



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Mindaugas Gricius

**PLAUŠU IR ARMATŪRA ARMUOTŲ LENKIAMŲ
GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ NORMALINIO PLYŠIO PLOČIO
TYRIMAI**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Dr. Nerijus Meslinas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

**PLAUŠU IR ARMATŪRA ARMUOTŲ LENKIAMŲ
GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ NORMALINIO PLYŠIO PLOČIO
TYRIMAI**

Baigiamasis magistro projektas
Statybos inžinerija (621H20001)

Vadovas

(parašas) Dr. Nerijus Meslinas
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Algirdas Augonis
(data)

Projektą atliko

(parašas) Mindaugas Gricius
(data)

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Statybos ir architektūros fakultetas

(Fakultetas)

Mindaugas Gricius

(Studento vardas, pavardė)

Statybos inžinerija 621H20001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Plaušu ir armatūra armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų normalinio plyšio pločio tyrimai“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 18 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Mindaugo Griciaus**, baigiamasis projektas tema „Plaušu ir armatūra armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų normalinio plyšio pločio 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)

TURINYS

SANTRAUKA	6
SUMMARY	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
ĮVADAS	11
1. LITERATŪROS APŽVALGA	13
1.1. Plaušo apibūdinimas, jo klasifikavimas ir parametrai	13
1.2. Konstrukcijų dispersinio ir kombinuoto armavimo esmė, privalumai ir trūkumai	15
1.3. Plaušo panaudojimas Lietuvoje ir užsienyje.....	17
1.4. Liekamojo tempimo stiprio lenkiant nustatymas.....	18
1.5. Kombinuotai (plaušu ir armatūra) armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų plyšio pločio skaičiavimo metodikos	20
2. METODAI.....	32
2.1. Eksperimentinių kombinuotai (plaušu ir armatūra) armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų tyrimų organizavimas ir tyrimo objekto aprašymas.....	32
2.3. Eksperimentinių bandymų aprašymas	36
3. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ.....	40
3.1. Eksperimento rezultatų analizė.....	40
3.2. Palyginamųjų skaičiavimų rezultatų analizė ir palyginimas su eksperimento rezultatais.....	48
IŠVADOS.....	56
LITERATŪRA	58
PUBLIKACIJOS	61
PRIEDAI	62
Priedas Nr. 1. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal RILEM metodiką	62
Priedas Nr. 2. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal papildyto EC2 metodiką	66
Priedas Nr. 3. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal pakoreguoto EC2 metodiką.....	69
Priedas Nr. 4. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal SFRC <i>Design Guideline</i> metodiką	72
Priedas Nr. 5. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal SS 812310:2014–1 metodiką	75
Priedas Nr. 6. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal SS 812310:2014–2 metodiką	78

Priedas Nr. 7. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal FIB <i>Model Code</i> 2010–1	
metodiką	81
Priedas Nr. 8. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal FIB <i>Model Code</i> 2010–2	
metodiką	85

Gricius Mindaugas. Plaušu ir armatūra armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų normalinio plyšio pločio tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas dr. Nerijus Meslinas; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T).

Reikšminiai žodžiai: *plaušas, kombinuotas armavimas, plyšio plotis, skaičiavimo metodai.*

Kaunas, 2017. 87 p.

SANTRAUKA

Magistro baigiamajame projekte atliktas kombinuotai (plaušu ir armatūra) armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų normalinio plyšio pločio tyrimas. Tyrime išnagrinėtos naujausios Europoje naudojamos plyšio pločio apskaičiavimo metodikos, patikrintas naujo Kelpšos ir bendraautorių (2015) pasiūlyto teorinio plieno plaušu lenktais galais armuoto betono liekamojo tempimo stiprio lenkiant $f_{R,1}$ apskaičiavimo metodo praktinis pritaikomumas, atliktas eksperimentinis tyrimas panaudojant 96 betono bandinius bei atlikta palyginamoji rezultatų analizė. Eksperimentiniame tyrime panaudotas plačiai naudojamas plieno plaušas lenktais galais ir konstrukcinis polipropileninis makroplaušas.

Darbo tikslas. Ištirti kombinuotai (plaušu ir armatūra) armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų plyšio pločio apskaičiavimą.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti kombinuotai (plaušu ir armatūra) armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų naujausias Europoje naudojamas plyšio pločio skaičiavimo metodikas.
2. Atlikti eksperimentinius kombinuotai armuotų lenkiamų sijų plyšių pločių tyrimus ir išanalizuoti jų rezultatus.
3. Pagal skirtingas skaičiavimo metodikas atlikti palyginamuosius teorinius plyšių pločių skaičiavimus.
4. Gautus eksperimentinių tyrimų rezultatus palyginti su teoriniais skaičiavimų rezultatais.
5. Pagal pasirinktus plaušo kiekius betono mišinyje ir gautus tyrimo rezultatus atskleisti plieno ir polipropileno plaušo savybių įtaką kombinuotai armuotų sijų plyšių pločiams.
6. Remiantis gautais rezultatais nustatyti patikimiausią plyšio pločio skaičiavimo metodiką.

Darbo apimtis ir sudėtis. Magistro baigiamąjį projektą sudaro 3 skyriai ir išvados. Darbo apimtis – 87 puslapiai. Projekte panaudotos ir aptartos 43 formulės, pateikti 34 paveikslai, 6 lentelės ir 35 literatūros šaltiniai.

Gricius Mindaugas. *Normal Crack Width Research of Fibre and Ordinary Reinforcement Reinforced Concrete Flexural Members*: Master's thesis in Civil Engineering / supervisor dr. Nerijus Meslinas. The Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technological Sciences, Civil Engineering (O2T).

Key words: *fibre, combined reinforcement, crack width, calculation methods*.

Kaunas, 2017. 87 p.

SUMMARY

The research of normal crack width of combined (fibre and ordinary reinforcement) reinforced concrete flexural members is performed in the Master's thesis. The latest crack width calculation methods used in Europe are analysed in the research work, as well as the practical applicability of new theoretical calculation method of residual flexural tensile strength $f_{R,1}$ of hooked end steel fibre reinforced concrete, proposed by Kelpša and co-authors (2015), is verified. Also, the experimental research with 96 specimens and comparative analysis of the results are performed in the work. The widely used hooked end steel fibre and structural polypropylene macro-fibre were used in the experimental research.

Aim of the work. To investigate the crack width calculations of combined (fibre and ordinary reinforcement) reinforced concrete flexural members.

Tasks of the work:

1. To analyse the latest crack width calculation methods of combined (fibre and ordinary reinforcement) reinforced concrete flexural members which are used in Europe.
2. To perform the experimental research of combined reinforced concrete flexural beams and to analyse the experimental results.
3. To perform the comparative theoretical calculations of crack widths by using different calculation methods.
4. To compare the experimental and theoretically calculated results.
5. To determine the influence of steel and polypropylene fibre properties on combined reinforced beams crack widths considering the experimental results and the chosen content of fibres.
6. To determine the most reliable crack width calculation method based on the research results.

The composition of the work. The Master's thesis consists of 3 chapters and conclusions. The volume of the work is 87 pages. 43 formulas are used and discussed in the project as well as 34 figures, 6 tables and 35 literature sources are presented.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Plieno plaušo galimi skerspjūviai	13
1.2 pav. Plieno plaušo klasifikavimas pagal geometrinę formą	14
1.3 pav. Bandinių suirimo pavyzdys: a) – betoninio; b) – plaušu armuoto betono	15
1.4 pav. Tempiamo betoninio elemento pleišėjimo pobūdis: a) – įprasto gelžbetoninio; b) – plaušu ir armatūra armuoto betono	16
1.5 pav. Plaušo išsidėstymas plyšio atžvilgiu: a) – idealus pasiskirstymas; b) – realus pasiskirstymas.....	17
1.6 pav. Tritaškio lenkimo bandymo schema	19
1.7 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas kombinuotai – plaušu ir armatūra – armuotame supleišėjusiame skerspjūvyje, kai plaušo įtaka įvertinama	21
1.8 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas supleišėjusiame skerspjūvyje, neįvertinant plaušo įtakos	27
2.1 pav. Eksperimentinių tyrimų schema (veiksmų seka).....	32
2.2 pav. Polipropileno plaušas (kairėje) ir plieno plaušas lenktais galais (dešinėje).....	34
2.3 pav. Didelių sijų (1300×200×160 mm) armavimo schema	35
2.4 pav. Vaizdai iš bandinių gamybos	35
2.5 pav. Pagaminti bandiniai	36
2.6 pav. Betono gniuždomojo stiprio nustatymas.....	37
2.7 pav. Tritaškio lenkimo bandymo schema nustatant betono tempiamąjį stiprį (kairėje) ir bandymo vaizdas (dešinėje).....	37
2.8 pav. Betono tamprumo modulio nustatymo vaizdas	38
2.9 pav. Tritaškio lenkimo bandymo schema nustatant betono liekamąjį tempimo stiprį (kairėje) ir bandymo vaizdas (dešinėje)	38
2.10 pav. Keturių taškų lenkimo bandymo schema (kairėje) ir eksperimento vaizdas (dešinėje)	39
3.1 pav. Betono vidutinio gniuždomojo stiprio rezultatai	40
3.2 pav. Betono vidutinio tempiamojo stiprio lenkiant rezultatai	41
3.3 pav. Vidutinio betono tamprumo modulio rezultatai	42
3.4 pav. 1 serijos bandinių (su 50 kg/m ³ plieno plaušu) $f_{R,i}$ – $CMOD$ priklausomybė	43
3.5 pav. 2 serijos bandinių (su 70 kg/m ³ plieno plaušu) $f_{R,i}$ – $CMOD$ priklausomybė	43

3.6 pav. 3 serijos bandinių (su 3 kg/m ³ polipropileno plaušu) $f_{R,i}$ – $CMOD$ priklausomybė ...	44
3.7 pav. 4 serijos bandinių (su 5 kg/m ³ polipropileno plaušu) $f_{R,i}$ – $CMOD$ priklausomybė ...	44
3.8 pav. Betono vidutinio liekamojo tempimo stiprio lenkiant rezultatai	45
3.9 pav. Sijų Nr. 1..Nr. 6 maksimalių plyšių pločių w priklausomybė nuo lenkimo momento M	46
3.10 pav. Sijų Nr. 1..Nr. 2 ir Nr. 7..Nr. 10 maksimalių plyšių pločių w priklausomybė nuo lenkimo momento M	47
3.11 pav. Plyšio pločio skaičiavimuose naudotos vidutinės ir charakteristinės liekamojo tempimo stiprio lenkiant $f_{R,1}$ reikšmės (eksperimentinės ir apskaičiuotos).....	49
3.12 pav. Sijų Nr. 1 ir Nr. 2 išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių palyginimas (0 kg/m ³ plaušo)	50
3.13 pav. Sijų Nr. 3 ir Nr. 4 išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių palyginimas (50 kg/m ³ plieno plaušo)	51
3.14 pav. Sijų Nr. 5 ir Nr. 6 išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių palyginimas (70 kg/m ³ plieno plaušo)	52
3.15 pav. Sijų Nr. 7 ir Nr. 8 išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių palyginimas (3 kg/m ³ polipropileno plaušo).....	53
3.16 pav. Sijų Nr. 9 ir Nr. 10 išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių palyginimas (5 kg/m ³ polipropileno plaušo).....	54

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Eksperimento bandinių gamybos planas (programa).....	33
2.2 lentelė. Eksperimente naudoto betono mišinio sudėtis.....	34
2.3 lentelė. Pagrindinės eksperimente naudotų plaušų charakteristikos.....	34
2.4 lentelė. Pagrindinės 600×150×150 mm bandinių charakteristikos.....	39
3.1 lentelė. Rezultatų palyginimui naudoto plaušo charakteristikos	41
3.2 lentelė. Didelių sijų (1300×200×160 mm) pagrindinės charakteristikos	46

IVADAS

Darbo aktualumas. Šiandieninėje statyboje betonas yra viena dažniausiai naudojamų medžiagų, kuri turi gana didelį gniuždomąjį stiprį, tačiau santykinai mažą tempiamąjį stiprį ir yra trapi medžiaga. Todėl siekiant padidinti betoninių konstrukcijų tempiamąjį stiprį ir sumažinti trapumą jas reikalinga armuoti [1, 2]. Betonines konstrukcijas įprasta armuoti plieniniais strypais, tačiau pastaruosius keletą dešimtmečių šalia įprasto armavimo vis dažniau tyrinėjamas statybinių konstrukcijų armavimas plaušu arba jo kombinavimas su įprastais armatūros strypais [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Tobulėjant technologijoms, atsiranda vis naujų medžiagų ir gamybos būdų, iš kurių gali būti gaminamas plaušas, tačiau ne visada jos gali būti pranašesnės už esamas. Todėl svarbu tirti naujai atsirandančio plaušo efektyvumą ir jo panaudojimo galimybes.

Vienas pagrindinių dispersinio arba kombinuoto armavimo tikslų – mažinti plyšių pločius konstrukcijose, kas tiesiogiai veikia jų ilgaamžiškumą. Priklausomai nuo eksploatuojamos konstrukcijos aplinkos poveikio agresyvumo, plyšių pločiai yra ribojami [9, 10]. Nepaisant to, kad yra pasiūlyta nemažai dispersinio armavimo konstrukcijų skaičiavimo metodikų, tačiau bendros ir visiems priimtinos plaušu armuotų betoninių ar gelžbetoninių konstrukcijų plyšio pločio skaičiavimo metodikos vis dar nėra [11, 12]. Todėl svarbu išanalizuoti naudojamų skaičiavimo metodikų skirtumus ir ieškoti patikimiausio skaičiavimo varianto plyšių pločiams prognozuoti.

Darbe gautų rezultatų panaudojimo galimybės sprendžiant panašias problemas.

Atliekant tyrimą buvo pasirinktas ir panaudotas rekomenduojamas kiekis plieno ir polipropileno plaušo betono mišinyje. Gauti tyrimo rezultatai gali būti naudingi atliekant platesnį ar tęsiant pradėtą tyrimą, siekiant tiksliau nustatyti polipropileno plaušo efektyvumą ir skirtumus lyginant su plieno plaušu, naudojant kitokius plaušo kiekius mišinyje ar kitokių savybių (mechaninių, geometrinių ir kt.) plaušą.

Darbo tikslas. Ištirti kombinuotai (plaušu ir armatūra) armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų plyšio pločio apskaičiavimą.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti kombinuotai (plaušu ir armatūra) armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų naujausias Europoje naudojamas plyšio pločio skaičiavimo metodikas.

2. Atlikti eksperimentinius kombinuotai armuotų lenkiamų sijų plyšių pločių tyrimus ir išanalizuoti jų rezultatus.
3. Pagal skirtingas skaičiavimo metodikas atlikti palyginamuosius teorinius plyšių pločių skaičiavimus.
4. Gautus eksperimentinių tyrimų rezultatus palyginti su teoriniais skaičiavimų rezultatais.
5. Pagal pasirinktus plaušo kiekius betono mišinyje ir gautus tyrimo rezultatus atskleisti plieno ir polipropileno plaušo savybių įtaką kombinuotai armuotų sijų plyšių pločiams.
6. Remiantis gautais rezultatais nustatyti patikimiausią plyšio pločio skaičiavimo metodiką.

Mokslinis naujumas. Naujausių Europoje naudojamų kombinuotai armuotų (plaušu ir armatūra) lenkiamų gelžbetoninių elementų plyšio pločio skaičiavimo metodikų analizė ir tiksliausios metodikos nustatymas, skaičiavimuose panaudojant konstrukcinio plieno ir polipropileno plaušo charakteristikas.

Praktinė vertė. Atlikta naujausių Europoje naudojamų kombinuotai armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų plyšio pločio skaičiavimo metodikų analizė, gautų skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais ir patikimiausios skaičiavimo metodikos nustatymas. Taip pat atliktas naujo Kelpšos ir bendraautorių (2015) [13] pasiūlyto betono liekamojo tempimo stiprio lenkiant teorinio apskaičiavimo metodo praktinis pritaikomumas. Tai gali padėti projektuotojui pasirenkant plyšio pločio skaičiavimo metodą ir optimalų konstrukcijos kombinuotą armavimą, nebeatliekant eksperimentinių tyrimų. Kadangi Lietuvoje nėra reglamentuotos plaušu armuotų elementų plyšio pločio skaičiavimo metodikos, tyrimas gali prisidėti prie naujos skaičiavimo metodikos Lietuvoje kūrimo ir reglamentavimo.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Plaušo apibūdinimas, jo klasifikavimas ir parametrai

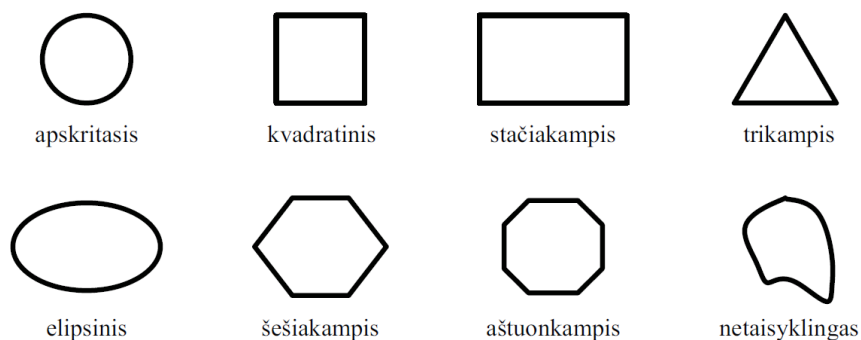
Plaušas – tai plaušinės struktūros medžiaga, naudojama betono dispersiniam armavimui [14]. Plaušas gali būti klasifikuojamas pagal įvairius požymius. Literatūroje dažniausiai plaušai klasifikuojami pagal medžiagas, tipą, geometrinę formą, skerspjūvį, dydį, fizikines, chemines ir mechanines savybes, gamybos būdą, paskirtį ir kt. [1, 11, 14, 15, 16, 17]. Pagal medžiagą, kuri naudojama plaušo gamybai, plaušai klasifikuojami į [11, 14, 17]:

- metalinius (anglinio ir nerūdijančio plieno);
- polimerinius (polipropileno, poliesterio ir kt.);
- mineralinius (stiklo pluošto, asbesto);
- gamtinių medžiagų (medžio drožlių, šiaudų ir kt.).

Dažniausiai dispersinei armatūrai gaminti naudojamas plienas, stiklas ir įvairių rūšių polimerai [11, 17].

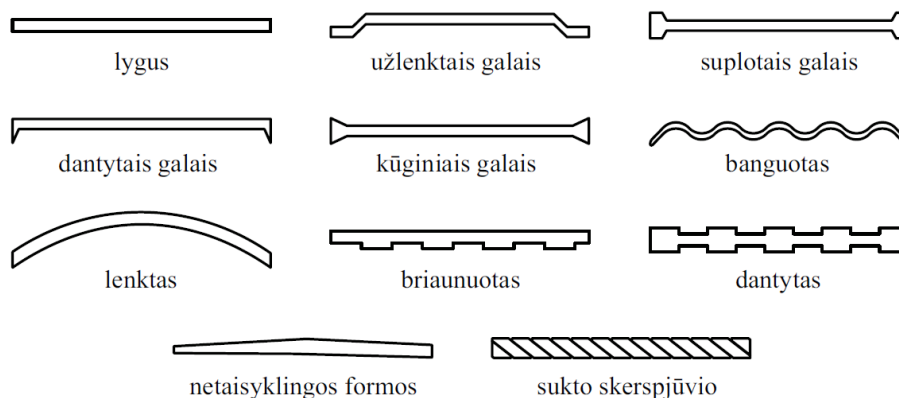
Pagal tipą plaušai dažniausiai skirstomi į mikroplaušus ir makroplaušus. Taip dažniausiai skirstomi polimeriniai plaušai, iš kurių labiausiai paplitę plaušai pagaminti iš polipropileno. Mikroplaušas yra 12–25 mm ilgio ir 1–18 μm skersmens. Jo pagrindinė paskirtis – suvaržyti mikroplyšius betone, atsirandančius betonui kietėjant ir vykstant traukumo deformacijoms [18]. Makroplaušas paprastai būna 40–60 mm ilgio ir 0,5–1,5 mm skersmens, kuris skirtas suvaržyti makroplyšius statybinėse konstrukcijose ir perimti tempimo įtempius, atsirandančius nuo konstrukcijas veikiančių apkrovų [11, 18].

Pagal skerspjūvio formą plaušai gali būti apvalaus, kvadratinio, stačiakampio, trikampio, daugiakampio, elipsės ar net netaisyklingo skerspjūvio. Galimi plieno plaušo skerspjūviai pateikti 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Plieno plaušo galimi skerspjūviai [11]

Plaušus klasifikuojant pagal geometrinę formą, išskiriami lygūs, lenktais, suplotais, dantytais ir kt. galais. Taip pat plaušai gali būti banguoti, dantyti, briaunuoti, sukto skerspjūvio ir kt. Plieno plaušo klasifikacija pagal geometriją pateikiama 1.2 paveiksle. Dažniausiai statybos pramonėje dėl paprastos gamybos technologijos ir gero sukibimo su betono matrica naudojamas apvalaus skerspjūvio plieno plaušas lenktais galais [11, 13].



1.2 pav. Plieno plaušo klasifikavimas pagal geometrinę formą [11]

Pagal fizikines ir chemines savybes plaušas gali būti klasifikuojamas atsižvelgiant į tankį, atsparumą ugniai (lydymosi temperatūrą), atsparumą cheminiam poveikiui (šarmams, rūgštims ir kt.), atsparumą ultravioletinių spindulių poveikiui ir kt. Mechaninės plaušo savybės – stiprumas tempiant, tamprumo modulis, santykinis pailgėjimas, plastiškumas ir kt. [14, 16]. Plieninio plaušo tankis yra apie 7000 kg/m^3 , o polipropileno – apie 900 kg/m^3 . Lyginant tamprumo modulį, plieninio plaušo atveju šis parametras siekia 200 GPa, o polipropileno – 3,5–10 GPa. Stipris tempiant plieninio plaušo atveju gali siekti 1–3 GPa, o polipropileno – apie 0,5 GPa [11, 14].

Pagal gamybos būdą plieniniai plaušai klasifikuojami į šias grupes [14]:

- šaltai temptos vielos;
- kapoto lakšto;
- išlieti;
- išdrožti šaltai temptos vielos;
- valcuoti.

Pagal paskirtį polimeriniai plaušai gali būti skirstomi į [14]:

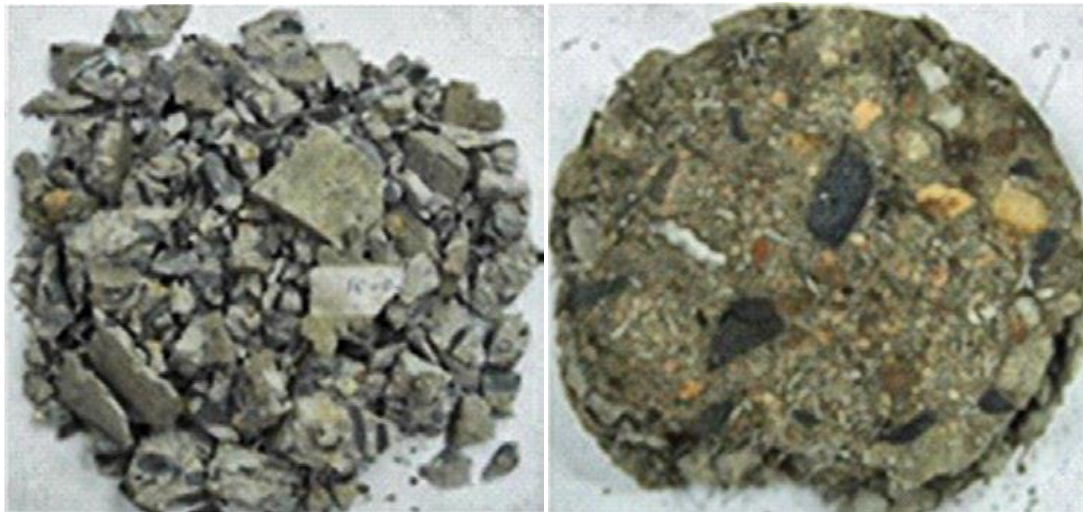
- plaušus, skirtus gerinti plastinėms betono mišinio savybėms (varžyti traukumo deformacijas, mažinti vandens pralaidumą);

- plaušus, skirtus sukietėjusio betono ilgaamžiškumui gerinti (dilumo mažinimas, atsparumo smūgiams ir šalčio poveikiui didinimas);
- plaušus, skirtus gerinti betono liekamąjį tempimo stiprį lenkiant;
- plaušus, kurie skirti didinti betono atsparumą ugniai.

Pagrindiniai plaušą apibūdinantys parametrai yra: plaušo ilgis l_{fb} , skersmuo d_{fb} , ilgio ir skersmens santykis l_{fb}/d_{fb} (svarbiausias efektyvumą apibūdinantis rodiklis), plaušo stipris tempiant f_y , tamprumo modulis E_{fb} , plaušo tankis [1, 11, 12, 16].

1.2. Konstruktijų dispersinio ir kombinuoto armavimo esmė, privalumai ir trūkumai

Konstruktijų armavimas plaušu gali pakankamai ženkliai pagerinti eksploatacines jų savybes. Nors plaušas neturi ženklios įtakos gniuždomojo betono stipriui ir deformacijų moduliui, tačiau jis gali pastebimai padidinti betono tempiamąjį stiprį ir pakeisti tempiamojo betono suirimo pobūdį. Dispersiškai (plaušu) armuotas betonas tampa izotropiškai atsparus pleišėjimui, o suirimo pobūdis iš trapius tampa artimas plastiškam, nes visame tūryje pasiskirstęs plaušas suvaržo atsiveriančius ir besivystančius plyšius [11, 16, 19].



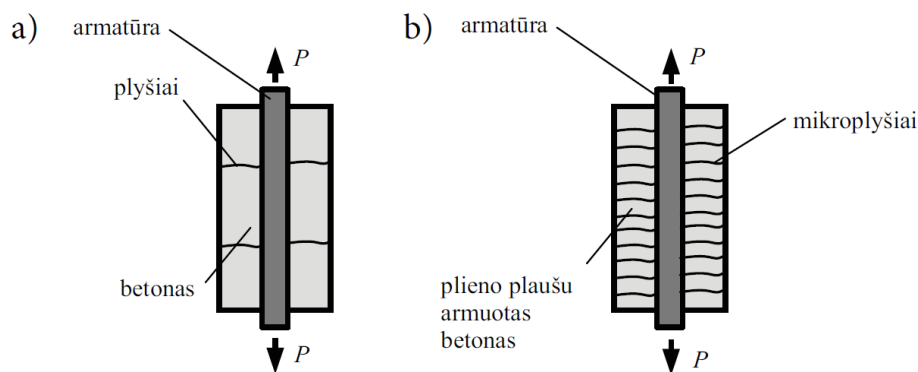
a)

b)

1.3 pav. Bandinių suirimo pavyzdys: a) – betoninio; b) – plaušu armuoto betono [11]

Nagrinėjant plaušu armuotas konstrukcijas svarbus veiksnys yra tai, kad atsitiktinis plaušo išsidėstymas (jeigu plaušas liejant betoną nėra orientuojamas papildomomis priemonėmis) leidžia suvaržyti arba apsunkinti plyšių vystymąsi skirtingomis kryptimis, todėl

toks armavimas tinkamas konstrukcijoms, kurios turi būti atsparios sproginams ar smūgiams. [11]. Atsižvelgiant į konstrukcijos pobūdį plaušas gali būti naudojamas kaip pagrindinis armavimas, tačiau dažniau yra kombinuojamas kartu su įprastine strypine armatūra [11, 12]. Veikiant dispersiškai armuotas konstrukcijas statinėmis ar ciklinėmis apkrovomis, atsiradę mikroplyšiai toliau nebesivysto. 1.4 paveiksle matoma, kad apkrovus betoninį elementą tempimo jėga, iki suirimo atsiranda tik keli plyšiai, tarp kurių atstumas santykinai didelis (a dalis), o dispersiškai armuoto elemento atveju atsiradę mikroplyšiai yra suvaržomi plaušo (b dalis) [11].

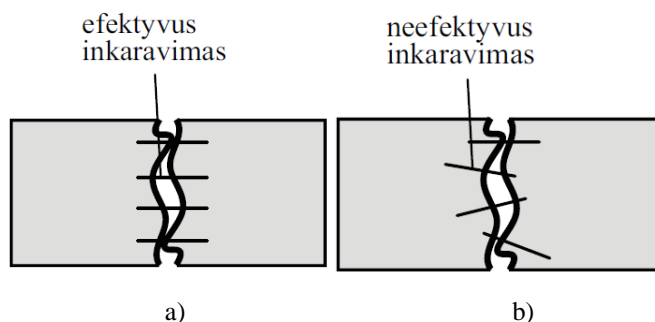


1.4 pav. Tempiamo betoninio elemento pleišėjimo pobūdis: a) – įprasto gelžbetoninio; b) – plaušu ir armatūra armuoto betono [11]

Plaušu armuotų betoninių konstrukcijų pranašumą ir privalumus, lyginant su įprastomis betoninėmis ar gelžbetoninėmis konstrukcijomis, lemia didesnis tempiamasis betono stipris, konstrukcijų atsparumas smūgiams ir nuovargiui, plastinis suirimas, tačiau vienas svarbiausių veiksnių yra tai, kad naudojant plaušą sumažėja plyšių pločiai (sulėtėja plyšių vystymasis) [6, 7, 11]. Taip pat naudojant dispersinį armavimą, galima labiau optimizuoti konstrukcijas ir jas gaminti plonesnes (pvz. grindų atveju) [11].

Nepaisant minėtų privalumų, dispersinis armavimas turi ir keletą trūkumų. Bene pagrindiniu armavimo plaušu trūkumu galima laikyti problemas, kurios iškyla betono maišymo ir liejimo metu. Taikant įprastas maišymo metodikas įmanoma pagaminti betono mišinį su santykinai nedideliu plaušo kiekiu (apie 1–1,5 % nuo mišinio tūrio). Taip pat atsiranda papildomų problemų, kai betono mišinys tiekiamas betono siurbliu. Pumpuojant mišinį sukibęs į gniūžulus plaušas gali užkimšti tiekimo sistemą, todėl tokiu būdu tiekiant mišinį plaušo kiekis taip pat yra ribojamas (iki 1 % nuo mišinio tūrio). Ši problema aktuali naudojant ne tik plieninį, bet ir kitų medžiagų plaušus [11]. Kalbant apie kitas dispersinio armavimo problemas, išskiriamas plaušo pasiskirstymas. Tokiu būdu armuojant konstrukcijas plaušas pasiskirsto

visame elemento tūryje. Atsižvelgiant į tai, kad įtempių pasiskirstymas konstrukcijos skerspjūvyje nėra vienodas, todėl santykinai nemaža dalis plaušo lieka neveikli [11]. Be to, dalis plaušų plyšių atžvilgiu susiorientuoja netinkama kryptimi, t. y. ne statmenai plyšiui ir nėra užtikrinamas pakankamas inkaravimas su betono mišiniu (1.5 pav., b). Blogiausias atvejis yra tada, kai plaušas orientuojasi lygiagrečiai plyšiui. Tada plaušas tampa visiškai neefektyvus. Efektyviausias pasiskirstymo atvejis yra tada, kai plaušas išsidėsto statmenai plyšio atžvilgiu (1.5 pav., a) [11].



1.5 pav. Plaušo išsidėstymas plyšio atžvilgiu: a) – idealus pasiskirstymas; b) – realus pasiskirstymas [11]

Be minėtų dispersinio armavimo trūkumų, svarbi dar viena problema, pasireiškianti naudojant plieninį plaušą. Konstrukciją eksploatuojant agresyvioje aplinkoje pasireiškia korozija, kuri turi neigiamą įtaką konstrukcijos ilgaamžiškumui. Pleišėjant elementui, drėgmė lengvai pasiekia plieninį plaušą ir bėgant laikui mažina jo veiksmingumą. Šios problemos sprendimui galima naudoti kitokių medžiagų plaušą – nerūdijantį plieną, polipropileną ir kt. [11].

1.3. Plaušo panaudojimas Lietuvoje ir užsienyje

Konstrukcijų armavimas plaušu visame pasaulyje sėkmingai naudojamas jau keletą dešimtmečių. Tačiau dispersinio armavimo pritaikymas Lietuvoje ir kitose užsienio šalyse kol kas yra skirtingas. Lietuvoje naudojant plaušą vis dar dažniausiai apsiribojama tik įvairių pastatų grindų betonavimu, tuo tarpu kitose konstrukcijose plaušas yra retas reiškinys. Be to, Lietuvoje plačiausiai naudojamas tik plieno plaušas, o kitų medžiagų plaušai vis dar nėra populiarūs. Priešinga situacija yra kitose pasaulio šalyse. Vokietijoje, JAV, Japonijoje ir kt. šalyse dispersinis armavimas naudojamas daug platesnėje statybinių konstrukcijų sferoje, apimančioje ne tik grindis, bet ir kitas atsakingas konstrukcijas [11]. Vakarų Europoje ir Skandinavijoje vis labiau populiarėja ne tik plieninio, bet ir polipropileno plaušo panaudojimas.

Literatūroje minima, kad plieninis plaušas gali būti plačiai panaudojamas statant tiek surenkamas, tiek monolitines konstrukcijas: sienas (plonasienes), tiltų ir kitų statinių perdangas bei sijas, tunelius, hidrotechninius statinius, rezervuarus, oro uostų kilimo ir tūpimo takus, automobilių kelius, polinius ir plokštinius pamatus, grindis, vamzdynus ir kt. Plieno plaušas taip pat sėkmingai panaudojamas sprogimams ir smūgiams atspariose konstrukcijose, torkretinio ar išlyginamojo betono sluoksniuose, žiedinėse konstrukcijose [11, 12, 20]. Taip pat yra įrenginėjamos ir konstrukcijos, kuriose plieno plaušas yra derinamas iš anksto įtempiamais lynais arba strypais, pvz. didelio tarpatramio besijės perdangos (kombinuotas armavimas) [8, 11].

Vis labiau populiarėjantis polipropileninis makroplaušas taip pat turi plačią pritaikymo sferą statybos pramonėje:

- įvairių paskirčių pastatų grindys;
- betoniniai grindiniai lauke (sunkvežimių ir kitų automobilių stovėjimo aikštelės, sandėliavimo aikštės);
- blokiniai betono elementai (pvz. sąramos, sijos, vamzdžiai, vandens rezervuarai, sienos ir kt.);
- žemės ūkio atliekų rezervuarai;
- torkretbetonis [11].

Plaušo panaudojimo sritis statybinėse konstrukcijose yra labai plati, kuri iš esmės priklauso nuo inžinierių kūrybiškumo. Tačiau masinį plaušo panaudojimą statybos pramonėje apriboja santykinai didelė plaušo kaina. 1 % plaušo kiekio nuo betono mišinio tūrio išaugina konstrukcijos kainą apie 2 kartus, o optimizuojant konstrukcijas kainos faktorius yra labai svarbus [11].

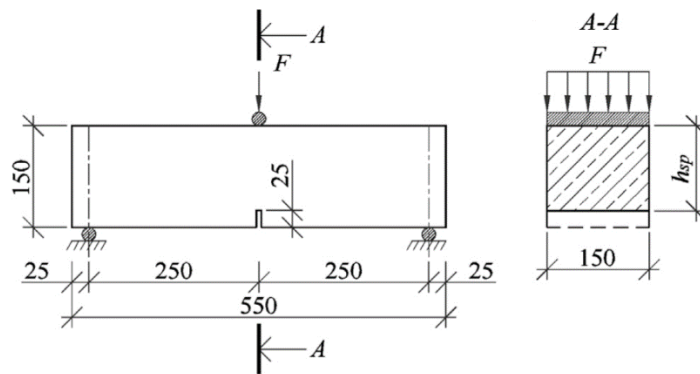
1.4. Liekamojo tempimo stiprio lenkiant nustatymas

Eksperimentinis liekamojo tempimo stiprio lenkiant $f_{R,1}$ nustatymas.

Literatūroje yra išskiriama keli eksperimentiniai liekamojo tempimo stiprio lenkiant metodai: tempimo bandymas, tritaškis sijos lenkimo bandymas, keturtaškis sijos lenkimo bandymas, apvalios plokštės lenkimo bandymas, kvadratinės plokštės lenkimo bandymas, skėlimo bandymas ir kt. [12, 21].

Eksperimentinis liekamasis tempimo stipris lenkiant $f_{R,1}$ bene dažniausiai yra nustatomas taikant trijų taškų apkrovimo schemą (1.6 pav.) lenkiant standartines 550×150×150 mm

matmenų sijas su 25 mm aukščio įpjova viduryje pagal standartą EN 14651:2005+A1:2007. Būtent pagal šį metodą daugelyje plyšio pločio skaičiavimo metodikų rekomenduojama nustatyti betono liekamąjį tempimo stiprį [12]. Šiuo metodu apkrovimas vykdomas dviem etapais, apkraunant pagal deformaciją. Bandymo metu matuojamas arba įlinkis δ , arba įpjovos praplatėjimas $CMOD$. Pagal standarto reikalavimus yra fiksuojami šie parametrai: LOP – stipris tempiant, kai atsiveria plyšys, ir $f_{R,i}$ – liekamasis tempimo stipris lenkiant; čia i – matavimo numeris prie konkretaus įlinkio arba $CMOD$ reikšmės ($i = 1, \dots, 4$). Kai $i = 1$, tai $CMOD = 0,5$ mm, o $\delta = 0,46$ mm; kai $i = 2$ – $CMOD = 1,5$ mm, $\delta = 1,32$ mm; kai $i = 3$ – $CMOD = 2,5$ mm, $\delta = 2,17$ mm ir kai $i = 4$ – $CMOD = 3,5$ mm, o $\delta = 3,02$ mm [12, 22].



1.6 pav. Tritaškio lenkimo bandymo schema [22]

Teorinis liekamojo tempimo stiprio lenkiant $f_{R,1}$ apskaičiavimas.

Liekamasis tempimo stipris lenkiant $f_{R,1}$ teoriškai gali būti apskaičiuojamas taikant naują Kelpšos ir bendraautorių (2015) pasiūlytą apskaičiavimo metodą (1.1 formulė) [13]. Metodas taikytinas naudojant plieno plaušą lenktais galais.

$$f_{Rm,1} = k_{adj} \left(16,5 f_{cm,fb} - 0,185 f_{cm,fb}^2 - 155 \right) \eta_0 \left(\frac{l_{fb}}{d_{fb}} \right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{f_{y,fb}}{1000} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[27,658 \left(k_{fb}^{1,5} V_{fb} \right) - 590,63 \left(k_{fb}^{1,5} V_{fb} \right)^2 + 0,0024 \right] \quad (1.1)$$

čia $k_{adj} = 0,96$ – pataisos koeficientas;

$$k_{fb} = \frac{l_{fb}}{50d_{fb}} - \text{armavimo plaušu efektyvumo koeficientas;}$$

η_0 – faktorius, pagal kurį įvertinama plaušo orientacijos įtaka liekamajam tempimo stipriui;

V_{fb} – plaušo kiekis (plaušo tūrio santykis);

$f_{cm,fb}$ – plaušu armuoto betono vidutinis gniuždomasis stipris;

$f_{y,fb}$ – plaušo tempiamasis stipris.

Šis liekamojo tempimo stiprio lenkiant $f_{R,1}$ apskaičiavimo metodas suteikia galimybę atlikti pirminius skaičiavimus nebeatliekant eksperimentinių bandymų. Naudojant skirtingus plaušo kiekius ir radus optimalų variantą, gautą rezultatą galima patikslinti eksperimentiniu būdu nustatant liekamąjį tempimo stiprį lenkiant $f_{R,1}$. Kaip jau minėta, tai naujas skaičiavimo metodas, kurio praktinis pritaikomumas dar nėra plačiai patikrintas.

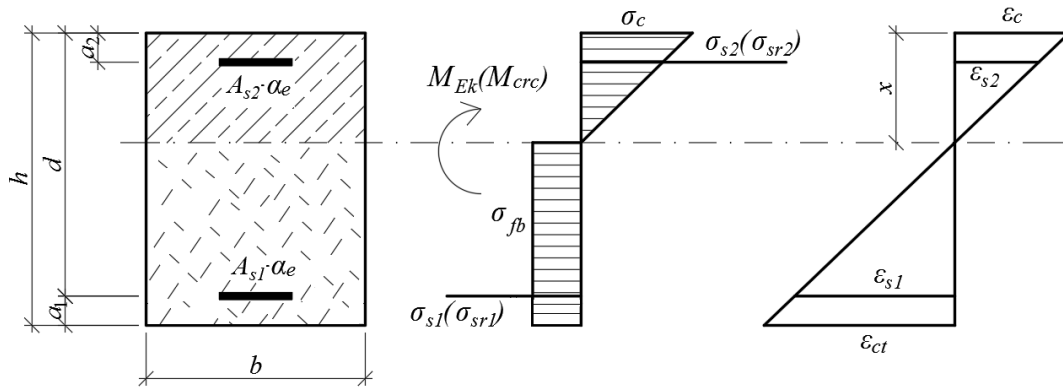
Nemaža dalis Europoje naudojamų naujausių plyšio pločio apskaičiavimo metodikų nurodo naudoti ne vidutines, o charakteristines (nusakomas fraktiliu ir patikimumo lygiu) liekamojo tempimo stiprio reikšmes. Jos gali būti apskaičiuojamos pagal skirtingus statistinius metodus: normalųjį skirstinį (Baezinį arba klasikinį metodus), kai variacijos koeficientas V_x žinomas; lognormalųjį skirstinį (klasikinį metodą), kai variacijos koeficientas V_x nežinomas ir kt.

1.5. Kombinuotai (plaušu ir armatūra) armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų plyšio pločio skaičiavimo metodikos

Kadangi per keletą dešimtmečių yra atlikta nemažai plaušu armuoto betono tyrimų, tai moksliniai komitetai Europoje (RILEM) ir JAV (ACI) yra išleidę rekomendacijas dispersiškai armuotų konstrukcijų projektavimui. Tačiau vieningų, išdirbtų, paprastų ir visoms šalims priimtinių plaušu armuotų betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimui skirtų rekomendacijų vis dar nėra [11]. Lietuvoje, taip pat ir kai kuriose kitose šalyse, apskritai nėra reglamentuotų normų, skirtų plaušu armuotų betoninių ar gelžbetoninių konstrukcijų skaičiavimui. Todėl tai labai suvaržo platesnį dispersinės armatūros (plaušo) praktinį panaudojimą statybinėse konstrukcijose [5].

Europoje gelžbetoninių konstrukcijų projektavimui išleistose normose, vadinamose antruoju Euro kodu (senasis – ENV 1992-1-1:1991 [23]; naujasis (galiojantis) – EN 1992-1-1:2004 [24]), nėra apibrėžtas plaušu ir armatūra armuotų konstrukcijų projektavimas. Tačiau atskirose Europos šalyse šios normos yra pakoreguotos arba papildytos ir taip pritaikytos kombinuotai (plaušu ir armatūra) armuotų konstrukcijų skaičiavimui (RILEM TC 162-TDF; CNR-DT 204/2006; SFRC *Design Guideline*; DafStb *Guideline*; SS 812310:2014; FIB *Model Code* 2010 ir kt.) [12, 25, 26, 27, 28, 29].

Atsivėrus plyšiui laikoma, kad įtempiai elemento gniuždomoje zonoje pasiskirsto tiesiškai, o tempiamoje zonoje tempimo įtempius perima tempiama (apatinė) armatūra ir plyšį kertantis plaušas. Tinkamumo ribinio būvio skaičiavimuose laikoma, kad visoje skerspjuvio tempiamoje zonoje liekamieji plaušo įtempiai σ_{fb} yra pasiskirstę tolygiai (žr. 1.7 pav.) [12].



1.7 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas kombinuotai – plaušu ir armatūra – armuotame supleišėjusiame skerspjūvyje, kai plaušo įtaka įvertinama

1.7 pav. pavaizduoti įtempiai σ_{s1} (σ_{sr1}) yra įtempiai tempiamoje armatūroje, apskaičiuoti laikant, kad skerspjūvis supleišėjęs (apskaičiuoti nuo momento M_{Ek} (M_{crc})). Įtempiai σ_{fb} yra liekamieji plaušo įtempiai.

Pleišėjimo momentas M_{crc} apskaičiuojamas pagal formulę:

$$M_{crc} = f_{ctm} W_{el}, \quad (1.2)$$

čia f_{ctm} – vidutinis betono ašinis tempiamasis stipris;

W_{el} (W_{red}) – elastinis gelžbetoninio elemento atsparumo momentas, kuris apskaičiuojamas:

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_{red}}, \quad (1.3)$$

čia I_{red} – ekvivalentinio skerspjūvio inercijos momentas:

$$I_{red} = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} - y_{red} \right)^2 + (\alpha_e - 1) A_{s1} (y_{red} - a_1)^2 + (\alpha_e - 1) A_{s2} (h - y_{red} - a_2)^2; \quad (1.4)$$

y_{red} – ekvivalentinio skerspjūvio centro atstumas iki apatinės briaunos:

$$y_{red} = \frac{S_{red}}{A_{red}}, \quad (1.5)$$

čia S_{red} – ekvivalentinio skerspjūvio statinis momentas:

$$S_{red} = bh \frac{h}{2} + (\alpha_e - 1) A_{s1} a_1 + (\alpha_e - 1) A_{s2} (h - a_2); \quad (1.6)$$

A_{red} – ekvivalentinio skerspjūvio statinis momentas:

$$A_{red} = bh + (\alpha_e - 1) A_{s1} + (\alpha_e - 1) A_{s2}. \quad (1.7)$$

Liekamieji plaušo įtempiai σ_{fb} yra apskaičiuojami pagal bendrą formulę [12]:

$$\sigma_{fb} = k f_{R,1} \quad (1.8)$$

čia k – koeficientas, kuris priklauso nuo plyšio pločio apskaičiavimo metodikos ($k = 0,20..0,65$);

$f_{R,1}$ – liekamasis tempimo stipris lenkiant priklausomai nuo plyšio pločio skaičiavimo metodikos.

Kai kuriose kombinuotai armuotų elementų plyšio pločio skaičiavimo metodikose (RILEM; CNR-DT 204/2006; papildyto ir pakoreguoto *Eurocode 2* (toliau vadinsime EC2)) yra nurodoma naudoti vidutinės liekamojo tempimo stiprio lenkiant reikšmes $f_{Rm,1}$, kurios nustatomos atliekant tritaškio lenkimo bandymą pagal standartą EN 14561:2005+A1:2007 (žiūrėti 1.4 dalį). Kitose skaičiavimo metodikose (SFRC *Design Guideline*; DafStb *Guideline*; SS 812310:2014; FIB *Model Code* 2010) rekomenduojama naudoti charakteristines liekamojo tempimo stiprio lenkiant reikšmes $f_{Rk,1}$, apskaičiuotas pagal skirtingus statistinius metodus [12]. Todėl skaičiavimo metodikose, kuriose naudojamos charakteristinės liekamojo stiprio reikšmės, gaunami patikimesni plyšio pločio rezultatai.

RILEM plyšio pločio skaičiavimo metodika.

Pagal RILEM pasiūlytą metodą (RILEM TC 162-TDF 2003) elementų, armuotų plieno plaušu ir įprastine armatūra, plyšio plotis yra apskaičiuojamas [25]:

$$w_k = \beta s_{rm} \varepsilon_{sm}, \quad (1.9)$$

čia w_k – skaičiuojamasis plyšio plotis;

s_{rm} – vidutinis atstumas tarp plyšių;

ε_{sm} – vidutinė deformacija tempiamoje armatūroje;

β – koeficientas, susiejantis vidutinį plyšio plotį su skaičiuojamąja verte (apkrovos sukeltam pleišėjimui $\beta = 1,7$).

Vidutinė deformacija tempiamoje armatūroje ε_{sm} yra apskaičiuojama pagal formulę:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_{s1}}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr1}}{\sigma_{s1}} \right)^2 \right], \quad (1.10)$$

čia σ_{s1} – įtempiai tempiamoje armatūroje, apskaičiuoti laikant, kad skerspjūvis supleišėjęs (apskaičiuoti nuo momento M_{Ek} pagal 1.7 pav. pateiktą schemą);

σ_{sr1} – įtempiai tempiamoje armatūroje, apskaičiuoti laikant, kad skerspjūvis supleišėjęs nuo apkrovų, sukėlusių pirmo plyšio atsiradimą (apskaičiuoti nuo pleišėjimo momento M_{crc} pagal 1.7 pav. pateiktą schemą);

β_1 – koeficientas, pagal kurį įvertinamas strypų paviršiaus pobūdis ($\beta_1 = 1,0$ – rombuotiems strypams; $\beta_1 = 0,5$ – lygaus paviršiaus strypams);

β_2 – koeficientas, pagal kurį įvertinama apkrovimo trukmė ar pasikartojantis apkrovimas ($\beta_2 = 1,0$ – vienai, trumpalaikiai apkrovai; $\beta_2 = 0,5$ – ilgalaikiai arba daug kartų pasikartojančiai (ciklinei) apkrovai);

E_s – armatūros tamprumo modulis.

Įtempiai tempiamoje armatūroje σ_{s1} ir gniuždomos zonos aukštis x apskaičiuojami pagal 1.7 pav. pateiktą schemą, rašant projekcijų bei momentų lygtį ir sprendžiant šią sudarytą lygčių sistemą:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{s1}bx^2}{2\alpha_e(d-x)} + \frac{\sigma_{s1}(\alpha_e-1)(x-a_2)A_{s2}}{\alpha_e(d-x)} - \sigma_{s1}A_{s1} - \sigma_{fb}b(h-x) = 0; \\ \sigma_{fb}b(h-x)\frac{h-x}{2} + \sigma_{s1}A_{s1}(d-x) + \frac{\sigma_{s1}(\alpha_e-1)(x-a_2)A_{s2}}{\alpha_e(d-x)}(x-a_2) + \frac{\sigma_{s1}bx^2}{2\alpha_e(d-x)}\frac{2}{3}x - \\ - M_{Ek} = 0. \end{cases} \quad (1.11)$$

$$\sigma_{fb} = 0,45 f_{Rm,1}, \quad (1.12)$$

čia $f_{Rm,1}$ – vidutinis betono liekamasis tempimo stipris lenkiant.

Pastaba: įtempiai tempiamoje armatūroje σ_{sr1} ir gniuždomos zonos aukštis x apskaičiuojami analogiškai, tik į lygčių sistemą vietoje σ_{s1} įrašoma σ_{sr1} , o vietoje momento M_{Ek} įrašomas pleišėjimo momentas M_{crc} , kuris apskaičiuojamas pagal 1.2 formulę.

Vidutinis atstumas tarp plyšių s_{rm} apskaičiuojamas pagal formulę:

$$s_{rm} = \left(50 + 0,25k_1k_2 \frac{\phi_b}{\rho_{p,eff}} \right) \left(\frac{50}{l_{fb}/d_{fb}} \right), \quad (1.13)$$

čia ϕ_b – armatūros strypo skersmuo;

k_1 – koeficientas, pagal kurį įvertinamas strypų paviršiaus pobūdis ($k_1 = 0,8$ – rombuotiems strypams; $k_1 = 1,6$ – lygaus paviršiaus strypams);

k_2 – koeficientas, pagal kurį įvertinama deformacijų pasiskirstymo forma ($k_2 = 0,5$ – lenkimo atveju; $k_2 = 1,0$ – grynojo tempimo atveju);

$\rho_{p,eff}$ – efektyvusis armavimo koeficientas ($A_{s1}/A_{c,eff}$), kur $A_{c,eff}$ – armatūrą supančio tempiamo betono, kurio aukštis yra $h_{c,eff}$ (čia $h_{c,eff}$ yra mažiausioji iš reikšmių: $2,5(h-d)$; $(h-x)/3$ arba $h/2$), efektyvusis skerspjūvio plotas;

l_{fb} – plieno plaušo ilgis;

d_{fb} – plieno plaušo skersmuo;

$50/(l_{fb}/d_{fb}) \leq 1$ – RILEM pasiūlytas koeficientas, pagal kurį įvertinama plieno plaušo įtaka vidutiniam atstumui tarp plyšių. Tačiau šiuo koeficientu įvertinama tik plaušo ilgio ir skersmens įtaka, bet neįvertinamas plaušo kiekis.

Pastaba: šis skaičiavimo metodas taikytinas betonui, kurio gniuždomasis stipris yra iki C50/60 klasės.

Skirtumai tarp RILEM ir italų metodikų:

Lyginant RILEM pasiūlytą metodiką su italų CNR-DT 204/2006 [26], italai RILEM pasiūlytą koeficientą ($50/(l_{fb}/d_{fb}) \leq 1$) keičia į bedimensį koeficientą ζ , kuris lygus:

= 1,0, kai $l_{fb} / d_{fb} < 50$;

= $50d_{fb} / l_{fb}$, kai $50 \leq l_{fb} / d_{fb} \leq 100$ (kaip ir RILEM atveju);

= 0,5, kai $l_{fb} / d_{fb} > 100$;

čia d_{fb} – plaušo skersmuo;

l_{fb} – plaušo ilgis.

Kitas skirtumas yra tas, kad italų rekomendacijose nurodoma, jog nustatant liekamuosius tempimo įtempimus, reikia taikyti ne standartinį tritaškio apkrovimo lenkimo bandymą (apibrėžiamą LST EN 14651+A1:2007 [22]), o yra galimybė pasirinkti keturių taškų lenkimo arba tempimo bandymą. Detaliau tai pateikta italų normose CNR-DT 204/2006.

Papildyto ir pakoreguoto Eurocode (EC2) plyšio pločio skaičiavimo metodikos.

Plyšio plotis apskaičiuojamas pagal naująjį (papildytą) Eurokodą EN 1992-1-1:2004 [10], įvedant analogiškus pakeitimus. Tada plyšio pločio išraiška lygi:

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (1.14)$$

čia $s_{r,max}$ – maksimalus atstumas tarp plyšių;

ε_{sm} – vidutinė armatūros deformacija;

ε_{cm} – vidutinė betono deformacija tarp plyšių.

Deformacijų skirtumas (ε_{sm} ir ε_{cm}):

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_{s1} - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_{s1}}{E_s}, \quad (1.15)$$

čia σ_{s1} – įtempiai tempiamoje armatūroje, darant prielaidą, kad skerspjūvis supleišėjęs (apskaičiuoti nuo momento M_{Ek} pagal 1.7 pav. pateiktą schemą);

k_t – faktorius, priklausantis nuo apkrovimo laiko (ilgalaikiam apkrovimui – $k_t = 0,4$, trumpalaikiam apkrovimui – $k_t = 0,6$);

$f_{ct,eff}$ – betono tempiamojo stiprio vidutinė reikšmė tuo laiko momentu, kai atsiranda pirmasis plyšys ($f_{ct,eff} = f_{ctm}$);

$\rho_{p,eff}$ – efektyvusis armavimo koeficientas išilginei armatūrai;

$\alpha_e = E_s/E_{cm}$, kur E_{cm} ir E_s yra betono ir armatūros strypų tamprumo moduliai.

Maksimalaus atstumo tarp plyšių išraiška taip pat yra papildyta koeficientu, pasiūlyto RILEM. Kai atstumas tarp armatūros strypų $a_{st} \leq 5(c + \phi_b / 2)$, ši išraiška lygi:

$$s_{r,max} = \left(k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi_b}{\rho_{p,eff}} \right) \left(\frac{50}{l_{fb} / d_{fb}} \right), \quad (1.16)$$

čia c – išilginės armatūros apsauginis sluoksnis;

ϕ_b – armatūros strypo skersmuo;

k_1 – koeficientas, pagal kurį įvertinamas strypų paviršiaus pobūdis;

k_2 – koeficientas, pagal kurį įvertinama deformacijų pasiskirstymo forma;

k_3 – koeficientas, kurio rekomenduojama reikšmė yra lygi 3,4;

k_4 – koeficientas, kurio rekomenduojama reikšmė yra lygi 0,425.

Pastaba: koeficientai k_1 ir k_2 yra tokie patys, kaip RILEM skaičiavimo metodikoje.

Kai atstumo tarp strypų a_{st} sąlyga netenkinama, maksimalus atstumas tarp plyšių lygus:

$$s_{r,max} = 1,3(h - x), \quad (1.17)$$

čia h – skerspjūvio aukštis;

x – gniuždomos zonos aukštis.

RILEM pasiūlytas koeficientas ($50/(l_{fb}/d_{fb})$) tiksliai neapibūdina plaušo kiekio zonoje tarp plyšių. Tuo tarpu atstumas tarp plyšių skiriasi keičiant plaušo kiekį, todėl pasiūlyta šiek tiek kitokia (1.18) išraiška maksimaliam atstumui tarp plyšių apskaičiuoti [4, 5, 30]. Šioje išraiškoje nėra RILEM pasiūlyto koeficiento, tačiau įvedamas koeficientas k_5 , siekiant sumažinti maksimalų atstumą tarp plyšių, priklausomai nuo liekamojo tempimo stiprio lenkiant. Tuo tarpu liekamasis tempimo stipris priklauso nuo plaušo parametrų (santykio – l_{fb}/d_{fb}), dėl to šiuo koeficientu taip pat įvertinamas plaušo ilgio ir skersmens santykis. Darbe šią skaičiavimo metodiką vadinsime pakoreguota *Eurocode 2* (EC2) metodika. Pagal šią metodiką $s_{r,max}$ išraiška lygi (kai $a_{st} \leq 5(c + \phi_b / 2)$):

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 k_5 \frac{\phi_b}{\rho_{p,eff}}, \quad (1.18)$$

čia aptartas koeficientas k_5 apskaičiuojamas pagal formulę:

$$k_5 = 1 - \frac{f_{ft,res}}{f_{ctm}}, \quad (1.19)$$

čia $f_{ft,res}$ – plieno plaušu armuoto betono liekamasis tempiamasis stipris ($f_{ft,res} = \sigma_{fb} = 0,45f_{Rm,1}$, kur $f_{Rm,1}$ – vidutinė lenkiamojo liekamojo stiprio reikšmė, nustatoma tritaškio apkrovimo lenkimo bandymu;

c – apsauginis betono sluoksnis.

Pastaba: plyšio pločio, deformacijų skirtumo ir kitų dydžių išraiškos tokios pačios kaip ir papildyto EC2 metodikos.

SFRC Design Guideline plyšio pločio skaičiavimo metodika.

Kombinuotai – plaušu ir armatūra – armuoto betono plyšio plotis w_k apskaičiuojamas pagal formulę [27]:

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (1.20)$$

čia $s_{r,max}$ – maksimalus atstumas tarp plyšių;

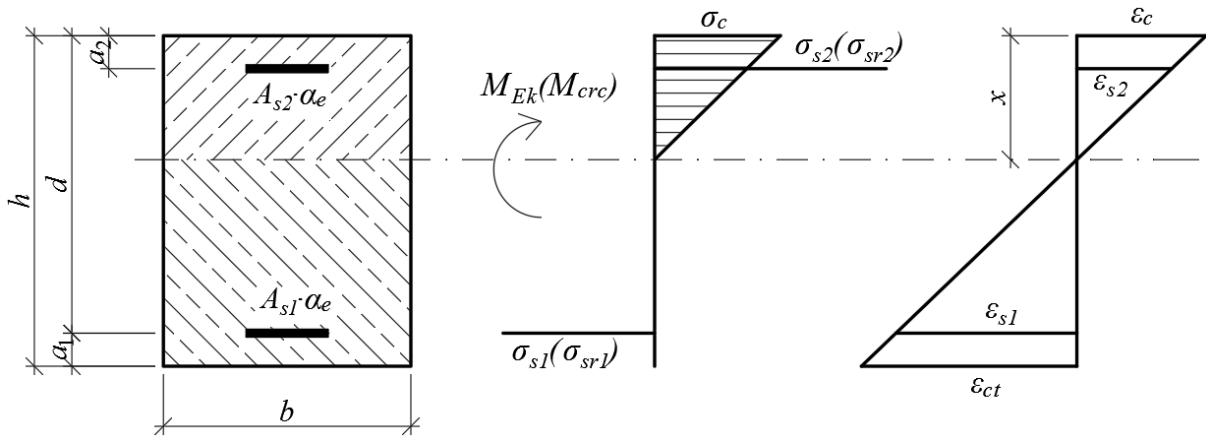
ε_{sm} – vidutinė armatūros deformacija nuo tiesioginių apkrovų derinių, atsižvelgiant į plieno plaušu armuoto betono tempimo standumą tarp plyšių;

ε_{cm} – vidutinė betono deformacija tarp plyšių.

Deformacijų skirtumas lygus:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{(1 - \alpha_f) \left(\sigma_{s1} - 0,4 f_{ct,eff} \frac{1}{\rho_{p,eff}} \right)}{E_s} \geq 0,6 (1 - \alpha_f) \frac{\sigma_{s1}}{E_s}, \quad (1.21)$$

čia σ_{s1} – tempiamos armatūros įtempiai, neįvertinant plieninio plaušo įtakos (apskaičiuojami pagal 1.8 pav. pateiktą schemą).



1.8 pav. Įtempių ir deformacijų pasiskirstymas supleišėjusiam skerspjūvyje, neįvertinant plaušo įtakos

Įtempiai tempiamoje armatūroje σ_{s1} ir gniuždomos zonos aukštis x apskaičiuojami pagal 1.8 pav. pateiktą schemą, rašant projekcijų bei momentų lygtį ir sprendžiant šią sudarytą lygčių sistemą:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{s1} b x^2}{2\alpha_e (d-x)} - \frac{\sigma_{s1} (\alpha_e - 1)(x - a_2) A_{s2}}{\alpha_e (d-x)} - \sigma_{s1} A_{s1} = 0; \\ \sigma_{s1} A_{s1} (d-x) + \frac{\sigma_{s1} (\alpha_e - 1)(x - a_2) A_{s2}}{\alpha_e (d-x)} (x - a_2) + \frac{\sigma_{s1} b x^2}{2\alpha_e (d-x)} \frac{2}{3} x - M_{Ek} = 0. \end{cases} \quad (1.22)$$

$f_{ct,eff}$ – betono tempiamojo stiprio vidutinė reikšmė tuo laiko momentu, kai atsiranda pirmasis plyšys ($f_{ct,eff} = f_{ctm}$);

f_{ctm} – vidutinis betono ašinis tempiamasis stipris;

$\rho_{p,eff}$ – efektyvusis armavimo koeficientas, nustatomas pagal formulę:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_{s1}}{A_{c,eff}}, \quad (1.23)$$

čia A_{s1} – tempiamos armatūros plotas;

$A_{c,eff}$ – armatūra supančio tempiamo betono, kurio aukštis yra $h_{c,eff}$ (čia $h_{c,eff}$ yra mažiausioji iš reikšmių: $2,5(h-d)$; $(h-x)/3$ arba $h/2$), efektyvusis skerspjūvio plotas.

$$\alpha_f = \frac{f_{ctR,L1}^f}{f_{ctm}^f}, \quad (1.24)$$

čia $f_{ctR,L1}^f = \sigma_{fb}$ – plaušu armuoto betono liekamojo stiprio skaičiuojamoji reikšmė:

$$f_{ctR,L1}^f = \kappa_F^f \kappa_G^f f_{ct0,L1}^f, \quad (1.25)$$

čia κ_G^f – faktorius, pagal kurį įvertinama elemento dydžio variacija ir yra lygus $1,0 + 0,5A_{ct}^f \leq 1,70$, kur A_{ct}^f – supleišėjusių zonų ar plastinių šarnyrų sudaromo skerspjūvio

ploto dalis, susieta su atitinkama pusiausvyros padėtimi (grynojo lenkimo atveju elementams be ašinės jėgos, plotas A_{ct}^f gali būti priimamas $0,9A_c$, kur A_c – betono skerspjūvio plotas);

κ_F^f – plaušo orientacijos faktorius. Slankiam betonui gali būti naudojama reikšmė $\kappa_F^f = 0,50$ plokščioms konstrukcijoms, liejant jas horizontalioje pozicijoje (plotis > 5 aukščiai); reikšmė $\kappa_F^f = 1,0$ gali būti naudojama lenkimo ir tempimo atveju;

$$f_{ct0,L1}^f = f_{cf1k,L1}^f \beta_{L1}, \quad (1.26)$$

čia $\beta_{L1} = 0,40$;

$f_{cf1k,L1}^f = f_{Rk,1}$ – charakteristinė liekamojo stiprio reikšmė.

Maksimalus atstumas tarp plyšių:

$$s_{r,max} = (1 - \alpha_f) \frac{\phi_b}{3,6\rho_{p,eff}} \leq (1 - \alpha_f) \frac{\sigma_{s1}\phi_b}{3,6f_{ct,eff}}, \quad (1.27)$$

čia ϕ_b – armatūros didžiausiojo strypo skersmuo.

Pastaba: suvirintų armatūros tinklų atveju $s_{r,max}$ gali būti papildomai apribotas iki dvigubo atstumo tarp tinklo strypų.

Šiai SFRC *Design Guideline* plyšio pločio skaičiavimo metodikai yra tapati vokiečių normose DafStb *Guideline for steel fibre reinforced concrete* pateikta kombinuotai armuotų elementų plyšio pločio apskaičiavimo metodika, todėl darbe ji atskirai nenagrinėjama.

SS 812310:2014 plyšo pločio skaičiavimo metodika.

Pagal SS 812310:2014 metodiką [29] plaušu ir armatūra armuotų elementų plyšio plotis w_k apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}). \quad (1.28)$$

Deformacijų skirtumas ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$) gali būti nustatomas skaičiuojant įtempius tempiamoje armatūroje pasirinktinai dviem atvejais (todėl darbe bus išskiriamos dvi SS 812310:2014 skaičiavimo metodikos). Pirmu atveju daroma prielaida, kad skerspjūvis supleišėjęs ir plaušo įtaka ($f_{fd,R1} = \sigma_{fb}$) yra įvertinama. Deformacijų skirtumas ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$) šiuo atveju apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_{s1} - (k_t + (1 - k_t)k_f) \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_{s1}}{E_s}, \quad (1.29)$$

čia σ_{s1} – įtempiai tempiamoje armatūroje, darant prielaidą, kad skerspjūvis supleišėjęs ir plaušo įtaka ($f_{fd,R1} = \sigma_{fb}$) yra įvertinama (žr. 1.7 pav. pateiktą schemą);

$$k_f = \frac{f_{ftd,R1}}{f_{ctm}} \leq 1,0, \quad (1.30)$$

čia $f_{ftd,R1} = \sigma_{fb}$ – skaičiuojamasis liekamasis stipris tinkamumo ribiniame būvyje:

$$f_{ftd,R1} = \eta_f \frac{f_{ft,R1}}{\gamma_f}, \quad (1.31)$$

čia $\gamma_f = 1,0$ – patikimumo koeficientas tinkamumo ribiniame būvyje;

$\eta_f = 0,5$ – faktorius, pagal kurį įvertinama plaušo orientacija;

$$f_{ft,R1} = 0,45 f_{Rk,1}, \quad (1.32)$$

čia $f_{Rk,1}$ – charakteristinis liekamasis stipris, randamas atliekant eksperimentinius bandymus.

Antruoju atveju deformacijų skirtumas ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$) apskaičiuojamas nustatant fiktyvius įtempius tempiamoje armatūroje, darant prielaidą, kad skerspjūvis supleišėjęs, tačiau plaušo įtakos ($f_{ftd,R1} = \sigma_{fb}$) nepaisoma. Šiuo atveju deformacijų skirtumas ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$) apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{(1 - k_f) \left(\sigma_{s1, fict} - k_t \frac{f_{ct, eff}}{\rho_{p, eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p, eff}) \right)}{E_s} \geq 0,6 (1 - k_f) \frac{\sigma_{s1, fict}}{E_s}, \quad (1.33)$$

čia $\sigma_{s1, fict}$ – fiktyvūs įtempiai tempiamoje armatūroje, darant prielaidą, kad skerspjūvis supleišėjęs, tačiau plaušo įtakos ($f_{ftd,R1} = \sigma_{fb}$) nepaisoma (žr. 1.8 pav. schemą).

Kai atstumas tarp išilginės armatūros strypų $a_{st} \leq 5(c + \phi_b / 2)$, maksimalus atstumas tarp plyšių gali būti apskaičiuojamas sekančiais:

$$s_{r, max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 (1 - k_f) \frac{\phi_b}{\rho_{p, eff}}, \quad (1.34)$$

čia c – išilginės armatūros apsauginis sluoksnis;

ϕ_b – armatūros strypo skersmuo;

k_1 – koeficientas, pagal kurį įvertinamas strypų paviršiaus pobūdis;

k_2 – koeficientas, pagal kurį įvertinama deformacijų pasiskirstymo forma;

k_3 – koeficientas, kurio rekomenduojama reikšmė yra lygi 3,4;

k_4 – koeficientas, kurio rekomenduojama reikšmė yra lygi 0,425.

Kai atstumas tarp armatūros strypų a_{st} viršija $5(c + \phi_b / 2)$, kaip ir pagal EC2 metodiką, maksimalus atstumas tarp plyšių yra lygus:

$$s_{r, max} = 1,3(h - x)(1 - k_f), \quad (1.35)$$

čia h – elemento aukštis;

x – atstumas nuo elemento neutralios ašies iki elemento krašto (gniuždomos zonos aukštis).

FIB Model Code 2010 plyšio pločio skaičiavimo metodika.

Pagal FIB *Model Code* 2010 [31] metodiką elementų, armuotų plaušu ir įprastine armatūra, skaičiuojamasis plyšio plotis yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$w_d = 2l_{s,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}), \quad (1.36)$$

čia $l_{s,max}$ – ilgis, kuriame įvyksta betono ir armatūros praslydimas;

ε_{sm} – vidutinė armatūros deformacija ilgyje $l_{s,max}$;

ε_{cm} – vidutinė betono deformacija ilgyje $l_{s,max}$;

ε_{cs} – betono deformacija dėl (laisvojo) traukumo.

$$l_{s,max} = kc + \frac{1}{4} \frac{\phi_b}{\rho_{p,eff}} \frac{(f_{ctm} - f_{Ftsm})}{\tau_{bm}}, \quad (1.37)$$

čia k – empirinis koeficientas, pagal kurį įvertinama betono apsauginio sluoksnio įtaka (supaprastintu atveju gali būti priimama $k = 1,0$);

c – apsauginis betono sluoksnis;

ϕ_b – didžiausio armatūros strypo skersmuo;

$\rho_{p,eff}$ – efektyvusis armavimo koeficientas tempiamai armatūrai;

f_{ctm} – vidutinis tempiamasis betono stipris;

τ_{bm} – vidutinis sukibimo stipris tarp plieno ir betono;

f_{Ftsm} – vidutinis skaičiuojamasis liekamasis stipris tinkamumo ribiniam būviui ($f_{Ftsm} = \sigma_{fb}$):

$$f_{Ftsm} = f_{Ftsk} / 0,7, \quad (1.38)$$

čia

$$f_{Ftsk} = 0,45 f_{Rk,1}, \quad (1.39)$$

čia $f_{Rk,1}$ – charakteristinis liekamasis stipris tinkamumo ribiniam būviui.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \frac{\sigma_{s1} - \beta \sigma_{sr1}}{E_s} - \eta_r \varepsilon_{sh}, \quad (1.40)$$

čia σ_{s1} – įtempiai tempiamoje armatūroje laikant, kad skerspjūvis supleišėjęs (žr. 1.7 pav. pateiktą schemą);

β – empirinis koeficientas, pagal kurį įvertinama vidutinė deformacija ilgyje $l_{s,max}$, priklausomai nuo apkrovimo tipo;

σ_{sr1} – įtempiai tempiamoje armatūroje, apskaičiuoti nuo pleišėjimo apkrovos ir laikant, kad skerspjūvis supleišėjęs;

η_r – koeficientas, pagal kurį įvertinama betono traukumo deformacijų įtaka (trumpalaikių apkrovų atveju $\eta_r = 0$);

ε_{sh} – betono traukumo deformacija.

Įtempiai tempiamoje armatūroje plyšio formavimosi stadijoje σ_{sr1} apskaičiuojami pagal pateikiamą formulę:

$$\sigma_{sr1} = (f_{ctm} - f_{Fism}) (1 + \alpha_e \rho_s) / \rho_{p,eff}, \quad (1.41)$$

čia α_e – plieno ir betono tamprumo modulių santykis (E_s/E_c).

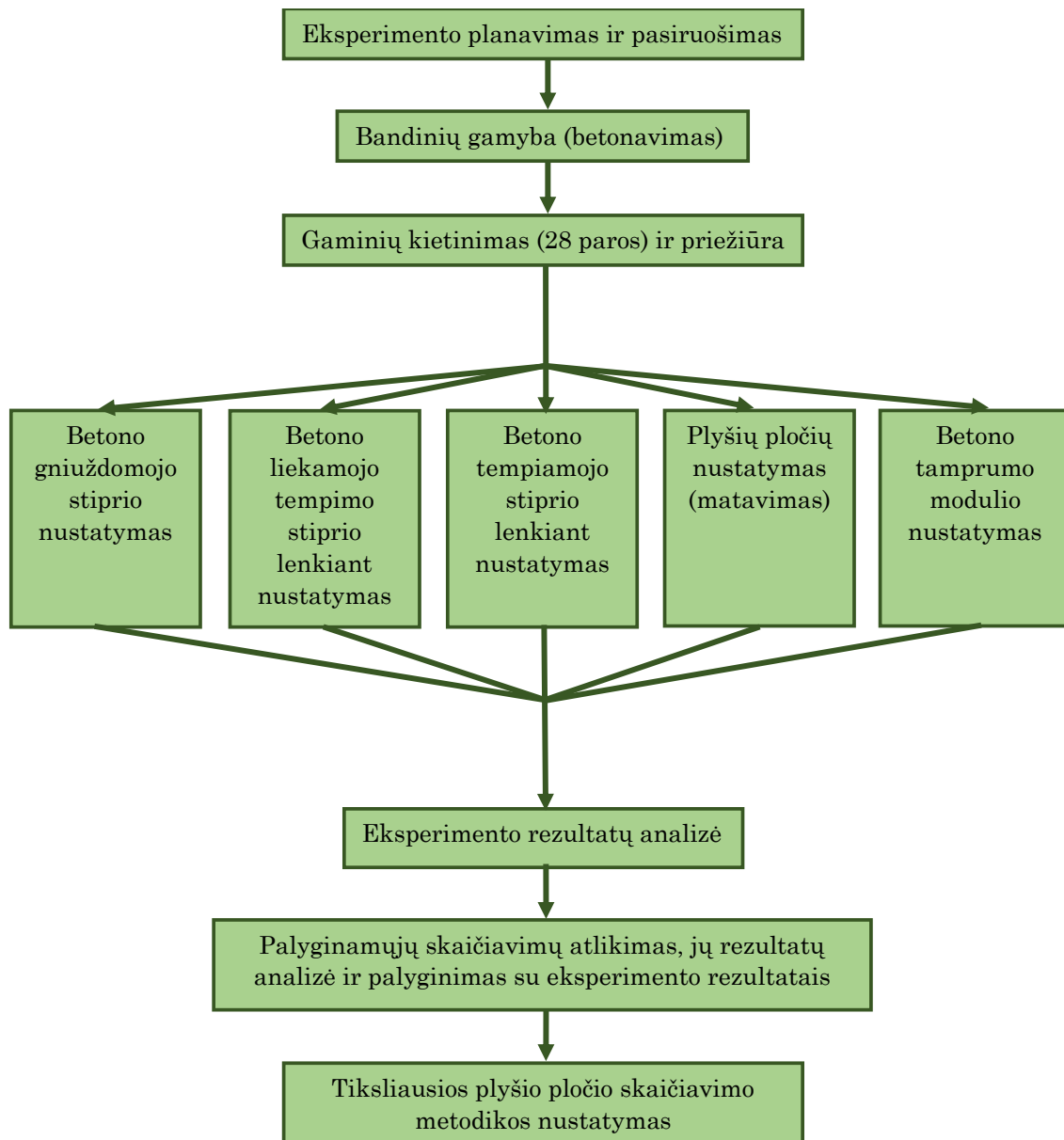
Pastaba:

- Naudojant šią skaičiavimo metodiką palyginimui pleišėjimo įtempiai σ_{sr1} gali būti apskaičiuojami ir pagal 1.7 pav. pateiktą schemą, todėl darbe bus išskiriamos dvi FIB *Model Code* 2010 skaičiavimo metodikos, kurios skiriasi pleišėjimo įtempių σ_{sr1} nustatymo būdu.

2. METODAI

2.1. Eksperimentinių kombinuotai (plaušu ir armatūra) armuotų lenkiamų gelžbetonių elementų tyrimų organizavimas ir tyrimo objekto aprašymas

2.1 paveiksle pateikiama eksperimentinių tyrimų eiga (veiksmų planas), o 2.1 lentelėje – eksperimento bandinių gamybos programa.



2.1 pav. Eksperimentinių tyrimų schema (veiksmų seka)

2.1 lentelė. Eksperimento bandinių gamybos planas (programa)

Betonavimo Nr.	Betonavimo data	Plaušo kiekis, kg/m ³	Bandiniai				
			Plyšių pločių matavimas (1300×200×160 mm)	Liekamojo tempimo stiprio lenkiant nustatymas (600×150×150 mm)	Tempiamojo stiprio lenkiant nustatymas (400×100×100 mm)	Tamprumo modulio nustatymas (300×100×100 mm)	Gniuždomojo stiprio nustatymas (100×100×100 mm)
1	2016-10-11	3		3	1		3
2		3		3	1		3
3	2016-10-13	5		3	1		3
4		5		3	1		3
5		3	1			1	3
6		3	1			1	3
7		5	1			1	3
8	2016-10-18	5	1			1	3
9		50	1			1	3
10		50		3	1		3
11		50		3	1		3
12	2016-10-20	50	1			1	3
13		70	1			1	3
14		70	1			1	3
15		70		3	1		3
16		70		3	1		3
SUMA:			8	24	8	8	48

Iš viso per keturias betonavimo dienas buvo suformuoti 96 standartiniai bandiniai: 8 (po 2 su kiekvienu plaušo kiekiu) didelės sijos (1300×200×160 mm) plyšių pločių matavimui, 24 (po 6 su kiekvienu plaušo kiekiu) tritaškio apkrovimo bandiniai (600×150×150 mm) betono liekamojo tempimo stiprio lenkiant nustatymui, 8 (po 2 su kiekvienu plaušo kiekiu) bandiniai (400×100×100 mm) betono tempiamojo stiprio lenkiant nustatymui, 8 (po 2 su kiekvienu plaušo kiekiu) bandiniai (300×100×100 mm) betono tamprumo modulio nustatymui ir 48 (po 12 su kiekvienu plaušo kiekiu) kubeliai (100×100×100 mm) betono gniuždomojo stiprio nustatymui.

Eksperimente naudotos medžiagos.

Eksperimentiniame tyrime buvo naudota vienoda betono mišinio sudėtis (2.2 lentelė), keičiant tik plaušo kiekį ir rūšį (žr. 2.3 lentelę ir 2.2 paveikslą).

2.2 lentelė. Eksperimente naudoto betono mišinio sudėtis

1 m ³ mišinio sudėtis:		0,049 m ³	Sunaudota, kg (su 5 % atsarga)
Medžiaga	Kiekis, kg/m ³	Kiekis, kg	
Cementas CEM I 42.5 R	330	16,17	277,2
Vanduo	165	8,09	-
Smėlis, frakcija 0/4	831	40,72	698,0
Žvirgždas, frakcija 4/16	1034	50,67	868,6
Plaušas (polipropileno arba plieno)	3/5/50/70	0,147/0,245/2,45/3,43	-
Superplastiklis	2,604	0,128	2,2

Betono mišinyje buvo pasirinkta naudoti 50 bei 70 kg/m³ kiekį plieno plaušo lenkais galais (ilgis - 50 mm, skersmuo – 1,0 mm, *l/d* santykis - 50) ir 3 bei 5 kg/m³ kiekį polipropileno makroplaušo (ilgis - 48 mm, skersmuo - 0,7 mm, *l/d* santykis – 68,6). Pagrindinės naudotų plaušų charakteristikos pateiktos 2.3 lentelėje, o jų vaizdas – 2.2 paveiksle.

2.3 lentelė. Pagrindinės eksperimente naudotų plaušų charakteristikos

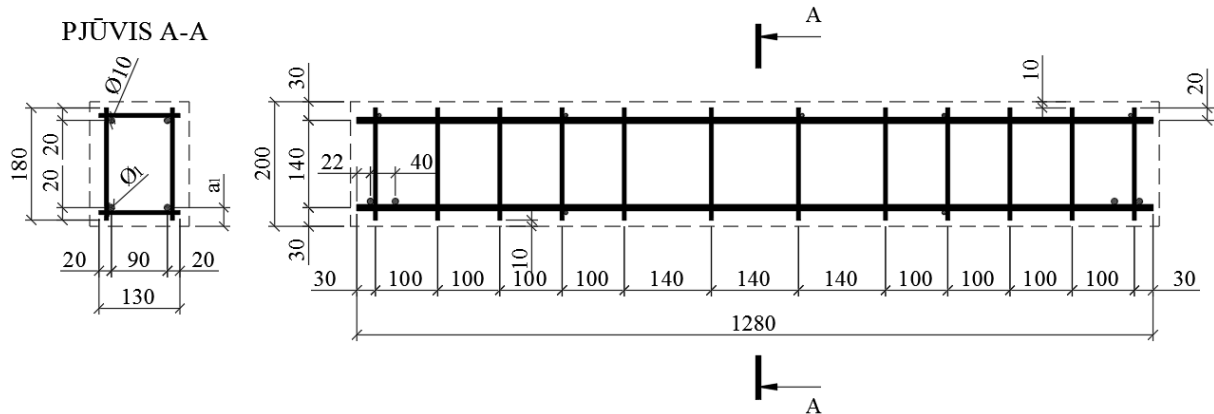
Medžiaga	Plaušo geometrija	Plaušo ilgis, mm	Plaušo skersmuo, mm	Plaušo ilgio ir skersmens santykis <i>l/d</i>	Plaušo tempiamasis stipris <i>f_y</i> , MPa	Plaušo kiekis, kg/m ³
Plienas	Lygus paviršius lenkais galais	50	1,0	50	1100	50/70
Polipropilenas	Dantytas paviršius	48	0,7	68,6	417	3/5



2.2 pav. Polipropileno plaušas (kairėje) ir plieno plaušas lenkais galais (dešinėje)

Didelės sijos (1300×200×160 mm) armuotos kombinuotai – plaušu ir armatūra. Išilginiam dvipusiam armavimui naudota 2Ø10 mm S500 klasės armatūra, kurios plieno tamprumo modulis $E_s = 200$ GPa. Skersiniam armavimui naudota Ø8 mm skersmens S500

klasės armatūra. Armatūros karkasas – suvirintas. Atstumas nuo sijos krašto iki išilginės armatūros centro – 30 mm (apsauginis sluoksnis – 25 mm), užtikrintas plastikiniai fiksuatoriai. Sijų pakėlimo kilpoms naudoti 8 mm skersmens lygaus paviršiaus plieno strypai. Armavimo schema pateikta 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Didelių sijų (1300×200×160 mm) armavimo schema

Bandinių gamyba.

Gaminant bandinius pastebėta, kad tankinant bandinius su plieno plaušu, plaušas į paviršių neiškilo. Tuo tarpu bandinių su polipropileno plaušu atveju, plaušas, buvęs paviršiuje, nenusėdavo gilyn ir buvo linkęs orientuotis ne tik horizontaliai, bet ir vertikalčiai (2.4 pav.). Tai galėjo turėti įtakos eksperimento rezultatams. Bandinių tankinimo laikas buvo vienodas.



2.4 pav. Vaizdai iš bandinių gamybos

Suformuoti bandiniai iš klojinių buvo išformuojami praėjus 1–2 paroms po betonavimo. Visi išbetonuoti bandiniai buvo kietinami 28 paras pagal LST EN 206:2013+A1:2017 [32] standartą. Bandiniai buvo laistomi 2–3 kartus per savaitę, kad būtų užtikrinamas pakankamas

vandens kiekis hidratacijos procesams ir išvengiamas pleišėjimas betonui kietėjant. 2.5 paveiksle pateikiamas kietinamų gaminių vaizdas (dalis gaminių jau buvo paimta išbandymui).



2.5 pav. Pagaminti bandiniai

2.3. Eksperimentinių bandymų aprašymas

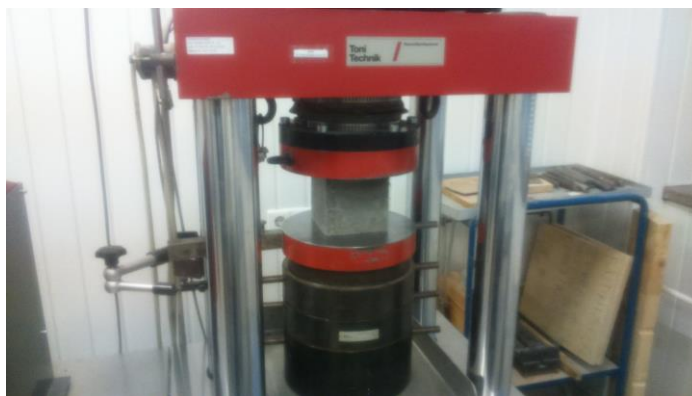
Betono gniuždomojo stiprio nustatymas.

Suformuoti betono kubeliai po 28 parų kietinimo pagal LST EN 12390-3:2009 standartą [33] buvo gniuždomi hidrauliniu 600 kN galios presu *Toni Technik* (2.6 pav.). Gniuždymo stipris nustatomas užfiksuotą suirimo apkrovą dalinant iš gniuždomo ploto:

$$f_c = \frac{F}{A}, \quad (2.1)$$

čia F – bandinio surimo apkrova;

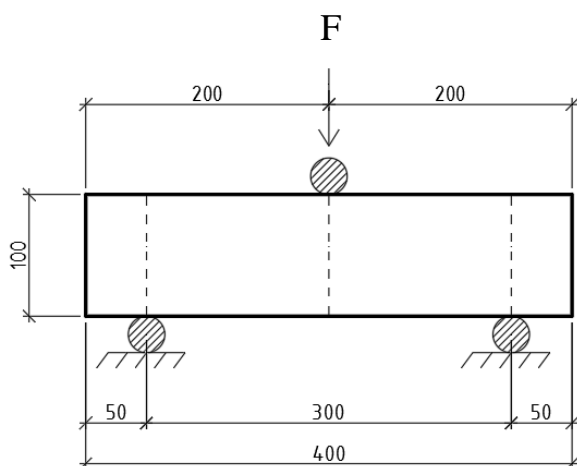
A – gniuždomas plotas.



2.6 pav. Betono gniuždomojo stiprio nustatymas

Betono tempiamojo stiprio lenkiant nustatymas.

Po 28 parų kietinimo standartiniai bandiniai pagal LST EN 12390-5:2009 standartą [34] buvo lenkiami hidrauliniu *Toni Technik* presu (600 kN galios) taikant tritaškę apkrovimo schemą (2.7 pav.).



2.7 pav. Tritaškio lenkimo bandymo schema nustatant betono tempiamąjį stiprį (kairėje) ir bandymo vaizdas (dešinėje)

Betono tamprumo modulio nustatymas.

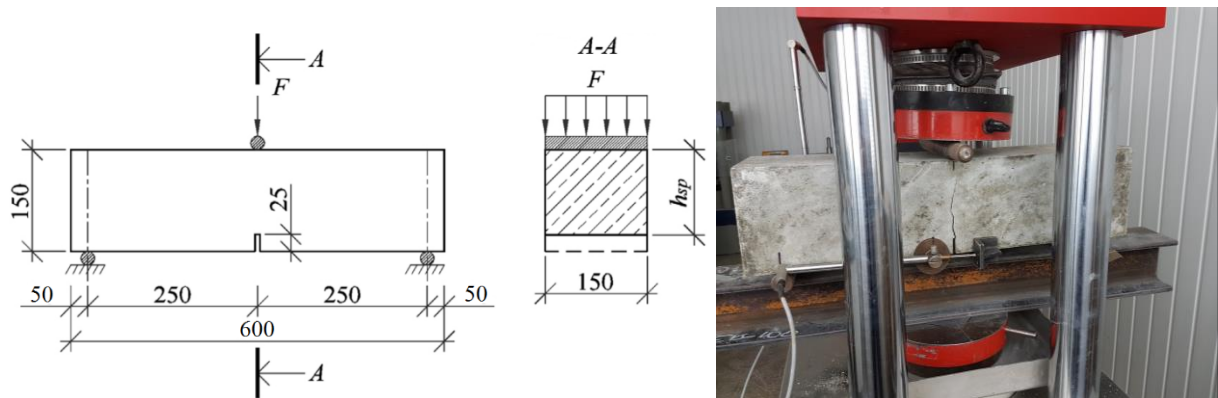
Standartiniai bandiniai po 28 parų kietinimo buvo bandomi hidrauliniu *Toni Technik* presu (600 kN galios) pagal ISO 1920-10:2010 [35] standarto reikalavimus apgniuždant iki 30 % stiprumo ribos (2.8 pav.). Į presą įvedamas kubelio (100×100 mm) gniuždomasis stipris, padaugintas iš 0,7 ir iš 0,3 (30 % stiprumo).



2.8 pav. Betono tamprumo modulio nustatymo vaizdas

Betono liekamojo tempimo stiprio lenkiant nustatymas.

Suformuoti standartiniai bandiniai su 25 mm aukščio įpjova po 28 parų kietinimo buvo bandomi hidraulinio *Toni Technik* presu (600 kN galios) taikant tritaškę apkrovimo schemą (2.9 pav.).



2.9 pav. Tritaškio lenkimo bandymo schema nustatant betono liekamąjį tempimo stiprį (kairėje) ir bandymo vaizdas (dešinėje)

Liekamasis stipris nustatytas pagal Lietuvoje patvirtinto Europos standarto LST EN 14651:2005+A1:2007 [22] reikalavimus. Pagal šį standartą su viena mišinio sudėtimi turi būti išbandyti ne mažiau kaip 6 bandiniai ir rezultatas gaunamas apskaičiuavus bandinių vidurkį. Bandymas atliekamas pagal deformacijų *CMOD* (crack mouth opening displacement) kontrolę. Schema pateikta 2.9 pav. Liekamojo stiprio išraiška, kai $CMOD = 0,5$ ($j = 1, i = 1$) [11]:

$$f_{R,i} = \frac{3F_{R,i}L}{2bh_{sp}^2}, \quad (2.2)$$

čia $F_{R,i}$ – apkrova, atitinkanti $CMOD = CMOD_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$);

L – atstumas tarp atramų;

b – elemento plotis;

h_{sp} – aukštis nuo įpjovos galo iki elemento viršaus.

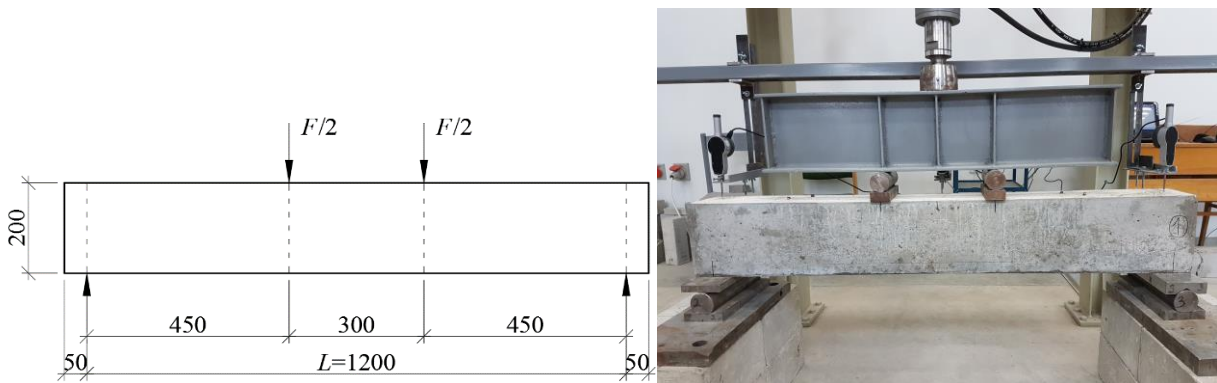
2.4 lentelėje pateikiamos bandinių charakteristikos liekamojo tempimo stiprio lenkiant nustatymui.

2.4 lentelė. Pagrindinės 600×150×150 mm bandinių charakteristikos

Serijos Nr.	600×150×150 mm sijų skaičius	Plaušo medžiaga	Plaušo kiekis, kg/m ³
1	6	Plienas	50
2	6	Plienas	70
3	6	Polipropilenas	3
4	6	Polipropilenas	5

Plyšio pločių matavimas.

Lenkiant bandinius (1300×200×160 mm) taikyta keturių taškų apkrovimo schema (2.10 pav). Apkrovimas vykdytas pakopomis (2,0-4,0 kN). Užfiksavus atsivėrusį plyšį ir apkrovą, kurią pasiekus jis atsivėrė, po kiekvienos apkrovimo pakopos (apkrova buvo keliami iki ≈ 70 % nuo sijos suirimo apkrovos) buvo matuojamas plyšio plotis ir atstumas tarp plyšių sijos grynojo lenkimo zonoje ties tempiamos išilginės armatūros centru. Plyšių pločių matavimai atlikti elektroniniu plyšio pločio matuokliu TC410, kurio padalos vertė 0,02 mm. Bandymo pabaigoje sijos buvo sulaužytos siekiant nustatyti suirimo apkrovą.

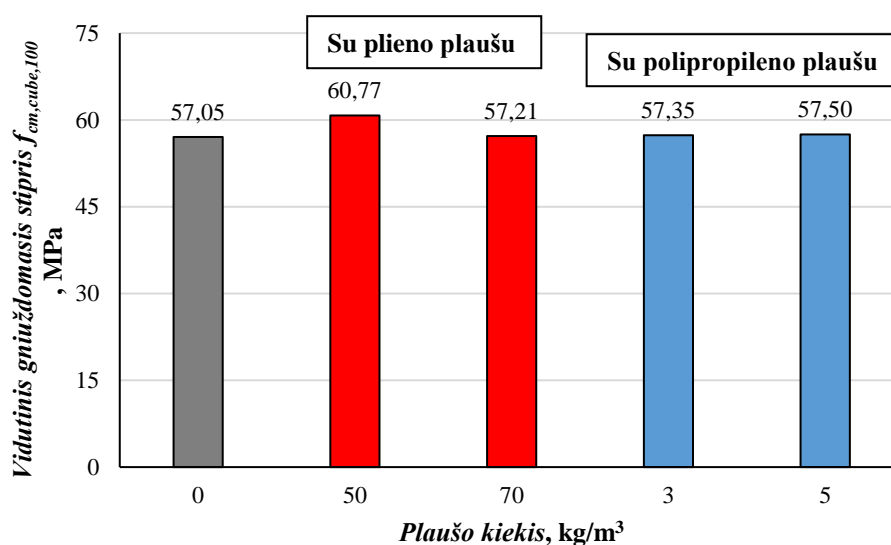


2.10 pav. Keturių taškų lenkimo bandymo schema (kairėje) ir eksperimento vaizdas (dešinėje)

3. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

3.1. Eksperimento rezultatų analizė

Atlikus eksperimentą ir nustačius visų bandinių gniuždomojo stiprio reikšmes, buvo apskaičiuotas vidutinis 100×100 mm kubinis gniuždomasis stipris (tolimesniems skaičiavimams perskaičiuota į 150×150 mm kubelio ir cilindrinį stiprius) betonui atitinkamai su kiekvienu plaušu kiekiu. Palyginimui pasinaudota tos pačios betono sudėties, bet be plaušo Kelpšos (2017) atlikto eksperimento rezultatais. Rezultatai pateikti 3.1 paveiksle. Šie rezultatai naudojami atliekant tolimesnius palyginamuosius skaičiavimus.



3.1 pav. Betono vidutinio gniuždomojo stiprio rezultatai

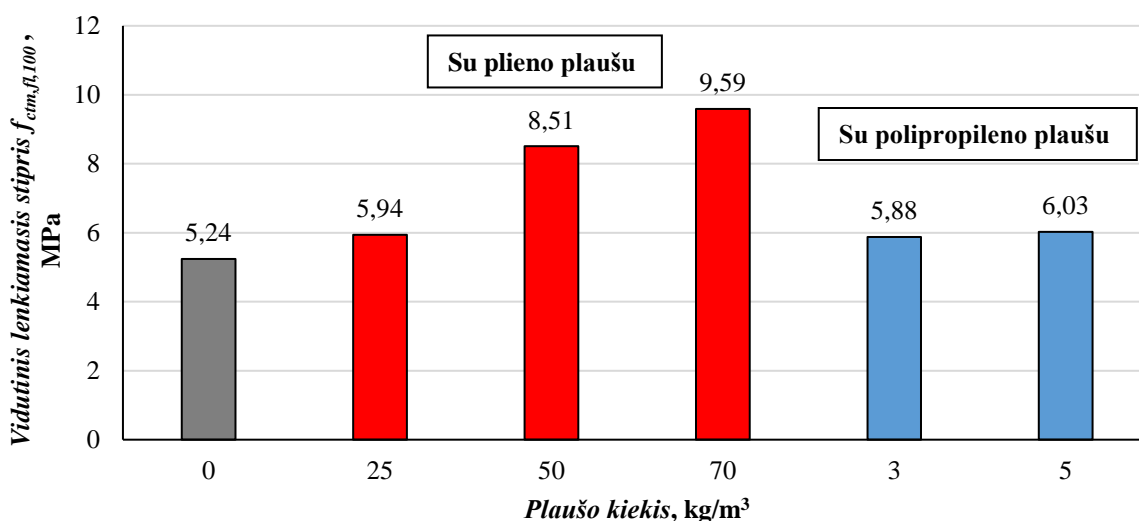
Iš eksperimento rezultatų pastebima, kad plaušo naudojimas betone jo gniuždomąjį stiprį įtakoja nežymiai. Ryškiausias pokytis pastebėtas 50 kg/m^3 kiekio plieno plaušo atveju, kai gniuždomasis stipris padidėjo apie 6 %. Tirtu atveju gniuždomojo stiprio sumažėjimo, panaudojus plaušą, nepastebėta.

Eksperimento metu nustačius visų bandinių tempiamojo betono stiprio lenkiant reikšmes, buvo apskaičiuotas vidutinis 100 mm aukščio sijos tempiamasis stipris lenkiant (tolimesniems skaičiavimams perskaičiuota į 200 mm aukščio sijos vidutinį tempiamąjį stiprį lenkiant $f_{ctm,fl,200}$ ir vidutinį ašinį tempiamąjį stiprį f_{ctm}) betonui atitinkamai su kiekvienu plaušo kiekiu. Palyginimui pasinaudota tos pačios betono sudėties be plaušo ir su kitokių savybių (žr. 3.1 lentelę) 25 kg/m^3 plieno plaušo kiekiu Kelpšos (2017) atlikto eksperimento rezultatais.

Rezultatai pateikiami 3.2 pav. Šie rezultatai naudojami atliekant tolimesnius palyginamuosius skaičiavimus.

3.1 lentelė. Rezultatų palyginimui naudoto plaušo charakteristikos

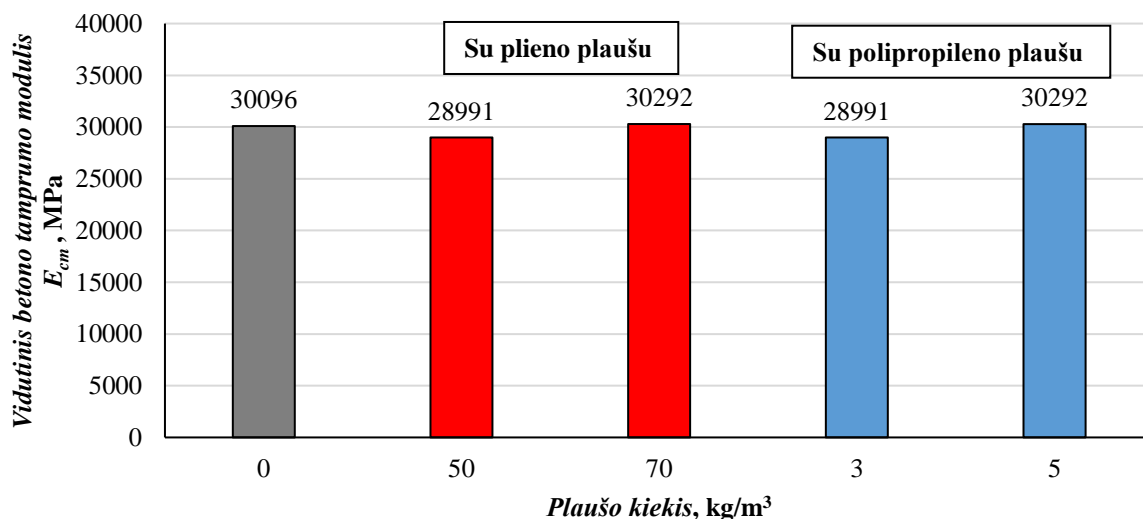
Medžiaga	Plaušo geometrija	Plaušo ilgis, mm	Plaušo skersmuo, mm	Plaušo ilgio ir skersmens santykis l/d	Plaušo tempiamasis stipris f_y , MPa	Plaušo kiekis, kg/m^3
Plienas	Lygus paviršius lenktais galais	52	0,75	69,3	1500	25



3.2 pav. Betono vidutinio tempiamojo stiprio lenkiant rezultatai

Iš eksperimento rezultatų (3.2 pav.) matoma, kad plaušo panaudojimas betone padidina jo tempiamąjį stiprį lenkiant. Tai ypač pastebima, kai betone naudojamas plieno plaušas. Panaudojus plieno plaušą, tempiamasis stipris lenkiant išaugo apie 12 % su 25 kg/m^3 plaušo kiekiu, apie 38 % – su 50 kg/m^3 plaušo, o su 70 kg/m^3 – apie 45 %. Tuo tarpu naudojant polipropileno plaušą ir lyginant su betonu be plaušo, tempiamasis stipris lenkiant padidėjo apie 11 % su 3 kg/m^3 plaušo kiekiu, o naudojant 5 kg/m^3 plaušo – 13 %. Pastebima, kad didėjant plaušo kiekiui, didėja ir tempiamasis stipris lenkiant. Bandiniuose su plieno plaušu stiprio padidėjimas siekia apie 30 % padidinus plaušo kiekį nuo 25 kg/m^3 iki 50 kg/m^3 ir apie 11 % - padidinus 50 kg/m^3 iki 70 kg/m^3 . Bandiniuose su polipropileno plaušu padidėjimas siekia apie 2,5 %. Lyginant rezultatus su 25 kg/m^3 plieno plaušo kiekiu ir su polipropileno plaušu, vidutinis tempiamasis stipris lenkiant skyrėsi neryškiai (iki 1,5 %), o su 50 kg/m^3 plieno plaušo kiekiu stipris gautas iki 30 % didesnis nei su polipropileno plaušu.

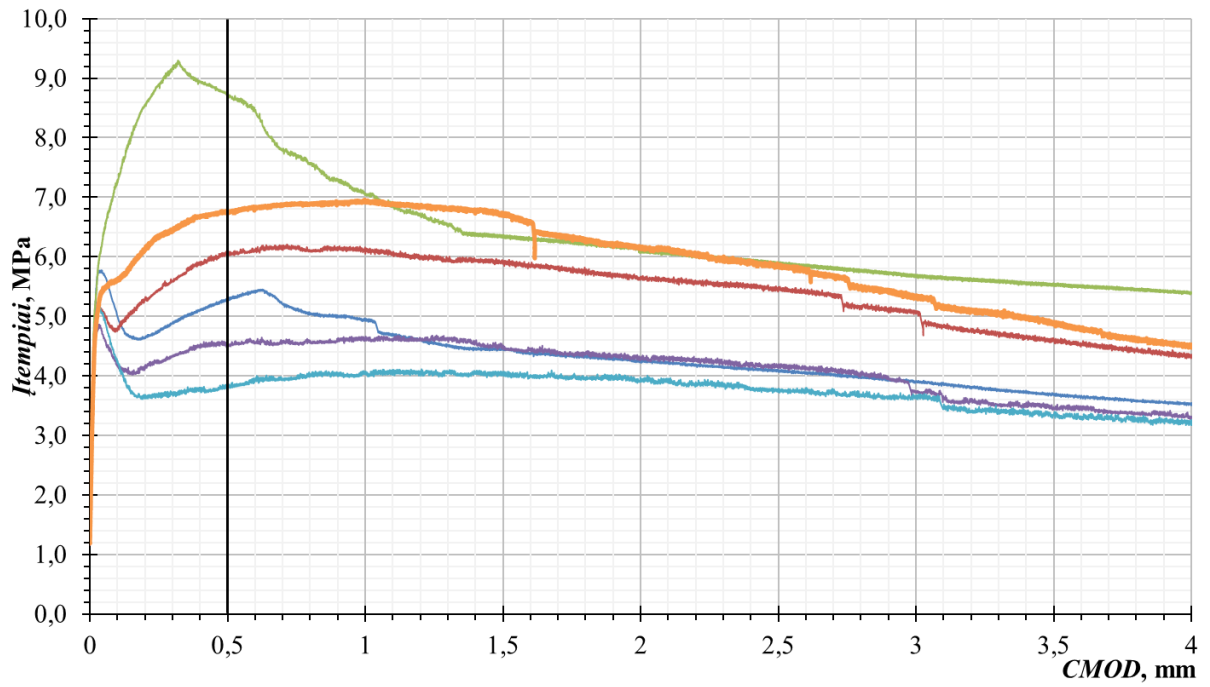
Atlikus eksperimentą buvo nustatytos visų bandinių tamprumo modulio reikšmės ir apskaičiuotas vidutinis betono tamprumo modulis betonui atitinkamai su kiekvienu plaušo kiekiu. Palyginimui pasinaudota tos pačios betono sudėties, bet be plaušo Kelpšos (2017) eksperimento rezultatais. Eksperimento rezultatai pateikti 3.3 paveiksle. Šie rezultatai naudojami atliekant tolimesnius palyginamuosius skaičiavimus.



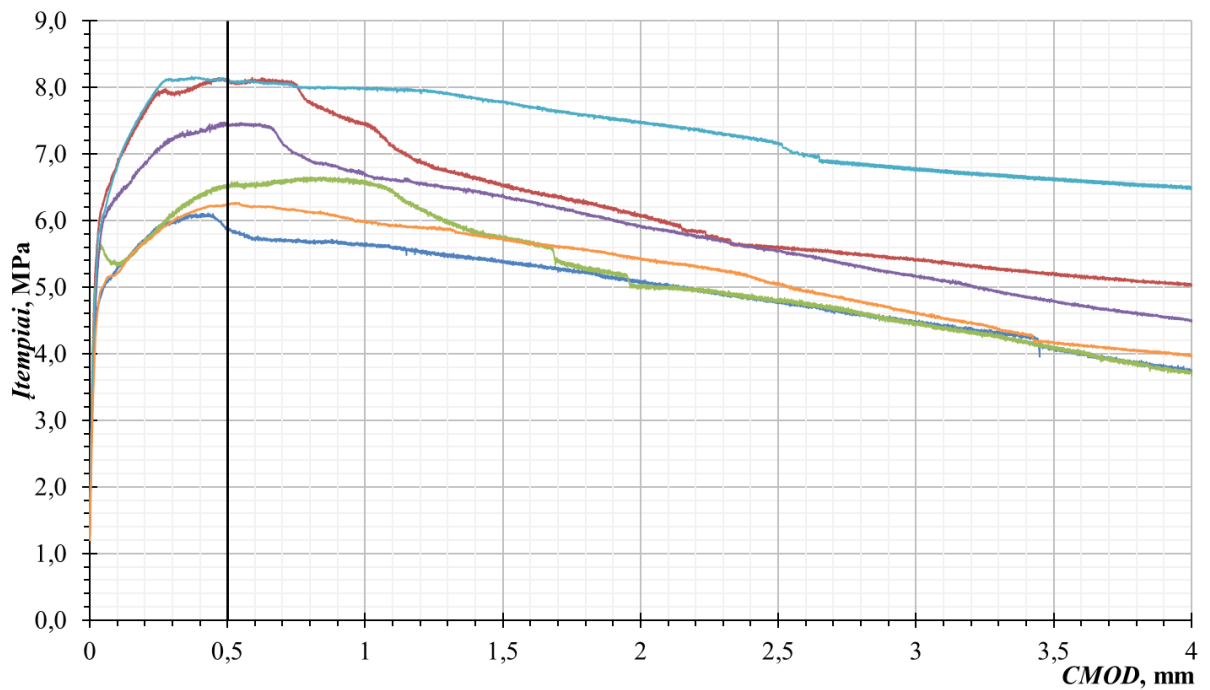
3.3 pav. Vidutinio betono tamprumo modulio rezultatai

Analizuojant rezultatus (3.3 pav.) galima teigti, kad plaušo panaudojimas betone praktiškai neįtakoja betono tamprumo modulio. Didžiausias pokytis lyginant su betonu be plaušo – sumažėjimas apie 3 %, kai buvo naudotas 5 kg/m³ polipropileno plaušas. Taip pat pastebėta, kad ryškesnės įtakos neturi ir naudojamo plaušo rūšis.

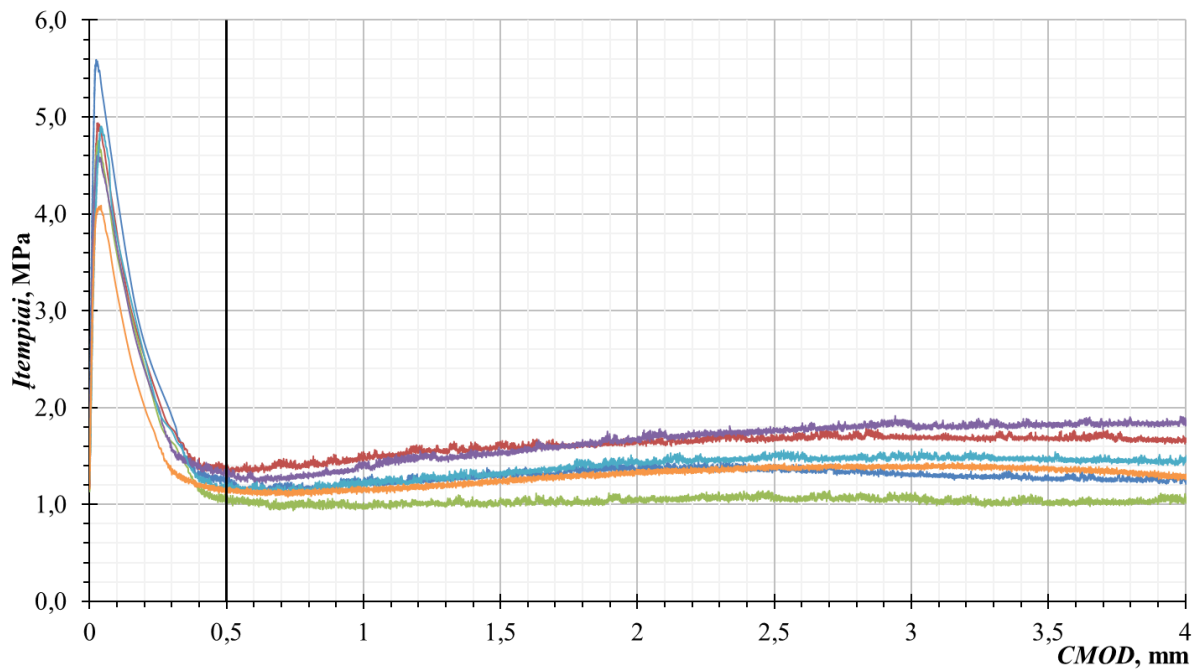
Atlikus liekamojo tempimo stiprio lenkiant nustatymo bandymus, buvo gautos kiekvieno bandinio deformacijos ($CMOD$) ir liekamojo tempimo stiprio lenkiant ($f_{R,1}$) kreivės (3.4–3.7 pav.). Nustatytos visų bandinių liekamojo tempimo stiprio eksperimentinės reikšmės $f_{R,1}$ prie deformacijos $CMOD = 0,5$ ir apskaičiuotas vidutinis eksperimentinis liekamasis tempimo stipris $f_{Rm,1}$ atitinkamai su kiekvienu plaušo kiekiu. Vidutinio liekamojo tempimo stiprio lenkiant $f_{Rm,1}$ rezultatai pateikti 3.8 paveiksle. Šie rezultatai naudojami atliekant tolimesnius palyginamuosius skaičiavimus.



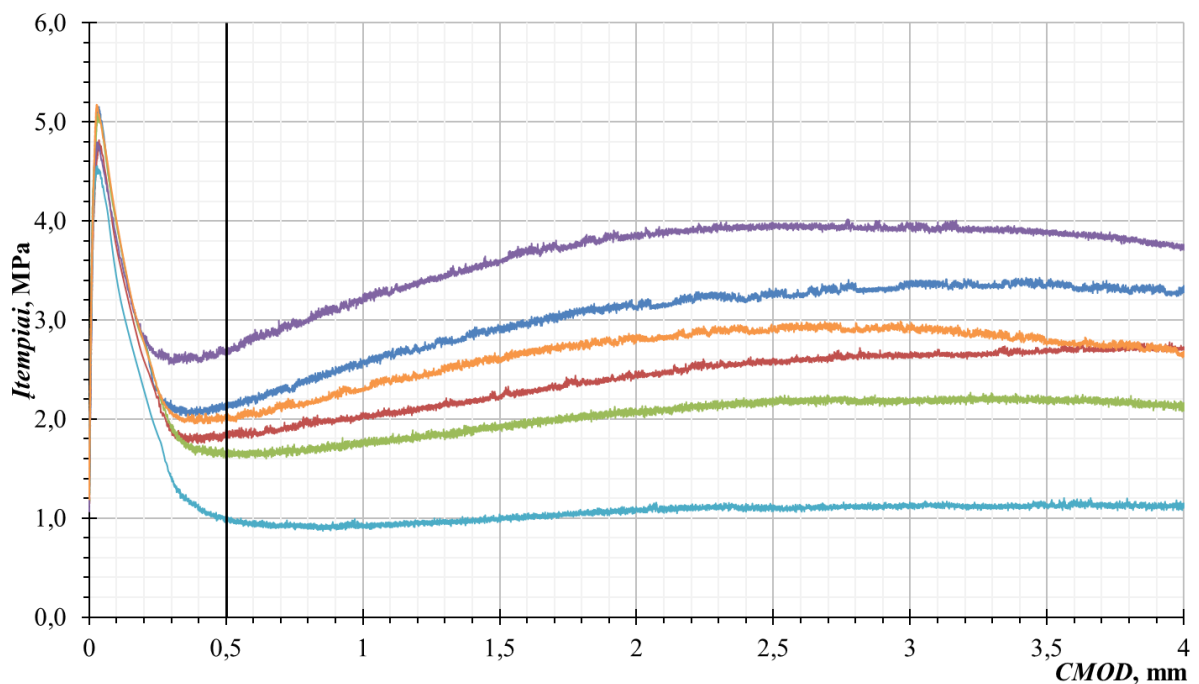
3.4 pav. 1 serijos bandinių (su 50 kg/m³ plieno plaušu) $f_{R,i}$ – CMOD priklausomybė



3.5 pav. 2 serijos bandinių (su 70 kg/m³ plieno plaušu) $f_{R,i}$ – CMOD priklausomybė



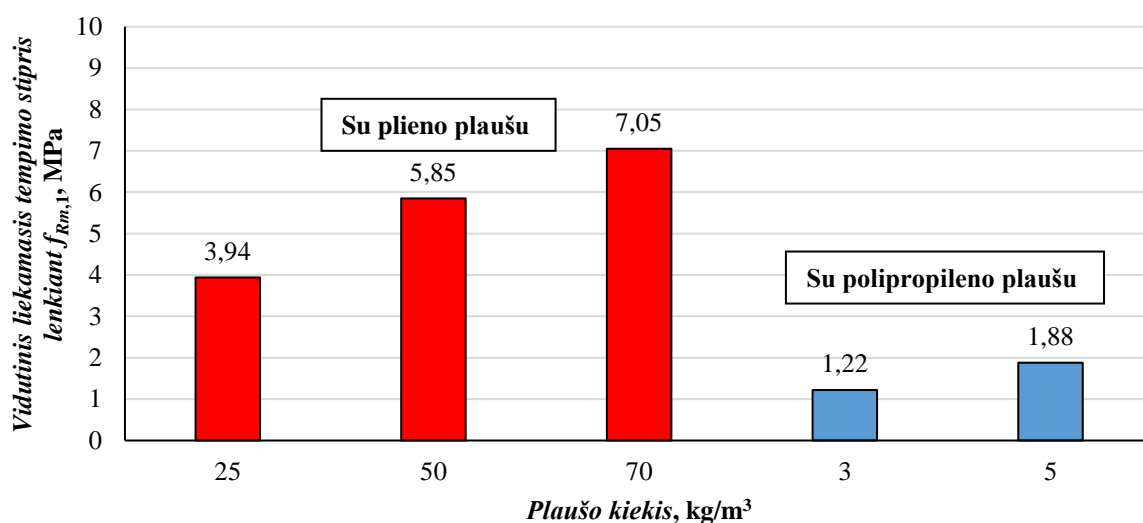
3.6 pav. 3 serijos bandinių (su 3 kg/m^3 polipropileno plaušu) $f_{R,i}$ – $CMOD$ priklausomybė



3.7 pav. 4 serijos bandinių (su 5 kg/m^3 polipropileno plaušu) $f_{R,i}$ – $CMOD$ priklausomybė

Analizuojant šias kreives, galima pastebėti keletą dėsningumų. Betono, kuriame naudojamas plieno plaušas, atveju pastebimas gana ženklus tos pačios bandinių serijos reikšmių sklaida. T. y. atsivėrus plyšiui viena kreivė iškart leidžiasi žemyn (liekamasis betono tempimo stipris sumažėja), o jau kita tos pačios serijos kreivė rodo, kad atsivėrus plyšiui, liekamasis tempimo stipris taip staigiai nenukrenta, o dar šiek tiek padidėja, kol ilgainiui prie didesnės

deformacijos stipris pradeda mažėti. Tačiau literatūroje tokia plieno plaušu armuoto betono liekamojo tempimo stiprio reikšmių sklaida yra sutinkama ir reali – būna tam tikrų atveju, kai ši reikšmių sklaida yra dar didesnė. Priešingai, betono su polipropileno plaušu atveju, reikšmių sklaida yra ženkliai mažesnė – visos kreivės kyla ir leidžiasi panašiu metu. Taip pat visais atvejais pastebimas ryškus betono liekamojo tempimo stiprio sumažėjimas atsivėrus plyšiui. Tokį skirtumą tarp bandinių su plieno ir polipropileno plaušais galėjo sąlygoti tai, kad plyšyje galimai skyrėsi plaušelių kiekis (polipropileno plaušelių galėjo būti daugiau ir jų pasiskirstymas tolygesnis). Taip pat polipropileno plaušas yra deformatyvesnis, plastiškesnis (dėl mechaninių plaušo savybių), todėl gautos reikšmės polipropileno plaušo atveju tolygesnės, o jų sklaida mažesnė.



3.8 pav. Betono vidutinio liekamojo tempimo stiprio lenkiant rezultatai

Detalesnei ir tikslesnei rezultatų analizei buvo pasinaudota Kelpšos (2017) atlikto eksperimento su ta pačia betono sudėtimi, tik su 25 kg/m³ geresnių savybių plieno plaušo kiekiu (plaušo savybes žiūrėti 3.1 lentelėje), rezultatu (būtent su tokiu plieno plaušo kiekiu rekomenduojama lyginti betono savybes naudojant polipropileno plaušą [11]). Analizuojant gautus rezultatus (3.8 pav.) galima teigti, kad naudojant plieno plaušą, liekamasis tempimo stipris lenkiant gaunamas ženkliai didesnis nei naudojant polipropileno plaušą, tačiau tai galioja tik su tyrime pasirinktais plaušų kiekiais betono mišinyje (tikslėnei analizei reikia papildomų tyrimų su kitokiais plaušo kiekiais). Pavyzdžiui, naudojant 25 kg/m³ plieno plaušą rezultatas didesnis apie 70 % (arba apie 3 kartus) nei naudojant 3 kg/m³ polipropileno plaušą, ir atitinkamai 50 % (arba apie 2 kartus) didesnis nei naudojant 5 kg/m³ plaušo kiekį. Didinant plieno plaušo kiekį, rezultatų skirtumas dar labiau auga, t. y. plieno plaušo teigiamas efektas

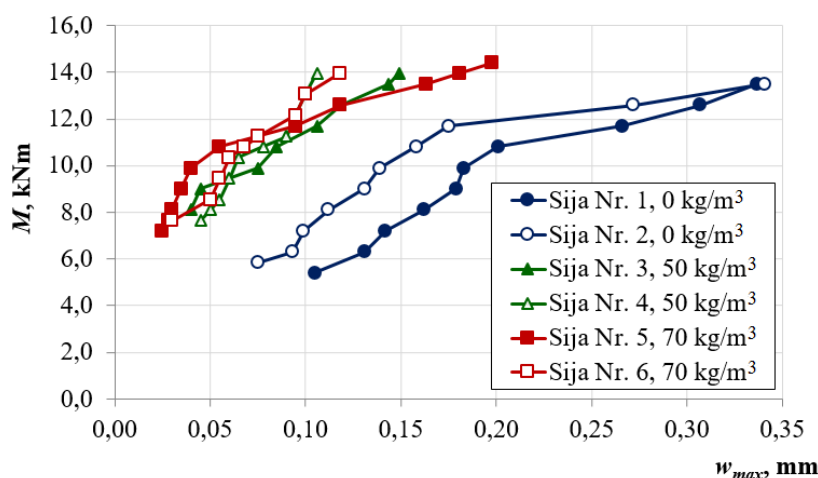
didėja. Taip pat pastebima, kad visais atvejais didinant plaušo kiekį, didėja ir betono liekamasis stipris lenkiant. Polipropileno plaušo atveju padidinant plaušo kiekį nuo 3 iki 5 kg/m³, liekamasis stipris padidėja apie 35 %, o plieno plaušo atveju padidinus kiekį nuo 25 kg/m³ iki 50 kg/m³ – padidėja apie 30 % ir nuo 50 kg/m³ padidinus iki 70 kg/m³ – apie 15 %.

3.2 lentelėje pateiktos didelių sijų (1300×200×160 mm) pagrindinės charakteristikos, reikalingos atliekant palyginamuosius skaičiavimus ir rezultatų analizę.

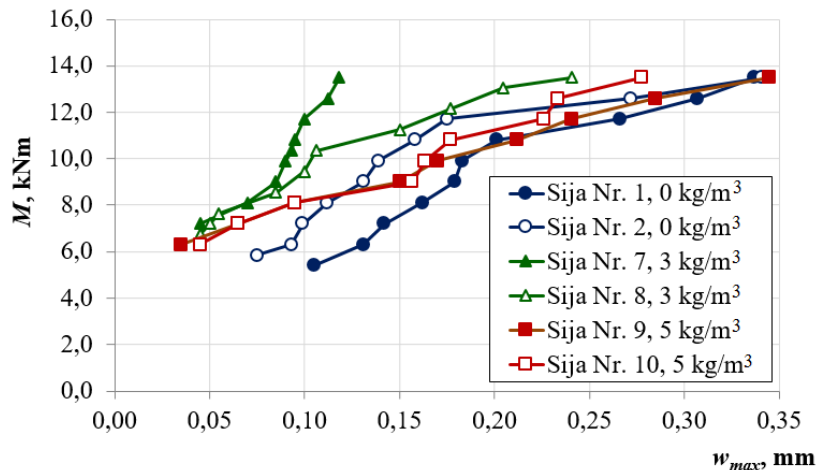
3.2 lentelė. Didelių sijų (1300×200×160 mm) pagrindinės charakteristikos

Sijos Nr.	Skerspjūvis ($h \times b$), mm	a_1 , mm	Apatinis armavimas $2\varnothing_1$ mm	Plaušo kiekis, kg/m ³	$f_{cm} / f_{cm,fb}$, MPa	$f_{ctm,fl} / f_{ctm,fl,fb}$, MPa	$f_{ctm} / f_{ctm,fb}$, MPa	$E_{cm} / E_{cm,fb}$, MPa	$f_{Rm,1,eksp.}$, MPa	$f_{Rm,1,apsk.}$, MPa
1	198×161	28	2Ø10 S500	-	43,9	4,89	3,49	30096	-	-
2	200×162	29	2Ø10 S500	-	43,9	4,89	3,49	30096	-	-
3	200×163	30	2Ø10 S500	50	47,6	7,94	5,67	30292	5,85	4,20
4	200×163	30	2Ø10 S500	50	47,6	7,94	5,67	30292	5,85	4,20
5	200×162	30	2Ø10 S500	70	44,2	8,95	6,39	29774	7,05	5,43
6	199×163	30	2Ø10 S500	70	44,2	8,95	6,39	29774	7,05	5,43
7	197×162	30	2Ø10 S500	3	43,9	5,49	3,92	30278	1,22	-
8	200×161	30	2Ø10 S500	3	43,9	5,49	3,92	30278	1,22	-
9	200×162	30	2Ø10 S500	5	46,0	5,63	4,02	28991	1,88	-
10	200×163	30	2Ø10 S500	5	46,0	5,63	4,02	28991	1,88	-

Eksperimento metu atlikus didelių sijų (1300×200×160 mm) plyšių pločių matavimą grynojo lenkimo zonoje prie užsiduotų vienodų apkrovimo lygių (lenkimo momentų), buvo užfiksuotos visų bandinių plyšių pločių reikšmės. Pagal gautus matavimų rezultatus sudarytos plyšių pločių priklausomybės nuo lenkimo momento gautiems eksperimento rezultatams atvaizduoti. Palyginimui pasinaudota tos pačios betono sudėties, bet be plaušo Kelpšos (2017) atlikto eksperimento rezultatais. Gauti matavimų rezultatai pateikti 3.9 ir 3.10 pav. Šie rezultatai bus taip pat naudojami plyšių pločių palyginamojoje analizėje su teoriniais skaičiavimais.



3.9 pav. Sijų Nr. 1..Nr. 6 maksimalių plyšių pločių w priklausomybė nuo lenkimo momento M



3.10 pav. Sijų Nr. 1..Nr. 2 ir Nr. 7..Nr. 10 maksimalių plyšių pločių w priklausomybė nuo lenkimo momento M

Analizuojant 3.9 paveiksle pateiktas maksimalių plyšio pločių w_{max} priklausomybes nuo lenkimo momento M matyti, kad sijos tempiamą zoną armuojant dviem 10 mm skersmens strypais (išilginio armavimo koeficientas $\rho_l = 0,58\%$) papildomas sijų armavimas plieno plaušu visais atvejais prie tokių pačių apkrovų gerokai sumažino plyšio pločius. Tiek sijos Nr. 1, tiek ir sijos Nr. 2 (0 kg/m^3 plaušo) plyšio pločiai w_{max} buvo didesni nei kitų kombinuotai (plieno plaušu ir armatūra) armuotų sijų. Didžiausio lenkimo momento atveju sijas papildomai armuojant plaušu plyšio plotis sumažėjo net iki 63 % (su 50 kg/m^3 plaušo kiekiu). Taip pat prie didžiausių lenkimo momentų pastebėta, kad sijoje Nr. 5 (su 70 kg/m^3 plieno plaušo kiekiu) gauti iki 18 % didesni plyšių pločiai nei sijoje Nr. 3 su (50 kg/m^3 plaušo kiekiu). Manoma, kad tokį rezultatą galėjo įtakoti netolygus plaušo pasiskirstymas sijos tūryje ir nevienoda jo orientacija plyšių atžvilgiu. Dėl netolygaus plaušo pasiskirstymo ir skirtingos orientacijos elemento tūryje, liekamieji tempimo įtempiai viename ir kitame plyšyje gali labai skirtis [12, 13]. Liekamųjų įtempių didelę sklaidą pagrindžia ir atlikti tritaškio lenkimo bandymai bei jų metu gautos kreivės (žr. 3.4 ir 3.5 pav.). Tokia liekamųjų tempimo įtempių rezultatų sklaida įtakoja ir maksimalaus plyšio pločio dydį.

Nagrinėjant 3.10 paveikslą matoma, kad polipropileno plaušo naudojimas suteikia ne tokią ryškią naudą kaip plieno plaušas. 3 kg/m^3 polipropileno plaušo panaudojimas (sijos Nr. 7 ir Nr. 8) sumažino plyšio pločius (esant tokioms pat apkrovoms), tačiau naudojant 5 kg/m^3 polipropileno plaušo kiekį, prie didesnių apkrovų gaunami didesni plyšių pločiai nei sijose be plaušo (Nr. 1 ir Nr. 2) esant tokioms pačioms apkrovoms. Lyginant tarpusavyje bandinius su polipropileno plaušu, tai plaušo kiekį padidinus nuo 3 kg/m^3 iki 5 kg/m^3 prie didžiausių lenkimo momentų gauti vidutiniškai apie 30-40 % didesni plyšio pločiai. Tokius rezultatus taip pat

galėjo lemti netolygus plaušo pasiskirstymas ir nevienoda jo orientacija sijos tūryje, dėl to liekamieji įtempiai plyšyje gali skirtis (žr. 3.6 ir 3.7 pav.).

Apibendrinant 3.9 ir 3.10 paveiksluose pateiktus eksperimentinius plyšių pločių rezultatus galima daryti išvadą, kad esant santykinai nedideliam sijos išilginio armavimo koeficientui ($\rho_l = 0,58 \%$), papildomas armavimas plaušu suteikia gana reikšmingą teigiamą efektą. Tai nagrinētu atveju ypač pastebima naudojant plieno plaušą. Pavyzdžiui, bandiniuose su plieno plaušu maksimalus plyšio plotis niekada neviršijo daugiau nei 0,163 mm (prie 13,50 kNm momento), tuo tarpu bandiniuose su polipropileno plaušu prie to paties momento maksimalus plyšio plotis pasiekė 0,345 mm reikšmę, o tai yra apie 53 % didesnis plyšio plotis. Žinoma, reikia pabrėžti, kad tokie rezultatai gauti su pasirinktais plaušų kiekiais ir tikslesnei analizei reikia atlikti papildomus eksperimentinius tyrimus su kitokiais plaušų kiekiais. Taip pat svarbus veiksnys, turintis įtakos kombinuoto armavimo efektyvumui yra liekamųjų tempimo įtempių netolygumas ir nevienodumas skirtinguose plyšiuose.

3.2. Palyginamųjų skaičiavimų rezultatų analizė ir palyginimas su eksperimento rezultatais

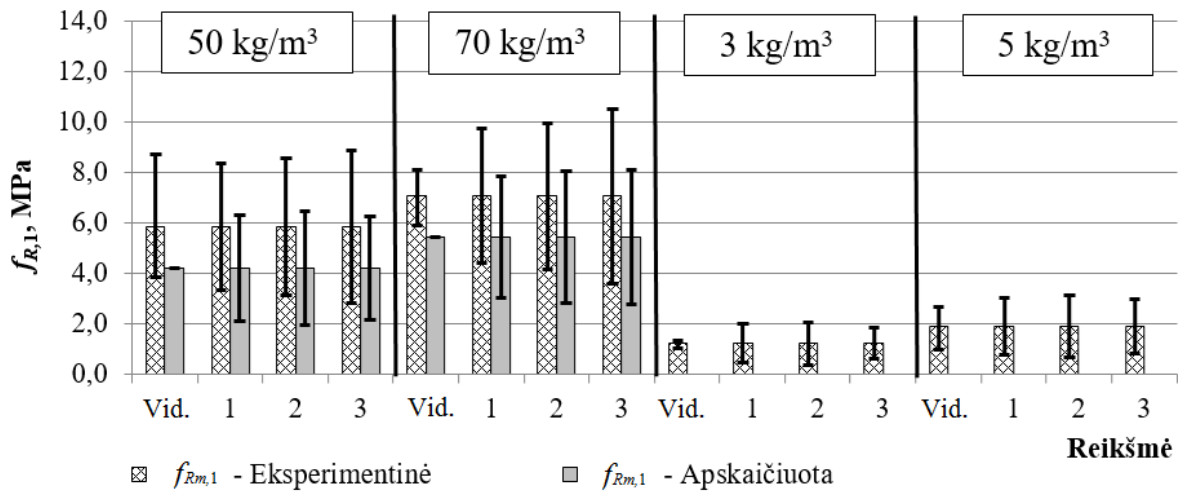
Kompiuterine programa „Mathcad 15“ buvo sudaryti kombinuotai – plaušu ir armatūra – armuoto lenkiamo gelžbetoninio elemento normalinio plyšio pločio skaičiavimo modeliai pagal išnagrinėtas skirtingas skaičiavimo metodikas (žr. 1.4 dalį ir priedus).

Eksperimentinės ir apskaičiuotos vidutinės liekamojo tempimo stiprio lenkiant reikšmės pateiktos 3.11 paveiksle. Pagal tris skirtingus statistinius metodus buvo apskaičiuotos charakteristinės liekamojo tempimo stiprio lenkiant $f_{R,1}$ reikšmės, kurios taip pat yra pateiktos 3.11 paveiksle.

3.11 paveiksle pavaizduoti statistiniai metodai:

- Numeriu „1“ pavaizduotas statistinis metodas – normalusis skirstinys, Baezinis (Bayesian), pagal kurį 95 % bandinių su 95 % tikimybe patenka į nurodytą intervalą (variacijos koeficientas V_x žinomas). Pagal šį metodą apskaičiuota charakteristinė reikšmė naudojama skaičiuojant teorinį plyšio plotį pagal SS 812310:2014 (švedų) skaičiavimo metodiką.
- „2“ metodas – normalusis skirstinys, klasikinis (classical), pagal kurį 95 % bandinių su 75 % tikimybe patenka į nurodytą intervalą (variacijos koeficientas V_x žinomas). Pagal šį metodą apskaičiuota charakteristinė reikšmė naudojama skaičiuojant teorinį plyšio plotį pagal FIB *Model Code* 2010 metodiką.

- „3“ metodas – lognormalusis (lognormal) skirstinys, klasikinis (klassical), pagal kurį 95 % bandinių su 75 % tikimybe patenka į nurodytą intervalą (variacijos koeficientas V_x nežinomas). Pagal šį metodą apskaičiuota charakteristinė reikšmė naudojama skaičiuojant teorinį plyšio plotį pagal SFRC *Design Guideline* metodiką.



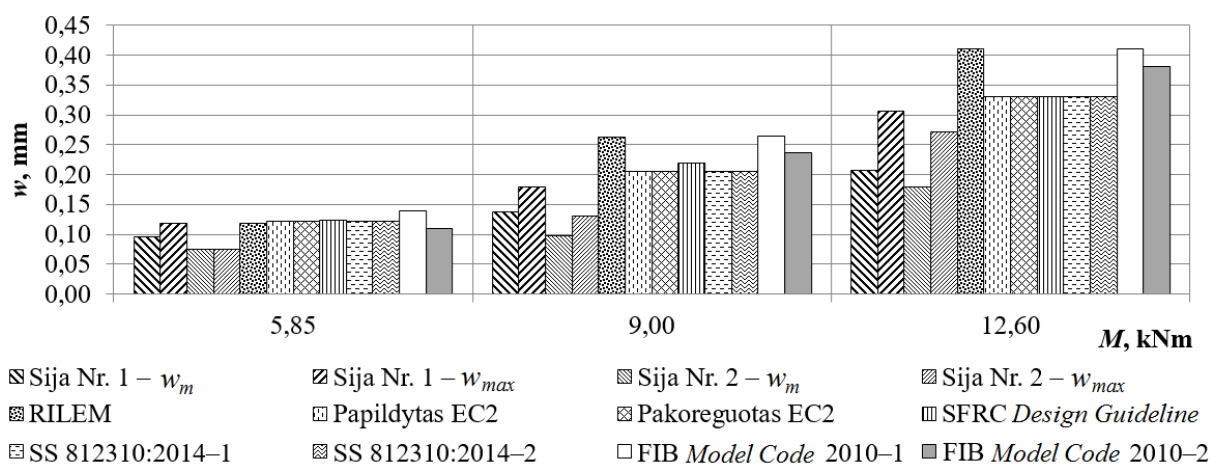
3.11 pav. Plyšio pločio skaičiavimuose naudotos vidutinės ir charakteristinės liekamojo tempimo stiprio lenkiant $f_{R,1}$ reikšmės (eksperimentinės ir apskaičiuotos)

Analizuojant 3.11 paveikslą matyti, kad naudojant plieno plaušą vidutinės eksperimentinės ir apskaičiuotos liekamojo tempimo stiprio lenkiant reikšmės gana pastebimai skyrėsi. Naudojant 50 kg/m^3 plieno plaušo kiekį vidutiniai rezultatai skyrėsi apie 28 %, o su 70 kg/m^3 kiekiu – apie 23 %. Teorinės vidutinės liekamojo tempimo stiprio lenkiant reikšmės gaunamos mažesnės nei eksperimentinės, nes skaičiuojant yra taikomi papildomi atsargos, pataisos koeficientai ir faktoriai. Tokie rezultatų skirtumai įtakojo ir charakteristinių liekamojo tempimo stiprio reikšmių skirtumus. Betono su polipropileno plaušo atveju apskaičiuotos liekamojo stiprio reikšmės nepateiktos, nes naudota (1.1) formulė taikytina tik betonui su plieno plaušu lenktais galais.

Palyginamojoje plyšių pločių rezultatų analizėje naudotos apskaičiuotos skaičiuojamosios plyšių pločių w reikšmės (naudojant eksperimentines ir teoriškai apskaičiuotas liekamojo tempimo stiprio lenkiant reikšmes) ir vidutiniai w_m bei didžiausi w_{max} išmatuoti plyšių pločiai sijos grynojo lenkimo zonoje. Kiekvienos didelės sijos ($1300 \times 200 \times 160 \text{ mm}$) plyšių pločiai apskaičiuoti nuo trijų skirtingų apkrovimo lygių (lenkimo momentų). Pirmasis lenkimo momentas (kairioji diagramos rezultatų grupė) – iš karto po pirmo plyšio atsivėrimo, antrasis (dešinioji diagramos rezultatų grupė) – apie 70 % nuo bandinio stiprumo ($\sim 0,7M_{max}$), o trečiasis (vidurinė diagramos rezultatų grupė) – pirmų dviejų lenkimo momentų vidurinė reikšmė. Tokį apkrovimo lygių parinkimą lėmė apkrovimo pakopų skaičius ir

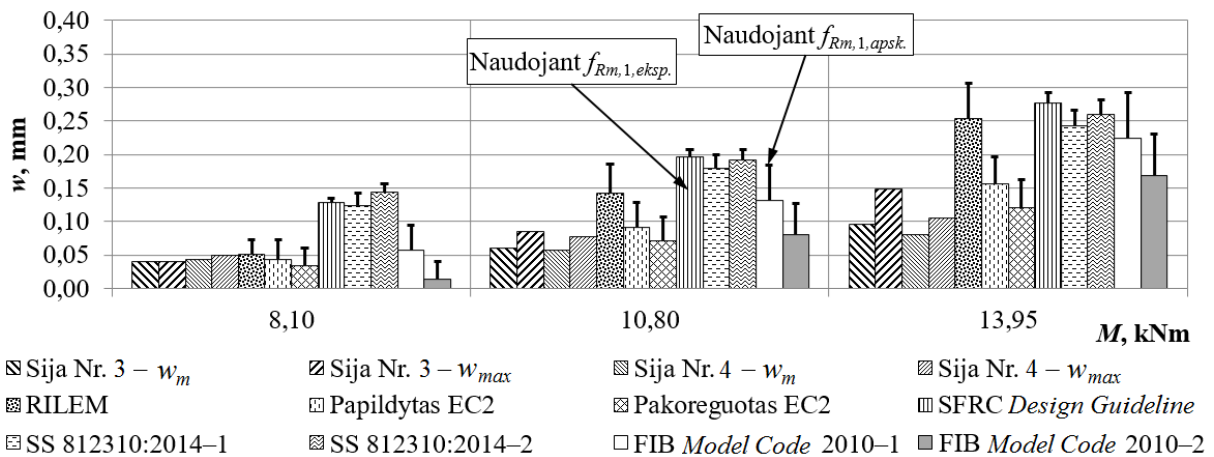
matavimų kiekis eksperimento metu. 3.12–3.16 paveiksluose pateiktas žymėjimas – SS 812310:2014–1 reiškia, kad skaičiavimuose buvo naudota (1.29) formulė (liekamųjų plaušo įtempių σ_{fb} įtaka buvo įvertinta). Žymėjimas – SS 812310:2014–2 reiškia, kad skaičiavimuose buvo pritaikyta (1.33) formulė (σ_{fb} įtaka nebuvo įvertinta). Skaičiavimų rezultatai, pažymėti FIB *Model Code* 2010–1 ir FIB *Model Code* 2010–2, išsiskyrė pleišėjimo įtempių σ_{sr1} apskaičiavimo būdu. Pirmuoju atveju σ_{sr1} buvo apskaičiuoti pagal 1.7 paveiksle pavaizduotą schemą, o antruoju atveju šie įtempiai buvo apskaičiuoti pagal (1.41) formulę siekiant palyginti gaunamus rezultatus.

Plyšio pločio skaičiavimų visomis aptartomis metodikomis rezultatai pateikti 3.12–3.16 paveiksluose.



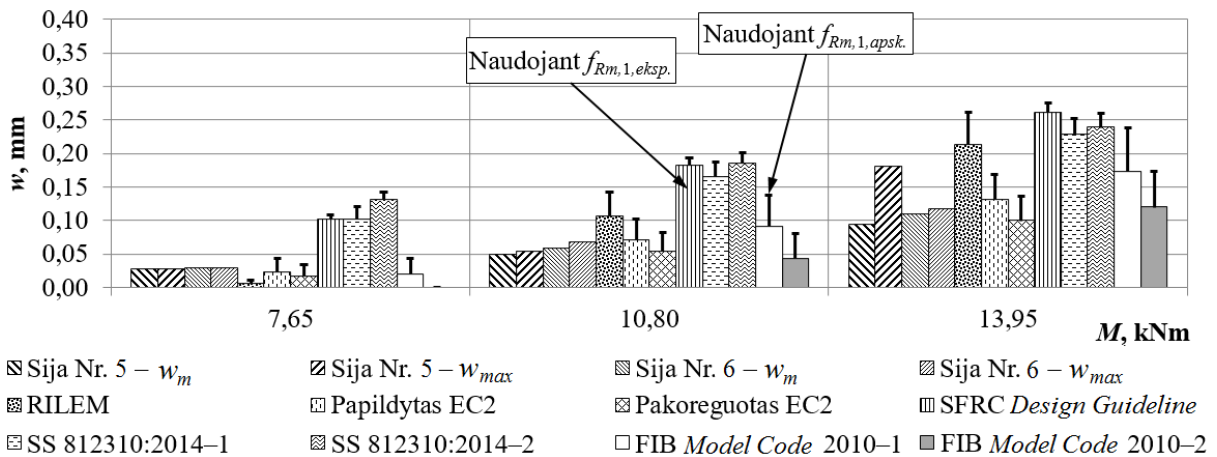
3.12 pav. Sijų Nr. 1 ir Nr. 2 išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių palyginimas (0 kg/m³ plaušo)

Analizuojant 3.12 paveikslą matyti, kad sijų Nr. 1 ir Nr. 2 išmatuoti plyšių pločiai skyrėsi santykinai nedaug, ypač prie didžiausių lenkimo momentų (skirtumas kito 11–36 % ribose). Panašus tendencingumas matomas lyginant išmatuotus vidutinius w_m ir didžiausius w_{max} plyšių pločius (skirtumas abiejose sijose kito nuo 0 % iki 34 %). Geriausiai su eksperimentinėmis plyšių pločių reikšmėmis sutapo rezultatai, apskaičiuoti pagal papildyto ir pakoreguoto EC2 (*Eurocode 2*), SS 812310:2014 ir SFRC *Design Guideline* (2014) skaičiavimo metodikas (pagal visas šias metodikas apskaičiuotų rezultatų didžiausiais skirtumas nuo išmatuoto maksimalaus plyšio pločio neviršijo 18 %). Pagal RILEM (2003) ir FIB *Model Code* 2010 skaičiavimo metodikas apskaičiuoti plyšių pločiai dažniais atvejais viršijo išmatuotus eksperimento metu (didžiausias skirtumas nuo maksimalaus išmatuoto plyšio pločio siekė 32 %).



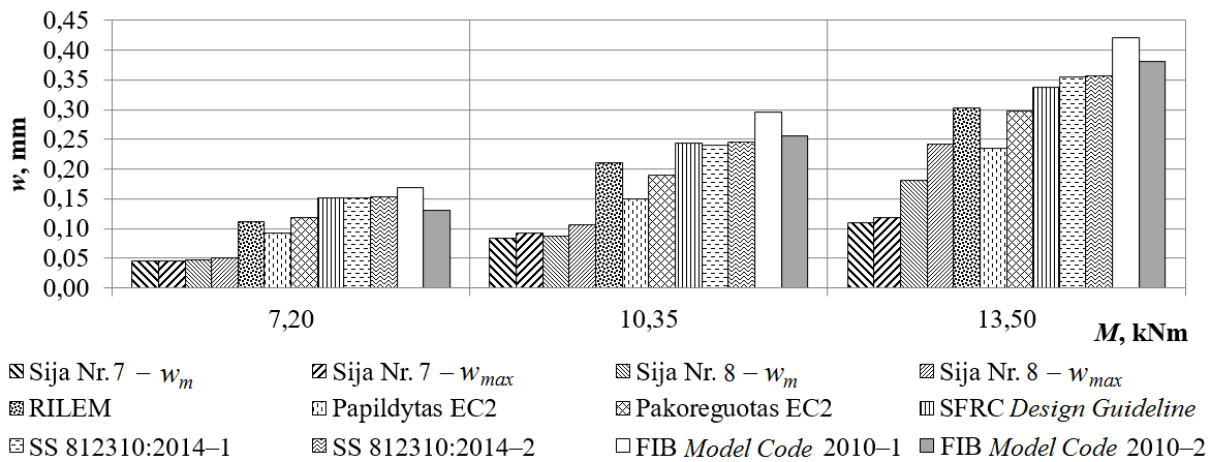
3.13 pav. Sijų Nr. 3 ir Nr. 4 išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių palyginimas (50 kg/m^3 plieno plaušo)

Iš 3.13 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad lyginant eksperimentines sijų Nr. 3 ir Nr. 4 plyšių pločių reikšmes matyti, kad skirtumai nėra dideli. Skirtumai tarp išmatuotų reikšmių kito 3–29 % ribose, o lyginant išmatuotas vidutines w_m ir didžiausias w_{max} plyšių pločių reikšmes skirtumas kito nuo 0 % iki 35 %. Šiuo atveju, kai sijos tempiamoje zonoje armuotos $2\text{Ø}10$ armatūros strypais ir naudotas 50 kg/m^3 plieno plaušas, esant didesniems lenkimo momentams pagal SS 812310:2014 ir SFRC *Design Guideline* (2014) plyšio pločio skaičiavimo metodikas gauti ganėtinai patikimi rezultatai lyginant su eksperimentinėmis reikšmėmis (skirtumas nuo išmatuoto maksimalaus plyšio pločio kito 38–56 % ribose į atsargos pusę), o mažesnio lenkimo momentu atveju rezultatai pagal šias skaičiavimo metodikas gaunami gerokai į atsargos pusę (skirtumas siekia iki 65 %). Pagal kitas skaičiavimo metodikas gauti ne tokie patikimi rezultatai, kurie daugeliu atvejų gauti mažesni nei išmatuoti eksperimento metu. Kadangi naudojant 50 kg/m^3 plieno plaušo kiekį apskaičiuotos $f_{R,1}$ reikšmės buvo iki 28 % mažesnės nei eksperimentinės, todėl plyšio pločio skaičiavimuose pritaikius apskaičiuotas $f_{R,1}$ reikšmes gauti pastebimai didesni plyšių pločiai, vis dėlto paklaida visais nagrinėtais atvejais gauta į atsargos pusę. Taip pat pastebima, kad FIB *Model Code* 2010 plyšio pločio skaičiavimo metodika yra jautriausia liekamųjų tempimo įtempių σ_{fb} pokyčiams.



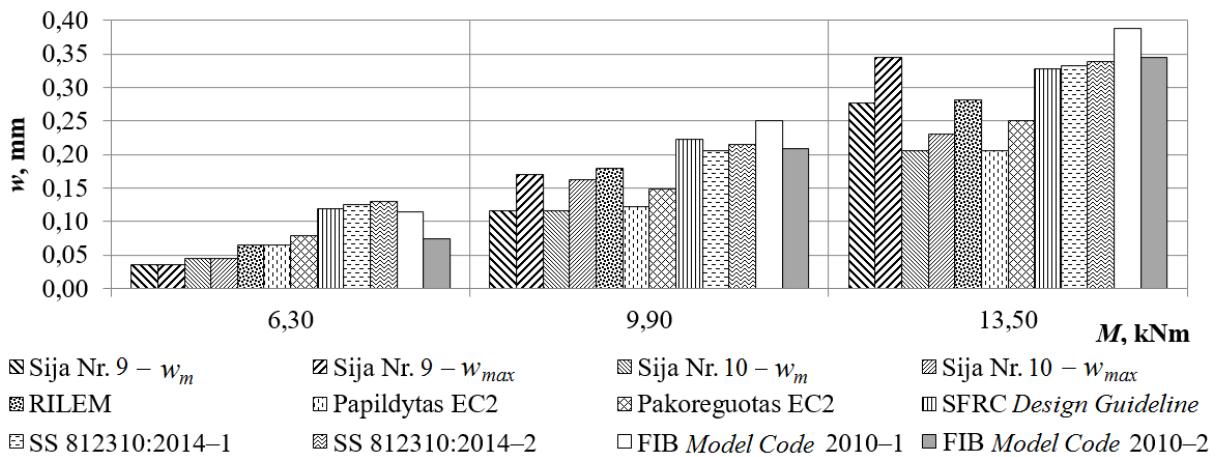
3.14 pav. Sijų Nr. 5 ir Nr. 6 išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių palyginimas (70 kg/m³ plieno plaušo)

Padidinus plaušo kiekį nuo 50 iki 70 kg/m³, gautos plyšių pločių reikšmės taip pat sumažėjo (3.13 ir 3.14 pav.). Šiuo atveju sijų Nr. 5 ir Nr. 6 (3.14 pav.), taip pat kaip ir sijų Nr. 3 ir Nr. 4, rezultatuose matyti, kad esant didesniems lenkimo momentams, SS 812310:2014 ir SFRC *Design Guideline* (2014) plyšio pločio skaičiavimo metodikomis gauti ganėtinai patikimi rezultatai (skirtumas nuo išmatuoto maksimalaus plyšio pločio kito 21–63 % ribose į atsargos pusę), o esant mažesniam lenkimo momentui rezultatai taip pat gauti gerokai į atsargos pusę (skirtumas siekia net iki 77 %). Pagal kitas skaičiavimo metodikas rezultatų patikimumas buvo prastesnis, nes dažnai apskaičiuotos plyšių pločių reikšmės buvo mažesnės nei išmatuotos eksperimento metu. Skaičiavimuose pritaikius su 70 kg/m³ plieno plaušu apskaičiuotas $f_{R,1}$ reikšmes, kurios yra iki 23 % mažesnės nei eksperimentinės, gauti didesni plyšių pločiai (kaip ir sijų Nr. 3 ir Nr. 4). Be to pagal tas skaičiavimo metodikas, kurias buvo apskaičiuoti mažesni plyšių pločiai naudojant eksperimentines $f_{R,1}$ reikšmes, buvo gauti artimesni eksperimento metu išmatuotiems plyšių pločiai. Taip pat iš pateiktų rezultatų matyti, kad FIB *Model Code* 2010 metodika yra jautriausia liekamųjų tempimo įtempių netikslumams, o paklaida gaunama į atsargos pusę ir rezultatai dažnai gauti artimesni eksperimentiniams.



3.15 pav. Sijų Nr. 7 ir Nr. 8 išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių palyginimas (3 kg/m^3 polipropileno plaušo)

Analizuojant 3.15 paveiksle pateiktus rezultatus pastebima, kad prie mažesnių lenkimo momentų sijų Nr. 7 ir Nr. 8 išmatuoti plyšių pločiai skyrėsi labai nežymiai (skirtumas kito 4–12 % ribose), tačiau prie didžiausių lenkimo momentų skirtumas atskirose sijose ženkliai padidėjo ir siekė net iki 51 %. Tai galimai sąlygojo netolygus plaušo pasiskirstymas sijos tūryje ir nevienoda jo orientacija. Taip pat įtakos galėjo turėti sijų tankinimas (tankinant paviršiuje buvęs plaušas buvo linkęs orientuotis vertikaliai). Iš 3.15 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad praktiškai visais atvejais (to nebuvo naudojant plieno plaušą) apskaičiuoti plyšių pločiai buvo didesni nei išmatuoti eksperimento metu (tiek vidutiniai w_m , tiek ir didžiausi w_{max}), o didžiausi plyšių pločiai gauti pagal FIB *Model Code* 2010 metodiką (skirtumas nuo maksimalaus eksperimento metu išmatuoto plyšio siekė net iki 70 %). Tokią situaciją galėjo įtakoti santykinai mažas betono liekamasis stipris, todėl skaičiuojant galimai gaunamos didesnės atsargos. Artimiausi eksperimentiniams rezultatams gauti plyšių pločiai, apskaičiuoti pagal papildyto ir pakoreguoto EC2 skaičiavimo metodikas (skirtumas nuo išmatuoto maksimalaus plyšio pločio kito 18–58 % ribose į atsargos pusę). Pagal likusias skaičiavimo metodikas gauti plyšių pločiai su ryškiomis atsargomis.



3.16 pav. Sijų Nr. 9 ir Nr. 10 išmatuotų ir apskaičiuotų plyšių pločių palyginimas (5 kg/m^3 polipropileno plaušo)

3.16 paveiksle matoma, kad padidinus polipropileno plaušo kiekį nuo 3 iki 5 kg/m^3 , nors eksperimento metu nustatyti plyšio pločiai padidėjo, tačiau apskaičiuoti plyšių pločiai šiek tiek sumažėjo (vidutiniškai apie 8%). Tokį eksperimentinių plyšių pločių padidėjimą galėjo lemti netolygus plaušo pasiskirstymas arba jo orientacija, o priešingą situaciją skaičiavimų rezultatuose lėmė didesnis betono su 5 kg/m^3 plaušu liekamasis tempimo stipris nei 3 kg/m^3 plaušo kiekio atveju. Taip pat pastebima, kad prie didesnių lenkimo momentų padidėja atskirų sijų (Nr. 9 ir Nr. 10) eksperimentiniai plyšių pločių skirtumai (didžiausias skirtumas siekia 53%). Šiuo nagrinėtu atveju matoma, kad skaičiuojant pagal *FIB Model Code 2010* metodiką, gaunami gana patikimi plyšio pločių rezultatai (skirtumas nuo išmatuoto maksimalaus plyšio pločio kito 0 – 60% ribose į atsargos pusę). Pagal kitas skaičiavimo metodikas patikimesni rezultatai gauti tiek prie mažesnių lenkimo momentų, o esant didžiausiems lenkimo momentams apskaičiuotos plyšių pločių reikšmės gautos mažesnės nei eksperimentinės.

Apibendrinant atliktų skaičiavimų rezultatus nustatyta, kad naudojant kombinuotai plaušą ir armatūrą lyginant su bandiniais be plaušo (tik su armatūra) plyšių pločiai sumažėja. Taip pat didesnis plaušo kiekis mažina plyšių plotį. Didžiausias apskaičiuotų plyšių pločių reikšmių skirtumas tarp skirtingų skaičiavimo metodikų konkrečiu vienu atveju pastebėtas tarp SS 812310:2014–2 ir *FIB Model Code 2010–2* metodikų rezultatų, kai skirtumas siekė net 90% (prie $8,1 \text{ kNm}$ momento naudojant 50 kg/m^3 plieno plaušo kiekį), tačiau bendrai vidutinis skirtumas tarp skirtingų metodikų rezultatų neviršija 50% . Taip pat reikia pabrėžti, kad rezultatus reikėtų vertinti atsižvelgiant ir į pačių skaičiavimo metodikų specifiką. RILEM, papildyto ir pakoreguoto EC2 metodikos nurodo naudoti vidutinį liekamąjį tempimo stiprį $f_{Rm,1}$, o likusios nurodo naudoti charakteristinę vertę $f_{Rk,1}$ (priimama didesnė atsarga).

Daugeliu atvejų patikimiausi plyšių pločių w rezultatai buvo gauti taikant SS 812310:2014 skaičiavimo metodiką (esant mažesniems lenkimo momentams artimesni ir patikimesni rezultatai buvo gauti taikant pirmąjį variantą (SS 812310:2014–1), o esant didesniems lenkimo momentams – antrąjį variantą (SS 812310:2014–2). Šių papildomam armavimui naudojant plieno plaušą, skaičiavimų rezultatai naudojant SFRC *Design Guideline* (2014) buvo taip pat gana patikimi, tačiau naudojant polipropileno plaušą rezultatų tikslumas sumažėjo. Plyšių pločių rezultatai, apskaičiuoti pagal FIB *Model Code* 2010 skaičiavimo metodiką buvo tikslesni esant mažesniems liekamiesiems tempimo įtempiams σ_{fb} (bandinių su polipropileno plaušu atveju), o liekamiesiems tempimo įtempiams didėjant (bandinių su plieno plaušu atveju) apskaičiuotų plyšių pločių tikslumas sumažėjo. Taip pat pastebėta, kad ši metodika buvo viena jautriausių liekamųjų tempimo stiprių kitimui. Pagal papildyto ir pakoreguoto EC2 skaičiavimo metodikas gauti rezultatai dažnai buvo mažesni nei eksperimento metu išmatuoti didžiausi plyšių pločiai w_{max} . Tokią tendenciją įtakojo šių metodikų nurodymai naudoti ne charakteristines, o vidutines liekamųjų tempimo stiprių $f_{R,1}$ reikšmes. Nors pagal RILEM skaičiavimo metodiką daugeliu atvejų plyšių pločiai gauti didesni nei pagal papildyto ir pakoreguoto EC2 metodikas, tačiau rezultatų tikslumas buvo gana prastas. Taip yra todėl, kad ši metodika taip pat nurodo naudoti vidutines $f_{R,1}$ reikšmes. Be to, pagal šią metodiką skaičiuojant atstumą tarp plyšių, nėra tiesiogiai įvertinamas plaušo kiekis (netiesiogiai tam tikra dalimi įvertinama skaičiuojant įtempius tempiamoje armatūroje), o siūlomas tik RILEM koeficientas, kuris vertina tik plaušo ilgio ir skersmens santykį.

Darbe nagrinėjais atvejais skaičiuojant plyšio plotį apskaičiuotų $f_{Rm,1}$ reikšmių panaudojimas sąlygojo vidutiniškai iki 35 % (1,35 karto) didesnius gaunamus plyšių pločius (liekamasis tempimo stipris nuo gautų eksperimento metu skyrėsi nuo 23 % iki 28 %). Daugeliu atvejų tokie rezultatai neturėjo kritinės įtakos ir buvo net tikslesni ar patikimesni (į atsargos pusę lyginant su eksperimentinėmis reikšmėmis). Lyginant rezultatus, apskaičiuotus naudojant eksperimentinį ir apskaičiuotą liekamąjį tempimo stiprį, didžiausias rezultatų skirtumas užfiksuotas skaičiuojant pagal FIB *Model Code* 2010–2 metodiką, kur skirtumas siekia 65 % (prie 8,10 kNm momento), tačiau didėjant momentui skirtumas sumažėja iki 27 %. Tuo tarpu mažiausias rezultatų skirtumas gautas pagal SFRC *Design Guideline* metodiką, kai skirtumas siekė apie 5 %.

IŠVADOS

1. Atlikus naujausių Europoje naudojamų kombinuotai armuotų lenkiamų gelžbetoninių elementų plyšių pločių skaičiavimo metodikų analizę, buvo atlikti plyšių pločių skaičiavimai pagal RILEM, papildyto *Eurocode 2* (EC2), pakoreguoto *Eurocode 2* (EC2), *SFRC Design Guideline* (2014), SS 812310:2014 bei *FIB Model Code 2010* skaičiavimo metodikas. Dauguma šių plyšio pločio apskaičiavimo metodikų yra paremtos *Eurocode 2* pateiktomis nuorodomis. Atskirose nagrinėtose metodikose skirtingai yra įvertinami plaušo perimami liekamieji tempimo įtempiai σ_{fb} – skaičiuojant įtempius tempiamoje armatūroje vienose metodikose σ_{fb} yra įvertinama, o kitose plaušo įtaka nevertinama.
2. Remiantis eksperimento rezultatais galima teigti, kad plaušo naudojimas labai nežymiai įtakoja betono gniuždomojo stiprio ir tamprumo modulio reikšmes (betono su plaušu gniuždomojo stiprio didžiausias pokytis lyginant su betonu be plaušo – 6 %, o tamprumo modulio – 3 %). Polipropileno plaušo panaudojimas vidutiniškai 12 % padidino betono tempiamąjį stiprį lenkiant, o panaudojus plieno plaušą – padidino vidutiniškai 42 %. Su tyrime analizuotais plaušų kiekiais nustatyta, kad panaudojus 50 kg/m³ plieno plaušą liekamasis tempimo stipris lenkiant buvo vidutiniškai didesnis net apie 73 % (arba apie 4 kartus) nei naudojant 3 ir 5 kg/m³ polipropileno plaušą. Taip pat buvo pastebėta, kad didinant plaušo kiekį, didėja betono tempiamasis stipris lenkiant ir liekamasis tempimo stipris lenkiant.
3. Remiantis eksperimentiniais plyšių pločių rezultatais galima teigti, kad plaušas kombinuojamas su įprastine armatūra betonui suteikia teigiamą efektą pleišėjimo atžvilgiu (plyšių pločiai prie didžiausių lenkimo momentų vidutiniškai sumažėjo nuo 8 iki 63 %), tačiau su tyrime pasirinktais plaušo kiekiais nustatyta mažesnė polipropileno plaušo nauda nei plieno plaušo (naudojant polipropileno plaušą plyšių pločiai prie didžiausių lenkimo momentų sumažėjo nuo 8 iki 47 %). Tokį rezultatą galėjo lemti sijų tankinimo įtaka – polipropileno plaušo kilimas į viršų ir orientavimasis vertikaliai, taip pat prastesnės polipropileno plaušo mechaninės savybės (gerokai mažesnis tempiamasis stipris ir tamprumo modulis) ar per mažas minėto plaušo kiekis. Todėl tikslesnei analizei reiktų papildomų tyrimų su kitokiais plaušų kiekiais betono mišinyje.
4. Palyginamojoje plyšių pločių analizėje naudoti dešimties 1300×200×160 mm matmenų sijų bandymų rezultatai. Analizė parodė, kad pagal skaičiavimo metodikas, kurios

nurodo naudoti charakteristines liekamojo tempimo stiprio $f_{Rk,1}$ reikšmes, gauti patikimesni ir tikslesni plyšių pločių rezultatai. Nustatyta, kad taikant SS 812310:2014–2 (švedų) skaičiavimo metodiką buvo gauti vieni patikimiausių ir su didžiausiomis atsargomis plyšių pločiai (vidutiniškai iki 23 % didesnės reikšmės nei eksperimentinės prie didžiausių lenkimo momentų). Viena nepatikimiausių skaičiavimo metodikų galima laikyti RILEM metodiką, kuri neįvertina plaušo kiekio betone įtakos ir nurodo naudoti vidutines liekamojo stiprio reikšmes (prie didžiausių lenkimo momentų gautos reikšmės vidutiniškai kito nuo -22 % (mažesnės nei eksperimentinės) iki +25 % (didesnės nei eksperimentinės)).

5. Atsižvelgiant į gautus rezultatus galima teigti, kad Kelpšos ir bendraautorių (2015) pasiūlytą vidutinio liekamojo tempimo stiprio lenkiant $f_{Rm,1}$ apskaičiavimo metodą galima pritaikyti plyšio pločio skaičiavimuose ir tai turi didelę praktinę naudą (apskaičiuotas liekamasis tempimo stipris nuo eksperimentinių skyrėsi nuo 23 % iki 28 %, o apskaičiuoti plyšių pločiai – vidutiniškai iki 35 % nuo eksperimentinių). Metodą galima taikyti pirminiams skaičiavimams naudojant skirtingus kiekius plaušo, o pasirinkus galutinį variantą, eksperimento metu galima patikslinti gautą $f_{R,1}$ reikšmę.

LITERATŪRA

1. BEHBAHANI, H.P., NEMATOLLAHI, B. and FARASATPOUR, M. *Steel Fiber Reinforced Concrete: A Review*. Kandy, Shri Lanka ed. ICSECM, 2011.
2. ULBINAS, D. and KAKLAUSKAS, G. Plieno Pluoštu Armuotų Gelžbetoninių Elementų Pleišėtumo Analizė. *VGTU: Mokslas - Lietuvos Ateitis*, 2009, vol. 1, no. 5. pp. 56 ISSN 20292341.
3. KARTHIK, M.P. and MARUTHACHALAM, D. Experimental Study on Shear Behaviour of Hybrid Fibre Reinforced Concrete Beams. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, vol. 19, no. 1. pp. 259-264 ISSN 1976-3808.
4. JANSSON, A., LÖFGREN, I. and GYLLTOFT, K. Flexural Behaviour of Members with a Combination of Steel Fibres and Conventional Reinforcement. *Nordic Concrete Research*, 2010, vol. 2/2010, no. 42. pp. 155-171 ISSN 0800-6377.
5. KELPŠA, Š, AUGONIS, M., DAUKŠYS, M. and AUGONIS, A. Analysis of Crack Width Calculation of Steel Fibre and Ordinary Reinforced Concrete Flexural Members. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering = Darnioji Architektūra Ir Statyba*, 2014, vol. 6, no. 1. pp. 50-57 ISSN 2029-9990.
6. VANDEWALLE, L. Cracking Behaviour of Concrete Beams Reinforced with a Combination of Ordinary Reinforcement and Steel Fibers. *Materials and Structures; Matériaux Et Construction*, 2000, vol. 33, no. 3. pp. 164-170 ISSN 1359-5997.
7. CHIAIA, B., FANTILLI, A.P. and VALLINI, P. Combining Fiber- Reinforced Concrete with Traditional Reinforcement in Tunnel Linings. *Engineering Structures*, 2009, vol. 31, no. 7. pp. 1600-1606 ISSN 0141-0296.
8. DELUCE, J.R., SEONG-CHEOL, L. and VECCHIO, F.J. Crack Model for Steel Fiber – Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 2014, vol. 111(1). pp. 93-102 ISSN 08893241.
9. *STR 2.05.05:2005. Betoninių Ir Gelžbetoninių Konstrukcijų Projektavimas*. Vilnius: Rekona, 2005.
10. *LST EN 1992-1-1:2005. Eurokodas 2. Gelžbetoninių Konstrukcijų Projektavimas: Eurocode 2. Design of Concrete Structures*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.

11. KAKLAUSKAS, G., et al. *Kompozitais Armuotos Betoninės Konstrukcijos: Vadovėlis*. Vilnius: Technika, 2012 ISBN 9786094573491.
12. KELPŠA, Š. *Plieno Plaušo Įtaka Lenkiamų Gelžbetoninių Elementų Pleišėjimui Ir Standumui: Daktaro Disertacija*. Kaunas: Kauno technologijos universitetas. Prieiga per eLABa – nacionalinė Lietuvos akademinė elektroninė biblioteka, 2017.
13. KELPŠA, Š, et al. Empirical Calculation Method of Residual Flexural Tensile Strength $f_{R,1}$ of SFRC. *Mechanika*, 2015, vol. 21, no. 4. pp. 257-264 ISSN 13921207.
14. SKRIPKIŪNAS, G. *Statybinių Konglomeratų Struktūra Ir Savybės: Vadovėlis*. Kaunas: Vitae litera, 2007 ISBN 9789955686507.
15. ULBINAS, D. *Cracking and Stiffness Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Members: Summary of Doctoral Dissertation : Technological Sciences, Civil Engineering (02T)*. Vilnius: Technika, 2012.
16. NAAMAN, A.E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, vol. 1, no. 3. pp. 241-252.
17. BENTUR, A. and MINDESS, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2nd ed. ed. London ; New York N.Y.]: Taylor & Francis, 2007 ISBN 9780415250481.
18. ALY, T., SANJAYAN, J.G. and COLLINS, F. Effect of Polypropylene Fibers on Shrinkage and Cracking of Concretes. *Materials and Structures*, 2008, vol. 41, no. 10. pp. 1741 ISSN 1871-6873.
19. DUPONT, D. *Modelling and Experimental Validation of the Constitutive Law (Σ -E) and Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete: Dissertation*. Belgium: Catholic University of Leuven, 2003 ISBN 9056824244.
20. BANTHIA, N., BINDIGANAVILE, V., JONES, J. and NOVAK, J. Fiber-Reinforced Concrete in Precast Concrete Applications: Research Leads to Innovative Products. *PCI Journal*, 2012, vol. 57, no. 3.
21. JANSSON, A. *Analysis and Design Methods for Fibre Reinforced Concrete: A State-of-the-Art Report*. Göteborg, Sweden, Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology: , 2007.
22. *LST EN 14651+A1:2007. Betono Su Metaliniu Pluoštu Bandymo Metodas. Tempiamojo Stiprio Lenkiant Matavimas (Proporcingumo Riba (LOP), Liekamasis Stipris)*. 2007-12-28 ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.

23. *ENV 1992-1-1:1991. Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings.* European Committee for Standardization (CEN), 1991.
24. *EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings.* European Committee for Standardization (CEN), 2004.
25. VANDEWALLE, L., et al. RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete' - Sigma-Epsilon-Design Method - Final Recommendation. *Materials and Structures*, 2003, vol. 36, no. 262. pp. 560-567 ISSN 1359-5997.
26. *CNR-DT 204/2006. Guide for the Design and Construction of Fibre-Reinforced Concrete Structures.* Rome, Italy: Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction (CNR), 2007.
27. *SFRC Design Guideline. Design Guideline for Structural Applications of Steel Fibre Reinforced Concrete.* SFRC Consortium, 2014.
28. *DafStb Guideline. Steel Fibre Reinforced Concrete.* German Committee for Reinforced Concrete, Draft, 2012.
29. *SS 812310:2014. Design of Fibre Concrete Structures.* Swedish Standards Institute, 2014.
30. LÖFGREN, I. *Calculation of Crack Width and Crack Spacing.* Trondheim, Norway ed. Nordic Concrete Federation, 2007 Available from: http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/248921/local_248921.pdf.
31. *Fib Model Code for Concrete Structures 2010.* Berlin: Ernst & Sohn, 2013 ISBN 9783433604090.
32. *LST EN 206:2014. Betonas. Specifikacija, Eksploatacinės Savybės, Gamyba Ir Atitiktis (Elektroninis Išteklius).* 2014-03-31.; Lietuviška versija: 2014-09-11. ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2014.
33. *LST EN 12390-3:2009/P:2001. Sukietėjusio Betono Bandymai. 3 Dalis. Bandinių Gniuždymo Stipris.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
34. *LST EN 12390-5:2009/P:2011. Sukietėjusio Betono Bandymai. 5 Dalis. Bandinių Lenkimo Stipris.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
35. *ISO 1920-10:2010. Testing of Concrete — Part 10: Determination of Static Modulus of Elasticity in Compression.* International Organization for Standardization (ISO), 2010.

PUBLIKACIJOS

- VILLALON, Ignacio, Deividas MARTINAVIČIUS, Mindaugas GRICIUS, Šarūnas KELPŠA ir Mindaugas KASIULEVIČIUS. Evaluation of Base Ground Stiffness on Statically Indeterminate Framed Building Structures. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2016, 14(1), 60-72 [žiūrėta 2017-04-23]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.sace.14.1.15821>.
- KELPŠA, Šarūnas, Mindaugas AUGONIS, Mindaugas GRICIUS, Tadas ZINGAILA ir Nerijus MESLINAS. Crack width estimation of combined reinforced concrete beams by using $f_{Rm,1}$ calculation method. (Straipsnis jau parašytas lietuvių kalba, liko vertimas į anglų kalbą ir pateikimas spaudai).

Dalyvavimas konferencijose:

- Tarptautinė mokslinė konferencija „Advanced Construction 2016“. Pranešimas tema „Evaluation of Base Ground Stiffness on Statically Indeterminate Framed Building Structures“.

PRIEDAI

Priedas Nr. 1. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal RILEM metodiką

Elemento duomenys:

$$h := 200 \quad \text{mm}$$

$$b := 163 \quad \text{mm}$$

$$a_1 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_2 := 30 \quad \text{mm}$$

$$A_{s1} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{s2} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$E_s := 200000 \quad \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 30292 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctm} := 5.67 \quad \text{MPa}$$

$$M_{Ek} := 8.10 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

Redukcijos koeficientas:

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{2 \times 10^5}{3.029 \times 10^4} = 6.602$$

Armatūros darbo aukštis:

$$d := h - a_1 = 200 - 30 = 170 \quad \text{mm}$$

Koeficientai:

$$k_1 := 0.8 \quad \text{- rombuotiems strypams}$$

$$k_2 := 0.5 \quad \text{- lenkimo atveju}$$

Didžiausio armatūros strypo skersmuo:

$$\phi_b := 10 \quad \text{mm}$$

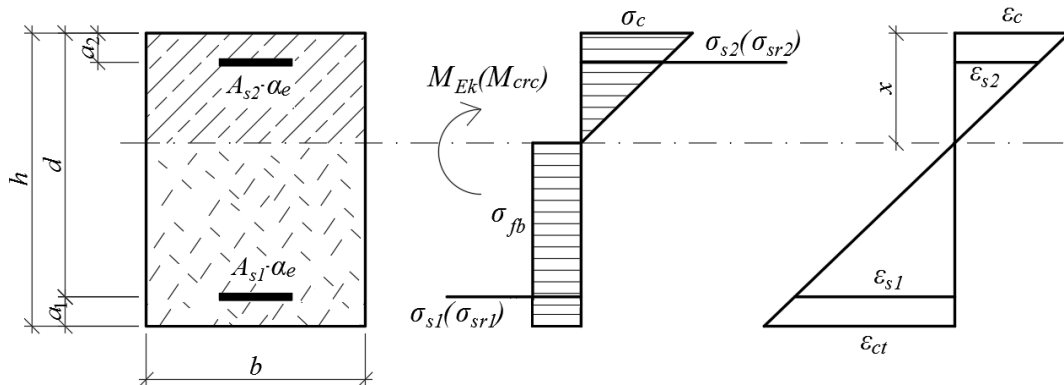
Plaušo ilgis ir skersmuo:

$$l_{fb} := 50 \quad \text{mm}$$

$$d_{fb} := 1 \quad \text{mm}$$

$$f_{Rm1} := 5.85 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_{fb} := 0.45 \cdot f_{Rm1} = 0.45 \cdot 5.85 = 2.632 \quad \text{MPa}$$



Given

$$\frac{\sigma_{s1} \cdot b \cdot x^2}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} - \sigma_{s1} \cdot A_{s1} - \sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) = 0$$

$$\sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \left(\frac{h - x}{2} \right) + \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (d - x) + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} \cdot (x - a_2) + \frac{\sigma_{s1} \cdot x^2 \cdot b}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} \cdot \frac{2}{3} \cdot x - M_{Ek} = 0$$

$$X_1 := \text{Find}(\sigma_{s1}, x) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 89.764 & 65.798 & -76.12 + 86.777i & -76.12 - 86.777i \\ 170 & 73.823 & -543.959 & -0.199 + 104.198i & -0.199 - 104.198i \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{s1} := X_{1,0,1} = 89.764 \quad \text{MPa}$$

$$x := X_{1,1,1} = 73.823 \quad \text{mm}$$

Efektyvusis armavimo koeficientas:

$$h_{\text{eff}} := \min \left[2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3}, \frac{h}{2} \right] = \min \left[2.5 \cdot (200 - 170), \frac{200 - 73.823}{3}, \frac{200}{2} \right] = 42.059 \quad \text{mm}$$

$$A_{c,\text{eff}} := h_{\text{eff}} \cdot b = 42.059 \cdot 163 = 6.856 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$\rho_{p,\text{eff}} := \frac{A_{s1}}{A_{c,\text{eff}}} = \frac{157}{6.856 \times 10^3} = 0.023$$

Vidutinis atstumas tarp plyšių :

$$s_{rm} := \left(50 + 0.25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi_b}{\rho_{p,\text{eff}}} \right) \cdot \frac{50}{\frac{l_{fb}}{d_{fb}}} = \left(50 + 0.25 \cdot 0.8 \cdot 0.5 \cdot \frac{10}{0.023} \right) \cdot \frac{50}{1} = 93.666 \quad \text{mm}$$

$$A_{\text{red}} := b \cdot h + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s1} + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} = 34359.1546 \text{ mm}^2$$

$$S_{\text{red}} := b \cdot h \cdot \frac{h}{2} + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s1} \cdot a_1 + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} \cdot (h - a_2) = 3.436 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$y_{\text{red}} := \frac{S_{\text{red}}}{A_{\text{red}}} = \frac{3.436 \times 10^6}{3.436 \times 10^4} = 100 \text{ mm}$$

$$I_{\text{red}} := \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - y_{\text{red}} \right)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s1} \cdot (y_{\text{red}} - a_1)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} \cdot (h - y_{\text{red}} - a_2)^2 = 1.173 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{red}} := \frac{I_{\text{red}}}{y_{\text{red}}} = \frac{1.173 \times 10^8}{100} = 1.173 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Pleišėjimo momentas:

$$M_{\text{crc}} := W_{\text{red}} \cdot f_{\text{ctm}} = 1.173 \times 10^6 \cdot 5.67 = 6.65 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

Given

$$\frac{\sigma_{\text{sr1}} \cdot b \cdot x^2}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} + \frac{\sigma_{\text{sr1}} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} - \sigma_{\text{sr1}} \cdot A_{s1} - \sigma_{\text{fb}} \cdot b \cdot (h - x) = 0$$

$$\sigma_{\text{fb}} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \left(\frac{h - x}{2} \right) + \sigma_{\text{sr1}} \cdot A_{s1} \cdot (d - x) + \frac{\sigma_{\text{sr1}} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} \cdot (x - a_2) + \frac{\sigma_{\text{sr1}} \cdot x^2 \cdot b}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} \cdot \frac{2}{3} \cdot x - M_{\text{crc}} = 0$$

$$X_2 := \text{Find}(\sigma_{\text{sr1}}, x) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 47.956 & 63.923 & -106.086 + 71.209i & -106.086 - 71.209i \\ 170 & 86.027 & -572.849 & 8.144 + 88.08i & 8.144 - 88.08i \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{sr1}} := X_{2,0,1} = 47.956 \text{ MPa}$$

Koeficientai:

$$\beta_1 := 1 \quad - \text{rombuotiems strypams}$$

$$\beta_2 := 1 \quad - \text{veikiant vienai trumpalaikei apkrovai}$$

Vidutinė deformacija tempiamoje armatūroje:

$$\varepsilon_{\text{sm}} := \frac{\sigma_{s1}}{E_s} \cdot \left[1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{sr1}}}{\sigma_{s1}} \right)^2 \right] = \frac{89.764}{2 \times 10^5} \cdot \left[1 - 1 \cdot \left(\frac{47.956}{89.764} \right)^2 \right] = 3.207 \times 10^{-4}$$

Koeficientas:

$$\beta := 1.7$$

Plyšio plotis:

$$w_k := \beta \cdot s_{rm} \cdot \varepsilon_{sm} = 1.7 \cdot 93.666 \cdot 3.207 \times 10^{-4} = 0.051 \text{ mm}$$

Italų metodikos koeficientas:

$$\xi := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{l_{fb}}{d_{fb}} < 50 \\ 50 \cdot \frac{d_{fb}}{l_{fb}} & \text{if } 50 \leq \frac{l_{fb}}{d_{fb}} \leq 100 \\ 0.5 & \text{if } \frac{l_{fb}}{d_{fb}} > 100 \end{cases}$$

$$\xi = 1$$

Vidutinis atstumas tarp plyšių:

$$s_{\text{max}} := \left(50 + 0.25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi_b}{\rho_{p,\text{eff}}} \right) \cdot \xi = \left(50 + 0.25 \cdot 0.8 \cdot 0.5 \cdot \frac{10}{0.023} \right) \cdot 50 \cdot \frac{1}{50} = 93.666 \text{ mm}$$

Plyšio plotis:

$$w_k := \beta \cdot s_{rm} \cdot \varepsilon_{sm} = 1.7 \cdot 93.666 \cdot 3.207 \times 10^{-4} = 0.051 \text{ mm}$$

Priedas Nr. 2. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal papildyto EC2 metodiką

Elemento duomenys:

$$h := 200 \quad \text{mm}$$

$$b := 163 \quad \text{mm}$$

$$a_1 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_2 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_{st} := 90 \quad \text{mm} \quad (\text{atstumas tarp strypų})$$

$$A_{s1} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{s2} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$E_s := 200000 \quad \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 30292 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctm} := 5.67 \quad \text{MPa}$$

$$M_{Ek} := 8.10 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

Redukcijos koeficientas:

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{2 \times 10^5}{3.029 \times 10^4} = 6.602$$

Armatūros darbo aukštis:

$$d := h - a_1 = 200 - 30 = 170 \quad \text{mm}$$

Koeficientai:

$$k_1 := 0.8 \quad - \text{rombuotiems strypams}$$

$$k_2 := 0.5 \quad - \text{lenkimo atveju}$$

$$k_3 := 3.4$$

$$k_4 := 0.425$$

Koeficientas, įvertinantis apkrovos trukmę:

$$k_t := 0.6 \quad (\text{trumpalaikė})$$

Didžiausio armatūros strypo skersmuo:

$$\phi_b := 10 \quad \text{mm}$$

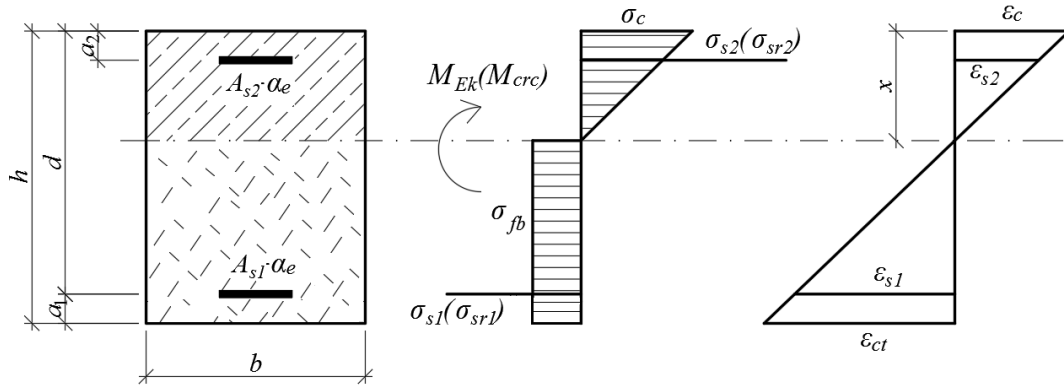
Plaušo ilgis ir skersmuo:

$$l_{fb} := 50 \quad \text{mm}$$

$$d_{fb} := 1 \quad \text{mm}$$

$$f_{Rm,1} := 5.85 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_{fb} := 0.45 \cdot f_{Rm,1} = 0.45 \cdot 5.85 = 2.632 \quad \text{MPa}$$



Given

$$\frac{\sigma_{s1} \cdot b \cdot x^2}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} - \sigma_{s1} \cdot A_{s1} - \sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) = 0$$

$$\sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \left(\frac{h - x}{2} \right) + \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (d - x) + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} \cdot (x - a_2) + \frac{\sigma_{s1} \cdot x^2 \cdot b}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} \cdot \frac{2}{3} \cdot x - M_{Ek} = 0$$

$$X := \text{Find}(\sigma_{s1}, x) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 89.764 & 65.798 & -76.12 + 86.777i & -76.12 - 86.777i \\ 170 & 73.823 & -543.959 & -0.199 + 104.198i & -0.199 - 104.198i \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{s1} := X_{0,1} = 89.764 \quad \text{MPa}$$

$$x := X_{1,1} = 73.823 \quad \text{mm}$$

Efektyvusis armavimo koeficientas:

$$h_{\text{eff}} := \min \left[2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3}, \frac{h}{2} \right] = \min \left[2.5 \cdot (200 - 170), \frac{200 - 73.823}{3}, \frac{200}{2} \right] = 42.059 \quad \text{mm}$$

$$A_{c,\text{eff}} := h_{\text{eff}} \cdot b = 42.059 \cdot 163 = 6.856 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$\rho_{p,\text{eff}} := \frac{A_{s1}}{A_{c,\text{eff}}} = \frac{157}{6.856 \times 10^3} = 0.023$$

$$f_{ct,eff} := f_{ctm} = 5.67 \quad \text{MPa}$$

Išilginės armatūros apsauginis sluoksnis:

$$c := a_1 - \frac{\phi_b}{2} = 30 - \frac{10}{2} = 25 \quad \text{mm}$$

Maksimalus atstumas tarp plyšių :

$$s_{r,max} := \begin{cases} \left(k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi_b}{\rho_{p,eff}} \right) \cdot \left(\frac{50}{\frac{l_{fb}}{d_{fb}}} \right) & \text{if } a_{st} \leq 5 \cdot \left(c + \frac{\phi_b}{2} \right) \\ 1.3 \cdot (h - x) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$s_{r,max} = 159.233 \quad \text{mm}$$

Deformacijų skirtumas:

$$\Delta \varepsilon := \begin{cases} \frac{\sigma_{s1} - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} & \text{if } \frac{\sigma_{s1} - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \cdot \frac{\sigma_{s1}}{E_s} \\ 0.6 \cdot \frac{\sigma_{s1}}{E_s} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta \varepsilon = 2.693 \times 10^{-4}$$

Plyšio plotis:

$$w_k := s_{r,max} \cdot \Delta \varepsilon = \left(3.4 \cdot 25 + 0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.425 \cdot \frac{10}{0.023} \right) \cdot \frac{50}{\frac{50}{1}} \cdot 0.6 \cdot \frac{89.764}{2 \times 10^5} = 0.043 \quad \text{mm}$$

Priedas Nr. 3. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal pakoreguoto EC2 metodiką

Elemento duomenys:

$$h := 200 \quad \text{mm}$$

$$b := 163 \quad \text{mm}$$

$$a_1 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_2 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_{st} := 90 \quad \text{mm} \quad (\text{atstumas tarp strypų})$$

$$A_{s1} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{s2} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$E_s := 200000 \quad \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 30292 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctm} := 5.67 \quad \text{MPa}$$

$$M_{Ek} := 8.10 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

Redukcijos koeficientas:

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{2 \times 10^5}{3.029 \times 10^4} = 6.602$$

Armatūros darbo aukštis:

$$d := h - a_1 = 200 - 30 = 170 \quad \text{mm}$$

Koeficientai:

$$k_1 := 0.8 \quad - \text{rombuotiems strypams}$$

$$k_2 := 0.5 \quad - \text{lenkimo atveju}$$

$$k_3 := 3.4$$

$$k_4 := 0.425$$

Koeficientas, į vertinantis apkrovos trukmę :

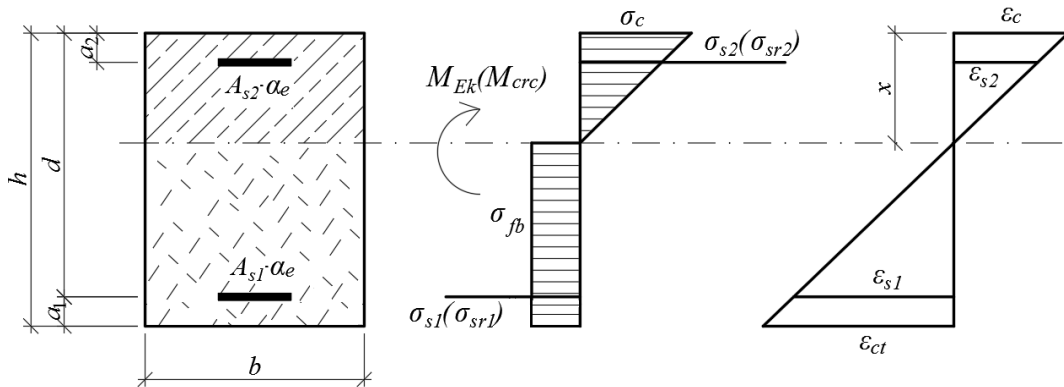
$$k_t := 0.6 \quad (\text{trumpalaikė})$$

Didžiausio armatūros strypo skersmuo:

$$\phi_b := 10 \quad \text{mm}$$

$$f_{Rm1} := 5.85 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_{fb} := 0.45 \cdot f_{Rm1} = 0.45 \cdot 5.85 = 2.632 \quad \text{MPa}$$



Given

$$\frac{\sigma_{s1} \cdot b \cdot x^2}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} - \sigma_{s1} \cdot A_{s1} - \sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) = 0$$

$$\sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \left(\frac{h - x}{2} \right) + \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (d - x) + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} \cdot (x - a_2) + \frac{\sigma_{s1} \cdot x^2 \cdot b}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} \cdot \frac{2}{3} \cdot x - M_{Ek} = 0$$

$$X := \text{Find}(\sigma_{s1}, x) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 89.764 & 65.798 & -76.12 + 86.777i & -76.12 - 86.777i \\ 170 & 73.823 & -543.959 & -0.199 + 104.198i & -0.199 - 104.198i \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{s1} := X_{0,1} = 89.764 \quad \text{MPa}$$

$$x := X_{1,1} = 73.823 \quad \text{mm}$$

Efektyvusis armavimo koeficientas:

$$h_{\text{eff}} := \min \left[2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3}, \frac{h}{2} \right] = \min \left[2.5 \cdot (200 - 170), \frac{200 - 73.823}{3}, \frac{200}{2} \right] = 42.059 \quad \text{mm}$$

$$A_{c,\text{eff}} := h_{\text{eff}} \cdot b = 42.059 \cdot 163 = 6.856 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$\rho_{p,\text{eff}} := \frac{A_{s1}}{A_{c,\text{eff}}} = \frac{157}{6.856 \times 10^3} = 0.023$$

$$f_{ct,\text{eff}} := f_{ctm} = 5.67 \quad \text{MPa}$$

Išilginės armatūros apsauginis sluoksnis:

$$c := a_1 - \frac{\phi_b}{2} = 30 - \frac{10}{2} = 25 \quad \text{mm}$$

$$f_{ft.res} := \sigma_{fb} = 2.632 \quad \text{MPa}$$

Koeficientas:

$$k_5 := 1 - \frac{f_{ft.res}}{f_{ctm}} = 1 - \frac{2.632}{5.67} = 0.536$$

Didžiausias atstumas tarp plyšių :

$$s_{r.max} := \begin{cases} k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot \frac{\phi_b}{\rho_{p.eff}} & \text{if } a_{st} \leq 5 \cdot \left(c + \frac{\phi_b}{2} \right) \\ 1.3 \cdot (h - x) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$s_{r.max} = 124.768 \quad \text{mm}$$

Deformacijų skirtumas:

$$\Delta \varepsilon := \begin{cases} \frac{\sigma_{s1} - k_t \cdot \frac{f_{ct.eff}}{\rho_{p.eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p.eff})}{E_s} & \text{if } \frac{\sigma_{s1} - k_t \cdot \frac{f_{ct.eff}}{\rho_{p.eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p.eff})}{E_s} \geq 0.6 \cdot \frac{\sigma_{s1}}{E_s} \\ 0.6 \cdot \frac{\sigma_{s1}}{E_s} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta \varepsilon = 2.693 \times 10^{-4}$$

Plyšio plotis:

$$w_k := s_{r.max} \cdot \Delta \varepsilon = \left(3.4 \cdot 25 + 0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.425 \cdot 0.536 \cdot \frac{10}{0.023} \right) \cdot 0.6 \cdot \frac{89.764}{2 \times 10^5} = 0.034 \quad \text{mm}$$

Priedas Nr. 4. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal SFRC *Design Guideline* metodiką

Elemento duomenys:

$$h := 200 \quad \text{mm}$$

$$b := 163 \quad \text{mm}$$

$$a_1 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_2 := 30 \quad \text{mm}$$

$$A_{s1} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{s2} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$E_s := 200000 \quad \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 30292 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctm} := 5.67 \quad \text{MPa}$$

$$M_{Ek} := 8.10 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

Redukcijos koeficientas:

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{2 \times 10^5}{3.029 \times 10^4} = 6.602$$

Armatūros darbo aukštis:

$$d := h - a_1 = 200 - 30 = 170 \quad \text{mm}$$

Didžiausio armatūros strypo skersmuo:

$$\phi_b := 10 \quad \text{mm}$$

$$f_{Rm,1} := 2.84 \quad \text{MPa}$$

Koeficientai:

$$\beta_{L1} := 0.40$$

$$\kappa_F := 0.50$$

$$\kappa_G := 1 + 0.9 \cdot b \cdot h \cdot 10^{-6} \cdot 0.5 = 1 + 0.9 \cdot 163 \cdot 200 \cdot 10^{-6} \cdot 0.5 = 1.015$$

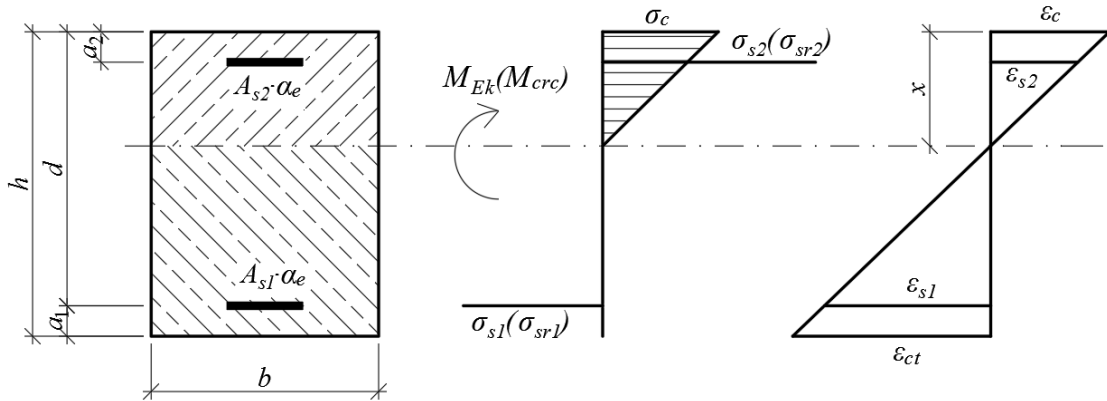
$$f_{ct0,L1} := f_{Rm,1} \cdot \beta_{L1} = 1.136 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctR,L1} := \kappa_F \cdot \kappa_G \cdot f_{ct0,L1} = 0.5 \cdot 1.015 \cdot 1.136 = 0.576 \quad \text{MPa}$$

$$\alpha_f := \begin{cases} \frac{f_{ctRL1}}{f_{ctm}} & \text{if } \frac{f_{ctRL1}}{f_{ctm}} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\alpha_f = 0.102$$

$$\sigma_{fb} := f_{ctRL1} = 0.576 \text{ MPa}$$



Given

$$\frac{\sigma_{s1} \cdot b \cdot x^2}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} - \sigma_{s1} \cdot A_{s1} = 0$$

$$\sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (d - x) + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} \cdot (x - a_2) + \frac{\sigma_{s1} \cdot x^2 \cdot b}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} \cdot \frac{2}{3} \cdot x - M_{Ek} = 0$$

$$X := \text{Find}(\sigma_{s1}, x) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 331.132 & 247.727 \\ 170 & 39.471 & -62.982 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{s.fict} := X_{0,1} = 331.132 \text{ MPa}$$

$$x := X_{1,1} = 39.471 \text{ mm}$$

$$h_{eff} := \min \left[2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3}, \frac{h}{2} \right] = \min \left[2.5 \cdot (200 - 170), \frac{200 - 39.471}{3}, \frac{200}{2} \right] = 53.51 \text{ mm}$$

$$A_{c,eff} := h_{eff} \cdot b = 53.51 \cdot 163 = 8.722 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{p,eff} := \frac{A_{s1}}{A_{c,eff}} = \frac{157}{8.722 \times 10^3} = 0.018$$

$$f_{ct,eff} := f_{ctm} = 5.67 \text{ MPa}$$

Maksimalus atstumas tarp plyšių:

$$s_{r,\max} := \begin{cases} (1 - \alpha_f) \cdot \frac{\phi_b}{3.6 \cdot \rho_{p,\text{eff}}} & \text{if } (1 - \alpha_f) \cdot \frac{\phi_b}{3.6 \cdot \rho_{p,\text{eff}}} \leq (1 - \alpha_f) \cdot \frac{\sigma_{s,\text{fict}} \cdot \phi_b}{3.6 \cdot f_{ct,\text{eff}}} \\ (1 - \alpha_f) \cdot \frac{\sigma_{s,\text{fict}} \cdot \phi_b}{3.6 \cdot f_{ct,\text{eff}}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$s_{r,\max} = 138.633 \text{ mm}$$

Deformacijų skirtumas:

$$\Delta \varepsilon := \begin{cases} \frac{(1 - \alpha_f) \cdot \left(\sigma_{s,\text{fict}} - 0.4 \cdot f_{ct,\text{eff}} \cdot \frac{1}{\rho_{p,\text{eff}}} \right)}{E_s} & \text{if } \frac{(1 - \alpha_f) \cdot \left(\sigma_{s,\text{fict}} - 0.4 \cdot f_{ct,\text{eff}} \cdot \frac{1}{\rho_{p,\text{eff}}} \right)}{E_s} \geq 0.6 \cdot (1 - \alpha_f) \cdot \frac{\sigma_{s,\text{fict}}}{E_s} \\ 0.6 \cdot (1 - \alpha_f) \cdot \frac{\sigma_{s,\text{fict}}}{E_s} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta \varepsilon = 9.214 \times 10^{-4}$$

Plyšio plotis:

$$w_k := s_{r,\max} \cdot \Delta \varepsilon = \left(1 - \frac{0.576}{5.67} \right) \cdot \frac{10}{3.6 \cdot 0.018} \cdot \frac{\left(1 - \frac{0.576}{5.67} \right) \cdot \left(331.132 - 0.4 \cdot 5.67 \cdot \frac{1}{0.018} \right)}{2 \times 10^5} = 0.128 \text{ mm}$$

Priedas Nr. 5. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal SS 812310:2014–1 metodiką

Elemento duomenys:

$$h := 200 \quad \text{mm}$$

$$b := 163 \quad \text{mm}$$

$$a_1 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_2 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_{st} := 90 \quad \text{mm} \quad (\text{atstumas tarp strypų})$$

$$A_{s1} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{s2} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$E_s := 200000 \quad \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 30292 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctm} := 5.67 \quad \text{MPa}$$

$$M_{Ek} := 8.10 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

Redukcijos koeficientas:

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{2 \times 10^5}{3.029 \times 10^4} = 6.602$$

Armatūros darbo aukštis:

$$d := h - a_1 = 200 - 30 = 170 \quad \text{mm}$$

Koeficientai:

$$k_1 := 0.8 \quad - \text{rombuotiems strypams}$$

$$k_2 := 0.5 \quad - \text{lenkimo atveju}$$

$$k_3 := 3.4$$

$$k_4 := 0.425$$

Koeficientas, į vertinantis apkrovos trukmę :

$$k_t := 0.6 \quad (\text{trumpalaikė})$$

Didžiausio armatūros strypo skersmuo:

$$\phi_b := 10 \quad \text{mm}$$

$$f_{Rm,1} := 3.34 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ft.R1} := 0.45 \cdot f_{Rm1} = 0.45 \cdot 3.34 = 1.503 \text{ MPa}$$

$$\eta_f := 0.5$$

$$\gamma_f := 1$$

$$f_{ftd.R1} := \eta_f \cdot \frac{f_{ft.R1}}{\gamma_f} = 0.5 \cdot \frac{1.503}{1} = 0.751 \text{ MPa}$$

$$k_f := \begin{cases} \frac{f_{ftd.R1}}{f_{ctm}} & \text{if } \frac{f_{ftd.R1}}{f_{ctm}} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

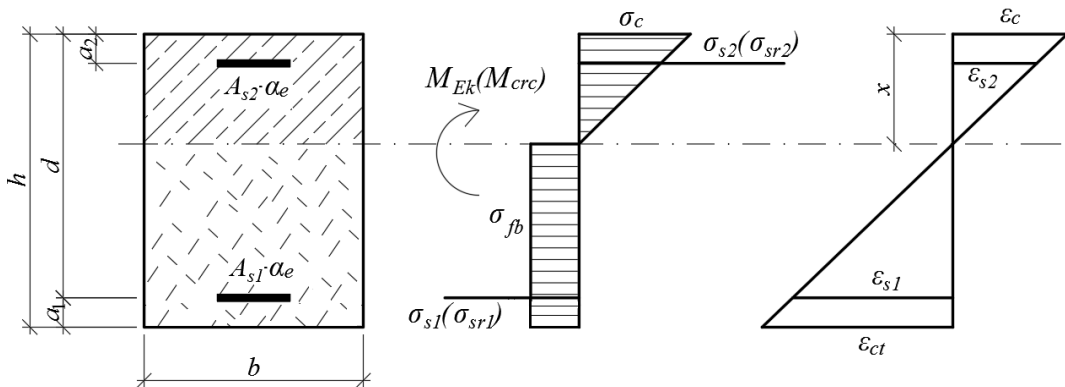
$$k_f = 0.133$$

$$\sigma_{fb} := f_{ftd.R1} = 0.751 \text{ MPa}$$

Išilginės armatūros apsauginis sluoksnis:

$$c := a_1 - \frac{\phi_b}{2} = 30 - \frac{10}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$f_{ct.eff} := f_{ctm} = 5.67 \text{ MPa}$$



Given

$$\frac{\sigma_{s1} \cdot b \cdot x^2}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} - \sigma_{s1} \cdot A_{s1} - \sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) = 0$$

$$\sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \left(\frac{h - x}{2} \right) + \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (d - x) + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} \cdot (x - a_2) + \frac{\sigma_{s1} \cdot x^2 \cdot b}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} \cdot \frac{2}{3} \cdot x - M_{Ek} = 0$$

$$X := \text{Find}(\sigma_{s1}, x) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 252.879 & 137.809 & 11.936 + 8.7i & 11.936 - 8.7i \\ 170 & 46.298 & -104.788 & -206.022 + 438.959i & -206.022 - 438.959i \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{s1} := X_{0,1} = 252.879 \quad \text{MPa}$$

$$x := X_{1,1} = 46.298 \quad \text{mm}$$

Efektyvusis armavimo koeficientas:

$$h_{\text{eff}} := \min \left[2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3}, \frac{h}{2} \right] = \min \left[2.5 \cdot (200 - 170), \frac{200 - 46.298}{3}, \frac{200}{2} \right] = 51.234 \quad \text{mm}$$

$$A_{\text{c.eff}} := h_{\text{eff}} \cdot b = 51.234 \cdot 163 = 8.351 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$\rho_{\text{p.eff}} := \frac{A_{s1}}{A_{\text{c.eff}}} = \frac{157}{8.351 \times 10^3} = 0.019$$

Maksimalus atstumas tarp plyšių:

$$s_{\text{r.max}} := \begin{cases} k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot (1 - k_f) \cdot \frac{\phi_b}{\rho_{\text{p.eff}}} & \text{if } a_{st} \leq 5 \cdot \left(c + \frac{\phi_b}{2} \right) \\ 1.3 \cdot (h - x) \cdot (1 - k_f) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$s_{\text{r.max}} = 163.441 \quad \text{mm}$$

Deformacijų skirtumas:

$$\Delta \varepsilon := \begin{cases} \frac{\sigma_{s1} - [k_t + (1 - k_t) \cdot k_f] \cdot \frac{f_{\text{ct.eff}}}{\rho_{\text{p.eff}}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{\text{p.eff}})}{E_s} & \text{if } \frac{\sigma_{s1} - [k_t + (1 - k_t) \cdot k_f] \cdot \frac{f_{\text{ct.eff}}}{\rho_{\text{p.eff}}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{\text{p.eff}})}{E_s} \geq 0.6 \cdot \frac{\sigma_{s1}}{E_s} \\ 0.6 \cdot \frac{\sigma_{s1}}{E_s} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta \varepsilon = 7.586 \times 10^{-4}$$

Plyšio plotis:

$$w_k := s_{\text{r.max}} \cdot \Delta \varepsilon = \left[3.4 \cdot 25 + 0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.425 \cdot \left(1 - \frac{0.751}{5.67} \right) \cdot \frac{10}{0.019} \right] \cdot 0.6 \cdot \frac{252.879}{2 \times 10^5} = 0.124 \quad \text{mm}$$

Priedas Nr. 6. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal SS 812310:2014–2 metodiką

Elemento duomenys:

$$h := 200 \quad \text{mm}$$

$$b := 163 \quad \text{mm}$$

$$a_1 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_2 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_{st} := 90 \quad \text{mm} \quad (\text{atstumas tarp strypų})$$

$$A_{s1} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{s2} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$E_s := 200000 \quad \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 30292 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctm} := 5.67 \quad \text{MPa}$$

$$M_{Ek} := 8.10 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

Redukcijos koeficientas:

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{2 \times 10^5}{3.029 \times 10^4} = 6.602$$

Armatūros darbo aukštis:

$$d := h - a_1 = 200 - 30 = 170 \quad \text{mm}$$

Koeficientai:

$$k_1 := 0.8 \quad - \text{rombuotiems strypams}$$

$$k_2 := 0.5 \quad - \text{lenkimo atveju}$$

$$k_3 := 3.4$$

$$k_4 := 0.425$$

Koeficientas, įvertinantis apkrovos trukmę:

$$k_t := 0.6 \quad (\text{trumpalaikė})$$

Didžiausio armatūros strypo skersmuo:

$$\phi_b := 10 \quad \text{mm}$$

$$f_{Rm,1} := 3.34 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ft.R1} := 0.45 \cdot f_{Rm1} = 0.45 \cdot 3.34 = 1.503 \text{ MPa}$$

$$\eta_f := 0.5$$

$$\gamma_f := 1$$

$$f_{ftd.R1} := \eta_f \cdot \frac{f_{ft.R1}}{\gamma_f} = 0.5 \cdot \frac{1.503}{1} = 0.751 \text{ MPa}$$

$$k_f := \begin{cases} \frac{f_{ftd.R1}}{f_{ctm}} & \text{if } \frac{f_{ftd.R1}}{f_{ctm}} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

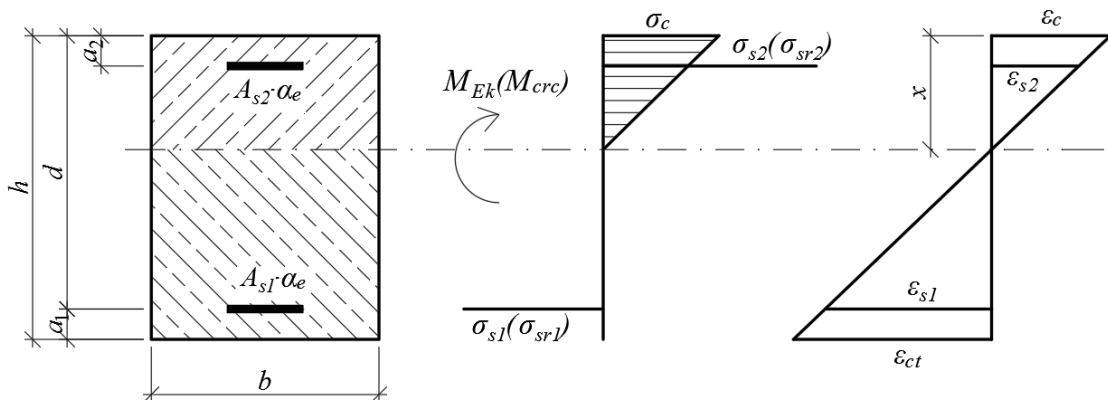
$$k_f = 0.133$$

$$\sigma_{fb} := f_{ftd.R1} = 0.751 \text{ MPa}$$

Išilginės armatūros apsauginis sluoksnis:

$$c_{\text{w}} := a_1 - \frac{\phi_b}{2} = 30 - \frac{10}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$f_{ct,eff} := f_{ctm} = 5.67 \text{ MPa}$$



Given

$$\frac{\sigma_{s1} \cdot b \cdot x^2}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} - \sigma_{s1} \cdot A_{s1} = 0$$

$$\sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (d - x) + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} \cdot (x - a_2) + \frac{\sigma_{s1} \cdot x^2 \cdot b}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} \cdot \frac{2}{3} \cdot x - M_{Ek} = 0$$

$$X := \text{Find}(\sigma_{s1}, x) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 331.132 & 247.727 \\ 170 & 39.471 & -62.982 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{s.fict} := X_{0,1} = 331.132 \text{ MPa}$$

$$x := X_{1,1} = 39.471 \text{ mm}$$

$$h_{eff} := \min \left[2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3}, \frac{h}{2} \right] = \min \left[2.5 \cdot (200 - 170), \frac{200 - 39.471}{3}, \frac{200}{2} \right] = 53.51 \text{ mm}$$

$$A_{c.eff} := h_{eff} \cdot b = 53.51 \cdot 163 = 8.722 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{p.eff} := \frac{A_{s1}}{A_{c.eff}} = \frac{157}{8.722 \times 10^3} = 0.018$$

Maksimalus atstumas tarp plyšių :

$$s_{r.max} := \begin{cases} k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot (1 - k_f) \cdot \frac{\phi_b}{\rho_{p.eff}} & \text{if } a_{st} \leq 5 \cdot \left(c + \frac{\phi_b}{2} \right) \\ 1.3 \cdot (h - x) \cdot (1 - k_f) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$s_{r.max} = 166.925 \text{ mm}$$

Deformacijų skirtumas:

$$\Delta \varepsilon := \begin{cases} \frac{(1 - k_f) \cdot \left[\sigma_{s.fict} - k_t \cdot \frac{f_{ct.eff}}{\rho_{p.eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p.eff}) \right]}{E_s} & \text{if } \frac{(1 - k_f) \cdot \left[\sigma_{s.fict} - k_t \cdot \frac{f_{ct.eff}}{\rho_{p.eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p.eff}) \right]}{E_s} \geq 0.6 \cdot (1 - k_f) \cdot \frac{\sigma_{s.fict}}{E_s} \\ 0.6 \cdot (1 - k_f) \cdot \frac{\sigma_{s.fict}}{E_s} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta \varepsilon = 0.0008617315$$

Plyšio plotis:

$$w_k := s_{r.max} \cdot \Delta \varepsilon = \left[3.4 \cdot 25 + 0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.425 \cdot \left(1 - \frac{0.751}{5.67} \right) \cdot \frac{10}{0.018} \right] \cdot 0.6 \cdot \left(1 - \frac{0.751}{5.67} \right) \cdot \frac{331.132}{2 \times 10^5} = 0.144 \text{ mm}$$

Priedas Nr. 7. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal FIB *Model Code* 2010–1 metodiką

Elemento duomenys:

$$h := 200 \quad \text{mm}$$

$$b := 163 \quad \text{mm}$$

$$a_1 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_2 := 30 \quad \text{mm}$$

$$A_{s1} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{s2} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$E_s := 200000 \quad \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 30292 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctm} := 5.67 \quad \text{MPa}$$

$$M_{Ek} := 8.10 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

Redukcijos koeficientas:

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{2 \times 10^5}{3.029 \times 10^4} = 6.602$$

Armatūros darbo aukštis:

$$d := h - a_1 = 200 - 30 = 170 \quad \text{mm}$$

Didžiausio armatūros strypo skersmuo:

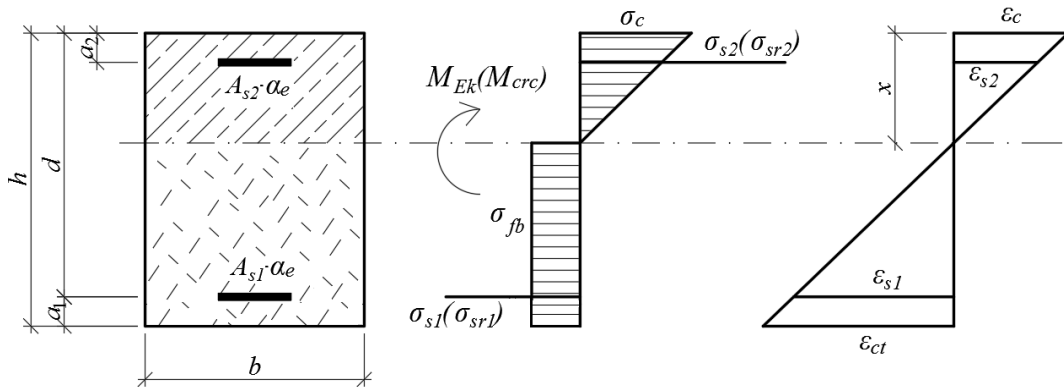
$$\phi_b := 10 \quad \text{mm}$$

$$f_{Rm,1} := 3.13 \quad \text{MPa}$$

$$f_{Ftsk} := 0.45 \cdot f_{Rm,1} = 0.45 \cdot 3.13 = 1.409 \quad \text{MPa}$$

$$f_{Ftsm} := \frac{f_{Ftsk}}{0.7} = \frac{1.409}{0.7} = 2.012 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_{fb} := f_{Ftsm} = 2.012 \quad \text{MPa}$$



Given

$$\frac{\sigma_{s1} \cdot b \cdot x^2}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} - \sigma_{s1} \cdot A_{s1} - \sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) = 0$$

$$\sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \left(\frac{h - x}{2} \right) + \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (d - x) + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} \cdot (x - a_2) + \frac{\sigma_{s1} \cdot x^2 \cdot b}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} \cdot \frac{2}{3} \cdot x - M_{Ek} = 0$$

$$X_1 := \text{Find}(\sigma_{s1}, x) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 135.457 & 53.657 & -25.083 + 77.997i & -25.083 - 77.997i \\ 170 & 62.549 & -487.953 & -22.565 + 128.918i & -22.565 - 128.918i \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{s1} := X_{1,0,1} = 135.457 \text{ MPa}$$

$$x := X_{1,1,1} = 62.549 \text{ mm}$$

Efektyvusis armavimo koeficientas:

$$h_{\text{eff}} := \min \left[2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3}, \frac{h}{2} \right] = \min \left[2.5 \cdot (200 - 170), \frac{200 - 62.549}{3}, \frac{200}{2} \right] = 45.817 \text{ mm}$$

$$A_{c,\text{eff}} := h_{\text{eff}} \cdot b = 45.817 \cdot 163 = 7.468 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{p,\text{eff}} := \frac{A_{s1}}{A_{c,\text{eff}}} = \frac{157}{7.468 \times 10^3} = 0.021$$

$$A_{\text{red}} := b \cdot h + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s1} + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} = 34359.1546 \text{ mm}^2$$

$$S_{\text{red}} := b \cdot h \cdot \frac{h}{2} + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s1} \cdot a_1 + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} \cdot (h - a_2) = 3.436 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$y_{\text{red}} := \frac{S_{\text{red}}}{A_{\text{red}}} = \frac{3.436 \times 10^6}{3.436 \times 10^4} = 100 \text{ mm}$$

$$I_{\text{red}} := \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - y_{\text{red}} \right)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s1} \cdot (y_{\text{red}} - a_1)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s2} \cdot (h - y_{\text{red}} - a_2)^2 = 1.173 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{red}} := \frac{I_{\text{red}}}{y_{\text{red}}} = \frac{1.173 \times 10^8}{100} = 1.173 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Pleišėjimo momentas:

$$M_{\text{crc}} := W_{\text{red}} \cdot f_{\text{ctm}} = 1.173 \times 10^6 \cdot 5.67 = 6.65 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

Given

$$\frac{\sigma_{\text{sr1}} \cdot b \cdot x^2}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} + \frac{\sigma_{\text{sr1}} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} - \sigma_{\text{sr1}} \cdot A_{s1} - \sigma_{\text{fb}} \cdot b \cdot (h - x) = 0$$

$$\sigma_{\text{fb}} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \left(\frac{h - x}{2} \right) + \sigma_{\text{sr1}} \cdot A_{s1} \cdot (d - x) + \frac{\sigma_{\text{sr1}} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} \cdot (x - a_2) + \frac{\sigma_{\text{sr1}} \cdot x^2 \cdot b}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} \cdot \frac{2}{3} \cdot x - M_{\text{crc}} = 0$$

$$X_2 := \text{Find}(\sigma_{\text{sr1}}, x) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 83.728 & 50.979 & -49.686 + 70.157i & -49.686 - 70.157i \\ 170 & 70.277 & -531.298 & -4.756 + 110.513i & -4.756 - 110.513i \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{sr1}} := X_{2,0,1} = 83.728 \text{ MPa}$$

Išilginės armatūros apsauginis sluoksnis:

$$c := a_1 - \frac{\phi_b}{2} = 30 - \frac{10}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$k := 1$$

Duomenys iš lentelės:

$$\tau_{\text{bmm}} := 1.8 \cdot f_{\text{ctm}} = 1.8 \cdot 5.67 = 10.206 \text{ MPa}$$

$$\beta := 0.6$$

$$\eta_r := 0 \quad \varepsilon_{\text{sh}} := 0$$

	<i>Crack formation stage</i>	<i>Stabilized cracking stage</i>
Short term, instantaneous loading	$\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$
Long term, repeated loading	$\tau_{bms} = 1.35 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$ $\beta = 0.4$ $\eta_r = 1$

Skaičiuojamasis plyšio plotis:

$$w_k := 2 \cdot \left[k \cdot c + \frac{1}{4} \cdot \frac{\phi_b}{\rho_{p,eff}} \cdot \frac{(f_{ctm} - f_{Ftsm})}{\tau_{bm}} \right] \cdot \frac{1}{E_s} \cdot (\sigma_{s1} - \beta \cdot \sigma_{sr1} + \eta_r \cdot \epsilon_{sh} \cdot E_s) = 0.058 \text{ mm}$$

Priedas Nr. 8. Plyšio pločio skaičiavimo modelis pagal FIB *Model Code 2010–2* metodiką

Elemento duomenys:

$$h := 200 \quad \text{mm}$$

$$b := 163 \quad \text{mm}$$

$$a_1 := 30 \quad \text{mm}$$

$$a_2 := 30 \quad \text{mm}$$

$$A_{s1} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{s2} := 157 \quad \text{mm}^2$$

$$E_s := 200000 \quad \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 30292 \quad \text{MPa}$$

$$f_{ctm} := 5.67 \quad \text{MPa}$$

$$M_{Ek} := 8.10 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Redukcijos koeficientas:

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{2 \times 10^5}{3.029 \times 10^4} = 6.602$$

Armatūros darbo aukštis:

$$d := h - a_1 = 200 - 30 = 170 \quad \text{mm}$$

Didžiausio armatūros strypo skersmuo:

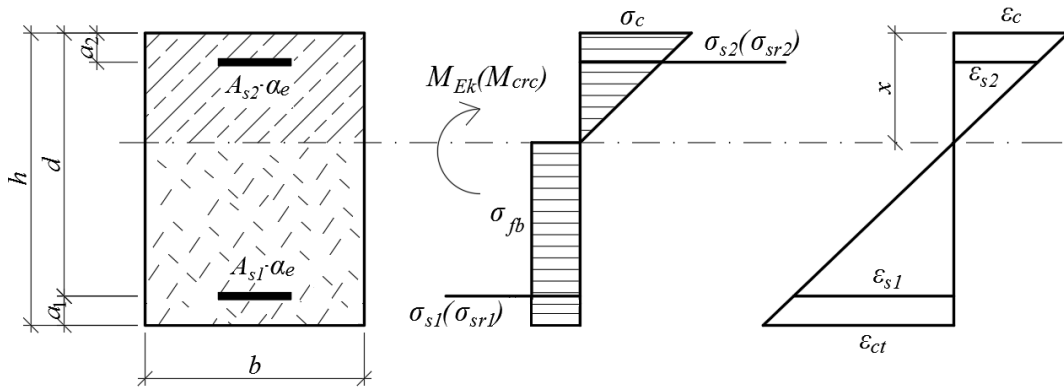
$$\phi_b := 10 \quad \text{mm}$$

$$f_{Rm.1} := 3.13 \quad \text{MPa}$$

$$f_{Ftsk} := 0.45 \cdot f_{Rm.1} = 0.45 \cdot 3.13 = 1.409 \quad \text{MPa}$$

$$f_{Ftsm} := \frac{f_{Ftsk}}{0.7} = \frac{1.409}{0.7} = 2.012 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_{fb} := f_{Ftsm} = 2.012 \quad \text{MPa}$$



Given

$$\frac{\sigma_{s1} \cdot b \cdot x^2}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} - \sigma_{s1} \cdot A_{s1} - \sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) = 0$$

$$\sigma_{fb} \cdot b \cdot (h - x) \cdot \left(\frac{h - x}{2} \right) + \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot (d - x) + \frac{\sigma_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (x - a_2) \cdot A_{s2}}{\alpha_e \cdot (d - x)} \cdot (x - a_2) + \frac{\sigma_{s1} \cdot x^2 \cdot b}{2 \cdot \alpha_e \cdot (d - x)} \cdot \frac{2}{3} \cdot x - M_{Ek} = 0$$

$$X := \text{Find}(\sigma_{s1}, x) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 135.457 & 53.657 & -25.083 + 77.997i & -25.083 - 77.997i \\ 170 & 62.549 & -487.953 & -22.565 + 128.918i & -22.565 - 128.918i \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{s1} := X_{0,1} = 135.457 \text{ MPa}$$

$$x := X_{1,1} = 62.549 \text{ mm}$$

Efektывusis armavimo koeficientas:

$$h_{\text{eff}} := \min \left[2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3}, \frac{h}{2} \right] = \min \left[2.5 \cdot (200 - 170), \frac{200 - 62.549}{3}, \frac{200}{2} \right] = 45.817 \text{ mm}$$

$$A_{c,\text{eff}} := h_{\text{eff}} \cdot b = 45.817 \cdot 163 = 7.468 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{p,\text{eff}} := \frac{A_{s1}}{A_{c,\text{eff}}} = \frac{157}{7.468 \times 10^3} = 0.021$$

$$\rho_s := \frac{A_{s1}}{b \cdot x} = 0.015$$

$$\sigma_{sr1} := (f_{ctm} - f_{Ftsm}) \cdot \frac{(1 + \alpha_e \cdot \rho_s)}{\rho_{p,\text{eff}}} = 191.687 \text{ MPa}$$

Išilginės armatūros apsauginis sluoksnis:

$$c_{\text{w}} := a_1 - \frac{\phi_b}{2} = 30 - \frac{10}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$k := 1$$

Duomenys iš lentelės:

$$\tau_{\text{bm}} := 1.8 \cdot f_{\text{ctm}} = 1.8 \cdot 5.67 = 10.206 \text{ MPa}$$

$$\beta := 0.6$$

$$\eta_r := 0 \quad \varepsilon_{\text{sh}} := 0$$

	<i>Crack formation stage</i>	<i>Stabilized cracking stage</i>
Short term, instantaneous loading	$\tau_{\text{bms}} = 1.8 \cdot f_{\text{ctm}}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{\text{bms}} = 1.8 \cdot f_{\text{ctm}}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$
Long term, repeated loading	$\tau_{\text{bms}} = 1.35 \cdot f_{\text{ctm}}(t)$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{\text{bms}} = 1.8 \cdot f_{\text{ctm}}(t)$ $\beta = 0.4$ $\eta_r = 1$

Skaičiuojamasis plyšio plotis:

$$w_k := 2 \cdot \left[k \cdot c + \frac{1}{4} \cdot \frac{\phi_b}{\rho_{\text{p.eff}}} \cdot \frac{(f_{\text{ctm}} - f_{\text{Ftsm}})}{\tau_{\text{bm}}} \right] \cdot \frac{1}{E_s} \cdot (\sigma_{\text{s1}} - \beta \cdot \sigma_{\text{sr1}} + \eta_r \cdot \varepsilon_{\text{sh}} \cdot E_s) = 0.014 \text{ mm}$$