 % taikant A. E. Naaman'o (2003) metodą kai skaičiuojamas plyšio atsivėrimas CMOD₄.
3. Skaičiuojant teorines vidutines liekamojo tempimo stiprių reikšmes didžiausias įtempių nuvertinimas gavosi 52 % taikant A. E. Naaman'o (2003) metodą kai skaičiuojamas plyšio atsivėrimas CMOD₂.
4. Mažiausia paklaida gauta kai skaičiuojamas vidutinis įtempis pagal C. Sujivorakul'o (2012) metodą, esant plyšio pločio atsivėrimui CMOD₄, ir gautas 30 % pervertinimas teorinių įtempių.
5. Variacijos koeficientai gauti vidutinių teorinių ir eksperimentinių liekamųjų įtempių lyginimo metu vyrauja tarp 19,51 % ir 24,44 %. Mažiausia variacija gauta kai CMOD₂ ir įtempiai skaičiuoti pagal C. Sujivorakul'o (2012) vidutinių reikšmių išraišką, didžiausia – kai CMOD₄ ir skaičiuoti įtempiai pagal A. E. Naaman'o (2003) metodą.
6. Skaičiuojant charakteristinius plieno plaušu armuoto betono liekamuosius tempimo stiprius gautos mažesnės paklaidos taikant klasikinį metodą. Variacijos koeficientas vyrauja nuo 26,74 % iki 37,10 %.
7. Bandinių serijos su mažiausiais ilgio ir diametro santykiais ($l_{fb}/d_{fb} \approx 50$, serijos 1 ir 8) turi vienas iš mažiausių liekamųjų tempimo stiprumų pagal 12 pav. ir 16 pav. grafikus.
8. Didžiausi stiprumai nustatyti bandymo serijoje 22 kuri pasižymi vienu iš didžiausių SFRC gniuždymo stiprių, didžiausiu fibrų kiekiu aukštu fibros ilgio ir diametro santykiu. Didžiausi liekamieji tempimo stipriai 11, 22, 23 ir 23. 11 pasižymi dideliu fibros geometrijų santykiu ir didžiausiu gniuždomuoju stipriu, 23 ir 27 turi didžiausius fibrų kiekius ir didelius gniuždomuosius stiprius.
9. Skaičiuojant plieno plaušu armuoto betono tempimo stiprius pagal Fib Model Code 2010 pastebėta jog diduma apskaičiuotų stiprių yra pervertinti palyginus su eksperimentinėmis vertėmis. Labiausiai pervertintos duomenų serijos (1, 8, 17, 20) yra kur liekamieji tempimo stipriai nustatyti mažiausi, o vertinami SFRC parametrai (arnavimo koeficientas (RI), betono gniuždomasis stipris (f^c) ir fibros ilgis) pasižymėjo vienomis iš mažiausių reikšmių.

Literatūros sąrašas

1. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 14651:2005+A1:2007]. Betono su metaliniu pluoštu bandymo metodas. Tempiamojo stiprio lenkiant matavimas (proporcingumo riba (LOP), liekamasis stipris) = Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) turi Lietuvos standarto statusą, Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
2. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN ISO 12491:1997]. Statistical methods for quality control of building materials and components. Europos standartas EN ISO 12491:1997 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2013.
3. AMIN A., S. J. FOSTER and A. MUTTONI. Derivation of the σ -w relationship for SFRC from Prism Bending Tests.” *Structural Concrete*, vol. 16, no. 1, 2015, pp. 93–105., doi:10.1002/suco.201400018.
4. AMIN A., S. J. FOSTER, Shear Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams with Stirrups. *Engineering Structures*, vol. 111, 2016, pp. 323–332., doi:10.1016/j.engstruct.2015.12.026.
5. AMIRINENI K. C., Fracture properties of fiber reinforced concrete, Master of Science Thesis, The Pennsylvania State University, 2009.
6. BARROS J. A. O. and J. A. FIGUEIRAS, Flexural Behavior of SFRC: Testing and Modeling.” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 11, no. 4, 1999, pp. 331–339., doi:10.1061/(asce)0899-1561(1999)11:4(331).
7. BERCARDINO F., L. RIZZUTI, G. SPADEA. Experimental Tests Vs. Theoretical modeling for FRC in Compression, *Proceedings of FraMCoS-6*, Department of Structural Engineering, University of Calabria, Italy, 2007, pp. 1473-1480.
8. BURATTI N., C. MAZZOTTI, M. SAVOIA Experimental study on the flexural behaviour of fibre reinforced concretes strengthened with steel and macro-synthetic fibres. *Proceedings of FraMCoS-7*, May 23-28, 2010. Korea Concrete Institute, Seoul, 2010 ISBN 978-89-5708-181-5
9. CONFORTI A., F. MINELLI, G. A. PLIZZARI , et al. Wide-Shallow Beams with and without Steel Fibres: A Peculiar Behaviour in Shear and Flexure. *Composites Part B: Engineering*, vol. 51, 2013, pp. 282–290., doi:10.1016/j.compositesb.2013.03.033.
10. EZELDIN, A. S., BALAGURU, P. N. Normal- and High Strength Fiber-Reinforced Concrete under Compression – *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1992, vol. 4, no. 4, p. 415-429
11. F. MINELLI, A. CONFORTI, E. CUENCA and G. PLIZZARI et al. “Are Steel Fibres Able to Mitigate or Eliminate Size Effect in Shear?” *Materials and Structures*, vol. 47, no. 3, 2013, pp. 459–473., doi:10.1617/s11527-013-0072-y.
12. FOSTER S. J., A. AGARWAL and A. AMIN. Design of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams for Shear Using Inverse Analysis for Determination of Residual Tensile Strength. *Structural Concrete*, vol. 19, no. 1, 2017, pp. 129–140., doi:10.1002/suco.201700100.
13. KAKLAUSKAS, G., D. BAČINSKAS, V. GRIBNIAK, R. JAKUBOVSKIS, D. ULBINAS, E. GUDONIS, A. MEŠKĖNAS, E. TIMINSKAS ir A. SOKOLOV. Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos: vadovėlis. Vilnius: VGTU leidyklos TECHNIKA 1411-S, 2012. ISBN 978-609-457-349-1.
14. KELPŠA Š., M. AUGONIS, M. DAUKŠYS and A. AUGONIS. Analysis of Crack Width Calculation of Steel Fibre and Ordinary Reinforced Concrete Flexural Members.” *Journal of*

- Sustainable Architecture and Civil Engineering, vol. 6, no. 1, 2014, doi:10.5755/j01.sace.6.1.6336.
15. KELPŠA Š., M. AUGONIS, M. DAUKŠYS, T. ZINGAILA, A. AUGONIS. Calculation of Residual Tensile Stress in Order to Predict the Crack Width of Steel Fibre and Ordinary Reinforced Concrete Flexural Members. Proceedings of 20th International Conference. Mechanika, 2015, pp. 143-148.
 16. LÖFGREN, I. "Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction-a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis". PhD Thesis, Dep. of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2005.
 17. MESKENAS A., V. GRIBNIAK, G. KAKLAUSKAS, A. K. ARNAUTOV & A. RIMKUS Simplified technique for constitutive analysis of SFRC, Journal of Civil Engineering and Management, vol. 20, no. 3, 2014 pp. 446-453., DOI:10.3846/13923730.2014.909882.
 18. MPEGETIS O. S., Behaviour and design of steel fibre reinforced concrete slabs, A thesis, Department of Civil and Environmental Engineering Imperial College London, London, 2013.
 19. N. BURATTI, C. MAZZOTTI and M. SAVOIA, Experimental study on the flexural behaviour of fibre reinforced concretes strengthened with steel and macro-synthetic fibres, Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2010, pp. 1286-1294., ISBN 978-89-5708-181-5.
 20. NAAMAN, A. E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. -Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, vol. 1, no 3, p.241-252.
 21. NAAMAN A. E. Strain Hardening and Deflection Hardening Fiber Reinforced Cement Composites, RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement composites, 2003, pp. 93-124. ISBN 2-912143-38-1.
 22. NAAMAN A. E., H. W. REINHARDT, Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Proceedings of 2nd International Workshop on HPRFRC, Chapter 41, in High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: HPRFRC 2, A. E. Naaman, H. W. Reinhardt, Editors, RILEM, No. 31, E & FN Spon, London, 1996. pp. 1-24. ISBN 0-419-21180-2.
 23. NAAMAN, A. E. High-performance construction materials. Science and Applications. Engineering materials for technological needs Vol.1. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. -Singapore, 2008, 91-153. <https://doi.org/10.1142/6793>.
 24. NATARAJA, M. C., DHANG, N., GUPTA, A. P. Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. -Cement and Concrete Composites, 1999, vol. 21, no. 5-6, p. 383-390
 25. PRISCO M. D., G. PLIZZARI and L. VANDEWALLE. Fibre Reinforced Concrete: New Design Perspectives. Materials and Structures, vol. 42, no. 9, Oct. 2009, pp. 1261–1281., doi:10.1617/s11527-009-9529-4.
 26. PRISCO M. D., M. COLUMBO and D. DOZIO. Fibre-Reinforced Concrete In fib Model Code 2010: Principles, Models and Test Validation.” Structural Concrete, vol. 14, no. 4, 2013, pp. 342–361., doi:10.1002/suco.201300021.
 27. RILEM TC 162-TDF. Final Recommendation of RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete sigma-Epsilon-Design Method. Materials and Structures, vol. 36, no. 262, 2003, pp. 560–567., doi:10.1617/14007.

28. RILEM TC 162-TDF. Recommendations of RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: Bending Test.” *Materials and Structures*, vol. 35, no. 253, 2002, pp. 579–582., doi:10.1617/13884.
29. Š. KELPŠA. Steel Fibre Influence On Cracking and Stiffness of Reinforced Concrete Flexural Members, Summary of Doctoral Dissertation Technological Science, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Department of Construction Technologies, Kaunas University of Technology, Kaunas, 2017.
30. SFRC CONSORTIUM. Design Guideline for Structural Applications of Steel Fibre Reinforced Concrete. SFRC Consortium, 2014, SS 812310:2014. (2014). Design of Fibre Concrete Structures. Swedish Standards Institute, 2014.
31. SOETENS T. And S. MATTHYS. Different methods to model the post-cracking behaviour of hooked-end steel fibre reinforced. *Construction and Building Materials*, vol. 73, 2014, pp. 458–471., doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.093.
32. SUJIVORAKUL C., “Model of Hooked Steel Fibers Reinforced Concrete under Tension.” *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6 RILEM State of the Art Reports*, 2012, pp. 19–26., doi:10.1007/978-94-007-2436-5_3.
33. VANDEWALLE L., G HEIRMAN and F. V. RICKSTAL Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete, Conference 7th Int. RILEM Symp. On fibre Reinforced Concrete: Design and Applications (BEFIB2008); 2008; pp. 719 – 728.
34. VENKATESHWARAN A. K. H. Tan, Y. LI, , et al. “Residual Flexural Strengths of Steel Fiber Reinforced Concrete with Multiple Hooked-End Fibers.” *Structural Concrete*, vol. 19, no. 2, 2017, pp. 352–365., doi:10.1002/suco.201700030.

Priedai

1 priedas. Lenkimo bandymo duomenų suvestinė

9 lentelė Fibros duomenų suvestinė

Nr.	Šaltinis	Fibros								
		Medžiaga	Forma	Bandinių sk. n	V _{fb} , %	V _{fb} , kg/m ³	l _{fb} , mm	d _{fb} , mm	l _{fb} /d _{fb}	f _y , Mpa
1	1	Plienas	Užlenktais galais	7	0.26	20	50	1.00	50	1100
2	1	Plienas	Užlenktais galais	7	0.45	35	50	1.00	50	1100
3	2	Plienas	Užlenktais galais	6	0.38	30	25	0.38	65	1700
4	2	Plienas	Užlenktais galais	6	0.38	30	25	0.38	65	1700
5	2	Plienas	Užlenktais galais	6	0.38	30	25	0.38	65	1700
6	2	Plienas	Užlenktais galais	6	0.38	30	60	0.92	65	1050
7	2	Plienas	Užlenktais galais	6	0.38	30	60	0.92	65	1050
8	2	Plienas	Užlenktais galais	6	0.38	30	60	0.92	65	1050
9	2	Plienas	Užlenktais galais	6	0.38	30	25	0.38	65	1700
10	2	Plienas	Užlenktais galais	6	0.38	30	60	0.92	65	1050
11	3	Plienas	Užlenktais galais	5	0.50	39	60	0.75	80	1050
12	3	Plienas	Užlenktais galais	5	1.00	79	60	0.75	80	1050
13	3	Plienas	Užlenktais galais	5	0.50	39	35	0.54	65	1100
14	3	Plienas	Užlenktais galais	5	1.00	79	35	0.54	65	1100
15	6	Plienas	Užlenktais galais	5	0.50	40	50	1.00	50	1115
16	6	Plienas	Užlenktais galais	5	1.00	80	50	1.00	50	1115
17	8	Plienas	Užlenktais galais	4	0.75	59	50	1.05	45	1115
18	9	Plienas	Užlenktais galais	6	0.25	20	60	0.71	85	2520
19	9	Plienas	Užlenktais galais	6	0.51	40	60	0.71	85	2520
20	10	Plienas	Užlenktais galais	6	0.40	35	35	0.55	65	1345
21	10	Plienas	Užlenktais galais	6	0.80	71	35	0.55	65	1345
25	12	Plienas	Užlenktais galais	6	0.50	45	50	0.75	67	1100
26	12	Plienas	Užlenktais galais	6	0.50	45	50	0.75	67	1100
27	12	Plienas	Užlenktais galais	6	0.50	45	50	0.75	67	1100
28	12	Plienas	Užlenktais galais	6	0.50	45	50	0.75	67	1100

10 lentelė Lenkimo bandymų rezultatų suvestinė

Lenkimo bandymas							
$f_{R,1}$ MPa	$f_{R,2}$ MPa	$f_{R,3}$ MPa	$f_{R,4}$ MPa	l, mm	h_{sp} , mm	h, mm	b, mm
1.845	1.980	2.025	2.025	500	125	150	150
2.019	2.142	2.245	2.184	500	125	150	150
7.500	7.808	6.944	6.080	500	125	150	150
7.480	8.016	7.104	6.110	500	125	150	150
6.830	7.040	6.208	5.430	500	125	150	150
5.960	6.080	5.600	4.890	500	125	150	150
7.030	7.552	7.040	6.370	500	125	150	150
7.590	8.288	7.360	6.610	500	125	150	150
4.810	5.280	4.768	3.860	500	125	150	150
5.310	5.728	5.440	5.070	500	125	150	150
5.258	6.610	6.430	5.108	500	125	150	150
6.448	6.888	6.621	5.946	500	125	150	150
3.678	3.606	3.339	2.873	500	125	150	150
6.240	6.215	5.651	4.814	500	125	150	150
2.779	2.831	2.659	2.568	500	125	150	150
4.828	4.876	4.503	4.125	500	125	150	150
4.729	4.502	4.000	3.596	500	125	150	150
3.980	5.275	5.750	5.608	500	125	150	150
5.810	8.208	8.730	8.715	500	125	150	150
5.009	4.128	3.330	2.734	500	125	150	150
7.445	7.074	5.664	4.610	500	125	150	150
4.190	4.230	4.040	3.790	500	125	150	150
3.550	3.430	3.170	2.900	500	125	150	150
4.220	4.190	4.120	3.870	500	125	150	150
4.070	3.960	3.670	3.530	500	125	150	150

11 lentelė Gniuždymo bandimų rezultatų suvestinė

Betono tipas	Kubeliai						Cilindras				
	n	b _{cub} , mm	l _{cub} , mm	h _{cub} , mm	f _{ck,cube} , MPa	f _{cm,cube} , MPa	n	h, mm	d, mm	f _{ck} , MPa	f _{cm} , MPa
Paprastas	2	150	150	150	35.5	43.5	1	300	150	28.76	36.76
Paprastas	2	150	150	150	35.6	43.6	1	300	150	28.84	36.84
Savaime susitankinantis	3	150	150	150		61					49.41
Savaime susitankinantis	3	150	150	150		61					49.41
Savaime susitankinantis	3	150	150	150		61					49.41
Savaime susitankinantis	3	150	150	150		58.3					47.22
Savaime susitankinantis	3	150	150	150		58.3					47.22
Savaime susitankinantis	3	150	150	150		58.3					47.22
Paprastas	3	150	150	150		67.1					54.35
Paprastas	3	150	150	150		59.2					47.95
Paprastas							3	200	100		29.00
Paprastas							3	200	100		28.50
Paprastas							3	200	100		27.67
Paprastas							3	200	100		35.33
Paprastas	?	150	150	150		43.1					34.91
Paprastas	?	150	150	150		44.8					36.29
Paprastas								200	100		57.10
Paprastas	?	150	150	150		68.8					55.73
Paprastas	?	150	150	150		73.2					59.29
Paprastas							3	200	100		61.30
Paprastas							3	200	100		63.80
Paprastas	12	100	100	100		49.5					40.10
Paprastas	12	100	100	100		52.5					42.53
Paprastas	12	100	100	100		41.7					33.78
Paprastas	12	100	100	100		48					38.88

12 lentelė bandinių serijų liekamųjų stiprių standartinės deviacijos

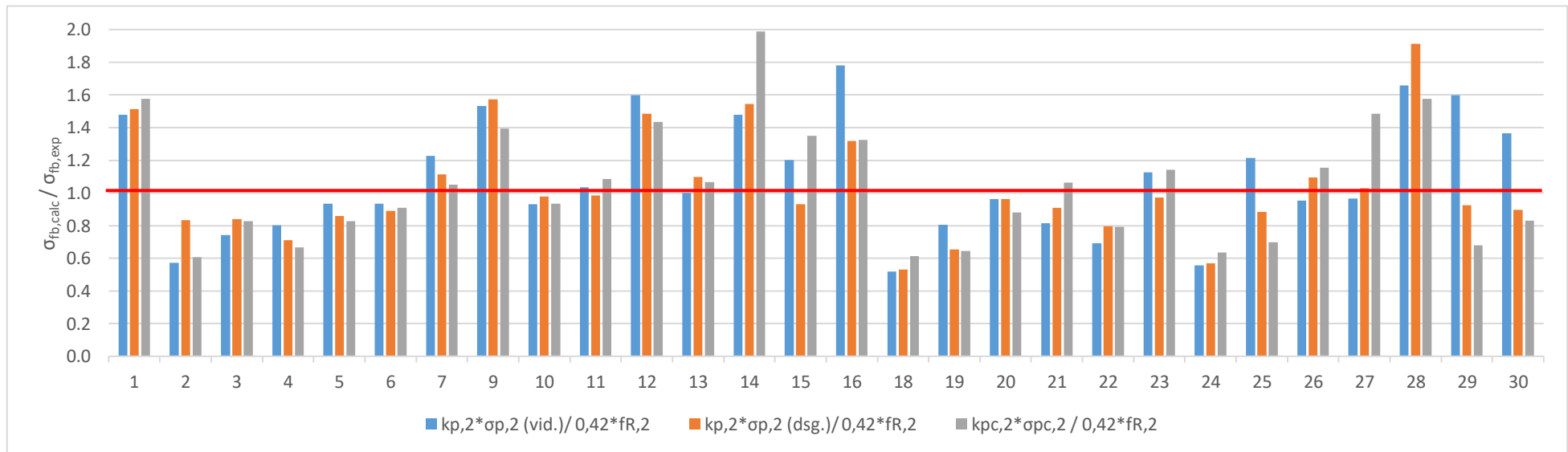
Serijos nr.	Šaltinis	Standartinės deviacijos		
		$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
1	1	0.50	0.51	0.52
2	2	0.18	0.87*	0.25
3	2	0.73	0.93*	0.88
4	3	1.14	0.90	0.75
5	3	0.97	0.75	0.65
6	3	0.50	0.43	0.44
7	3	1.21	1.03	0.92
8	6	0.94	1.12	1.16
9	6	1.06	1.08	0.93
10	9	0.90*	0.95*	0.86*
11	9	1.22*	1.06*	1.28*
12	12	0.98	0.89	0.84
13	12	0.57	0.67	0.62
14	12	0.80	0.83	1.04
15	13	0.56	0.36	0.62*
16	13	1.09	0.69	0.68*
17	14	0.84	0.89	0.96
18	14	1.05	1.07	1.33
19	14	1.68	1.13	1.05
20	15	0.17	0.16	0.07
21	15	0.69	0.85	1.06
22	15	0.42	0.73	0.69
23	15	1.42*	1.06*	1.40*
24	15	0.28	0.29	0.42
25	15	1.26	0.79	0.32
26	15	1.02	1.25	1.32
27	15	1.25	1.36	2.02
28	15	1.32	1.38	1.28
29	15	1.94	1.23	0.60
30	15	1.65	0.87	0.67

* - apskaičiuota standartinė deviacija pagal grafikų priklausomybes.

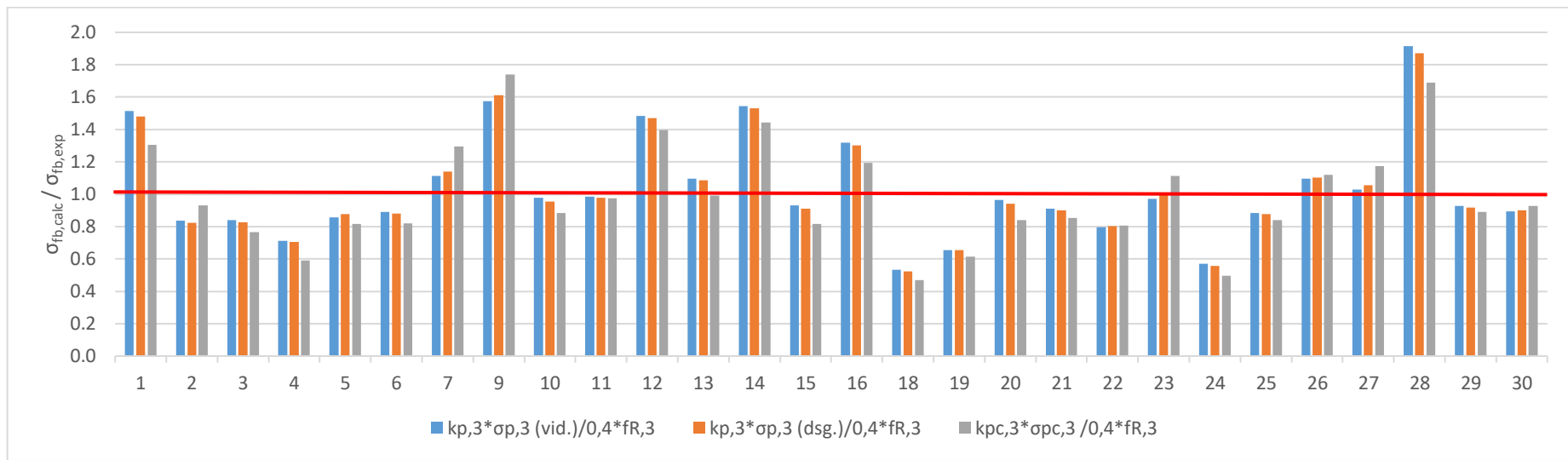
2 priedas. Charakteristinių reikšmių pagal Bayesian'o metodą suvestinė

13 lentelė Siūlomi k_p ir k_{pc} koeficientai ir jų paklaidos (charakteristinių reikšmių $f_{Rk,i}$)

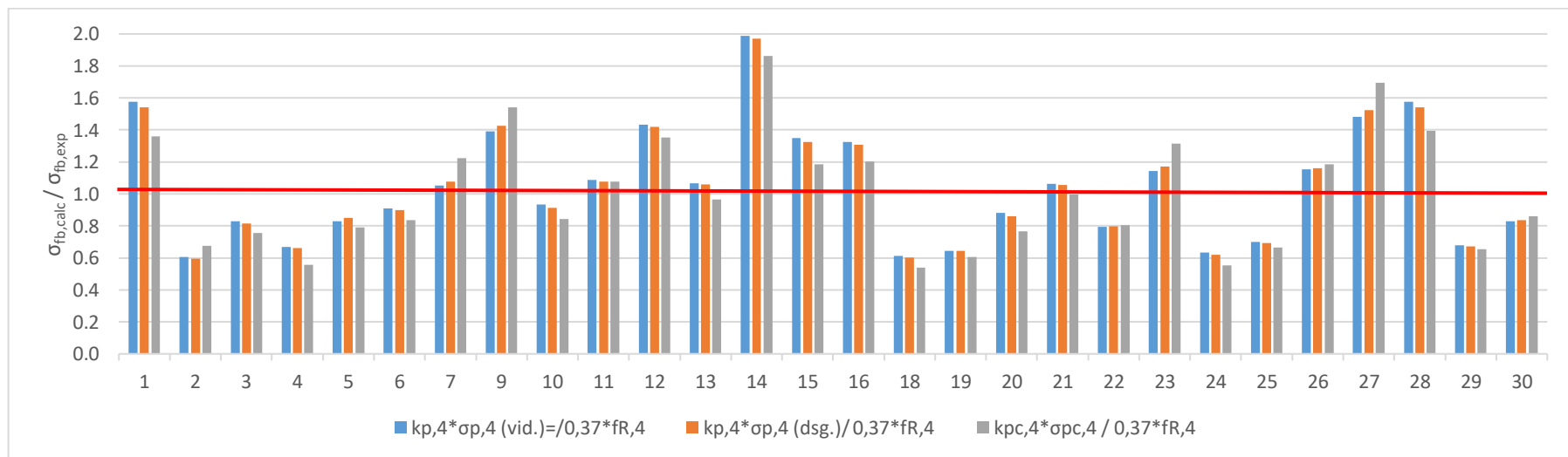
Paklaidos, %	σ_p		σ_{pc}	Paklaidos, %	σ_p		σ_{pc}	Paklaidos, %	σ_p		σ_{pc}
	$\sigma_{p,2}$ (vid.)	$\sigma_{p,2}$ (dsg.)	$\sigma_{pc,2}$		$\sigma_{p,3}$ (vid.)	$\sigma_{p,3}$ (dsg.)	$\sigma_{pc,3}$		$\sigma_{p,4}$ (vid.)	$\sigma_{p,4}$ (dsg.)	$\sigma_{pc,4}$
<i>CMOD1.5</i>				<i>CMOOD2.5</i>				<i>CMOD3.5</i>			
k	0.924	1.074	2.351	k	0.893	1.045	2.282	k	0.836	0.979	2.14
MIN	48	47	39	MIN	47	48	53	MIN	39	40	46
MAX	78	91	99	MAX	91	87	74	MAX	99	97	86
CoV %	32.94	31.56	34.39	CoV %	31.56	31.43	32.51	CoV %	34.39	34.42	35.98



32 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai $CMOD_2$



33 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai $CMOD_3$



34 pav. Teorinių ir eksperimentinių SFRC įtempių $\sigma_{fb}(k)$ santykiai, kai $CMOD_4$

3 priedas. Fib Model Code 2010 metodo apskaičiuotų stiprių reikšmės

14 lentelė Fib Model Code 2010 metodo liekamųjų tempimo stiprio reikšmių suvestinė

Serijos Nr.	N (užlenktų galų skč.)	0.13	1.22	fR,1	fR,2	fR,3	fR,4
1	1	0.25	1.12	3.08	3.79	3.59	3.35
2	1	0.25	1.26	4.13	4.98	4.75	4.43
3	1	0.40	1.26	4.46	5.41	5.18	4.83
4	1	0.80	1.26	4.83	5.91	5.87	5.44
5	1	0.33	1.16	7.70	9.32	9.48	8.75
6	1	0.65	1.16	3.87	4.76	4.71	4.37
7	1	0.50	1.22	6.40	7.73	7.76	7.18
8	1	0.22	1.26	5.71	6.92	6.88	6.37
9	1	0.43	1.26	4.47	5.39	5.12	4.77
10	1	0.34	1.22	6.21	7.44	7.24	6.73
11	1	0.34	1.22	4.68	5.68	5.54	5.15
12	1	0.34	1.22	4.43	5.41	5.31	4.93
13	1	0.20	1.22	4.63	5.63	5.50	5.11
14	1	0.28	1.22	3.59	4.40	4.23	3.94
15	1	0.19	1.26	4.14	5.05	4.92	4.57
16	2	0.45	1.26	4.11	5.98	6.02	5.60
17	2	0.17	1.26	5.67	7.86	8.08	7.48
18	1	0.34	1.26	3.81	4.63	4.38	4.09
19	1	0.51	1.26	5.06	6.12	5.95	5.53
20	1	0.68	1.26	6.25	7.54	7.45	6.91
21	1	0.17	1.26	7.73	9.27	9.23	8.55
22	1.5	0.34	1.26	3.87	5.12	4.98	4.64
23	1.5	0.51	1.26	5.19	6.68	6.62	6.15
24	1.5	0.68	1.26	6.38	8.10	8.11	7.52
25	1.5	0.17	1.26	7.73	9.69	9.77	9.05
26	2	0.34	1.26	4.04	5.89	5.90	5.49
27	2	0.51	1.26	5.36	7.45	7.53	6.99
28	2	0.13	1.22	6.54	8.85	9.01	8.35
29	1	0.25	1.12	3.08	3.79	3.59	3.35
30	1	0.25	1.26	4.13	4.98	4.75	4.43