



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Stiprinamų lenkiamų gelžbetoninių elementų įtempių būvio
analizė įvertinant ilgalaikes deformacijas**

Baigiamasis magistro projektas

Audrius Čižinauskas

Projekto autorius

Doc. dr. Mindaugas Augonis

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Stiprinamų lenkiamų gelžbetoninių elementų įtempių būvio analizė įvertinant ilgalaikes deformacijas

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Audrius Čizinauskas

Projekto autorius

Doc. dr. Mindaugas Augonis

Vadovas

Lekt. dr. Nerijus Adamukaitis

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Audrius Čižinauskas

Stiprinamų lenkiamų gelžbetoninių elementų įtempių būvio analizė įvertinant ilgalaikes deformacijas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Audriaus Čižinausko, baigiamasis projektas tema „Stiprinamų lenkiamų gelžbetoninių elementų įtempių būvio analizė įvertinant ilgalaikes deformacijas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):
STIPRINAMŲ LENKIAMŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ĮTEMPIŲ BŪVIO ANALIZĖ
ĮVERTINANT ILGALAIKES DEFORMACIJAS

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanı potvarkiu Nr.: 2020 m. lapkričio 30 d. Nr. V25-09-18

(lietuvių k.):
STIPRINAMŲ LENKIAMŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ ĮTEMPIŲ BŪVIO ANALIZĖ
ĮVERTINANT ILGALAIKES DEFORMACIJAS

(anglų k.):
STRESS STATE ANALYSIS OF STRENGTHENING FLEXURAL RC MEMBERS
CONSIDERING LONG TERM DEFORMATIONS

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

Baigiamojo projekto dalys:	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	
Analitiniai tyrimai	x
Skaitiniai tyrimai	
Ekonominė dalis	
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:

Vadovas: Doc. Mindaugas Augonis parašas
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė*

Konsultantas: _____ parašas
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė*

Konsultantas: _____ parašas
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė*

Studentas: Audrius Čižinauskas parašas
vardas, pavardė

Čižinauskas, Audrius. Stiprinamų lenkiamų gelžbetoninių elementų įtempių būvio analizė įvertinant ilgalaikes deformacijas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: stiprinimas, gelžbetoninės konstrukcijos, ilgalaikės deformacijos, praslydimas, įtempiai.

Kaunas, 2021. 66 p.

Santrauka

Šio magistro baigiamojo projekto tikslas yra sudaryti metodiką lenkiamoms gelžbetoninėms konstrukcijoms, sustiprintoms užliejamu betono sluoksniu apskaičiuoti, įvertinant šlyties standumo bei sluoksnių ilgalaikių deformacijų įtaką.

Darbas pradedamas nuo literatūros analizės, kurioje analizuojami skirtingi monolitinių perdangų ir sijų stiprinimo būdai, gilinamasi, nuo ko priklauso sukibimas tarp stiprinamo betono sluoksniu ir papildomo betono sluoksniu. Nagrinėjamas deformacijų pasiskirstymas tarp jų.

Antroje dalyje sudaromi du skaičiavimo modeliai. Pirmasis, kuris įvertina trumpalaikes deformacijas ir antrasis, kuris įvertina ilgalaikes deformacijas. Kiekvienam iš modelių yra sudaroma po tris skaičiavimo metodikas, kai tarp sluoksnių yra pilnas praslydimas, pilnas sukibimas ir dalinis praslydimas. Sudarytos lygtys leidžia apskaičiuoti lenkimo momentus, tenkančius kiekvienam sluoksniui, ir šlyties jėgas tarp jų, esant skirtingam praslydimui.

Trečioje dalyje pateikiami pasirinkti ir apskaičiuoti nekintantys dydžiai visų skaičiavimų metu. Grafiškai palyginami skaičiavimo modeliais gauti rezultatai, esant skirtingam praslydimui tarp sluoksnių. Palyginama konstrukcijos laikomoji galia, pleišėjimo momentai, lenkimo momentų ir šlyties jėgų pasiskirstymas, deformacijos, įtempiai ir konstrukcijos įlinkis. Gautiems rezultatams suformuluojamos išvados.

Projekto sudedamosios dalys: lentelių sąrašas (20 lentelių), paveikslėlių sąrašas (46 paveikslėliai), įvadas, literatūros apžvalga, analitiniai skaičiavimai, rezultatai, išvados, literatūros sąrašas (31 šaltinis), priedai (3 dalys).

Čižinauskas, Audrius. Stress State Analysis of Strengthening Flexural RC Members Considering Long Term Deformations. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Mindaugas Augonis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: strengthening, reinforced concrete structures, long term deformations, slip, stress.

Kaunas, 2021. 66 pages.

Summary

The purpose of this master's thesis is to create a calculation methodology for flexural RC members, strengthened with additional layer of concrete, evaluating the influence of shear stiffness and long term deformations.

The thesis begins with a literature review which examines the different ways of strengthening monolithic slabs and beams, examines what determines adhesion between existing concrete layer and newly poured concrete. In addition, deformation distribution among them is examine.

There are two calculation models in the second part. The first model evaluates short term deformations, while the second model evaluates long term deformations. Both models consist of three calculation methods which determine interaction between layers: no interaction, full interaction and partial interaction. Derived equations allow to calculate bending moments for each layer and the shear forces between them at different slip.

The third part presents the selected and calculated constant values during all calculations. Results with different slip between layers were graphically compared. Comparable load-bearing capacity of the structure, cracking moments, distribution of bending moments and shear forces, deformations, stresses and deflection of the structure. Conclusions are given for the results.

Components of the thesis are as follow: list of tables (20 tables), list of pictures (46 pictures), introduction, literature review, analytical calculation, results, conclusions, list of literature (31 sources), appendixes (3 parts).

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Monolitinių perdangų stiprinimo būdai.....	13
1.1.1. Perdangų stiprinimas naudojant anglies pluošto polimerinius strypus.....	13
1.1.2. Sijinių perdangų stiprinimas naudojant anglies pluošto polimerines juostas.....	14
1.1.3. Sijinių perdangų stiprinimas naudojant plieninius kampuočius ir lakštus	15
1.1.4. Perdangų stiprinimas naudojant fibromis armuotą betono sluoksnį	15
1.2. Teorinis deformacijų pasiskirstymas kompozitinėje konstrukcijoje	16
1.3. Sukibimo tarp sluoksnių didinimo būdai.....	17
1.3.1. Mechaniniai sukibimo tarp sluoksnių gerinimo būdai	18
1.3.2. Sukibimo tarp sluoksnių pagerinimas naudojant plieninius strypus	19
1.3.3. Sukibimo tarp sluoksnių priklausomybė nuo betono rūšies	20
1.3.4. Sukibimo tarp sluoksnių pagerinimas naudojant papildomas rišamąsias medžiagas.....	21
1.4. Literatūros apžvalgos išvados.....	22
2. Analitiniai skaičiavimai.....	23
2.1. Pradiniai duomenys	23
2.2. Ilgalaikių deformacijų vertinimas.....	25
2.2.1. Valkšnumo koeficiento skaičiavimas	25
2.2.2. Traukumo deformacijų skaičiavimas	26
2.3. Efektyvieji skerspjūvio parametrai	27
2.3.1. Papildomo sluoksnio (indeksas – 1) efektyvieji skerspjūvio parametrai	28
2.3.2. Stiprinamo sluoksnio (indeksas – 2) efektyvieji skerspjūvio parametrai	28
2.3.3. Efektyvieji skerspjūvio parametrai, kai elementas yra pilnai standus.....	29
2.4. Pirmasis skaičiavimo modelis	30
2.4.1. Maksimalios praslydimo deformacijos radimas, kai tarp sluoksnių nėra sukibimo.....	30
2.4.2. Maksimalios šlyties jėgos tarp sluoksnių radimas, esant pilnam sukibimui	31
2.4.3. Deformacijų radimas, esant daliniam praslydimui tarp sluoksnių	33
2.5. Antrasis skaičiavimo modelis.....	36
2.5.1. Maksimalios praslydimo deformacijų radimas, kai tarp sluoksnių nėra sukibimo	36
2.5.2. Maksimalios šlyties jėgos tarp sluoksnių radimas, esant pilnam sukibimui	37
2.5.3. Deformacijų radimas, esant daliniam praslydimui tarp sluoksnių	40
3. Rezultatai.....	44
3.1. Konstrukcijos laikomoji galia.....	44
3.2. Konstrukcijos pleišėjimo momentas.....	45
3.3. Apkrovos	46
3.4. Lenkimo momentų pasiskirstymas sluoksniuose	47
3.5. Sustiprintos konstrukcijos deformacijos.....	50
3.6. Sustiprintos konstrukcijos įtempiai	55
3.7. Sustiprintos konstrukcijos įlinkiai	61
Išvados	63

Literatūros sąrašas	64
Priedai.....	67
1 priedas. Stiprinamo sluoksnio normalinio pjūvio stiprumo skaičiavimas.....	67
2 priedas. Papildomo sluoksnio normalinio pjūvio stiprumo skaičiavimas	70
3 priedas. Sustiprintos konstrukcijos normalinio pjūvio stiprumo skaičiavimai, esant pilnam sukibimui tarp sluoksnių.....	72

Lentelių sąrašas

1 lentelė. M. Rezazadeh'io ir bendraautorių gauti konstrukcijos laikomosios galios padidėjimo rezultatai [2].....	13
2 lentelė. V.T. Silva'os ir bendraautorių gautos šiurkštumų vertės [23].....	19
3 lentelė. Skaičiavimų formulėms išvesti naudojami simboliai.....	23
4 lentelė. Apskaičiuojami simboliai ir jų paaiškinimai.....	24
5 lentelė. Papildomą sluoksnį apibūdinančių parametru skaitinės reikšmės.....	44
6 lentelė. Stiprinamą sluoksnį apibūdinančių parametru skaitinės reikšmės.....	44
7 lentelė. Papildomo sluoksnio ilgalaikių poveikių vertinimui naudojamų parametru skaitinės vertės.....	44
8 lentelė. Stiprinamo sluoksnio ilgalaikių poveikių vertinimui naudojamų parametru skaitinės vertės.....	44
9 lentelė. Apskaičiuotų nekintančių dydžių skaitinės reikšmės.....	44
10 lentelė. Konstrukcijos pleišėjimo momentai.....	45
11 lentelė. Konstrukcijos lenkimo momentų pasiskirstymas tarp sluoksnių pirmo modelio skaičiavimuose.....	47
12 lentelė. Konstrukcijos lenkimo momentų pasiskirstymas tarp sluoksnių antro modelio skaičiavimuose.....	47
13 lentelė. Šlyties jėga tarp sluoksnių skirtinguose plokštės pjūviuose pirmo modelio skaičiavimuose.....	48
14 lentelė. Šlyties jėga tarp sluoksnių skirtinguose plokštės pjūviuose antro modelio skaičiavimuose.....	49
15 lentelė. Konstrukcijos deformacijos, vertinant trumpalaikius poveikius.....	51
16 lentelė. Konstrukcijos deformacijos, vertinant ilgalaikius poveikius.....	51
17 lentelė. Konstrukcijos įtempiai, vertinant trumpalaikius poveikius.....	56
18 lentelė. Konstrukcijos įtempiai, vertinant ilgalaikius poveikius.....	56
19 lentelė. Konstrukcijos įlinkiai ir kreiviai, vertinant trumpalaikius poveikius.....	61
20 lentelė. Konstrukcijos įlinkiai ir kreiviai, vertinant ilgalaikius poveikius.....	61

Paveikslų sąrašas

1 pav. M.R. M. Hosseini'io ir bendraautorių bandymo metu gauti konstrukcijos stiprumo ir įlinkių rezultatai [1].....	13
2 pav. Bandymo schema naudojant anglies pluošto polimerines juostas [3].....	14
3 pav. Stiprinimo schema, naudojant plienines juostas ir kampuočius [8].....	15
4 pav. Eksperimentinių ir analitinių rezultatų palyginimas [8].....	15
5 pav. Keturios skirtingos stiprinimo konfigūracijos: (a) – gniuždomos zonos, (b) – tempiamos zonos, (c) – dviejų pusių, (d) – trijų pusių [10]	16
6 pav. Skirtingos sąveikos tarp sluoksnių įtaka deformacijų pasiskirstymui skerspjūvyje: a) – išilginis jungiamų elementų vaizdas, b) – elementų skerspjūvis, c) – deformacijų pasiskirstymo diagramos [12]	17
7 pav. A. Adawi'io ir bendraautorių gauti šiurkštumo įvertinimo rezultatai [16]	18
8 pav. Bandymai šlyties įtempiams nustatyti: a) – atplėšimo testas, atliekamas laboratorijoje; b) – atplėšimo testas, atliekamas bandinio eksploatavimo vietoje; c) – sukimo testas; d) – pasvirusios šlyties (kirpimo) testas; e), f) – kirpimo testas; g) – pleišto testas; h) – šlyties bandymas [21].....	18
9 pav. V. T. Silva'os ir bendraautorių bandymo metu gauti sukibimo stiprumo rezultatai [22]	19
10 pav. Q. Sun'o ir bendraautorių naudotų bandinių tipai [27]	19
11 pav. Bandinių praslydimo nuo apkrovos kreivės [27]	20
12 pav. Sukibimo įvertinimo diagrama, kai stiprinama konstrukcija iš N2.4 betono. S – papildomai neapdirbtas paviršius, B – apdorotas vielomis, GB – apdirbtas šratais, G – su papildomais grioveliais, R – šiurkštus paviršius, apdirbtas keliais būdais [29].....	20
13 pav. Vidutinės atplėšimo jėgos priklausomybė nuo apkrovimo greičio ir užpildų dydžio [30] ..	21
14 pav. Šlyties įtempių priklausomybė nuo rišamosios medžiagos [31]	21
15 pav. Stiprinamo skerspjūvio schema.....	23
16 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant pilnam praslydimui tarp sluoksnių, pirmo modelio skaičiavimuose	30
17 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant pilnam sukibimui tarp sluoksnių, pirmo modelio skaičiavimuose	31
18 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant daliniam sukibimui, pirmo modelio skaičiavimuose	34
19 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant pilnam praslydimui tarp sluoksnių, antro modelio skaičiavimuose.....	36
20 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant pilnam sukibimui tarp sluoksnių, antro modelio skaičiavimuose.....	37
21 pav. Ašinės jėgos padėtis viso skerspjūvio neutralios ašies atžvilgiu.....	38
22 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant daliniam sukibimui, antro modelio skaičiavimuose	41
23 pav. Konstrukcijos laikomosios galios diagrama.....	45
24 pav. Konstrukcijos pleišėjimo momentų diagrama.....	46
25 pav. Konstrukcijos apkrovimo schema	46
26 pav. Lenkimo momentų M_1 ir M_2 priklausomybė nuo praslydimo deformacijos ϵ_{slip}	48
27 pav. Maksimalios šlyties jėgos tarp sluoksnių T priklausomybė nuo praslydimo deformacijos ϵ_{slip}	49
28 pav. Šlyties jėgos tarp sluoksnių T pasiskirstymo per plokštės ilgį priklausomybė, esant skirtingai praslydimo deformacijai ϵ_{slip} pirmo modelio skaičiavimuose	49

29 pav. Šlyties jėgos tarp sluoksnių T pasiskirstymo per plokštės ilgį priklausomybė, esant skirtingai praslydimio deformacijai ε_{slip} antro modelio skaičiavimuose	50
30 pav. Schema, kurioje pažymėti nagrinėjamų deformacijų taškai.....	51
31 pav. Papildomo sluoksnio viršutinio krašto deformacijos $\varepsilon_{1.1}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	51
32 pav. Papildomo sluoksnio apatinio krašto deformacijos $\varepsilon_{1.2}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	52
33 pav. Stiprinamo sluoksnio viršutinio krašto deformacijos $\varepsilon_{2.1}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	52
34 pav. Stiprinamo sluoksnio apatinio krašto deformacijos $\varepsilon_{2.2}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	53
35 pav. Papildomo sluoksnio armatūros deformacijos $\varepsilon_{As1.2}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	53
36 pav. Stiprinamo sluoksnio viršutinės armatūros deformacijos $\varepsilon_{As2.1}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	54
37 pav. Stiprinamo sluoksnio apatinės armatūros deformacijos $\varepsilon_{As2.2}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	54
38 pav. Schema, kurioje pažymėtos nagrinėjamų įtempių vietos	56
39 pav. Papildomo sluoksnio viršutinio krašto betono įtempių $\sigma_{1.1}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	57
40 pav. Papildomo sluoksnio apatinio krašto betono įtempių $\sigma_{1.2}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	57
41 pav. Stiprinamo sluoksnio viršutinio krašto betono įtempių $\sigma_{2.1}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	58
42 pav. Stiprinamo sluoksnio apatinio krašto betono įtempių $\sigma_{2.2}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	58
43 pav. Papildomo sluoksnio armatūros įtempių $\sigma_{As1.2}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	59
44 pav. Stiprinamo sluoksnio viršutinės armatūros įtempių $\sigma_{As2.1}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	59
45 pav. Stiprinamo sluoksnio apatinės armatūros įtempių $\sigma_{As2.2}$ priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	60
46 pav. Sustiprintos konstrukcijos įlinkio d priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ε_{slip}	62

Įvadas

Darbo aktualumas

Suprojektuoti statiniai visą gyvavimo trukmę nebūna vienos paskirties. Bėgant metams keičiasi jų naudojimo paskirtis, keičiasi projektavimo normos, atsiranda įvairių pažeidimų konstrukcijose. Dėl šių priežasčių dažnai esamų konstrukcijų laikomoji galia nėra pakankama atlaikyti naujai projektuojamas apkrovas ir esamos konstrukcijos turi būti stiprinimos. Yra įvairiausių stiprinimo būdų, tačiau galutinį stiprinimo variantą nulemia daugybė faktorių: kaina, darbų atlikimo trukmė, reikiamas sustiprinimo lygis, patalpų aukštingumas. Šiame darbe yra nagrinėjamas vienas iš paprasčiausių ir pigiausių perdangų stiprinimo būdų – liejant papildomą betono sluoksnį ant stiprinamo betono sluoksnio. Šis būdas reikalauja tikslaus praslydimo, deformacijų ir įtempių tarp sluoksnių pasiskirstymo įvertinimo. Darbe numatoma pateikti sluoksniuotos konstrukcijos skaičiavimo metodiką, įvertinant praslydimą tarp sluoksnių ir gelžbetoninio elemento ilgalaikes deformacijas.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – sudaryti metodiką lenkiamoms gelžbetoninėms konstrukcijoms, sustiprintoms užliejamu betono sluoksniu apskaičiuoti, įvertinant šlyties standumo bei sluoksnių ilgalaikių deformacijų įtaką.

Darbo uždaviniai:

1. apžvelgti lenkiamų gelžbetoninių elementų stiprinimo būdus;
2. palyginti sustiprintos ir nesustiprintos konstrukcijos normalinio pjūvio laikomąją galią ir pleišėjimo momentą, esant skirtingam sukibimui;
3. išanalizuoti, kaip pasiskirsto lenkimo momentai ir šlyties jėgos tarp sluoksnių, praslystant elementams;
4. nustatyti, kaip kinta konstrukcijos deformacijos ir įtempiai, atsirandant praslydimui tarp sluoksnių;
5. nustatyti, kokią įtaką sustiprintos konstrukcijos įlinkiui daro praslydimas tarp sluoksnių.

Mokslinis naujumas

Projektavimo normos, knygos, vadovėliai nepateikia skaičiavimo metodikos, kuri leistų įvertinti įtempių pasiskirstymą gelžbetoninėje sluoksniuotoje konstrukcijoje, įvertinant ilgalaikes deformacijas. Išanalizuotas skaičiavimo metodas padės tiksliau įvertinti tikrąją sluoksniuotos konstrukcijos laikomąją galią.

Praktinė vertė

Ši metodika suteiks galimybę skaičiuoti konstrukcijas tiksliau, įvertinant praslydimą tarp sluoksnių, trumpalaikius ir ilgalaikius poveikius konstrukcijai, o tai padės sumažinti sunaudojamų medžiagų kiekį ir darbų atlikimo trukmę.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Monolitinių perdangų stiprinimo būdai

Perdangoms stiprinti yra išrasta ir išbandyta daugybė stiprinimo būdų. Vieni jų yra efektyvesni, tačiau brangesni, kiti ne tokie efektyvūs ir pigesni, todėl reikia tiksliai nusistatyti, kokį rezultatą po stiprinimo norima gauti. Šiame skyriuje trumpai apžvelgiami perdangų stiprinimo būdai.

1.1.1. Perdangų stiprinimas naudojant anglies pluošto polimerinius strypus

Vienas iš galimų stiprinimo būdų yra gelžbetoninių elementų stiprinimas naudojant iš anksto įtemptus, šalia tempiamo paviršiaus montuojamus anglies pluošto polimerinius strypus. M. R. M. Hosseini'is ir bendraautoriai [1] atliko bandymus su keturiomis, dviem galais atremtomis, plokštėmis, kurios buvo apkrautos dviem koncentruotomis apkrovomis. Bandymo metu nustatyta, jog šiuo stiprinimo būdu įtemptus strypus 20 % maksimalaus tempiamojo stiprio, tinkamumo ribinio būvio apkrovas galima padidinti 55 %, o saugos ribinio būvio apkrovas – 136 %, atitinkamai įtemptus – 40 %, gaunama – 119 % ir 152 %. Nenaudojant išankstinio įtempimo bandytas bandinys atlaikė 24 % didesnes tinkamumo ribinio būvio apkrovas ir 129 % didesnes saugos ribinio būvio apkrovas. Gauti rezultatai pateikti 1-ame paveikslėlyje.

Slab	Service	Yielding		Maximum	
	$F_{serv.}$ (kN)	F_{sy} (kN)	δ_{Fsy} (mm)	F_{max} (kN)	δ_{Fmax} (mm)
SREF	15.89	19.00	14.81	22.60	158.15
S2L-0	19.76	29.52	20.63	51.80	85.90
S2L-20	24.65	35.66	20.16	53.33	63.33
S2L-40	34.76	45.65	17.86	56.90	42.29

1 pav. M.R. M. Hosseini'io ir bendraautorių bandymo metu gauti konstrukcijos stiprumo ir įlinkių rezultatai [1]

M. Rezazadeh'is ir bendraautoriai [2] taip pat atliko tokio tipo bandymą. Gautas laikomosios galios padidėjimas skyrėsi nuo prieš tai aprašyto tyrimo dėl perpus mažesnio įtempiamųjų strypų skerspjūvio ploto, tačiau aiškiai matomas stiprumo padidėjimas. Gautos reikšmės pateiktos 1-oje lentelėje.

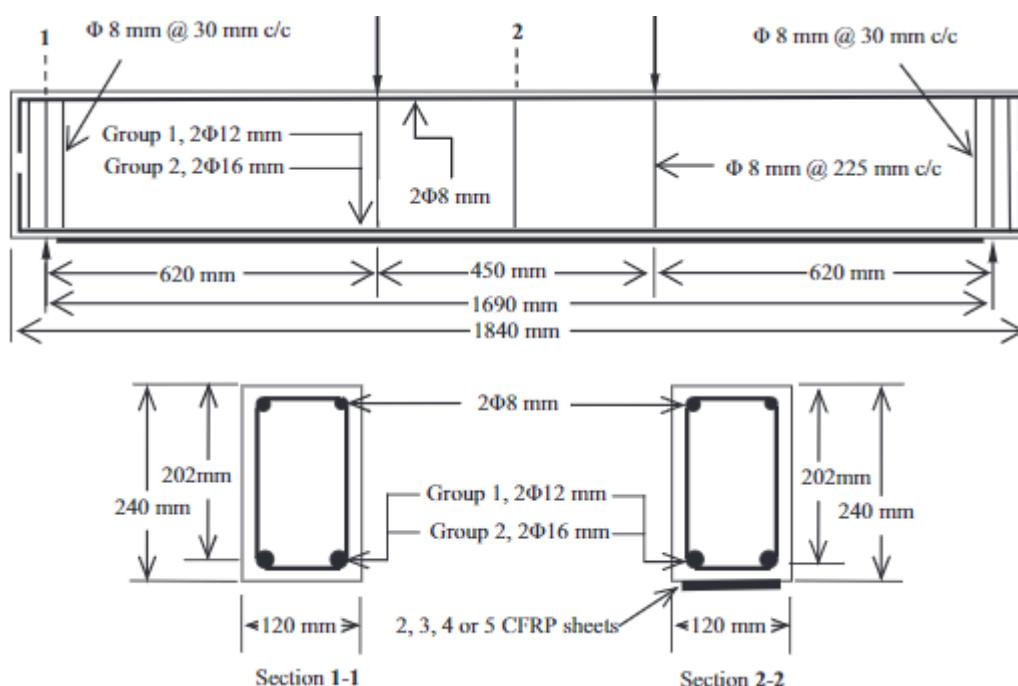
1 lentelė. M. Rezazadeh'io ir bendraautorių gauti konstrukcijos laikomosios galios padidėjimo rezultatai [2]

Bandinys	Stiprumo padidėjimas, % (lyginant su kontroliniu bandiniu)	
	Tinkamumo ribinis būvis	Saugos ribinis būvis
Be išankstinio įtempimo	23	51
Įtemptiant strypus 20 % maksimalaus tempiamojo stiprio	60	52
Įtemptiant strypus 30 % maksimalaus tempiamojo stiprio	66	54
Įtemptiant strypus 40 % maksimalaus tempiamojo stiprio	81	42

Pagal gautus rezultatus akivaizdu, jog stiprinimo būdas yra tikrai naudingas, norint padidinti konstrukcijos stiprumą, o norint papildomai sumažinti įlinkį ir plyšių atsivėrimo tikimybę, yra būtinas ir išankstinis įtempimas.

1.1.2. Sijinių perdangų stiprinimas naudojant anglies pluošto polimerines juostas

Antrasis perdangų stiprinimo būdas yra naudojant anglies pluošto polimerines juostas. Tokio stiprinimo bandymus atliko R. A. Hawileh'as ir bendraautoriai [3]. Jie išbandė trylika bandinių, kurie buvo suskirstyti į tris grupes, priklausomai nuo išilginės armatūros kiekio. Kiekvienas grupės elementas turėjo skirtingą pritvirtintų juostų skaičių. Bandymo schema pavaizduota 2-ame paveikslėlyje. Šio bandymo tikslas buvo nustatyti prie tempiamo sijos krašto pritvirtintos polimerinės juostos įtaką skersinio pjūvio laikomajai galiai, todėl visi bandiniai buvo suformuoti be skersinės armatūros tam, kad suirimas pasireikštų įstrižajame pjūvyje. Bandinį armuojant dviem $\varnothing 12$ mm armatūros strypais ir stiprinant polimerinėmis juostomis, skersinio pjūvio laikomoji galia padidėjo 49–70 %, naudojant du $\varnothing 16$ mm armatūros strypus – 10–31 % ir bandant bandinius be armatūros – 59–65 %. Gauti rezultatai priklauso nuo pritvirtintų juostų skaičiaus.



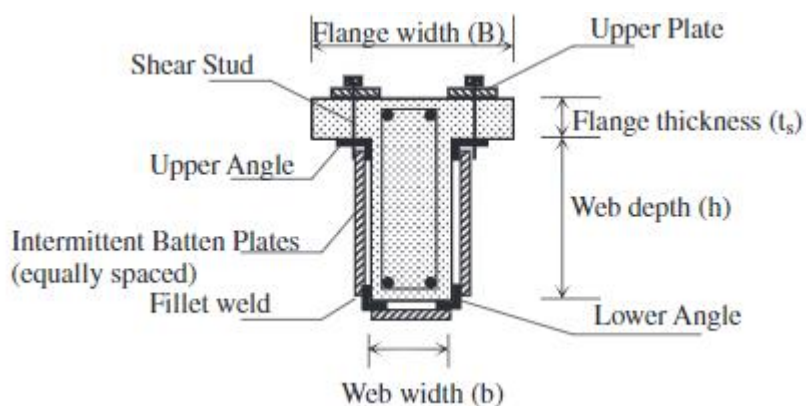
2 pav. Bandymo schema naudojant anglies pluošto polimerines juostas [3]

A. Si Larbi'is ir bendraautoriai [4] atliko skersinio pjūvio laikomosios galios bandymą, naudodami U formos polimerines juostas, išdėstytas tam tikrais atstumais. Tirtu bandinio laikomoji galia padidėjo 1,22 karto. D. J. Oehlers'o ir bendraautorių [5] atlikto bandymo metu buvo tiriama normalinio pjūvio laikomoji galia, kuri padidėjo 1,05–1,52 karto. Tyrime naudota daugiaatramė sija, todėl padidėjimas priklausė nuo apkrovos pridėjimo padėties ir juostų išdėstymo. Kitų tyrėjų [6] atlikto tyrimo metu, tvirtinant vieną sluoksnį anglies pluošto polimerinės juostos, stiprumas padidėjo 1,57 kartus. Tuo tarpu T. El Maaddawy'is ir K. Soudki'io [7] atliktame tyrime laikomoji bandinio galia priklijavus anglies pluošto polimerinę juostą padidėjo 1,46 karto, o dar papildomai ją prisukus varžtais prie bandinio – 1,62 karto. Neklijuojant polimerinės juostos, o tik pritvirtinant mechaniškai (varžtais), laikomoji galia, priklausomai nuo varžtų skaičiaus, padidėjo 1,2–1,43 karto.

Naudojant šį stiprinimo būdą praktiškai neprarandamas patalpos aukštis, tačiau stiprinimo metu reikia užtikrinti gerą sukibimą tarp sluoksnių, priešingu atveju, konstrukcijos suirimas bus trapus, o tai nėra pageidautina.

1.1.3. Sijinių perdangų stiprinimas naudojant plieninius kampuočius ir lakštus

Trečiasis perdangų stiprinimo būdas yra naudojant plieninius kampuočius ir juostas. Tokį stiprinimo būdą tyrė B. Hamad'is ir bendraautoriai [8], tyrime buvo naudoti keturi skirtingi bandiniai. Pirmas bandinys buvo kontrolinis, nesustiprintas jokiais plieniniais profiliais. Kiti bandiniai buvo sustiprinti plieniniais profiliais: antrojo bandinio plieninės juostos išdėstytos kas 300 mm, trečiojo – kas 250 mm ir paskutiniojo – kas 200 mm. Bandymo schema pavaizduota 3-iame paveikslėlyje. Atlikus šį bandymą gauta, jog plieniniais profiliais apkaustyti bandiniai atlaikė 2,5–3,2 karto didesnes apkrovas negu kontrolinis bandinys. Eksperimento rezultatai pateikti 4-ame paveikslėlyje.



3 pav. Stiprinimo schema, naudojant plienines juostas ir kampuočius [8]

Specimen	Experimental values				Analytical values			
	P_y (kN)	A_y (mm)	P_u (kN)	A_u (mm)	P_y (kN)	A_y (mm)	P_u (kN)	A_u (mm)
TS1	26.0	4.3	31	48	27	4.5	–	–
TS2	44.2	7.2	78	70	48	7.4	75	56
TS3	45.0	7.3	81	80	48	7.4	81	74
TS4	52.7	8.1	100	105	48	7.4	94	114

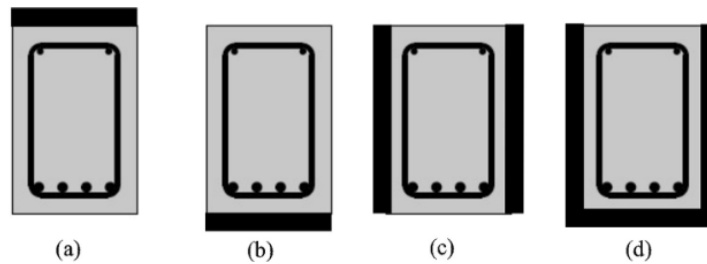
4 pav. Eksperimentinių ir analitinių rezultatų palyginimas [8]

Gauti šio bandymo rezultatai papildomai buvo palyginti su analitiniais skaičiavimais, reikšmės viena nuo kitos skyrėsi apie 10 %. Atlikus bandymą pastebėta, jog plieninių plokštelių žingsnis turi didelę įtaką sijos stiprumui ir elgsenai. Norint, jog plieniniai elementai pasiektų savo takumo ribą, rekomenduojama jomis uždengti bent 40 % sijos skerspjūvio.

S. M. Rakgate'ė ir M. Dundu'us [9] atliko bandymą stiprindami tik tempiamą zoną ištisiniu lakštu. Lakštas prie betono buvo priklijuotas epoksidine derva. Gautas maksimalus lenkimo momentas buvo 4,29–4,67 kartus didesnis nei kontrolinio bandinio.

1.1.4. Perdangų stiprinimas naudojant fibromis armuotą betono sluoksnį

Ketvirtas perdangų stiprinimo būdas yra panaudojant papildomą betono sluoksnį. Naudojant šį būdą yra galimi keturi stiprinimo variantai, jie pateikti 5-ame paveikslėlyje.



5 pav. Keturios skirtingos stiprinimo konfigūracijos: (a) – gniuždomos zonos, (b) – tempiamos zonos, (c) – dviejų pusių, (d) – trijų pusių [10]

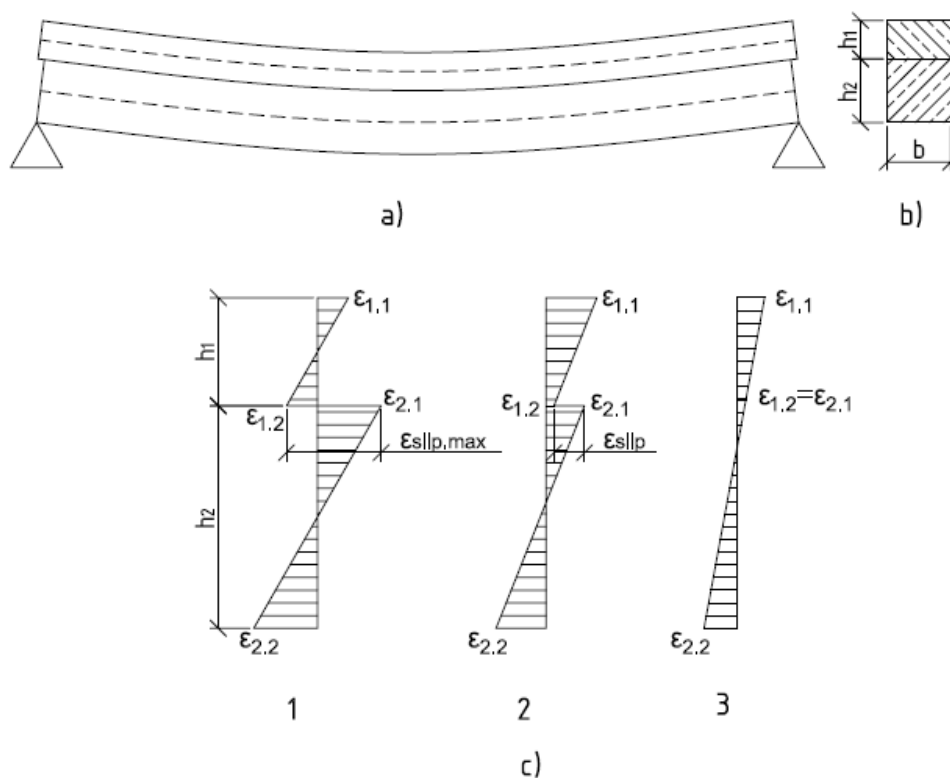
A. P. Lampropoulos'o ir bendraautorių [11] atliktame bandyme buvo naudojami 150×250 mm dydžio bandiniai, sustiprinti papildomu 50 mm storio sluoksniu. Bandymai atlikti po du kartus, naudojant skirtingus betonus. Pirmu atveju naudotas ypač stiprus fibromis armuotas betonas (UHPFRC) ir antru – paprastas betonas. Stiprinant gniuždomą zoną ir naudojant UHPFRC, maksimalus lenkimo momentas padidėjo 28 %, tuo tarpu naudojant įprastą betoną – 22 %. Stiprinant tempiamą zoną, įprastame betone buvo naudoti du $\varnothing 12$ mm armatūros strypai, kurių charakteristinis tempiamasis stipris – 500 MPa. Šiuo atveju maksimalus lenkimo momentas padidėjo 97 %, UHPFRC atveju – 31 %. Stiprinimas trimis kraštais buvo atliktas naudojant tik UHPFRC. Šio bandymo metu gautas 178 % stiprumo padidėjimas.

Y. Zhu'us ir bendraautoriai [10] atliko įvairių tyrėjų atliktų eksperimentų, stiprinant konstrukcijas papildomu betono sluoksniu, palyginimą. Šiame palyginime buvo įtrauktas ir prieš tai aptartas bandymas [11]. Palyginimo metu buvo gauta svarbi išvada, jog rezultatai labai priklauso nuo jungiamųjų paviršių šiurkštumo. Šiurkštesnis betono paviršius padidina sukibimą tarp sluoksnių ir kartu padidėja galutinis konstrukcijos stiprumas.

1.2. Teorinis deformacijų pasiskirstymas kompozitinėje konstrukcijoje

Nagrinėjant gelžbetoninį elementą, kuris yra stiprinamas papildomu betono sluoksniu, galimi trys skaičiavimo variantai. Pirmasis, kai tarp sluoksnių nėra jokio sukibimo ir abu sluoksniai dirba atskirai (žr. 6 pav. c-1). Antrasis, kai tarp sluoksnių yra dalinis sukibimas (žr. 6 pav. c-2) ir trečiasis, kuomet abu sujungti sluoksniai yra standūs ir praslydimo tarp jų nėra (žr. 6 pav. c-3). Antrasis atvejis yra sunkiausiai įvertinamas, tačiau yra tiksliausias.

Praslydimo dydis tarp paviršių priklauso nuo stiprinamo betono sluoksnio ir naujai liejamo betono sluoksnio sukibimo. Pagal Europos standartą *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. Bendrosios ir pastatų taisyklės* [13] betono paviršiai gali būti klasifikuojami į keturias klases: labai lygūs, lygūs, šiurkštūs arba dantyti. Pagal šias kategorijas sąlyginai galima nustatyti praslydimo dydį, tačiau jis nebus labai tikslus. Atsiradus didesniai praslydimui nei leidžiama, įtempiai konstrukcijoje persiskirstys ir jei viršys sukibimo įtempius, jungtis tarp dviejų sluoksnių nutrūks ir jos nebebus galima atstatyti nukrovus konstrukciją, sluoksniai dirbs atskirai [14].



6 pav. Skirtingos sąveikos tarp sluoksnių įtaka deformacijų pasiskirstymui skerspjūvyje: a) – išilginis jungiamų elementų vaizdas, b) – elementų skerspjūvis, c) – deformacijų pasiskirstymo diagramos [12]

1.3. Sukibimo tarp sluoksnių didinimo būdai

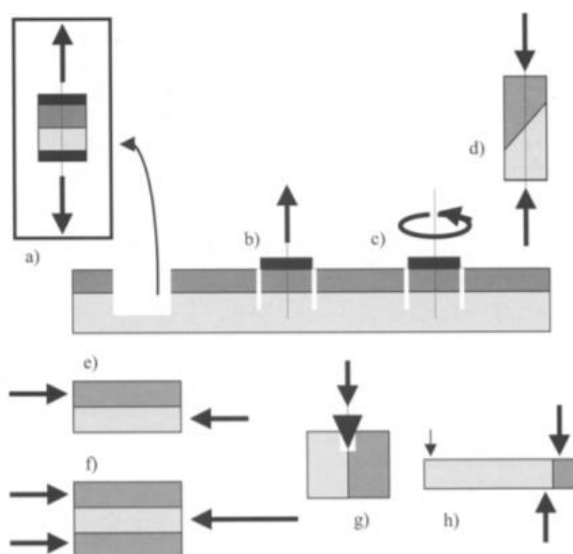
Sukibimas tarp sluoksnių yra labai svarbus aspektas norint, jog konstrukcija būtų standi. I. S. Ibrahim'as ir bendraautoriai [15], atlikę bandymus su kiaurymėtomis perdangos plokštėmis nustatė, kad paviršiaus šiurkštumas yra vienas iš svarbių faktorių, norint pasiekti maksimalius šlyties įtempius tarp sluoksnių. A. Adawi'is ir bendraautoriai [16] atliko bandymą su tokio pat tipo plokštėmis, kurio metu tikrino jų paviršiaus šiurkštumą. Plokštės buvo tiekiamos iš dviejų gamintojų. Naudojamas bandymo metodas, aprašytas ASTM E965 standarte [17]. Jis tinka nustatyti paviršių šiurkštumui, kurio tuštumų gylis ne didesnis kaip 25,4 mm. Bandymo metu tam tikro dydžio stiklo rutuliukai, sukamaisiais judesiais, naudojant kietą plastikinį diską, yra paskleidžiami ant perdangos plokštės. Kai paviršius tampa lygus, atliekami mažiausiai keturi panašaus dydžio apskritimų skersmens matavimai ir vidutinis šiurkštumo gylis gaunamas padalijus panaudotų granulių tūrį iš duobučių ploto. Šiuo bandymu gauti paviršiaus šiurkštumai svyravo nuo 0,106 mm iki 0,353 mm. Rezultatai pateikti 7-ame paveikslėlyje. Gauti šiurkštumai yra maži lyginant su tuo, jog pagal ACI 318M-08 [18] standartą, reikiamas stiprinamos konstrukcijos šiurkštumas turėtų būti apie 6 mm.

Surface roughness evaluation results.

Slab label	Surface roughness (mm)	Average roughness (mm)
PMA1-1	0.341	0.353
PMA1-2	0.360	
SMA1-1	0.351	
SMA1-2	0.361	
FMA2-1	0.325	0.320
FMA2-2	0.314	
FMB2-1	0.320	0.311
FMB2-2	0.297	
FMB2-3	0.315	
FMA3-1	0.314	0.314
PSMA4-1	0.140	0.165
PSMA4-2	0.202	
PSMA4-3	0.152	
PSMB4-1	0.105	0.106
PSMB4-2	0.121	
PSMB4-3	0.093	

7 pav. A. Adawi'o ir bendraautorių gauti šiurkštumo įvertinimo rezultatai [16]

Žinoma, šiurkštumo dydžio nustatymui daug įtakos turi ir nustatymo metodika. Yra įvairiausių šiurkštumo nustatymų būdų: naudojant 9 standartinių betono paviršių pavyzdžius ir juos lyginant su esamu betonu, užklojimo smėliu arba stiklo karoliukais testas, skaitmeninis paviršiaus šiurkštumo matavimas testas, mikroskopinis, ultragarsinis metodas ir kiti [19, 20]. Nuo paviršių šiurkštumo priklauso sukibimas tarp sluoksnių. Galimi sukibimo tarp sluoksnių įvertinimo metodai pateikti 8-ame paveikslėlyje.



8 pav. Bandymai šlyties įtempiams nustatyti: a) – atplėšimo testas, atliekamas laboratorijoje; b) – atplėšimo testas, atliekamas bandinio eksploatavimo vietoje; c) – sukimo testas; d) – pasvirusios šlyties (kirpimo) testas; e), f) – kirpimo testas; g) – pleišto testas; h) – šlyties bandymas [21]

1.3.1. Mechaniniai sukibimo tarp sluoksnių gerinimo būdai

Norint sutaupyti laiko ir pinigų, dažnai yra naudojami patys paprasčiausi ir mažiausiai pastangų reikalaujantys sukibimo pagerinimo būdai. Yra keletas efektyvių būdų, kurie gali pagerinti esamo betono sukibimą su nauju. Tai gali būti: paviršiaus apdirbimas vielomis, šlifavimas, valymas smėlio srove, vandens srove, griovelių betone išdaužymas, smūgiavimas į betoną.

V. T. Silva ir bendraautoriai [22] palygino skirtingais šiurkštavimo metodais šiurkštintų bandinių sukibimą. Buvo išbandyti penki bandiniai, rezultatai pateikti 9-ame paveikslėlyje.

Situations considered	Substrate surface treatment	Bond strength in shear (MPa)
1	As-cast against steel formwork	1.30
2	Wire-brushing	10.67
3	Partially chipped	6.24
4	Partially chipped and pre-wetted	6.64
5	Sand-blasting	14.13

9 pav. V. T. Silva'os ir bendraautorių bandymo metu gauti sukibimo stiprumo rezultatai [22]

Atlikus bandymą pastebėta, jog prieš stiprinimą sudrėkintas bandinys neturi didelės reikšmės sukibimo stiprumui, o didžiausią sukibimą tarp dviejų sluoksnių pavyko pasiekti valant paviršių smėliarove. Tie patys tyrėjai kitame savo straipsnyje aprašė tų pačių bandinių paviršiaus šiurkštumo dydžius, kurie pateikti 2-oje lentelėje.

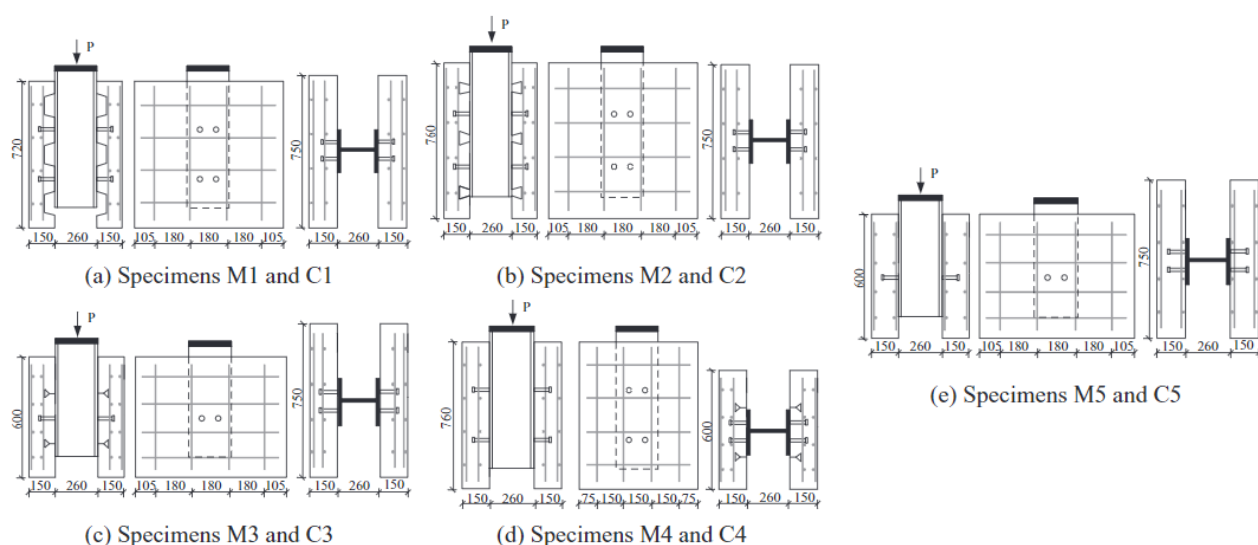
2 lentelė. V.T. Silva'os ir bendraautorių gautos šiurkštumų vertės [23]

Šiurkštumo parametras	Apdirbimo tipas		
	Be apdirbimo	Apdirbimas vielomis	Apdirbimas smėlio srove
Vidutinis šiurkštumų aukštis, mm	0,213	0,403	0,797

Kiti tyrėjai [24, 25, 26] taip pat atliko panašius bandymus ir rezultatas buvo gautas tas pats – geriausias sukibimas pasiekiamas naudojant smėliarovę.

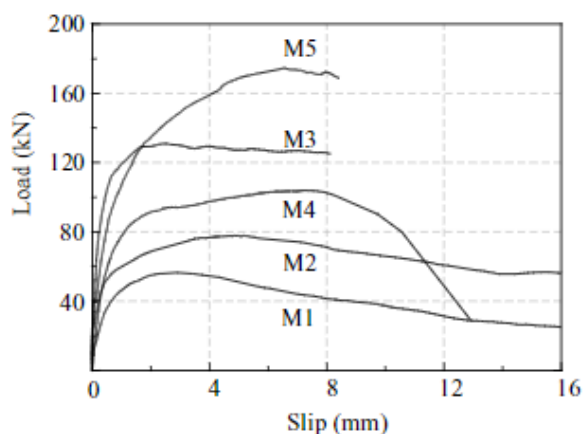
1.3.2. Sukibimo tarp sluoksnių pagerinimas naudojant plieninius strypus

Q. Sun'as ir bendraautoriai [27] atliko bandymus su profiliuotu plieniniu paklotu ir monolitine plokšte ant jo. Siekiant užtikrinti bendrą elementų darbą buvo naudojami inkariniai strypai, kurie virinami prie dvitėjinio profilio. Išbandyta 10 bandinių, 5-ios grupės po du bandinius. Kiekvienos grupės bandinys turėjo skirtingo tipo profiliuotą paklotą. Bandinių pavyzdžiai pateikti 10-ame paveikslėlyje.



10 pav. Q. Sun'o ir bendraautorių naudotų bandinių tipai [27]

Bandymo rezultatai parodė, kad banguotas pakloto paviršius nereiškia, kad praslydimas bus mažesnis. Priklausomai nuo pakloto formos, įtempiai, tenkantys strypui, pasiskirsto skirtingai, ir jį skirtingai lenkia. Praslydimo priklausomybė nuo apkrovų pateikta 11-ame paveikslėlyje.

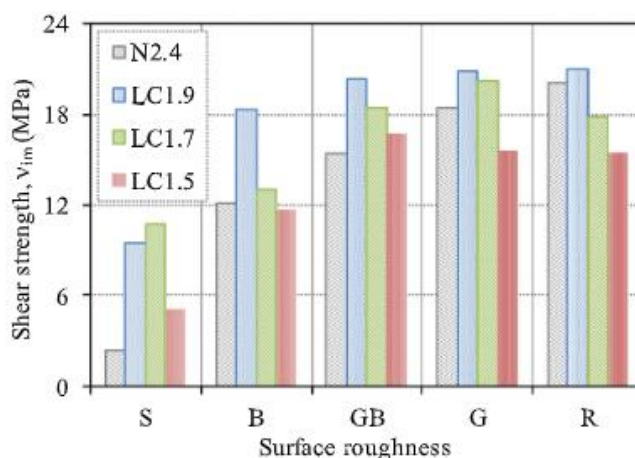


11 pav. Bandinių praslydimo nuo apkrovos kreivės [27]

Tokį sukibimo pagerinimo būdą galima naudoti ir gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimui. Kai neužtenka sukibimo tarp paviršių, stiprinamo betono paviršiuje yra gręžiamos skylės, jose statomi cheminiai inkarai ir užliejamas papildomas betono sluoksnis. Taip ženkliai padidinamas sukibimas tarp sluoksnių [28].

1.3.3. Sukibimo tarp sluoksnių priklausomybė nuo betono rūšies

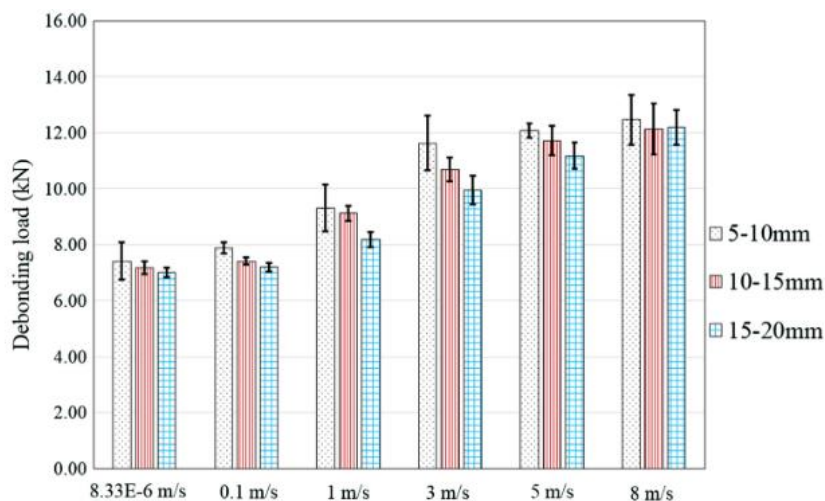
H. Costa ir bendraautoriai [29] pabandė palyginti, kaip kinta sukibimas priklausomai nuo naudojamo betono sluoksnio. Atliekant bandymą, kaip pagrindinis sluoksnis buvo naudotas normalaus sunkumo betonas, kurio tankis 2350 kg/m^3 (N2.4) ir jis buvo šiurkštinamas įvairiais metodais. Papildomam sluoksniui buvo naudoti skirtingi variantai: toks pat betonas kaip ir stiprinamo sluoksnio (N2.4); lengvas betonas, kurio tankis 1900 kg/m^3 (LC1.9); lengvas betonas, kurio tankis 1700 kg/m^3 (LC1.7); lengvas betonas, kurio tankis 1500 kg/m^3 (LC1.5). Gauti sukibimo įtempiai pateikti 12-ame paveikslėlyje.



12 pav. Sukibimo įvertinimo diagrama, kai stiprinama konstrukcija iš N2.4 betono. S – papildomai neapdirbtas paviršius, B – apdorotas vielomis, GB – apdirbtas šratais, G – su papildomais grioveliais, R – šiurkštus paviršius, apdirbtas keliais būdais [29]

Bandymu gauta, jog tam tikrais atvejais, naudojant smėlbetonį vietoje normalaus betono, galima pasiekti didesnius sukibimo įtempius. Visais atvejais su lengvu betonu (LC1.9) buvo gauti geresni sukibimo įtempiai.

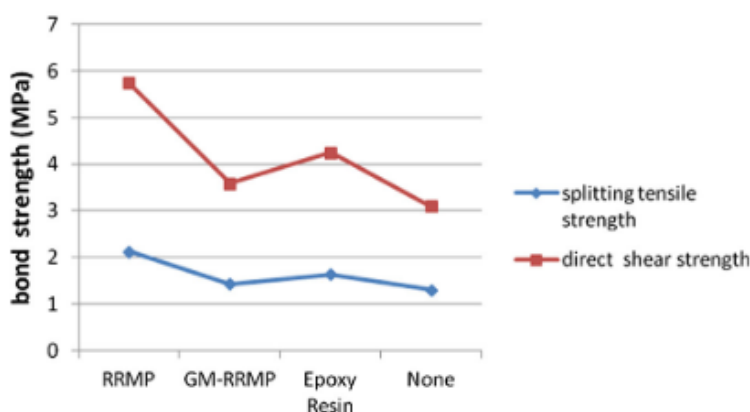
Kitų tyrėjų [30] atliktų tyrimų metu pastebėta, jog ir esamo (stiprinamo) betono užpildų dydis daro įtaką sukibimo stiprumui. Esant mažesnio dydžio užpildams betone, sukibimas yra šiek tiek didesnis. Rezultatai pateikti 13-ame paveikslėlyje.



13 pav. Vidutinės atplėšimo jėgos priklausomybė nuo apkrovimo greičio ir užpildų dydžio [30]

1.3.4. Sukibimo tarp sluoksnių pagerinimas naudojant papildomas rišamąsias medžiagas

X. Weng'as ir bendraautoriai [31] atliko tyrimus tarp stiprinamo ir papildomo betono sluoksnio naudodami papildomas rišamąsias medžiagas. Iš viso buvo atlikti keturi skirtingi bandymai. Vienas iš jų, kai tarp sluoksnių nėra jokios rišamosios medžiagos ir trys bandymai su papildoma rišamąja medžiaga, tokia kaip: greitai kietėjantis remontinis mišinys (RRMP), polivinilformaldehido pagrindu modifikuotas greitai kietėjantis remontinis mišinys (GM-RRMP) ir epoksidinė derva (Epoxy Resin). Šlyties įtempių priklausomybė pateikta 14-ame paveikslėlyje.



14 pav. Šlyties įtempių priklausomybė nuo rišamosios medžiagos [31]

Pagal atliktą eksperimentą galima pastebėti, jog naudojant papildomą rišamąją medžiagą, sukibimo įtempiai gali padidėti 1,1–1,8 karto.

1.4. Literatūros apžvalgos išvados

Atlikus literatūros apžvalgą rasta įvairių perdangos konstrukcijų stiprinimo ir sukibimą pagerinančių būdų. Įsitikinta, jog stiprinant konstrukcijas papildomu betono sluoksniu, praslydimas tarp jų yra svarbus veiksnys, nulemiantis konstrukcijos standumą ir laikomąją galią. Tačiau tuo pat metu pastebėta, jog nėra pateikiami nei laboratoriniai bandymai, nei tiksli skaičiavimo metodika, kuri leistų analitiškai analizuoti įtempių pasiskirstymą tarp dviejų betono sluoksnių, įvertinant šlyties tarp jų ir betono ilgalaikių deformacijų įtaką. Todėl būtina sudaryti skaičiavimo metodiką, kuri leistų tai įvertinti.

2. Analitiniai skaičiavimai

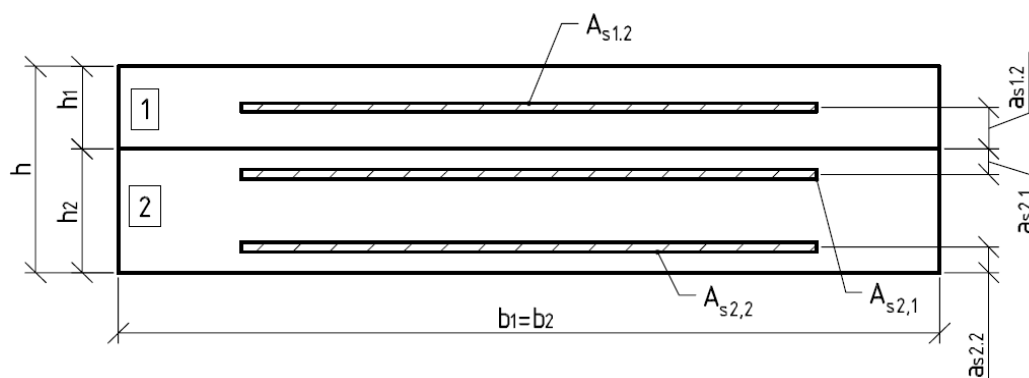
Skaičiavimuose nagrinėjamas monolitinės plokštės stiprinimo uždavinys. Stiprinimas atliekamas liejant papildomą betono sluoksnį ant stiprinamos gelžbetoninės plokštės viršaus. Analitiniai skaičiavimai atliekami dviem skirtingais laiko momentais, kiekviename jų yra keičiamas sukibimas tarp sluoksnių ir analizuojami gauti rezultatai bei sukibimo įtaka jiems. Skaičiavimuose priimama, jog konstrukcija prieš stiprinimą yra išramstoma tam, kad užliejus papildomą betono sluoksnį stiprinamoje konstrukcijoje neatsirastų pradinės deformacijos.

Pirmas skaičiavimo modelis išvedamas įvertinant tik trumpalaikius poveikius (nevertinami ilgalaikiai poveikiai). Pasirenkama, kad stiprinimo metu stiprinamai konstrukcijai yra 50 metų, o papildomas betono sluoksnis yra po 28 kietėjimo parų. Šiame skaičiavime įvertinamas tik išorinių apkrovų sukeltas lenkimo momentas.

Pirmas skaičiavimo modelis yra palyginamas su antru skaičiavimo modeliu, kuriame įvertinamas ilgalaikių deformacijų poveikis sustiprintai konstrukcijai. Antro modelio skaičiavimai atliekami pasirenkant, jog stiprinamo sluoksnio amžius yra 70 metų, o papildomo sluoksnio – 20 metų. Šio modelio skaičiavimuose konstrukcijos amžius yra 20 metų didesnis nei pirmajame skaičiavimo modelyje. Šiame skaičiavime, be konstrukciją veikiančio išorinio lenkimo momento, tampriam elementui papildomai pridedama ašinė jėga svorio centre, kuri atitinkanti traukumo sukeltą deformaciją. Skaičiuojant įtempius, įtempių dalis nuo pridėtos ašinės jėgos yra eliminuojama, taip gaunami tikrieji įtempiai.

2.1. Pradiniai duomenys

Skaičiavimams atlikti pasirinkta 1-o metro pločio, stačiakampio skerspjūvio, monolitinės perdangos dalis (elemento indeksas – 2), kuri stiprinama papildomu betono sluoksniu (elemento indeksas – 1). Stiprinamo skerspjūvio schema pavaizduota 15-ame paveikslėlyje.



15 pav. Stiprinamo skerspjūvio schema

3 lentelė. Skaičiavimų formulėms išvesti naudojami simboliai

Simbolis	Apibūdinimas
Papildomas betono sluoksnis	
h_1	Skerspjūvio aukštis
b_1	Skerspjūvio plotis
$f_{ck,1}$	Cilindrinis gniuždomasis 28 dienų betono stipris

Simbolis	Apibūdinimas
$f_{cm.1}$	Vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris
$E_{cm.1}$	Kirstinis betono tamprumo modulis
\varnothing_1	Armatūros diametras
n_1	Armatūros strypų skaičius 1-ame metre plokštės
$a_{s1.2}$	Atstumas nuo armatūros centro iki papildomo sluoksnio skerspjūvio apačios
E_s	Armatūros tamprumo modulis
Stiprinamas betono sluoksnis	
h_2	Skerspjūvio aukštis
b_2	Skerspjūvio plotis
$f_{ck.2}$	Cilindrinis gniuždomasis 28 dienų betono stipris
$f_{cm.2}$	Vidutinis betono cilindrinis gniuždomasis stipris
$E_{cm.2}$	Kirstinis betono tamprumo modulis
$\varnothing_{2.1}$	Viršutinės armatūros diametras
$n_{2.1}$	Viršutinės armatūros strypų skaičius 1-ame metre plokštės
$a_{s2.1}$	Atstumas nuo viršutinės armatūros centro iki stiprinamo sluoksnio skerspjūvio viršaus
$\varnothing_{2.2}$	Apatinės armatūros diametras
$n_{2.2}$	Apatinės armatūros strypų skaičius 1-ame metre plokštės
$a_{s2.2}$	Atstumas nuo apatinės armatūros centro iki stiprinamo sluoksnio skerspjūvio apačios
E_s	Armatūros tamprumo modulis
Papildomi dydžiai	
RH	Aplinkos drėgnis
$t_{0.1}$	Papildomo sluoksnio betono amžius dienomis, apkrovimo metu
$t_{0.2}$	Stiprinamo sluoksnio betono amžius dienomis, apkrovimo metu
t_1	Papildomo sluoksnio betono amžius (dienomis) nagrinėjamo laiko momentu
$t_{2.50}, t_{2.70}$	Stiprinamo sluoksnio betono amžius (dienomis) nagrinėjamo laiko momentu (50 ir 70 metų)
$t_{s.1}$	Papildomo sluoksnio betono amžius (dienomis) džiūstamojo traukimo (arba brinkimo) pradžioje. Paprastai tai yra apdorojimo pabaigoje
$t_{s.2.50}, t_{s.2.70}$	Stiprinamo sluoksnio betono amžius (dienomis) džiūstamojo traukimo (arba brinkimo) pradžioje. Paprastai tai yra apdorojimo pabaigoje
$\alpha_{ds1}, \alpha_{ds2}$	Koeficientai, priklausantys nuo cemento rūšies
f_{cm0}, RH_0	Papildomi reikalingi dydžiai

4 lentelė. Apskaičiuojami simboliai ir jų paaiškinimai

Simbolis	Apibūdinimas
$\varepsilon_{1.1}, \sigma_{1.1}$	Papildomo sluoksnio viršutinio krašto deformacija ir įtempis
$\varepsilon_{As1.2}, \sigma_{As1.2}$	Papildomo sluoksnio armatūros deformacija ir įtempis
$\varepsilon_{1.2}, \sigma_{1.2}$	Papildomo sluoksnio apatinio krašto deformacija ir įtempis
$\varepsilon_{2.1}, \sigma_{2.1}$	Stiprinamo sluoksnio viršutinio krašto deformacija ir įtempis
$\varepsilon_{As2.1}, \sigma_{As2.1}$	Stiprinamo sluoksnio viršutinės armatūros deformacija ir įtempis
$\varepsilon_{As2.2}, \sigma_{As2.2}$	Stiprinamo sluoksnio apatinės armatūros deformacija ir įtempis

Simbolis	Apibūdinimas
$\varepsilon_{2.2}, \sigma_{2.2}$	Stiprinamo sluoksnio apatinio krašto deformacija ir įtempis

2.2. Ilgalaikių deformacijų vertinimas

Stiprinamos perdangos plokštės ir papildomo sluoksnio ilgalaikės deformacijos vertinamos pagal Europos standartą *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. Bendrosios ir pastatų taisyklės* [13]. Analizė atliekama dviem atvejais.

Pirmajame skaičiavime traukumo deformacijos abiejuose sluoksniuose yra pasirenkamos lygios nuliui, kadangi sukibimo tarp sluoksnių beveik nėra ir nagrinėjamas laiko periodas yra labai trumpas. Valkšnumas papildomame sluoksnyje dar nėra pasireiškęs, o stiprinamo sluoksnio yra įvertinamas. Atitinkamai papildomam sluoksniui yra naudojamas pradinis liestinis tamprumo modulis, o stiprinamam sluoksniui yra apskaičiuojamas efektyvusis betono tamprumo modulis, įvertinant valkšnumą po 50-ies metų.

Antrajame skaičiavime vertinamos tiek traukumo, tiek valkšnumo deformacijos abiem sluoksniams. Traukumo deformacijos papildomam sluoksniui yra vertinamos 20-ies metų laikotarpyje, pradedant skaičiuoti nuo betono išpylimo. Stiprinamo sluoksnio traukumo deformacijos vertinamos laikotarpyje nuo 50-ies iki 70-ies jo gyvavimo metų. Norint tai įvertinti reikia: 1. paskaičiuoti traukumo deformaciją, kai betonas yra 70-ies metų senumo; 2. paskaičiuoti traukumo deformaciją, kai betonas yra 50-ies metų senumo; 3. paimti šių deformacijų skirtumą. Valkšnumo koeficientas papildomam sluoksniui skaičiuojamas po 20-ies metų, o stiprinamam sluoksniui po 70-ies metų.

2.2.1. Valkšnumo koeficiento skaičiavimas

Šiame skyriuje pateikiamos bendros valkšnumo koeficiento apskaičiavimo formulės. Kiekvienu atveju skaičiuojant reikėtų naudoti skirtingus sluoksnių parametrus.

Nagrinėjamo sluoksnio skerspjūvio plotas (vertinamas tik betonas):

$$A_c = b \cdot h. \quad (2.2.1.1)$$

Su aplinka turinčio sąlytį elemento perimetras (kiekvienam atveju kraštinių skaičių konkrečiam sluoksniui reikia tikslinti):

$$u = b + 2 \cdot h. \quad (2.2.1.2)$$

Tariamasis elemento dydis:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u}. \quad (2.2.1.3)$$

Betono stiprio įtakos įvertinimo koeficientai (čia f_{cm} – [MPa]):

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,7}; \quad (2.2.1.4)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,2}; \quad (2.2.1.5)$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,5}. \quad (2.2.1.6)$$

Koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į drėgnio įtaką tariamajam valkšnumo koeficientui:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}}, \text{ kai } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}; \quad (2.2.1.7)$$

$$\varphi_{RH} = \left(1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1\right) \cdot \alpha_2, \text{ kai } f_{cm} > 35 \text{ MPa}. \quad (2.2.1.8)$$

Koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į betono stiprio įtaką tariamajam valkšnumo koeficientui:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}. \quad (2.2.1.9)$$

Koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į apkrovos veikiamo betono amžiaus įtaką tariamajam valkšnumo koeficientui:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + (t_0)^{0,2})}. \quad (2.2.1.10)$$

Tariamasis valkšnumo koeficientas:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0). \quad (2.2.1.11)$$

Nuo drėgnio (RH , %) ir elemento tariamojo dydžio (h_0 , mm) priklausantis koeficientas:

$$\beta_H = 1,5 \cdot (1 + (0,012 \cdot RH)^{18}) \cdot h_0 + 250 \leq 1500, \text{ kai } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}; \quad (2.2.1.12)$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot (1 + (0,012 \cdot RH)^{18}) \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3, \text{ kai } f_{cm} > 35 \text{ MPa}. \quad (2.2.1.13)$$

Koeficientas, apibūdinantis valkšnumo plėtrą per laiką po apkrovimo. Jis apytiksliai apskaičiuojamas pagal šią lygtį:

$$\beta_c(t, t_0) = \left(\frac{(t-t_0)}{(\beta_H + t - t_0)}\right)^{0,3}. \quad (2.2.1.14)$$

Valkšnumo koeficientas:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0). \quad (2.2.1.15)$$

Pradinis liestinis tamprumo modulis:

$$E_c = 1,05 \cdot E_{cm}. \quad (2.2.1.16)$$

Efektyvusis betono tamprumo modulis:

$$E = \frac{E_c}{1 + \varphi(t, t_0)}. \quad (2.2.1.17)$$

2.2.2. Traukumo deformacijų skaičiavimas

Šiame skyriuje pateikiamos bendros traukumo deformacijų apskaičiavimo formulės. Kiekvienu atveju skaičiuojant reikėtų naudoti skirtingus sluoksnių parametrus.

Skaičiavimams reikalingas papildomas dydis:

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left(1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right). \quad (2.2.2.1)$$

Pagrindinė traukioji santykinė deformacija dėl džiūvimo:

$$\varepsilon_{cd.0} = 0,85 \cdot \left((220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm.1}}{f_{cm0}}\right) \right) \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}. \quad (2.2.2.2)$$

Skaičiavimams reikalingas papildomas dydis:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s)+0,04 \cdot \sqrt{(h_0)^2}}. \quad (2.2.2.3)$$

Traukioji santykinė deformacija:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd.0}. \quad (2.2.2.4)$$

Nuo tariamojo dydžio h_0 priklausantis koeficientas k_h , randamas interpoliavimo būdu pagal standarto *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. Bendrosios ir pastatų taisyklės 3.3* lentelę [13].

Papildomi reikiami dydžiai savaiminio traukumo deformacijai rasti:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}; \quad (2.2.2.5)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5}). \quad (2.2.2.6)$$

Savaiminio traukumo deformacija:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty). \quad (2.2.2.7)$$

Bendroji traukumo deformacija:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd}(t) + \varepsilon_{ca}(t). \quad (2.2.2.8)$$

Tikroji traukumo deformacija įvertinus tai, jog armatūra suvaržo betono traukumą:

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot E \cdot (A_c - A_s)}{E \cdot (A_c - A_s) + E_s \cdot A_s}; \quad (2.2.2.9)$$

čia A_s – suminis nagrinėjamo sluoksnio armatūros skerspjūvio plotas.

Elementą tariamai veikianti ašinė jėga nuo ilgalaikių deformacijų:

$$N = E \cdot \varepsilon_{sc} \cdot A_c. \quad (2.2.2.10)$$

2.3. Efektyvieji skerspjūvio parametrai

Abiem skaičiavimo atvejais efektyvieji skerspjūvio parametrai apskaičiuojami identišškai. Skiriasi tik betono tamprumo moduliai, kuriuos reikia naudoti. Skaičiuojant konstrukciją pirmuoju atveju, papildomam betono sluoksniui yra naudojamas pradinis liestinis tamprumo modulis. Visų kitų

skaičiavimų metu yra naudojami efektyvieji betono tamprumo moduliai, apskaičiuoti tam tikrais laiko momentais.

2.3.1. Papildomo sluoksnio (indeksas – 1) efektyvieji skerspjūvio parametrai

Armatūros tamprumo modulio redukcijos koeficientas pirmo sluoksnio atžvilgiu:

$$\alpha_{s,1} = \frac{E_s}{E_1}. \quad (2.3.1.1)$$

Pirmo sluoksnio efektyvusis skerspjūvio plotas:

$$A_{eff,1} = b_1 \cdot h_1 + (a_{s,1} - 1) \cdot A_{s1,2}. \quad (2.3.1.2)$$

Pirmo sluoksnio efektyvusis skerspjūvio statinis momentas šio sluoksnio apačios atžvilgiu:

$$S_{eff,1} = b_1 \cdot h_1 \cdot \frac{h_1}{2} + (a_{s,1} - 1) \cdot A_{s1,2} \cdot a_{s1,2}. \quad (2.3.1.3)$$

Pirmo sluoksnio neutraliosios ašies padėtis:

$$y_{eff,1} = \frac{S_{eff,1}}{A_{eff,1}}. \quad (2.3.1.4)$$

Pirmo sluoksnio efektyvusis inercijos momentas:

$$I_{eff,1} = \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + b_1 \cdot h_1 \cdot \left(y_{eff,1} - \frac{h_1}{2}\right)^2 + (a_{s,1} - 1) \cdot A_{s1,2} \cdot (y_{eff,1} - a_{s1,2})^2. \quad (2.3.1.5)$$

Pirmo sluoksnio viršutinio krašto efektyvusis atsparumo momentas:

$$W_{eff,top,1} = \frac{I_{eff,1}}{h_1 - y_{eff,1}}. \quad (2.3.1.6)$$

Pirmo sluoksnio apatinio krašto efektyvusis atsparumo momentas:

$$W_{eff,bot,1} = \frac{I_{eff,1}}{y_{eff,1}}. \quad (2.3.1.7)$$

Atstumas nuo pirmo sluoksnio neutralios ašies iki jo skerspjūvio viršaus:

$$e_{1,1} = h_1 - y_{eff,1}. \quad (2.3.1.8)$$

Atstumas nuo pirmo sluoksnio neutralios ašies iki jo skerspjūvio apačios:

$$e_{1,2} = y_{eff,1}. \quad (2.3.1.9)$$

2.3.2. Stiprinamo sluoksnio (indeksas – 2) efektyvieji skerspjūvio parametrai

Armatūros tamprumo modulio redukcijos koeficientas antro sluoksnio atžvilgiu:

$$\alpha_{s,2} = \frac{E_s}{E_2}. \quad (2.3.2.1)$$

Antro sluoksnio efektyvusis skerspjūvio plotas:

$$A_{eff.2} = b_2 \cdot h_2 + (a_{s.2} - 1) \cdot A_{s2.1} + (a_{s.2} - 1) \cdot A_{s2.2}. \quad (2.3.2.2)$$

Antro sluoksnio efektyvusis skerspjūvio statinis momentas šio sluoksnio apačios atžvilgiu:

$$S_{eff.2} = b_2 \cdot h_2 \cdot \frac{h_2}{2} + (a_{s.2} - 1) \cdot A_{s2.1} \cdot (h_2 - a_{s2.1}) + (a_{s.2} - 1) \cdot A_{s2.2} \cdot a_{s2.2}. \quad (2.3.2.3)$$

Antro sluoksnio neutraliosios ašies padėtis:

$$y_{eff.2} = \frac{S_{eff.2}}{A_{eff.2}}. \quad (2.3.2.4)$$

Antro sluoksnio efektyvusis inercijos momentas:

$$I_{eff.2} = \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + b_2 \cdot h_2 \cdot \left(y_{eff.2} - \frac{h_2}{2} \right)^2 + (a_{s.2} - 1) \cdot A_{s2.1} \cdot \left(h_2 - y_{eff.2} - a_{s2.1} \right)^2 + (a_{s.2} - 1) \cdot A_{s2.2} \cdot \left(y_{eff.2} - a_{s2.1} \right)^2. \quad (2.3.2.5)$$

Antro sluoksnio viršutinio krašto efektyvusis atsparumo momentas:

$$W_{eff.top.2} = \frac{I_{eff.2}}{h_2 - y_{eff.2}}. \quad (2.3.2.6)$$

Antro sluoksnio apatinio krašto efektyvusis atsparumo momentas:

$$W_{eff.bot.2} = \frac{I_{eff.2}}{y_{eff.2}}. \quad (2.3.2.7)$$

Atstumas nuo antro sluoksnio neutralios ašies iki jo skerspjūvio viršaus:

$$e_{2.1} = h_2 - y_{eff.2}. \quad (2.3.2.8)$$

Atstumas nuo antro sluoksnio neutralios ašies iki jo skerspjūvio apačios:

$$e_{2.2} = y_{eff.2}. \quad (2.3.2.9)$$

2.3.3. Efektyvieji skerspjūvio parametrai, kai elementas yra pilnai standus

Armatūros tamprumo modulio redukcijos koeficientas pirmo sluoksnio atžvilgiu:

$$\alpha_{s.1} = \frac{E_s}{E_1}. \quad (2.3.3.1)$$

Antro sluoksnio tamprumo modulio redukcijos koeficientas pirmo sluoksnio atžvilgiu:

$$\alpha_{2.1} = \frac{E_2}{E_1}. \quad (2.3.3.2)$$

Efektyvusis skerspjūvio plotas:

$$A_{eff} = b_1 \cdot h_1 + \alpha_{2.1} \cdot b_2 \cdot h_2 + (a_{s.1} - 1) \cdot A_{s1.2} + (a_{s.1} - \alpha_{2.1}) \cdot A_{s2.1} + (a_{s.1} - \alpha_{2.1}) \cdot A_{s2.2}. \quad (2.3.3.3)$$

Efektvusis skerspjūvio statinis momentas skerspjūvio apačios atžvilgiu:

$$S_{eff} = b_1 \cdot h_1 \cdot \left(h_2 + \frac{h_1}{2} \right) + \alpha_{2.1} \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot \frac{h_2}{2} + (a_{s.1} - 1) \cdot A_{s1.2} \cdot (h_2 + a_{s1.2}) + (a_{s.1} - \alpha_{2.1}) \cdot A_{s2.1} \cdot (h_2 - a_{s2.1}) + (a_{s.1} - \alpha_{2.1}) \cdot A_{s2.2} \cdot a_{s2.2}. \quad (2.3.3.4)$$

Neutraliosios ašies padėtis:

$$y_{eff} = \frac{S_{eff}}{A_{eff}}. \quad (2.3.3.5)$$

Efektvusis inercijos momentas:

$$I_{eff} = \frac{b_1 \cdot (h_1)^3}{12} + b_1 \cdot h_1 \cdot \left(h - y_{eff} - \frac{h_1}{2} \right)^2 + \alpha_{2.1} \cdot \frac{b_2 \cdot (h_2)^3}{12} + \alpha_{2.1} \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot \left(y_{eff} - \frac{h_2}{2} \right)^2 + (a_{s.1} - 1) \cdot A_{s1.2} \cdot (h_2 - y_{eff} + a_{s1.2})^2 + (a_{s.1} - \alpha_{2.1}) \cdot A_{s2.1} \cdot (h_2 - y_{eff} - a_{s2.1})^2 + (a_{s.1} - \alpha_{2.1}) \cdot A_{s2.2} \cdot (y_{eff} - a_{s2.2})^2. \quad (2.3.3.6)$$

Atstumas nuo standaus elemento neutraliosios ašies iki papildomo sluoksnio neutraliosios ašies:

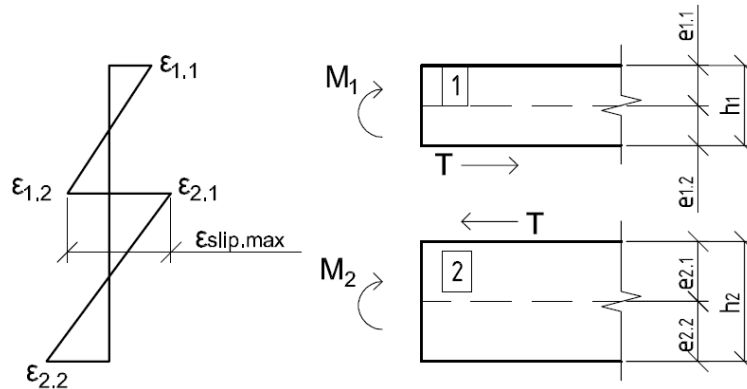
$$e_{0.1} = |h - y_{eff} - e_{1.1}|. \quad (2.3.3.7)$$

Atstumas nuo standaus elemento neutraliosios ašies iki stiprinamo sluoksnio neutraliosios ašies:

$$e_{0.2} = |y_{eff} - e_{2.2}|. \quad (2.3.3.8)$$

2.4. Pirmasis skaičiavimo modelis

2.4.1. Maksimalios praslydimo deformacijos radimas, kai tarp sluoksnių nėra sukibimo



16 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant pilnam praslydimui tarp sluoksnių, pirmo modelio skaičiavimuose

Apskaičiavus efektyviusius skerspjūvio parametrus yra išvedama lygtis maksimaliai galimai praslydimo deformacijai tarp sluoksnių rasti, kai tarp jų nėra jokios sukibimo jėgos. Kadangi linkstant dviem elementams jų kreiviai yra vienodi, o išorinis lenkimo momentas pasiskirsto abiem sluoksniams, tai galima parašyti lygčių sistemą, susidedančią iš dviejų lygčių ir dviejų nežinomųjų:

$$(1) \left(\frac{1}{r} \right)_I = \frac{M_1}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \left(\frac{1}{r} \right)_{II} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.4.1.1)$$

$$(2) M = M_1 + M_2. \quad (2.4.1.2)$$

Sprendžiama lygčių sistema, iš 2.4.1.2 formulės išreiškiamas dydis M_1 ir įstatomas į 2.4.1.1 formulę:

$$M_1 = M - M_2; \quad (2.4.1.3)$$

$$\frac{M - M_2}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_{eff.2}}. \quad (2.4.1.4)$$

Iš lygties 2.4.1.4 išreiškiamas dydis M_2 :

$$\frac{M}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{M_2}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.4.1.5)$$

$$\frac{M}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{M_2}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M_2 \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + M_2 \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M_2 \cdot (E_1 \cdot I_{eff.1} + E_2 \cdot I_{eff.2})}{E_2 \cdot I_{eff.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}; \quad (2.4.1.6)$$

$$M_2 = \frac{M \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}}. \quad (2.4.1.7)$$

Išsprendus lygčių sistemą gauname, kokio dydžio lenkimo momentą perima kiekvienas sluoksnis. Turint kiekvienam sluoksniui tenkantį lenkimo momentą galima apskaičiuoti ir sluoksnių deformacijas:

$$\varepsilon_{1.1} = -\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.top.1}}; \quad (2.4.1.8)$$

$$\varepsilon_{1.2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}}; \quad (2.4.1.9)$$

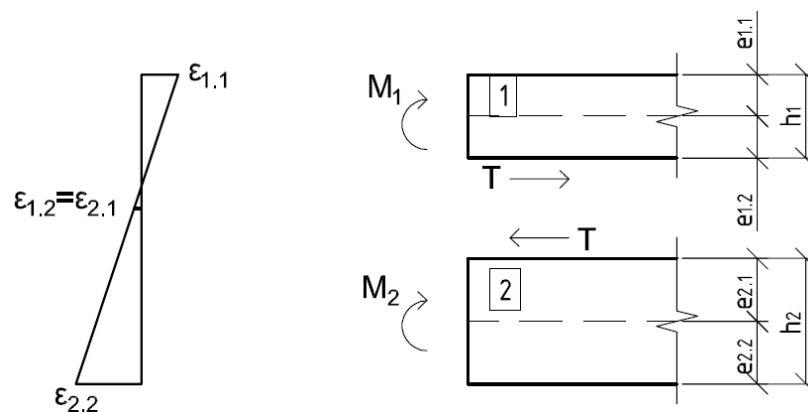
$$\varepsilon_{2.1} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}}; \quad (2.4.1.10)$$

$$\varepsilon_{2.2} = \frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.bot.2}}. \quad (2.4.1.11)$$

Maksimali praslydimo deformacija tarp sluoksnių:

$$\varepsilon_{slip.max} = \varepsilon_{2.1} - \varepsilon_{1.2}. \quad (2.4.1.12)$$

2.4.2. Maksimalios šlyties jėgos tarp sluoksnių radimas, esant pilnam sukibimui



17 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant pilnam sukibimui tarp sluoksnių, pirmo modelio skaičiavimuose

Šiuo atveju yra nagrinėjamas pilnas sukibimas tarp sluoksnių. Norint surasti deformacijas, lenkimo momentus ir maksimalią šlyties jėgą reikia sudaryti penkių lygčių sistemą, susidedančią iš penkių nežinomųjų. Be 2.4.1 skyriuje aptartų lygčių papildomai įvedama lygtis, nusakanti papildomo sluoksnio apatinio krašto deformaciją, bei lygtis, nusakanti stiprinamo sluoksnio viršutinio krašto deformaciją. Taip pat įvedama lygybė parodanti, kad deformacijos sluoksnių sujungime yra lygios, tai yra praslydimo tarp jų nėra:

$$(1) \varepsilon_{1,2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.4.2.1)$$

$$(2) \varepsilon_{2,1} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}}; \quad (2.4.2.2)$$

$$(3) M = M_1 + M_2; \quad (2.4.2.3)$$

$$(4) \left(\frac{1}{r}\right) = \frac{M}{E_1 \cdot I_{eff}} = \left(\frac{1}{r}\right)_I = \frac{M_1 - T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \left(\frac{1}{r}\right)_{II} = \frac{M_2 - T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.4.2.4)$$

$$(5) \varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{2,1}. \quad (2.4.2.5)$$

Sprendžiama lygčių sistema. Pirmiausia į 2.4.2.5 lygtį įstatomos 2.4.2.1 ir 2.4.2.2 lygtys:

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}}; \quad (2.4.2.6)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} = 0. \quad (2.4.2.7)$$

Į gautą lygybę įstatoma M_2 išraiška gauta iš 2.4.2.3 lygties:

$$M_2 = M - M_1; \quad (2.4.2.8)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{M - M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} = 0; \quad (2.4.2.9)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} = 0; \quad (2.4.2.10)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - T \cdot \left(\frac{1}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{e_{2,1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{e_{1,2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} \right) = 0. \quad (2.4.2.11)$$

Įvedamas pažymėjimas norint supaprastinti lygtį:

$$k_t = \left(\frac{1}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{e_{2,1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{e_{1,2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} \right); \quad (2.4.2.12)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - T \cdot k_t = 0. \quad (2.4.2.13)$$

Iš 2.4.2.4 lygties išreiškiamas dydis T ir įstatomas į 2.4.2.13 lygtį:

$$M_1 - T \cdot e_{1.2} = \frac{M \cdot I_{eff.1}}{I_{eff}}; \quad (2.4.2.14)$$

$$T \cdot e_{1.2} = M_1 - \frac{M \cdot I_{eff.1}}{I_{eff}}; \quad (2.4.2.15)$$

$$T = \frac{M_1}{e_{1.2}} - \frac{M \cdot I_{eff.1}}{I_{eff} \cdot e_{1.2}}; \quad (2.4.2.16)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \left(\frac{M_1}{e_{1.2}} - \frac{M \cdot I_{eff.1}}{I_{eff} \cdot e_{1.2}} \right) \cdot k_t = 0. \quad (2.4.2.17)$$

Iš šios lygties išreiškiamas dydis M_1 :

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M_1 \cdot k_t}{e_{1.2}} + \frac{M \cdot I_{eff.1} \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{1.2}} = 0; \quad (2.4.2.18)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M_1 \cdot k_t}{e_{1.2}} = - \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M \cdot I_{eff.1} \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{1.2}}; \quad (2.4.2.19)$$

$$M_1 \cdot \left(\frac{1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{k_t}{e_{1.2}} \right) = -M \cdot \left(\frac{1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{I_{eff.1} \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{1.2}} \right); \quad (2.4.2.20)$$

$$M_1 = \frac{M \cdot \left(\frac{1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{I_{eff.1} \cdot k_t}{I_{eff} \cdot e_{1.2}} \right)}{\frac{k_t}{e_{1.2}} - \frac{1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}}}. \quad (2.4.2.21)$$

Suradus skerspjūvius veikiančias jėgas galima rasti deformacijas:

$$\varepsilon_{1.1} = - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.top.1}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.top.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.4.2.22)$$

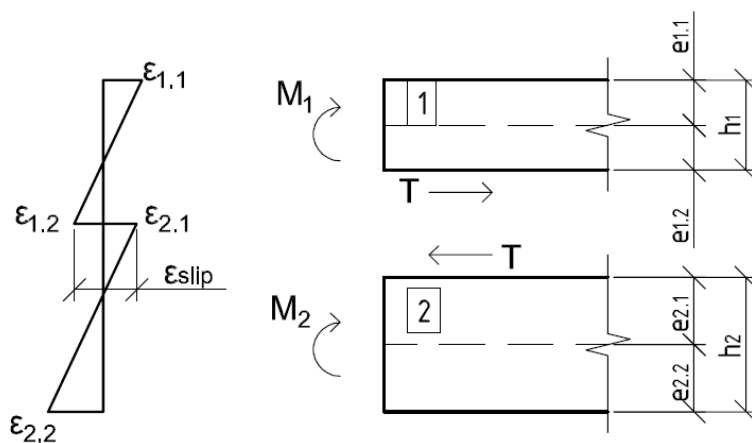
$$\varepsilon_{1.2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.4.2.23)$$

$$\varepsilon_{2.1} = - \frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}}; \quad (2.4.2.24)$$

$$\varepsilon_{2.2} = \frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.bot.2}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.bot.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}}. \quad (2.4.2.25)$$

2.4.3. Deformacijų radimas, esant daliniam praslydimui tarp sluoksnių

Šiame formulių išvedime ieškomos sluoksnių deformacijos, sluoksniams tenkantys lenkimo momentai ir šlyties jėgos tarp jų, esant daliniam sukibimui tarp sluoksnių. 2.4.1 ir 2.4.2 skyriuose išvestos formulės neleidžia įvertinti kintamos praslydimo deformacijos. Šis skaičiavimo būdas ypatingas tuo, jog juo galima įvertinti dalinį praslydimą tarp sluoksnių ir jis tinka prieš tai aptartiems atvejams skaičiuoti, todėl pirmuosius du skaičiavimo metodus galima naudoti kaip patikrinimą.



18 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant daliniam sukibimui, pirmo modelio skaičiavimuose

Pagal pateiktą 18-ą paveikslėlį išvedama nauja lygčių sistema. Naujoji sistema susideda iš penkių lygčių. Lygtys yra tokios pačios kaip ir 2.4.2 skyriuje, tik šiame išvedime deformacijos sluoksnių sujungime nėra lygios, todėl jų skirtumas pažymimas dydžiu ε_{slip} , tai yra praslydimo deformacija. Skaičiavimuose dydis ε_{slip} yra pasirenkamas. Pradinė lygčių sistema:

$$(1) \varepsilon_{1.2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.4.3.1)$$

$$(2) \varepsilon_{2.1} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}}; \quad (2.4.3.2)$$

$$(3) M = M_1 + M_2; \quad (2.4.3.3)$$

$$(4) \left(\frac{1}{r}\right)_I = \frac{M_1 - T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \left(\frac{1}{r}\right)_{II} = \frac{M_2 - T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.4.3.4)$$

$$(5) \varepsilon_{2.1} - \varepsilon_{1.2} = \varepsilon_{slip}. \quad (2.4.3.5)$$

Turime penkis lygtis ir penkis nežinomuosius: $\varepsilon_{1.2}, \varepsilon_{2.1}, M_1, M_2, T$. Išsprendus lygčių sistemą gaunamos išraiškos, kuriomis galima apskaičiuoti šlyties jėgas ir lenkimo momentus, tenkančius kiekvienam sluoksniui, kai tarp jų yra dalinis sukibimas. Sprendžiama lygčių sistema, pirmiausia į 2.4.3.5 lygtį įstatomos 2.4.3.1 ir 2.4.3.2 lygtys:

$$-\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} = \varepsilon_{slip}. \quad (2.4.3.6)$$

Į gautą lygybę įstatoma M_2 išraiška gauta iš 2.4.3.3 lygties:

$$M_2 = M - M_1; \quad (2.4.3.7)$$

$$-\frac{M - M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} = \varepsilon_{slip}; \quad (2.4.3.8)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + T \cdot \left(\frac{1}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} \right) = \varepsilon_{slip}. \quad (2.4.3.9)$$

Įvedamas pažymėjimas norint supaprastinti lygtį:

$$k_t = \left(\frac{1}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} \right); \quad (2.4.3.10)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + T \cdot k_t = \varepsilon_{slip}. \quad (2.4.3.11)$$

Į 2.4.3.4 lygtį įstatoma M_2 išraiška ir išreiškiamas dydis M_1 :

$$\frac{M_1 - T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M - M_1 - T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.4.3.12)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_2 \cdot I_{eff.2}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.4.3.13)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot I_{eff.1}} + \frac{M_1}{E_2 \cdot I_{eff.2}} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.4.3.14)$$

$$M_1 \cdot \left(\frac{E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_1 \cdot I_{eff.1} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}} \right) = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.4.3.15)$$

$$M_1 = \frac{\left(\frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} \right) \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}}; \quad (2.4.3.16)$$

$$M_1 = \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}}. \quad (2.4.3.17)$$

2.4.3.17 lygtis įstatoma į 2.4.3.11 lygtį:

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1})} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1})} + T \cdot k_t = \varepsilon_{slip}. \quad (2.4.3.18)$$

Įvedami pažymėjimai norint supaprastinti lygtį ir iš gautos lygties išreiškiamas dydis T :

$$k_1 = E_1 \cdot W_{eff.bot.1} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}); \quad (2.4.3.19)$$

$$k_2 = E_2 \cdot W_{eff.top.2} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}); \quad (2.4.3.20)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + T \cdot k_t = \varepsilon_{slip}; \quad (2.4.3.21)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \frac{T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_2} - \frac{T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} - \frac{T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_1} + \frac{T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + T \cdot k_t = \varepsilon_{slip}; \quad (2.4.3.22)$$

$$T \cdot \left(\frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_2} - \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_1} + \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + k_t \right) = \varepsilon_{slip} + \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1}; \quad (2.4.3.23)$$

$$T = \frac{\varepsilon_{slip} + \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} \cdot \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1}}{\frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_2} - \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_1} + \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + k_t}. \quad (2.4.3.24)$$

Turint šiuos dydžius ir pasirinkus praslydimą deformacijos vertę, galima apskaičiuoti šlyties jėgas tarp sluoksnių. Tuomet apskaičiuoti lenkimo momentus, tenkančius kiekvienam sluoksniui, bei norimo skerspjūvio taško deformacijas:

$$\varepsilon_{1.1} = -\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.top.1}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.top.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.4.3.25)$$

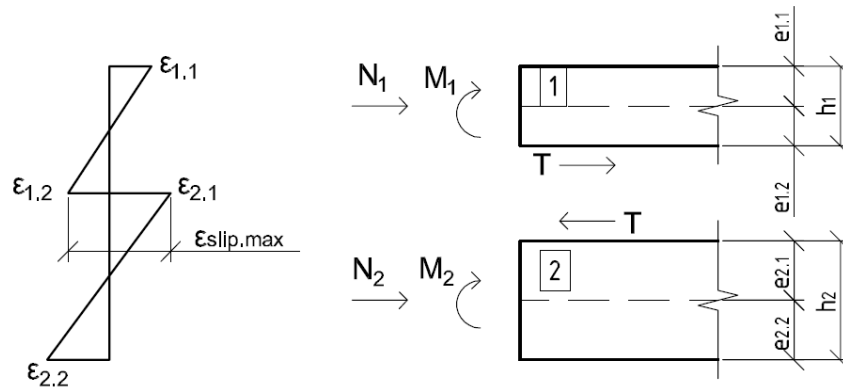
$$\varepsilon_{1.2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.4.3.26)$$

$$\varepsilon_{2.1} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}}; \quad (2.4.3.27)$$

$$\varepsilon_{2.2} = \frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.bot.2}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.bot.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}}. \quad (2.4.3.28)$$

2.5. Antrasis skaičiavimo modelis

2.5.1. Maksimalios praslydimų deformacijų radimas, kai tarp sluoksnių nėra sukibimo



19 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant pilnam praslydimui tarp sluoksnių, antro modelio skaičiavimuose

Kaip ir 2.4.1 skyriuje yra išvedama lygtis maksimaliai galimai praslydimui deformacijai tarp sluoksnių surasti, kai tarp jų nėra jokios sukibimo jėgos:

$$(1) \left(\frac{1}{r}\right)_I = \frac{M_1}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \left(\frac{1}{r}\right)_{II} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.1.1)$$

$$(2) M = M_1 + M_2. \quad (2.5.1.2)$$

Sprendžiama lygčių sistema, iš 2.5.1.2 formulės išreiškiamas dydis M_1 ir įstatomas į 2.5.1.1 formulę:

$$M_1 = M - M_2; \quad (2.5.1.3)$$

$$\frac{M - M_2}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_{eff.2}}. \quad (2.5.1.4)$$

Iš lygties 2.5.1.4 išreiškiamas dydis M_2 :

$$\frac{M}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{M_2}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.1.5)$$

$$\frac{M}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M_2}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{M_2}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M_2 \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + M_2 \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M_2 \cdot (E_1 \cdot I_{eff.1} + E_2 \cdot I_{eff.2})}{E_2 \cdot I_{eff.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}; \quad (2.5.1.6)$$

$$M_2 = \frac{M \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}}. \quad (2.5.1.7)$$

Išsprendus lygčių sistemą gauname, kokio dydžio lenkimo momentą perima kiekvienas sluoksnis. Turint kiekvienam sluoksniui tenkantį lenkimo momentą, galima apskaičiuoti ir sluoksnių deformacijas:

$$\varepsilon_{1.1} = -\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.top.1}} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.5.1.8)$$

$$\varepsilon_{1.2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.5.1.9)$$

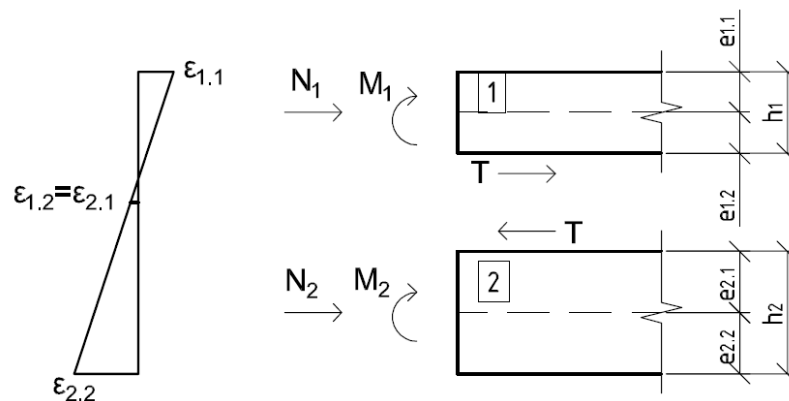
$$\varepsilon_{2.1} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}}; \quad (2.5.1.10)$$

$$\varepsilon_{2.2} = \frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.bot.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}}. \quad (2.5.1.11)$$

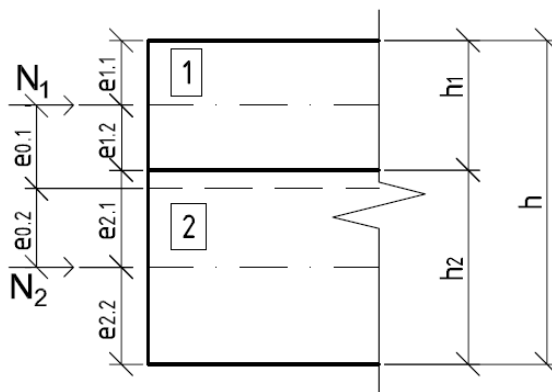
Maksimali praslydimo deformacija tarp sluoksnių:

$$\varepsilon_{slip.max} = \varepsilon_{2.1} - \varepsilon_{1.2}. \quad (2.5.1.12)$$

2.5.2. Maksimalios šlyties jėgos tarp sluoksnių radimas, esant pilnam sukibimui



20 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant pilnam sukibimui tarp sluoksnių, antro modelio skaičiavimuose



21 pav. Ašinės jėgos padėtis viso skerspjūvio neutralios ašies atžvilgiu

Šiuo atveju yra nagrinėjamas pilnas sukibimas tarp sluoksnių. Norint surasti deformacijas, lenkimo momentus ir maksimalią šlyties jėgą, reikia sudaryti penkių lygčių sistemą, susidedančią iš penkių nežinomųjų. Lygtys yra tokios pat kaip ir 2.4.2 skyriuje, tik čia papildomai įtraukiamos tariamai nuo traukumo deformacijos atsirandančios ašinės jėgos:

$$(1) \varepsilon_{1.2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.5.2.1)$$

$$(2) \varepsilon_{2.1} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}}; \quad (2.5.2.2)$$

$$(3) M_T = M_1 + M_2 + N_1 \cdot e_{0.1} - N_2 \cdot e_{0.2}; \quad (2.5.2.3)$$

$$(4) \left(\frac{1}{r}\right) = \frac{M}{E_1 \cdot I_{eff}} = \left(\frac{1}{r}\right)_I = \frac{M_1 - T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \left(\frac{1}{r}\right)_{II} = \frac{M_2 - T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.2.4)$$

$$(5) \varepsilon_{2.1} = \varepsilon_{1.2}. \quad (2.5.2.5)$$

Sprendžiama lygčių sistema. Pirmiausia į 2.5.2.5 lygtį įstatomos 2.5.2.1 ir 2.5.2.2 lygtys:

$$-\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.5.2.6)$$

$$-\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} = 0. \quad (2.5.2.7)$$

Į gautą lygybę įstatoma M_2 išraiška gauta iš 2.5.2.3 lygties:

$$M_2 = M - M_1 - N_1 \cdot e_{0.1} + N_2 \cdot e_{0.2}; \quad (2.5.2.8)$$

$$-\frac{M - M_1 - N_1 \cdot e_{0.1} + N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} = 0; \quad (2.5.2.9)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} = 0; \quad (2.5.2.10)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + T \cdot \left(\frac{1}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} \right) = 0. \quad (2.5.2.11)$$

Įvedamas pažymėjimas norint supaprastinti lygtį:

$$k_t = \left(\frac{1}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} \right); \quad (2.5.2.12)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + T \cdot k_t = 0. \quad (2.5.2.13)$$

Į 2.5.2.4 lygtį įstatoma M_2 išraiška ir išreiškiamas dydis M_1 :

$$\frac{M_1 - T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M - M_1 - N_1 \cdot e_{0.1} + N_2 \cdot e_{0.2} - T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.2.14)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_2 \cdot I_{eff.2}} - \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.2.15)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot I_{eff.1}} + \frac{M_1}{E_2 \cdot I_{eff.2}} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} - \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.2.16)$$

$$\frac{M_1 \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} + M_1 \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_1 \cdot I_{eff.1} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} - \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.2.17)$$

$$M_1 = \frac{\left(\frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} - \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} \right) \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}}; \quad (2.5.2.18)$$

$$M_1 = \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} - N_1 \cdot e_{0.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + N_2 \cdot e_{0.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}}. \quad (2.5.2.19)$$

Gautą dydį įstatome į 2.5.2.13 lygtį:

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} - N_1 \cdot e_{0.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + N_2 \cdot e_{0.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1})} + \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} = 0. \quad (2.5.2.20)$$

$$k_t = 0.$$

Įvedami pažymėjimai norint supaprastinti lygtį ir iš gautos lygties išreiškiamas dydis T :

$$k_1 = E_1 \cdot W_{eff.bot.1} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}); \quad (2.5.2.21)$$

$$k_2 = E_2 \cdot W_{eff.top.2} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}); \quad (2.5.2.22)$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} - N_1 \cdot e_{0.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + N_2 \cdot e_{0.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \\
& \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \\
& \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} - N_1 \cdot e_{0.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + N_2 \cdot e_{0.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + T \cdot
\end{aligned} \tag{2.5.2.23}$$

$$k_t = 0;$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \frac{T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_2} - \frac{T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{N_1 \cdot e_{0.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \\
& \frac{N_2 \cdot e_{0.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} - \frac{T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_1} + \\
& \frac{T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + \frac{N_1 \cdot e_{0.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} - \frac{N_2 \cdot e_{0.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + T \cdot k_t = 0;
\end{aligned} \tag{2.5.2.24}$$

$$\begin{aligned}
& T \cdot \left(\frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_2} - \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_1} + \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + k_t \right) = \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \\
& \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \frac{N_1 \cdot e_{0.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{N_2 \cdot e_{0.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \\
& \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} - \frac{N_1 \cdot e_{0.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + \frac{N_2 \cdot e_{0.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}};
\end{aligned} \tag{2.5.2.25}$$

$$\begin{aligned}
& T = \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \frac{N_1 \cdot e_{0.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{N_2 \cdot e_{0.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{N_1 \cdot e_{0.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{N_2 \cdot e_{0.2}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \\
& \frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_2} - \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_1} + \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + k_t + \\
& \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} - \frac{N_1 \cdot e_{0.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + \frac{N_2 \cdot e_{0.2} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} - \\
& \frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_2} - \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_1} + \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + k_t.
\end{aligned} \tag{2.5.2.26}$$

Suradus skerspjūvius veikiančias jėgas, galima rasti deformacijas:

$$\varepsilon_{1.1} = -\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.top.1}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.top.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \tag{2.5.2.27}$$

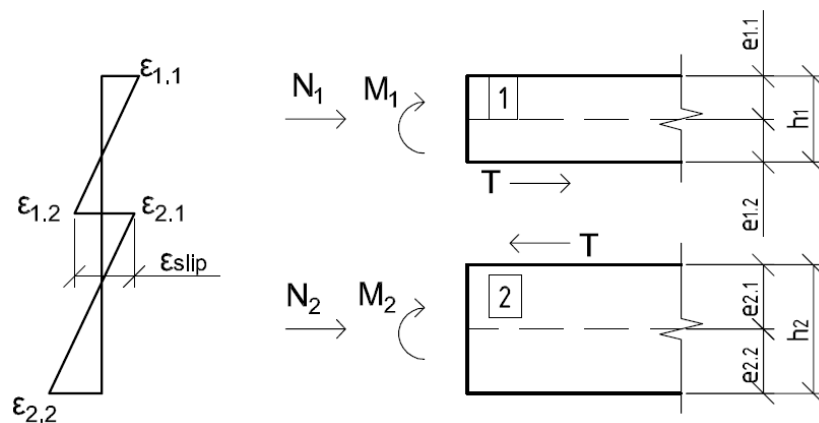
$$\varepsilon_{1.2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \tag{2.5.2.28}$$

$$\varepsilon_{2.1} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}}; \tag{2.5.2.29}$$

$$\varepsilon_{2.2} = \frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.bot.2}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.bot.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}}. \tag{2.5.2.30}$$

2.5.3. Deformacijų radimas, esant daliniam praslydimui tarp sluoksnių

Šiame formuliu išvedime ieškomos sluoksnių deformacijos, sluoksniams tenkantys lenkimo momentai ir šlyties jėgos tarp jų, esant daliniam sukibimui tarp sluoksnių. 2.5.1 ir 2.5.2 skyriuose išvestos formulės neleidžia įvertinti kintamos praslydimo deformacijos. Šis skaičiavimo būdas ypatingas tuo, jog juo galima įvertinti dalinį praslydimą tarp sluoksnių ir jis tinka prieš tai aptartiems atvejams skaičiuoti, todėl pirmuosius du skaičiavimo metodus galima naudoti kaip pasitikrinimą.



22 pav. Deformacijų diagrama ir skerspjūvius veikiančios jėgos, esant daliniam sukibimui, antro modelio skaičiavimuose

Pagal pateiktą 22-ą paveikslėlį išvedama nauja lygčių sistema. Ji susideda iš penkių lygčių. Skaičiavimuose dydis ε_{slip} pasirenkamas. Lygtys yra tokios pat kaip ir 2.4.3 skyriuje, tik čia papildomai įtraukiamos tariamai nuo traukimo deformacijos atsirandančios ašinės jėgos:

$$(1) \varepsilon_{1,2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.5.3.1)$$

$$(2) \varepsilon_{2,1} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}}; \quad (2.5.3.2)$$

$$(3) M = M_1 + M_2; \quad (2.5.3.3)$$

$$(4) \left(\frac{1}{r}\right)_I = \frac{M_1 - T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \left(\frac{1}{r}\right)_{II} = \frac{M_2 - T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.3.4)$$

$$(5) \varepsilon_{2,1} - \varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{slip}. \quad (2.5.3.5)$$

Turime penkis lygtis ir penkis nežinomuosius: $\varepsilon_{1,2}, \varepsilon_{2,1}, M_1, M_2, T$. Išsprendus lygčių sistemą gaunamos išraiškos, kuriomis galima apskaičiuoti šlyties jėgas ir lenkimo momentus, tenkančius kiekvienam sluoksniui, kai tarp jų yra dalinis sukibimas. Sprendžiama lygčių sistema, pirmiausia į 2.5.3.5 lygtį įstatomos 2.5.3.1 ir 2.5.3.2 lygtys:

$$-\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} = \varepsilon_{slip}. \quad (2.5.3.6)$$

Į gautą lygybę įstatoma M_2 išraiška gauta iš 2.5.3.3 lygties:

$$M_2 = M - M_1; \quad (2.5.3.7)$$

$$-\frac{M - M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2,1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T \cdot e_{1,2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} = \varepsilon_{slip}; \quad (2.5.3.8)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + T \cdot \left(\frac{1}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} \right) = \varepsilon_{slip}. \quad (2.5.3.9)$$

Įvedamas pažymėjimas norint supaprastinti lygtį:

$$k_t = \left(\frac{1}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + \frac{e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} \right); \quad (2.5.3.10)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M_1}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + T \cdot k_t = \varepsilon_{slip}. \quad (2.5.3.11)$$

Į 2.5.3.4 lygtį įstatoma M_2 išraiška ir išreiškiamas dydis M_1 :

$$\frac{M_1 - T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M - M_1 - T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.3.12)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} - \frac{M_1}{E_2 \cdot I_{eff.2}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.3.13)$$

$$\frac{M_1}{E_1 \cdot I_{eff.1}} + \frac{M_1}{E_2 \cdot I_{eff.2}} = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.3.14)$$

$$M_1 \cdot \left(\frac{E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_1 \cdot I_{eff.1} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}} \right) = \frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}}; \quad (2.5.3.15)$$

$$M_1 = \frac{\left(\frac{M}{E_2 \cdot I_{eff.2}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot I_{eff.1}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2}} \right) \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}}; \quad (2.5.3.16)$$

$$M_1 = \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}}. \quad (2.5.3.17)$$

2.5.3.17 lygtis įstatoma į 2.5.3.11 lygtį:

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1})} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1})} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + T \cdot k_t = \varepsilon_{slip}. \quad (2.5.3.18)$$

Įvedami pažymėjimai norint supaprastinti lygtį ir iš gautos lygties išreiškiamas dydis T :

$$k_1 = E_1 \cdot W_{eff.bot.1} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}); \quad (2.5.3.19)$$

$$k_2 = E_2 \cdot W_{eff.top.2} \cdot (E_2 \cdot I_{eff.2} + E_1 \cdot I_{eff.1}); \quad (2.5.3.20)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1} + T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2} - T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + T \cdot k_t = \varepsilon_{slip}; \quad (2.5.3.21)$$

$$-\frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \frac{T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_2} - \frac{T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} - \frac{T \cdot e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_1} + \frac{T \cdot e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}} + T \cdot k_t = \varepsilon_{slip}; \quad (2.5.3.22)$$

$$T \cdot \left(\frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_2} - \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_1} + \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + k_t \right) = \varepsilon_{slip} + \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.5.3.23)$$

$$T = \frac{\varepsilon_{slip} + \frac{M}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} - \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} + \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}} + \frac{M \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}}{\frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_2} - \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_2} - \frac{e_{1.2} \cdot E_2 \cdot I_{eff.2}}{k_1} + \frac{e_{2.1} \cdot E_1 \cdot I_{eff.1}}{k_1} + k_t}. \quad (2.5.3.24)$$

Turint šiuos dydžius ir pasirinkus praslydimą deformacijos vertę, galima apskaičiuoti šlyties jėgas tarp sluoksnių. Tuomet apskaičiuoti lenkimo momentus, tenkančius kiekvienam sluoksniui, bei norimo skerspjūvio taško deformacijas:

$$\varepsilon_{1.1} = -\frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.top.1}} + \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.top.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.5.3.25)$$

$$\varepsilon_{1.2} = \frac{M_1}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T \cdot e_{1.2}}{E_1 \cdot W_{eff.bot.1}} - \frac{T}{E_1 \cdot A_{eff.1}} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_{eff.1}}; \quad (2.5.3.26)$$

$$\varepsilon_{2.1} = -\frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.top.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}}; \quad (2.5.3.27)$$

$$\varepsilon_{2.2} = \frac{M_2}{E_2 \cdot W_{eff.bot.2}} - \frac{T \cdot e_{2.1}}{E_2 \cdot W_{eff.bot.2}} + \frac{T}{E_2 \cdot A_{eff.2}} - \frac{N_2}{E_2 \cdot A_{eff.2}}. \quad (2.5.3.28)$$

3. Rezultatai

5–9 lentelėse pateiktos skaitinės vertės naudojamos skaičiavimuose. Pateikti dydžiai yra pastovūs visų skaičiavimų metu. 5–8 lentelėse pateikti pasirinkti dydžiai, o 9-oje lentelėje apskaičiuoti nekintami dydžiai.

5 lentelė. Papildomą sluoksnį apibūdinančių parametų skaitinės reikšmės

Simbolis	h_1, mm	b_1, mm	$f_{ck.1}, MPa$	$f_{cm.1}, MPa$	$E_{cm.1}, GPa$	ϕ_1, mm	$n_1, vnt.$	$a_{s1.2}, mm$	E_s, GPa
Reikšmė	80	1000	30	38	33	14	10	40	200

6 lentelė. Stiprinamą sluoksnį apibūdinančių parametų skaitinės reikšmės

Simbolis	h_2, mm	b_2, mm	$f_{ck.2}, MPa$	$f_{cm.2}, MPa$	$E_{cm.2}, GPa$	$\phi_{2.1}, mm$	$n_{2.1}, vnt.$	$a_{s2.1}, mm$	$\phi_{2.2}, mm$	$n_{2.2}, vnt.$	$a_{s2.2}, mm$	E_s, GPa
Reikšmė	200	1000	30	38	33	12	5	36	12	5	36	200

7 lentelė. Papildomo sluoksnio ilgalaikių poveikių vertinimui naudojamų parametų skaitinės vertės

Simbolis	$RH, \%$	$t_{0.1}, d.$	$t_1, d.$	$t_{s.1}, d.$	α_{ds1}	α_{ds2}	f_{cm0}, MPa	$RH_0, \%$
Reikšmė	80	28	7300	7	3	0,13	10	100

8 lentelė. Stiprinamo sluoksnio ilgalaikių poveikių vertinimui naudojamų parametų skaitinės vertės

Simbolis	$RH, \%$	$t_{0.2}, d.$	$t_{2.50}, d.$	$t_{2.70}, d.$	$t_{s.2.50}, d.$	$t_{s.2.70}, d.$	α_{ds1}	α_{ds2}	f_{cm0}, MPa	$RH_0, \%$
Reikšmė	80	28	18250	25550	7	7	4	0,12	10	100

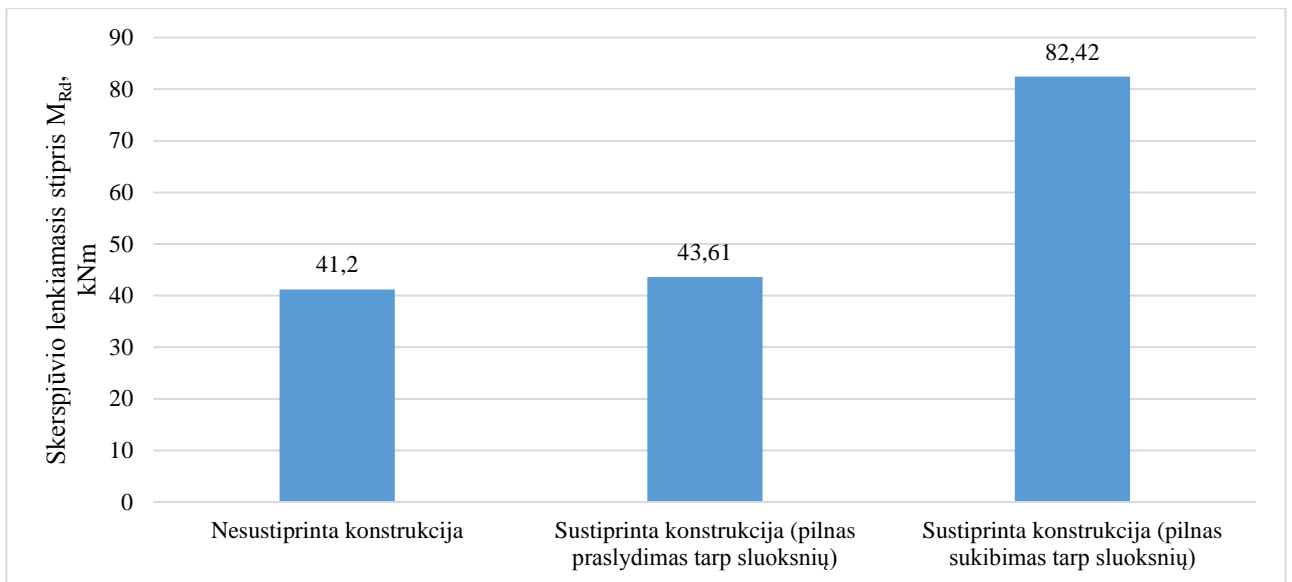
9 lentelė. Apskaičiuotų nekintančių dydžių skaitinės reikšmės

Simbolis	$A_{s1.2}, cm^2$	$A_{s2.1}, cm^2$	$A_{s2.2}, cm^2$	N_1, kN	N_2, kN
Reikšmė	15,39	5,655	5,655	191,5	0,619

Visi rezultatai, išskyrus konstrukcijos laikomosios galios, yra pateikiami pasirenkant skirtingą praslydimą tarp sluoksnių. Pasirinktos šios tarpinės praslydimo reikšmės: $0 \cdot \epsilon_{slip,max}$, $0,25 \cdot \epsilon_{slip,max}$, $0,5 \cdot \epsilon_{slip,max}$, $0,75 \cdot \epsilon_{slip,max}$, $\epsilon_{slip,max}$. Konstrukcijos laikomosios galios diagramoje lyginama nesustiprintos ir sustiprintos konstrukcijos laikomoji galia, pasirenkant dvi praslydimo reikšmes: $0 \cdot \epsilon_{slip,max}$, $\epsilon_{slip,max}$. Konstrukcijos pleišėjimo momentų ir įlinkių diagramoje papildomai įtraukiami nesustiprintos konstrukcijos skaičiavimo rezultatai.

3.1. Konstrukcijos laikomoji galia

Šiame skyriuje yra pateikiama konstrukcijos normalinio pjūvio laikomosios galios diagrama. Joje lyginama nesustiprintos ir sustiprintos konstrukcijos laikomoji galia, kai tarp sluoksnių yra pilnas praslydimas ir pilnas sukibimas (žr. 1, 2, 3 priedus).



23 pav. Konstrukcijos laikomosios galios diagrama

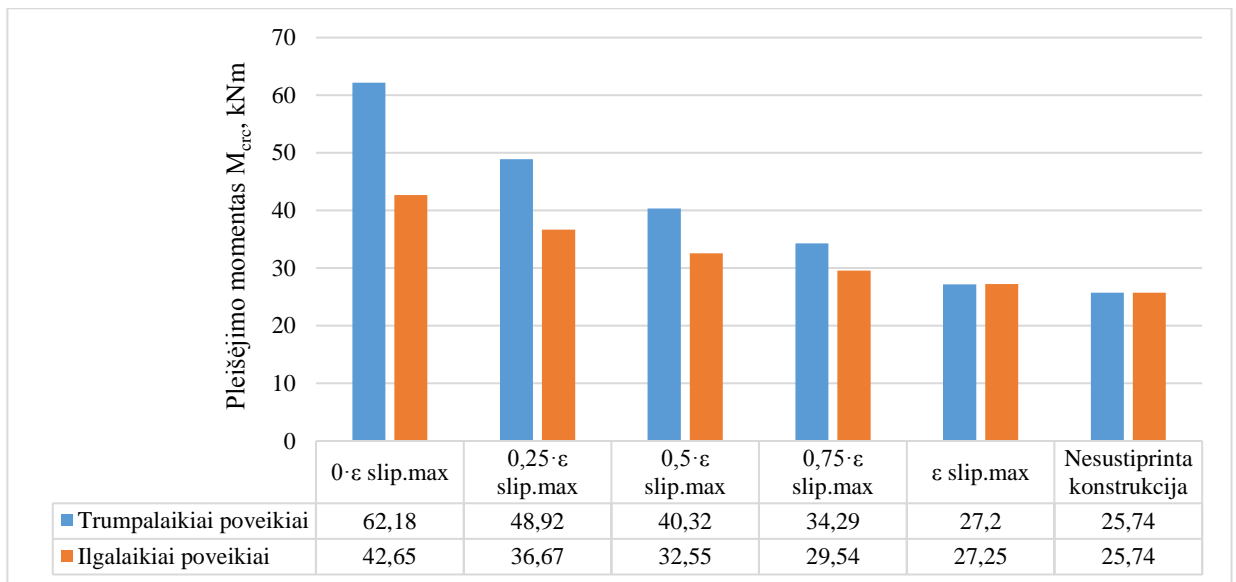
Iš diagramos matyti, jog stiprinti konstrukciją, kai tarp sluoksnių nėra sukibimo, neverta. Šiuo atveju stiprumas padidėja 5,8 %, tai atitinka 2,41 kNm. Tačiau paskaičiavus, kokį lenkimo momentą sukelia papildomo sluoksnio svoris gauname, kad jis yra didesnis nei padidėjusi stiprinamos konstrukcijos laikomoji galia. Priėmus pilną sukibimą tarp sluoksnių, konstrukcijos laikomoji galia, lyginant su nesustiprintu skerspjūviu, padidėja 2 kartus. Šiuo atveju konstrukcijos stiprinimas yra labai efektyvus.

3.2. Konstrukcijos pleišėjimo momentas

Šiame skyriuje yra lyginamos konstrukcijos pleišėjimo momento reikšmės, esant skirtingam praslydimui tarp sluoksnių. Gautos reikšmės taip pat palyginamos su nesustiprintos konstrukcijos pleišėjimo momentu. Rezultatai pateikiami vertinant tiek trumpalaikius, tiek ilgalaikius poveikius.

10 lentelė. Konstrukcijos pleišėjimo momentai

Konstrukcijos tipas	Praslydimo deformacija	Konstrukcijos pleišėjimo momentas M_{crc} , kNm	
		Trumpalaikiai poveikiai	Ilgalaikiai poveikiai
Konstrukcija sustiprinta papildomu sluoksniu	0	62,18	42,65
	$0,25 \cdot \epsilon_{slip,max}$	48,92	36,67
	$0,5 \cdot \epsilon_{slip,max}$	40,32	32,55
	$0,75 \cdot \epsilon_{slip,max}$	34,29	29,54
	$\epsilon_{slip,max}$	27,2	27,25
Konstrukcija nesustiprinta papildomu sluoksniu	-	25,74	25,74



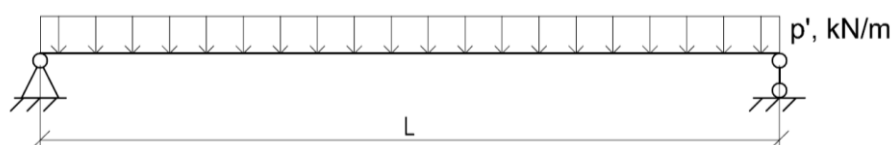
24 pav. Konstrukcijos pleišėjimo momentų diagrama

Iš diagramos matyti, jog esant sukibimui tarp sluoksnių galima pasiekti didesnę pleišėjimo momentą. Nagrinėjant pleišėjimo momento kitimą praslystant sluoksniams pastebėta, jog jis kinta netiesiškai. Praslydimui padidėjus ketvirtadaliu maksimalaus praslydimo, pleišėjimo momentas staigiai sumažėja. Nagrinėjant trumpalaikius poveikius, pirmasis sumažėjimas siekia 21,3 % didžiausiojo pleišėjimo momento. Dar labiau praslystant sluoksniams, pleišėjimo momento mažėjimas lėtėja, paskutinis sumažėjimo dydis siekia 9,7 %. Vertinant ilgalaikius poveikius, pleišėjimo momentas kinta tokiu pačiu dėsniumu, tik šis dydis mažėja lėčiau, po 5,4–14 %. Esant pilnam praslydimui pleišėjimo momentų reikšmė abiem skaičiavimo modeliais beveik sutampa. Nesustiprintos konstrukcijos pleišėjimo momento reikšmės abiem atvejais yra vienodos.

Nagrinėjant trumpalaikius poveikius, esant sukibimui tarp sluoksnių, konstrukcija gali atlaikyti didesnę lenkimo momentą iki plyšio atsivėrimo nei konstrukcija, kurioje yra vertinami ilgalaikiai poveikiai. Vertinant trumpalaikius poveikius, esant pilnam sukibimui, konstrukcijos pleišėjimo momentas padidėja 142 %, o vertinant ilgalaikius poveikius – 66 %. Tai įvyksta, nes pirmuoju atveju papildomame sluoksnyje dar nėra pasireiškęs valkšnumas ir jis yra pakankamai standus, o konstrukcija yra atsparesnė plyšių atsiradimui. Tačiau abi stadijas reikia nagrinėti lygiagrečiai.

3.3. Apkrovos

Tolesniems skaičiavimams atlikti pasirinkta nagrinėti stadija, kurios metu konstrukcijoje neatsiranda plyšiai. Tam pasirinkta tokio dydžio išorinė apkrova, kuri nesukelia didesnio lenkimo momento nei sustiprintos konstrukcijos pleišėjimo momentas, esant pilnam praslydimui. Skaičiuojant išorinį lenkimo momentą veikiančią konstrukcijoje pasirinkta dviatramė, laisvai atremta perdangos plokštė.



25 pav. Konstrukcijos apkrovimo schema

Plokštės ilgis: $L = 4 \text{ m}$.

Pasirinkta suminė apkrova: $p = 13,5 \frac{kN}{m^2}$.

Apkrova, tenkanti vieno metro pločio plokštei: $p' = 13,5 \frac{kN}{m}$.

Išorinis lenkimo momentas, veikiantis konstrukciją:

$$M = \frac{p' \cdot L^2}{8} = \frac{13,5 \cdot 4^2}{8} = 27 \text{ kNm}. \quad (3.3.1)$$

3.4. Lenkimo momentų pasiskirstymas sluoksniuose

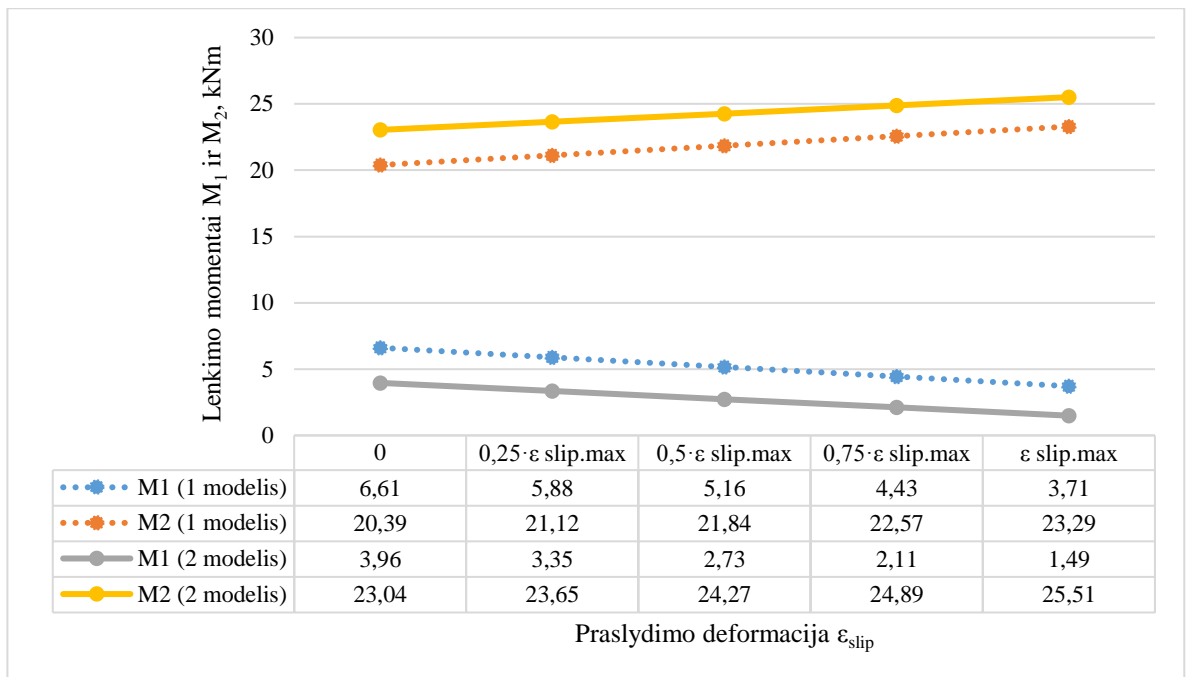
Šiame skyriuje pateikiamas lenkimo momentų ir šlyties jėgų pasiskirstymas tarp sluoksnių. Įvertinamos tiek trumpalaikės, tiek ilgalaikės deformacijos bei praslydimo deformacija.

11 lentelė. Konstrukcijos lenkimo momentų pasiskirstymas tarp sluoksnių pirmo modelio skaičiavimuose

Praslydimo deformacija	Lenkimo momentai tenkantys sluoksniams	
	M_1 , kNm	M_2 , kNm
0	6,61	20,39
$0,25 \cdot \varepsilon_{\text{slip.max}}$	5,88	21,12
$0,5 \cdot \varepsilon_{\text{slip.max}}$	5,16	21,84
$0,75 \cdot \varepsilon_{\text{slip.max}}$	4,43	22,57
$\varepsilon_{\text{slip.max}}$	3,71	23,29

12 lentelė. Konstrukcijos lenkimo momentų pasiskirstymas tarp sluoksnių antro modelio skaičiavimuose

Praslydimo deformacija	Lenkimo momentai tenkantys sluoksniams	
	M_1 , kNm	M_2 , kNm
0	3,96	23,04
$0,25 \cdot \varepsilon_{\text{slip.max}}$	3,35	23,65
$0,5 \cdot \varepsilon_{\text{slip.max}}$	2,73	24,27
$0,75 \cdot \varepsilon_{\text{slip.max}}$	2,11	24,89
$\varepsilon_{\text{slip.max}}$	1,49	25,51



26 pav. Lenkimo momentų M_1 ir M_2 priklausomybė nuo praslydimio deformacijos ϵ_{slip}

Lyginant gautus lenkimo momentus pastebėta, jog naujai išlietas ir 28 paras kietėjęs betono sluoksnis pirmo modelio skaičiavimuose perima didesnę lenkimo momentą nei tas pats sluoksnis antro modelio skaičiavimuose. Taip atsitinka, nes skaičiuojant pirmuoju modeliu papildomame sluoksnyje dar nėra pasireiškusių ilgalaikės deformacijos. Nagrinėjant šį modelį, praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{slip.max}$, lenkimo momentas, tenkantis papildomam sluoksniui tolygiai mažėja po 11 %, o stiprinamame sluoksnyje tolygiai didėja po 3,6 %. Atitinkamai skirtumas tarp kraštinių reikšmių yra 44 % ir 14,4 %. Abiem atvejais lenkimo momentas pakinta 2,9 kNm. Nagrinėjant antrąjį modelį papildomam sluoksniui tenkantis lenkimo momentas, praslydimui didėjant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{slip.max}$, tolygiai mažėja po 15,6 %, o stiprinamame sluoksnyje didėja po 2,7 %. Atitinkamai skirtumas tarp kraštinių reikšmių yra 62,4 % ir 10,8 %. Abiem atvejais lenkimo momentas pakinta 2,47 kNm.

Įvertinus ilgalaikius poveikius, pastebėta, jog konstrukcijos standumas iki plyšių atsivėrimo labai daug nepadidėja. Papildomam sluoksniui tenka nuo 5,5 % iki 14,7 % sustiprintą konstrukciją veikiančio lenkimo momento. Tuo tarpu, vertinant trumpalaikius poveikius, tenka 13,7 – 24,5 %. Norint padidinti lenkimo momentą, tenkanti papildomam sluoksniui ilgame periode, reikėtų stengtis kiek įmanoma labiau sumažinti papildomo sluoksnio traukumo deformacijas. Dėl ilgalaikių deformacijų poveikio ir galimo sluoksnių praslydimio, projektuojant tokio tipo konstrukcijas, reikia įvertinti keletą galimų lenkimo momentų persiskirstymo variantų, kadangi kiekvienas iš jų gali būti pavojingas.

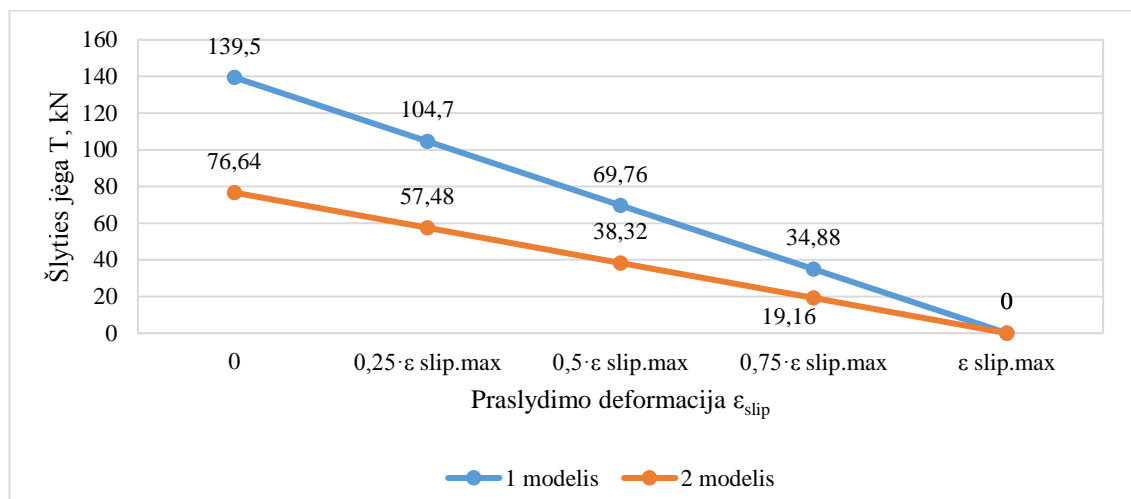
13 lentelė. Šlyties jėga tarp sluoksnių skirtinguose plokštės pjūviuose pirmo modelio skaičiavimuose

Praslydimio deformacija	Šlyties jėga T, kN				
	0 · L	0,25 · L	0,5 · L	0,75 · L	1 · L
0	0	104,7	139,5	104,7	0
$0,25 \cdot \epsilon_{slip.max}$	0	78,48	104,7	78,48	0
$0,5 \cdot \epsilon_{slip.max}$	0	52,32	69,76	52,32	0
$0,75 \cdot \epsilon_{slip.max}$	0	26,16	34,88	26,16	0

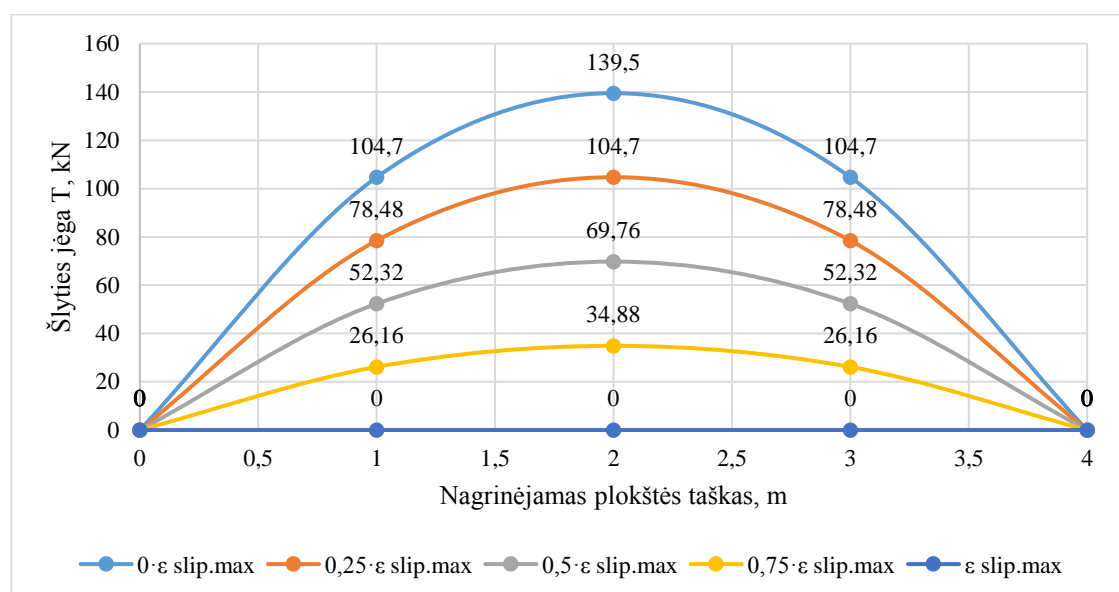
Praslydimos deformacija	Šlyties jėga T, kN				
	0 · L	0,25 · L	0,5 · L	0,75 · L	1 · L
$\epsilon_{slip,max}$	0	0	0	0	0

14 lentelė. Šlyties jėga tarp sluoksnių skirtinguose plokštės pjūviuose antro modelio skaičiavimuose

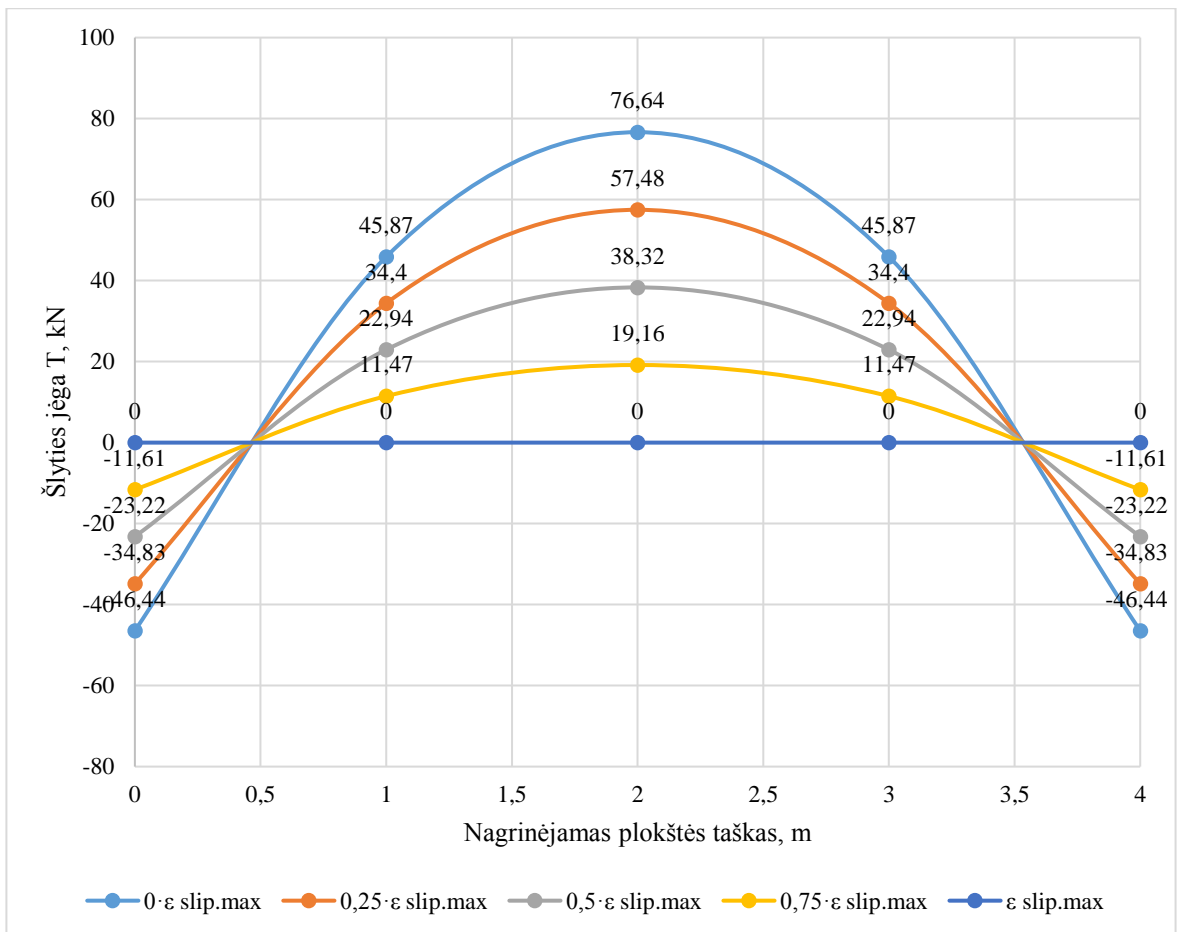
Praslydimos deformacija	Šlyties jėga T, kN				
	0 · L	0,25 · L	0,5 · L	0,75 · L	1 · L
0	-46,44	45,87	76,64	45,87	-46,44
$0,25 \cdot \epsilon_{slip,max}$	-34,83	34,4	57,48	34,4	-34,83
$0,5 \cdot \epsilon_{slip,max}$	-23,22	22,94	38,32	22,94	-23,22
$0,75 \cdot \epsilon_{slip,max}$	-11,61	11,47	19,16	11,47	-11,61
$\epsilon_{slip,max}$	0	0	0	0	0



27 pav. Maksimalios šlyties jėgos tarp sluoksnių T priklausomybė nuo praslydimos deformacijos ϵ_{slip}



28 pav. Šlyties jėgos tarp sluoksnių T pasiskirstymo per plokštės ilgį priklausomybė, esant skirtingai praslydimos deformacijai ϵ_{slip} pirmo modelio skaičiavimuose

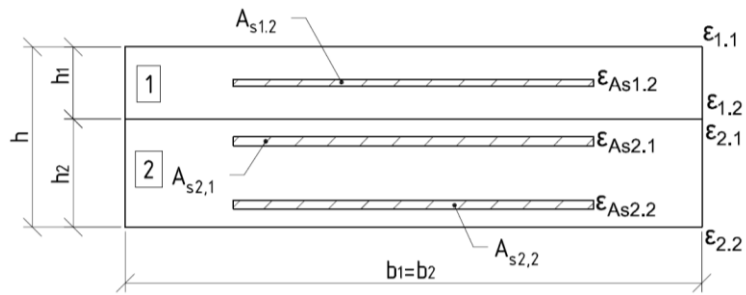


29 pav. Šlyties jėgos tarp sluoksnių T pasiskirstymo per plokštės ilgį priklausomybė, esant skirtingai praslydimio deformacijai $\varepsilon_{\text{slip}}$ antro modelio skaičiavimuose

Šlyties jėgų priklausomybės grafikuose matyti, jog nevertinant ilgalaikių deformacijų sijos viduryje esanti šlyties jėga turi būti didesnė, norint užtikrinti bendrą sluoksnių darbą. Vertinant ilgalaikes deformacijas sluoksniai yra tariamai apgniuždomi, dėl ko reikia mažesnės šlyties jėgos tarp jų sijos viduryje. Tačiau įvertinus ilgalaikius poveikius konstrukcijos sluoksniai apgniuždomi nevienodai, papildomas sluoksnis traukiasi labiau nei stiprinamas. Dėl to, kraštuose, ties atramomis, atsiranda priešingos krypties šlyties jėgos. Šioje zonoje viršutinio elemento apatinis sluoksnis yra gniuždomas, o sijos viduryje tempiamas, dėl to ir šlyties jėgų kryptis yra priešinga. Šiuo atžvilgiu ilgalaikių deformacijų poveikis yra naudingas, kadangi nereikia tokios didelės šlyties jėgos sukibimui atlaikyti tarpatriamio viduryje, o ši jėga pasiskirsto visu konstrukcijos ilgiu. Iš 27-o paveikslėlio matyti, jog pilnai praslydus elementams, šlyties jėga yra lygi nuliui, o bent šiek tiek sukibusių elementų šlyties jėga, vertinant trumpalaikius poveikius, yra 1,82 karto didesnė už jėgą, kuri gauta įvertinant ilgalaikius poveikius. Praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \varepsilon_{\text{slip.max}}$, šlyties jėga tarp sluoksnių abiem skaičiavimo atvejais tolygiai mažėja po 25 %.

3.5. Sustiprintos konstrukcijos deformacijos

Šiame skyriuje pateikiamos sluoksnių viršutinio ir apatinio krašto betono deformacijos bei juose esančios armatūros deformacijos, esant skirtingam praslydimui. Rezultatai pateikiami vertinant tiek trumpalaikius, tiek ilgalaikius poveikius.



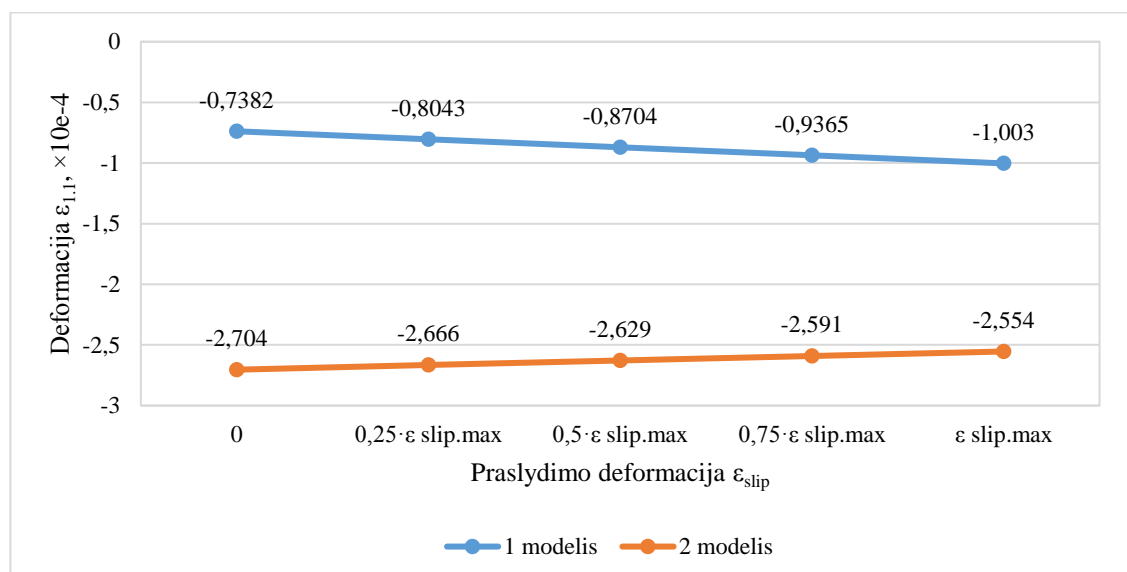
30 pav. Schema, kurioje pažymėti nagrinėjamų deformacijų taškai

15 lentelė. Konstrukcijos deformacijos, vertinant trumpalaikius poveikius

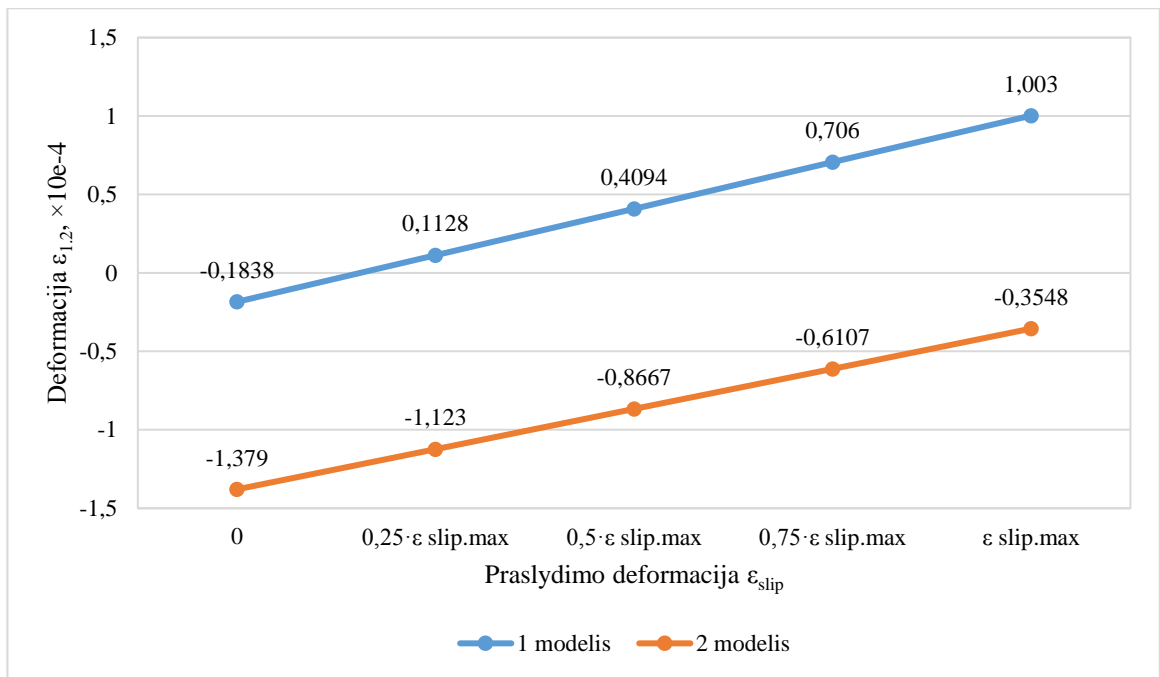
Praslydimo deformacija	Deformacija konkrečiame konstrukcijos taške, $\times 10^{-4}$						
	$\epsilon_{1.1}$	$\epsilon_{As1.2}$	$\epsilon_{1.2}$	$\epsilon_{2.1}$	$\epsilon_{As2.1}$	$\epsilon_{As2.2}$	$\epsilon_{2.2}$
0	-0,7382	-0,461	-0,1838	-0,1838	0,06571	0,9528	1,202
$0,25 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-0,8043	-0,3458	0,1128	-0,7644	-0,3517	1,116	1,528
$0,5 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-0,8704	-0,2305	0,4094	-1,345	-0,7692	1,278	1,854
$0,75 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-0,9365	-0,1153	0,706	-1,926	-1,187	1,441	2,18
$\epsilon_{slip.max}$	-1,003	0	1,003	-2,506	-1,604	1,604	2,506

16 lentelė. Konstrukcijos deformacijos, vertinant ilgalaikius poveikius

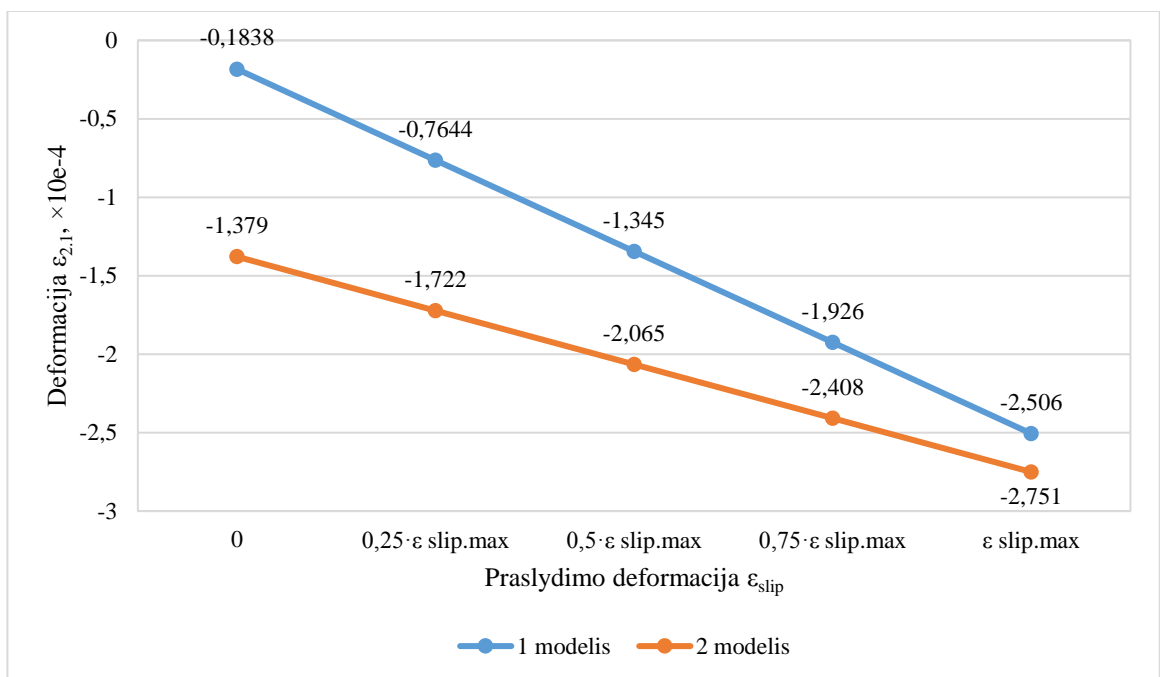
Praslydimo deformacija	Deformacija konkrečiame konstrukcijos taške, $\times 10^{-4}$						
	$\epsilon_{1.1}$	$\epsilon_{As1.2}$	$\epsilon_{1.2}$	$\epsilon_{2.1}$	$\epsilon_{As2.1}$	$\epsilon_{As2.2}$	$\epsilon_{2.2}$
0	-2,704	-2,041	-1,379	-1,379	-0,7822	1,338	1,934
$0,25 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-2,666	-1,894	-1,123	-1,722	-1,027	1,443	2,137
$0,5 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-2,629	-1,748	-0,8667	-2,065	-1,272	1,548	2,341
$0,75 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-2,591	-1,601	-0,6107	-2,408	-1,517	1,652	2,544
$\epsilon_{slip.max}$	-2,554	-1,454	-0,3548	-2,751	-1,762	1,757	2,747



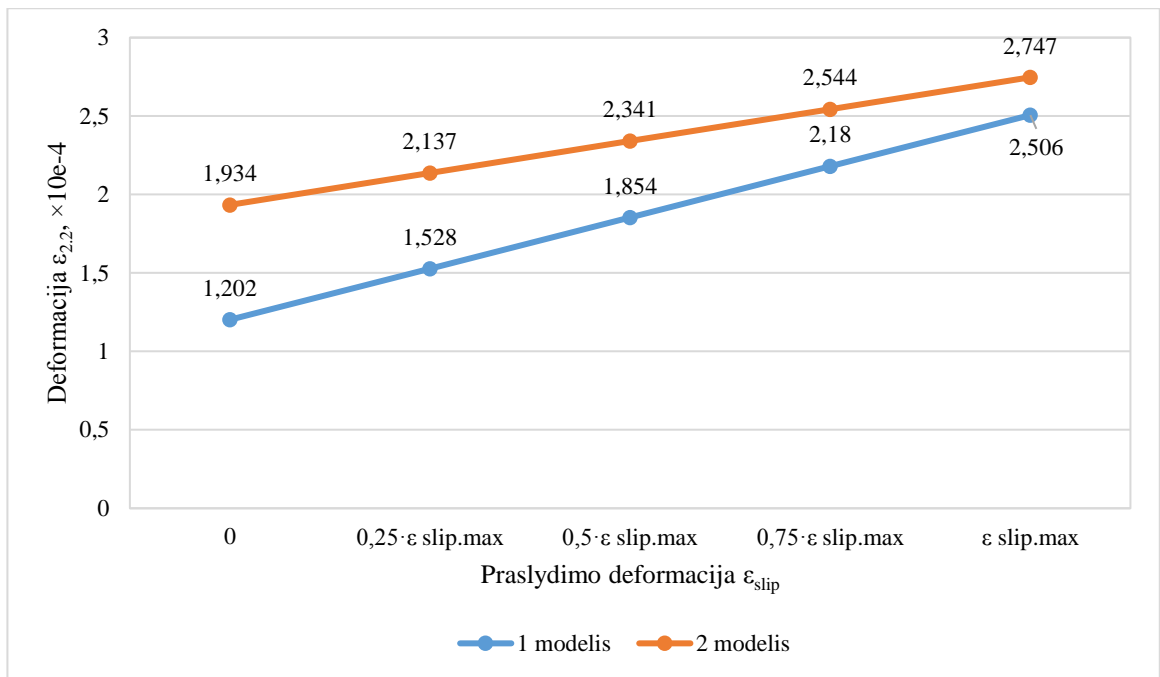
31 pav. Papildomo sluoksnio viršutinio krašto deformacijos $\epsilon_{1.1}$ priklausomybė nuo praslydimo deformacijos ϵ_{slip}



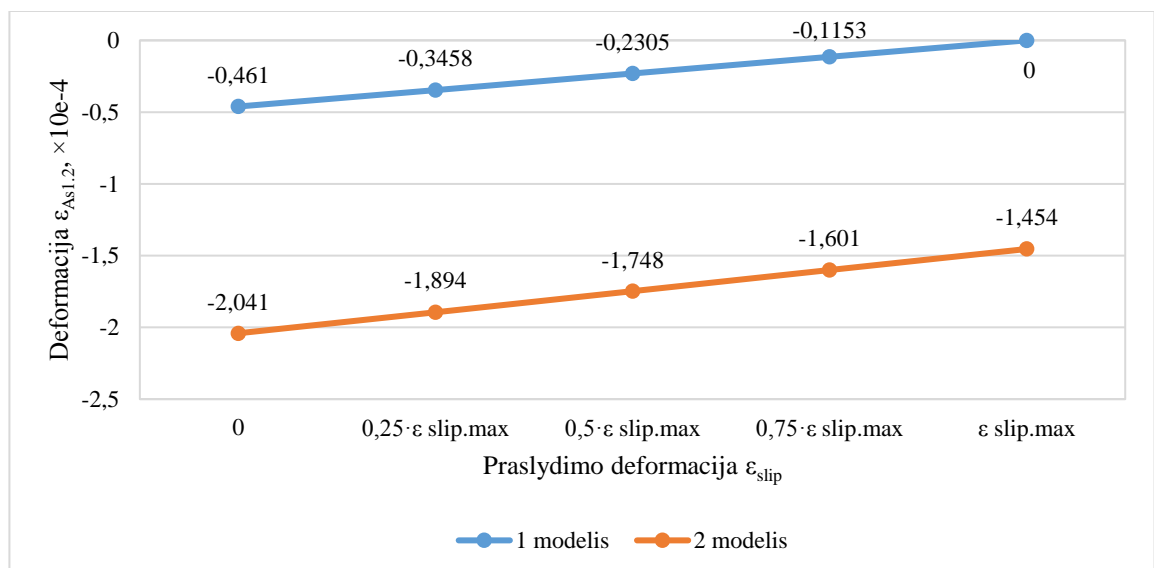
32 pav. Papildomo sluoksnio apatinio krašto deformacijos $\epsilon_{1,2}$ priklausomybė nuo praslydimas deformacijos ϵ_{slip}



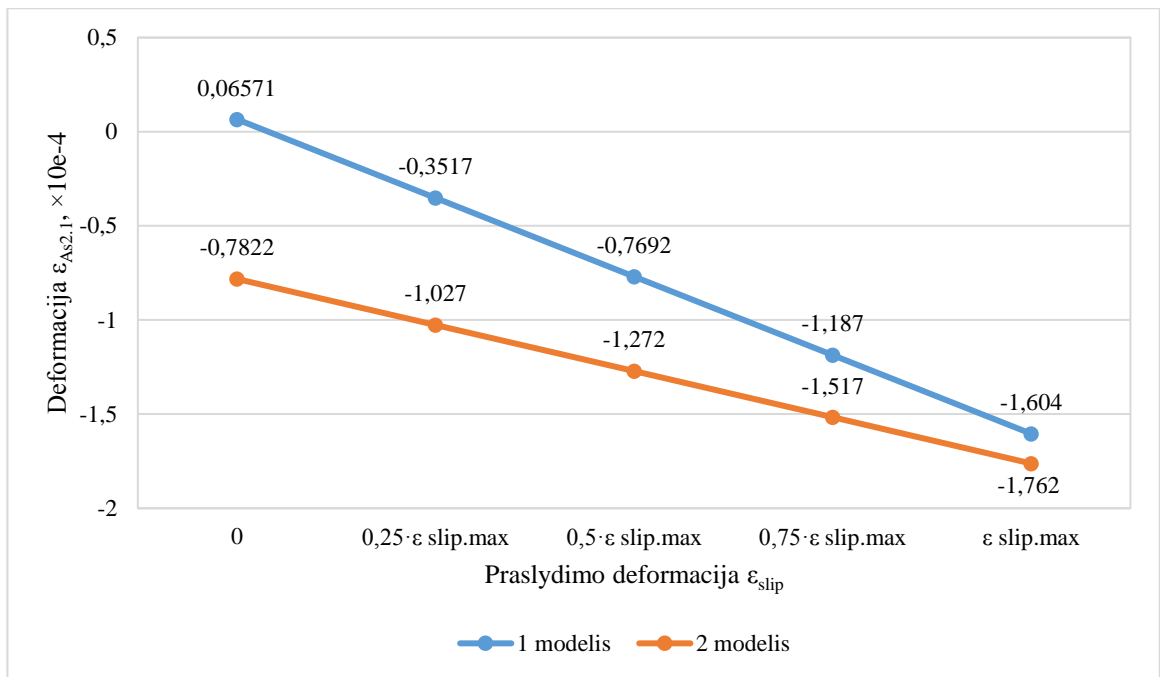
33 pav. Stiprinamo sluoksnio viršutinio krašto deformacijos $\epsilon_{2,1}$ priklausomybė nuo praslydimas deformacijos ϵ_{slip}



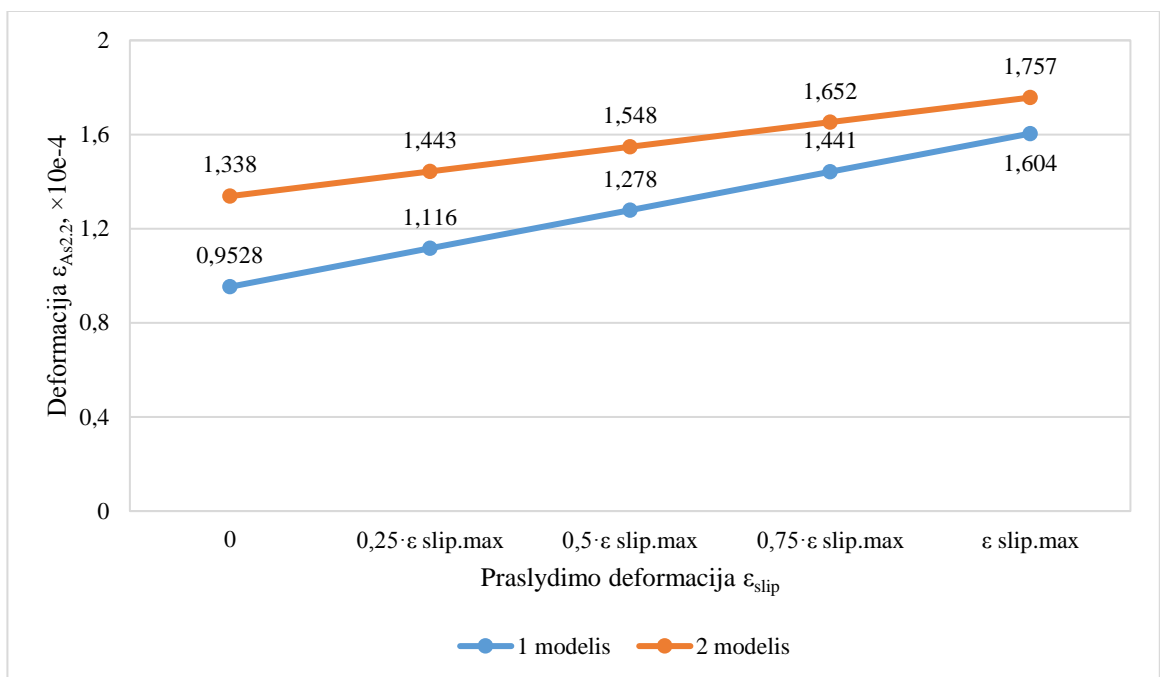
34 pav. Stiprinamo sluoksnio apatinio krašto deformacijos $\epsilon_{2,2}$ priklausomybė nuo praslydimas deformacijos ϵ_{slip}



35 pav. Papildomo sluoksnio armatūros deformacijos $\epsilon_{As1,2}$ priklausomybė nuo praslydimas deformacijos ϵ_{slip}



36 pav. Stiprinamo sluoksnio viršutinės armatūros deformacijos $\epsilon_{As2.1}$ priklausomybė nuo praslydimas deformacijos ϵ_{slip}



37 pav. Stiprinamo sluoksnio apatinės armatūros deformacijos $\epsilon_{As2.2}$ priklausomybė nuo praslydimas deformacijos ϵ_{slip}

Žvelgiant į deformacijų pasiskirstymą, beveik visais atvejais, įvertinant ilgalaikius poveikius, absoliutinis deformacijos dydis buvo gautas didesnis už deformacijas, gautas vertinant tik trumpalaikius poveikius.

Deformacijos papildomo betono sluoksnio viršutiniame krašte abiem skaičiavimo modeliais beveik nekinta. Pirmo skaičiavimo modelio metu, praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{slip.max}$, deformacija didėja po $0,0662 \cdot 10^{-4}$, antro mažėja po $0,0375 \cdot 10^{-4}$. Atitinkamai bendrai pakinta dydžiu

$0,2648 \cdot 10^{-4}$ ir $0,15 \cdot 10^{-4}$. Tarp deformacijų yra labai panašus skirtumas, nepriklausomai nuo praslydimio dydžio ir jis sudaro nuo $1,551 \cdot 10^{-4}$ iki $1,966 \cdot 10^{-4}$.

Beveik visos papildomo betono sluoksnio apatinio krašto deformacijos, vertinant trumpalaikius poveikius, buvo gautos teigiamos, vertinant ilgalaikius poveikius – neigiamos. Dėl to pirmo modelio skaičiavimais gauta deformacija atsirandant praslydimui didėja, antro – mažėja. Pirmame modelyje deformacija iš viso padidėja $1,187 \cdot 10^{-4}$, antrame modelyje sumažėja $1,024 \cdot 10^{-4}$.

Stiprinamo sluoksnio viršutinio krašto deformacija visais atvejais gauta neigiama. Nagrinėjant trumpalaikius poveikius ir praslydimui tarp sluoksnių didėjant 25 %, deformacija didėja po $0,5806 \cdot 10^{-4}$. Vertinant ilgalaikius poveikius, deformacija didėja po $0,343 \cdot 10^{-4}$. Atitinkamai bendras padidėjimas yra $2,322 \cdot 10^{-4}$ ir $1,372 \cdot 10^{-4}$.

Panaši tendencija matoma ir stiprinamo sluoksnio apatiniame krašte. Praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \varepsilon_{\text{slip.max}}$, pirmo modelio deformacija didėja po $0,326 \cdot 10^{-4}$. Antro modelio deformacija didėja po $0,203 \cdot 10^{-4}$. Atitinkamai bendras padidėjimas yra $1,304 \cdot 10^{-4}$ ir $0,813 \cdot 10^{-4}$.

Papildomo sluoksnio armatūra yra orientuota ties skerspjuvio neutraliąja ašimi, todėl pirmo modelio skaičiavimuose, sluoksniams pilnai praslydus, deformacija sumažėja 100 % ir tampa lygi nuliui, o antro modelio skaičiavimais sumažėja 28,8 %. Absoliutinės sumažėjusių deformacijų reikšmės yra $0,461 \cdot 10^{-4}$ ir $0,587 \cdot 10^{-4}$.

Stiprinamo sluoksnio viršutinė armatūra pirmo modelio skaičiavimuose yra tempiama, kai sukibimas tarp sluoksnių maksimalus. Atsiradus 25 % praslydimui, armatūra tampa gniuždoma. Praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \varepsilon_{\text{slip.max}}$, pirmo modelio armatūros deformacija didėja po $0,4174 \cdot 10^{-4}$. Antro modelio armatūros deformacija didėja po $0,245 \cdot 10^{-4}$. Atitinkamai bendras padidėjimas yra $1,67 \cdot 10^{-4}$ ir $0,98 \cdot 10^{-4}$.

Stiprinamo sluoksnio apatinės armatūros deformacija pirmo modelio skaičiavimuose, didinant praslydimą tarp sluoksnių 25 %, didėja po $0,1628 \cdot 10^{-4}$. Antro modelio deformacija didėja po $0,105 \cdot 10^{-4}$. Atitinkamai bendras padidėjimas yra $0,6512 \cdot 10^{-4}$ ir $0,42 \cdot 10^{-4}$.

Abiem skaičiavimo modeliais stiprinamo sluoksnio deformacijos, esant pilnam praslydimui, yra beveik lygios.

3.6. Sustiprintos konstrukcijos įtempiai

Šiame skyriuje pateikiami sluoksnių betono įtempiai bei juose esančios armatūros įtempiai, esant skirtingam praslydimui. Rezultatai pateikiami vertinant tiek trumpalaikius, tiek ilgalaikius poveikius.

Bendra įtempių apskaičiavimo formulė, kurioje eliminuojama įtempių dalis nuo pridėtos ašinės jėgos:

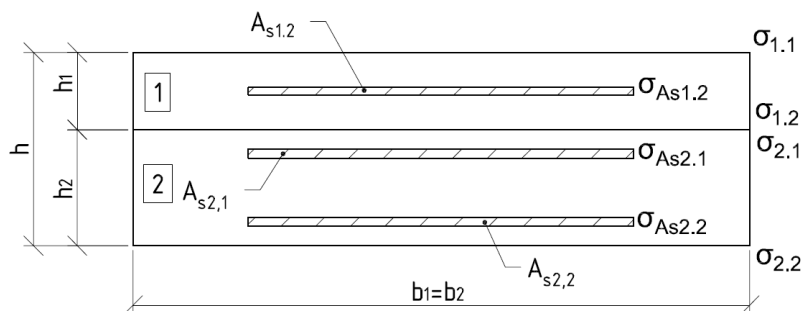
$$\sigma = \varepsilon \cdot E - \frac{N}{A_{\text{eff}}}; \quad (3.6.1)$$

čia ε – konstrukcijos deformacija nagrinėjamame taške;

E – nagrinėjamo sluoksnio tamprumo modulis;

N – nagrinėjamą sluoksnį veikianti ašinė jėga nuo traukumo deformacijos;

A_{eff} – nagrinėjamo sluoksnio efektyvusis skerspjūvio plotas.



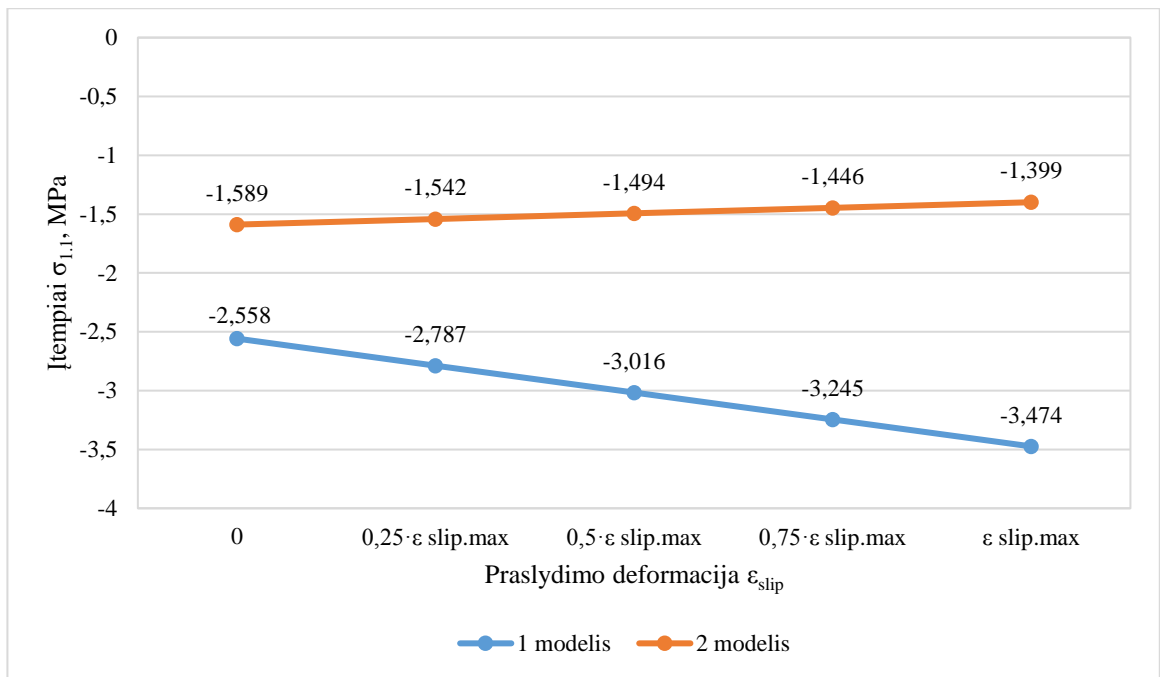
38 pav. Schema, kurioje pažymėtos nagrinėjamų įtempių vietos

17 lentelė. Konstrukcijos įtempiai, vertinant trumpalaikius poveikius

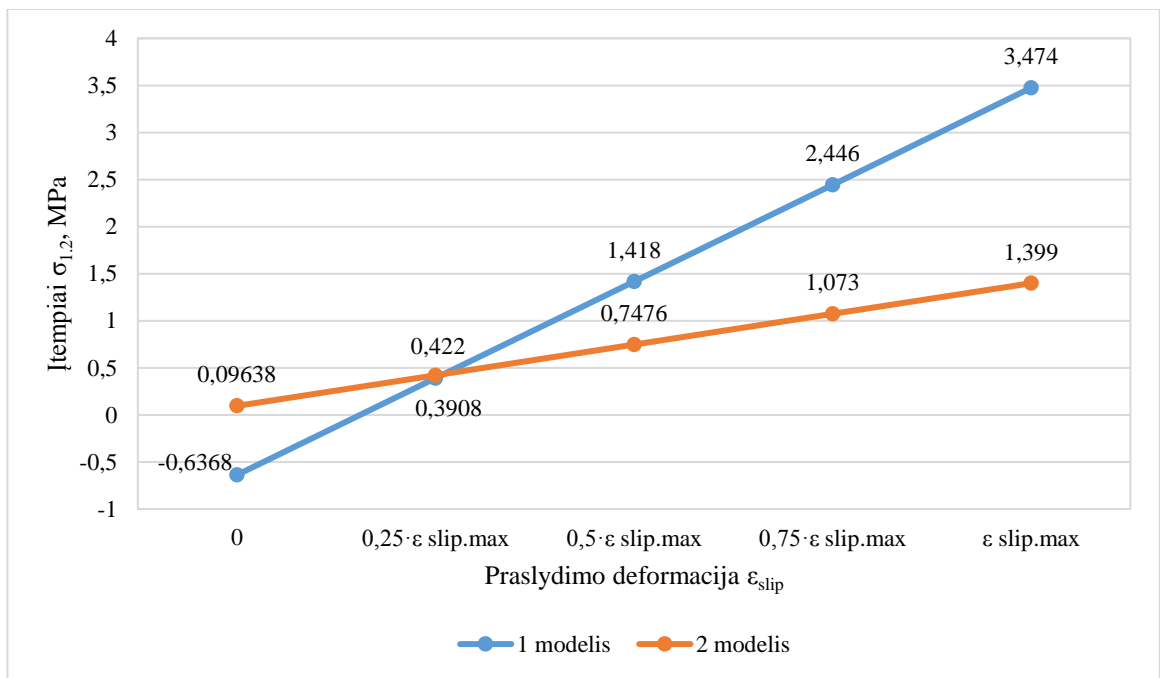
Praslydimo deformacija	Įtempiai konkrečiame konstrukcijos taške, MPa						
	$\sigma_{1.1}$	$\sigma_{As1.2}$	$\sigma_{1.2}$	$\sigma_{2.1}$	$\sigma_{As2.1}$	$\sigma_{As2.2}$	$\sigma_{2.2}$
0	-2,558	-9,22	-0,6368	-0,2323	1,314	19,06	1,52
$0,25 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-2,787	-6,915	0,3908	-0,9662	-7,035	22,31	1,932
$0,5 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-3,016	-4,61	1,418	-1,7	-15,38	25,57	2,344
$0,75 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-3,245	-2,305	2,446	-2,434	-23,73	28,83	2,756
$\epsilon_{slip.max}$	-3,474	0	3,474	-3,168	-32,08	32,08	3,168

18 lentelė. Konstrukcijos įtempiai, vertinant ilgalaikius poveikius

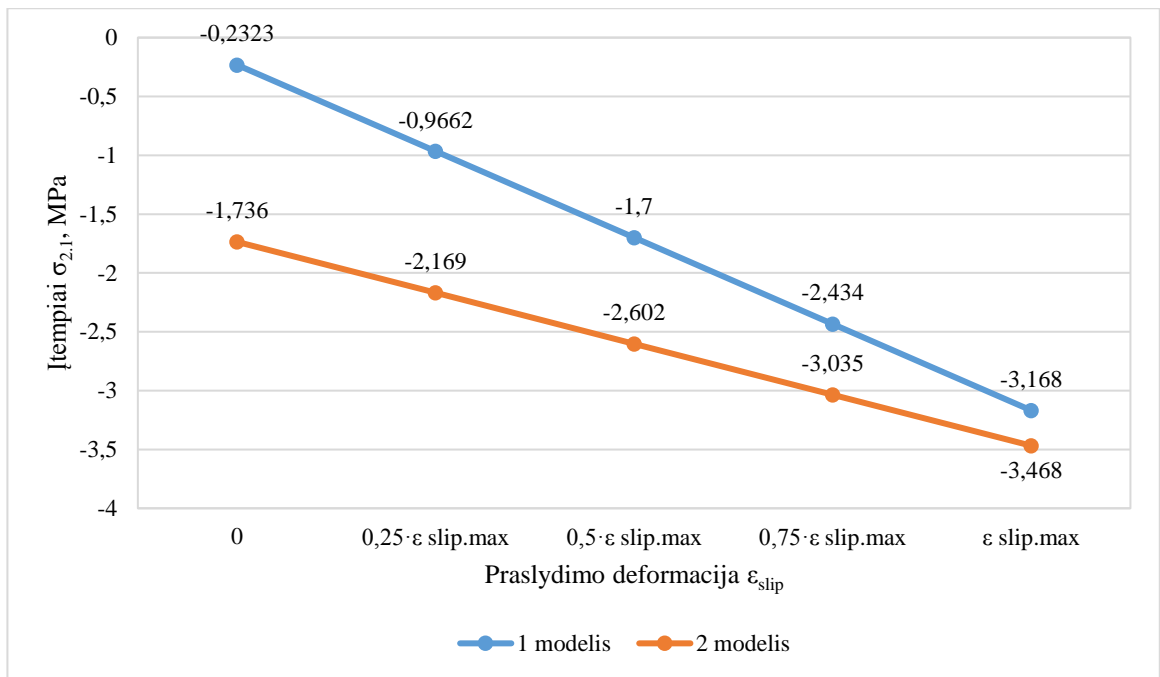
Praslydimo deformacija	Įtempiai konkrečiame konstrukcijos taške, MPa						
	$\sigma_{1.1}$	$\sigma_{As1.2}$	$\sigma_{1.2}$	$\sigma_{2.1}$	$\sigma_{As2.1}$	$\sigma_{As2.2}$	$\sigma_{2.2}$
0	-1,589	-11,74	0,09638	-1,736	-15,6	26,81	2,443
$0,25 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-1,542	-8,803	0,422	-2,169	-20,5	28,9	2,7
$0,5 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-1,494	-5,868	0,7476	-2,602	-25,39	31	2,956
$0,75 \cdot \epsilon_{slip.max}$	-1,446	-2,934	1,073	-3,035	-30,29	33,09	3,212
$\epsilon_{slip.max}$	-1,399	0	1,399	-3,468	-35,19	35,19	3,468



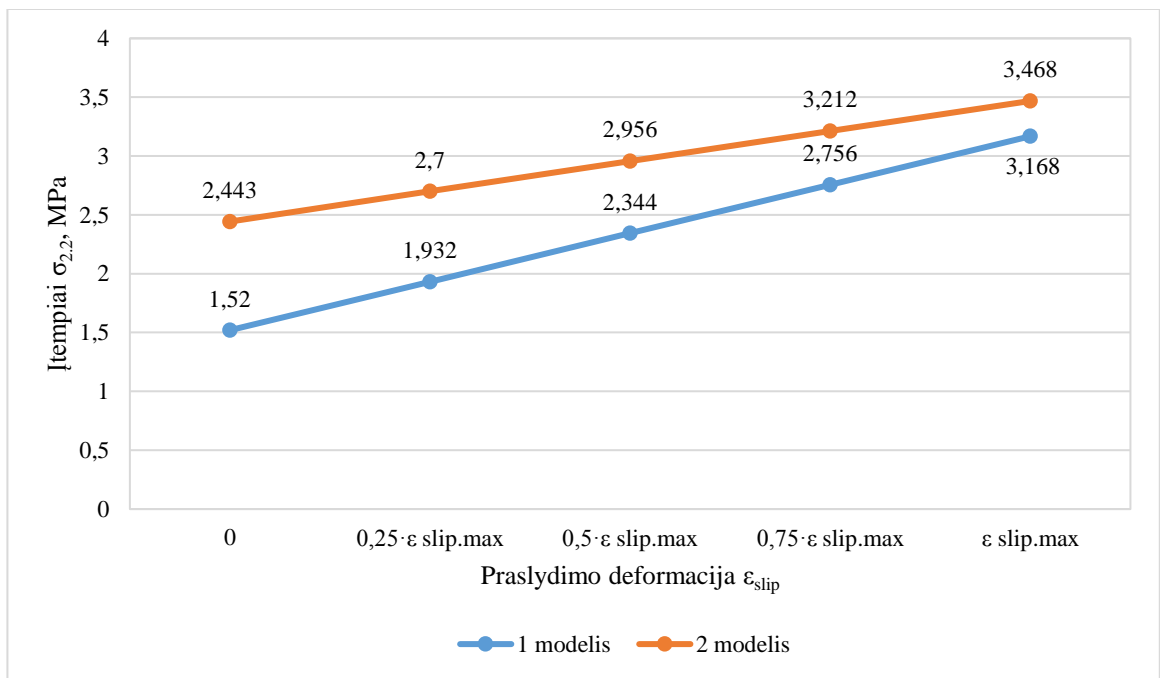
39 pav. Papildomo sluoksnio viršutinio krašto betono įtempių $\sigma_{1,1}$ priklausomybė nuo praslydimo deformacijos ϵ_{slip}



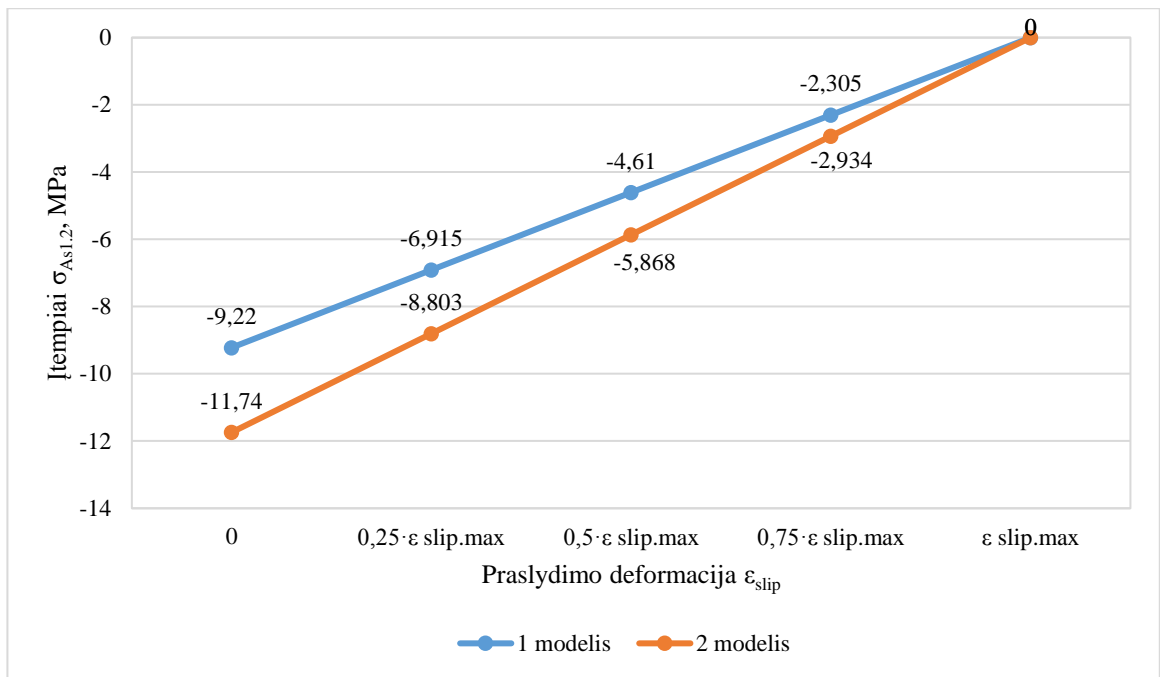
40 pav. Papildomo sluoksnio apatinio krašto betono įtempių $\sigma_{1,2}$ priklausomybė nuo praslydimo deformacijos ϵ_{slip}



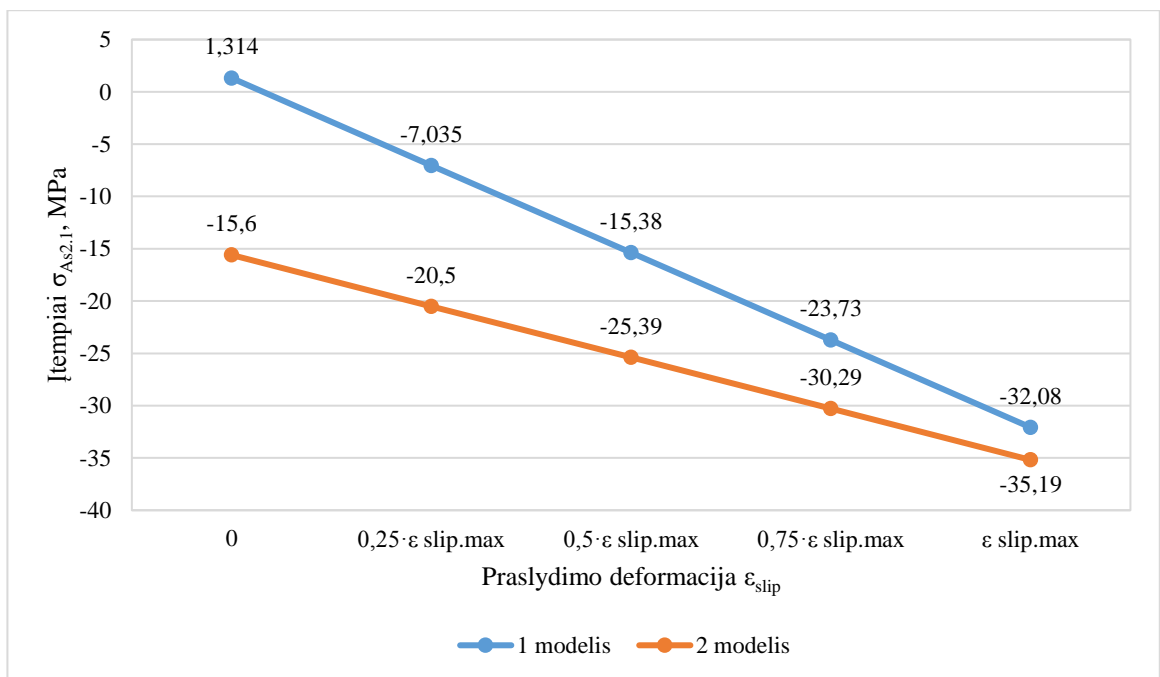
41 pav. Stiprinamo sluoksnio viršutinio krašto betono įtempių $\sigma_{2.1}$ priklausomybė nuo praslydimo deformacijos ϵ_{slip}



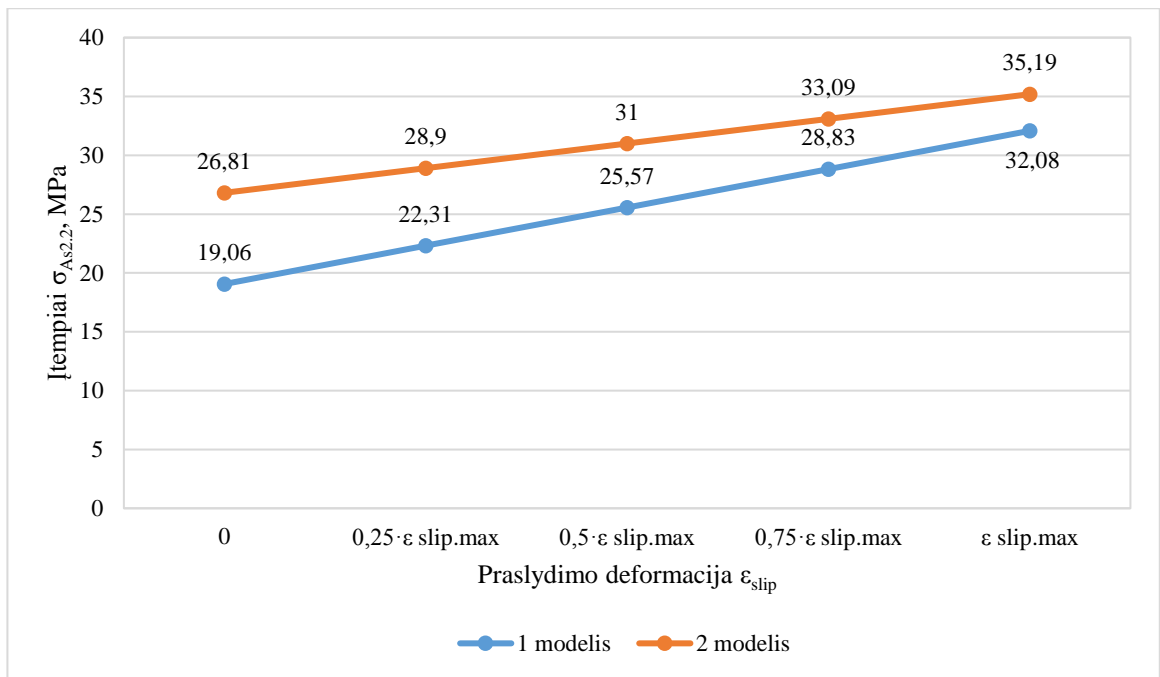
42 pav. Stiprinamo sluoksnio apatinio krašto betono įtempių $\sigma_{2.2}$ priklausomybė nuo praslydimo deformacijos ϵ_{slip}



43 pav. Papildomo sluoksnio armatūros įtempių $\sigma_{As1.2}$ priklausomybė nuo praslydimo deformacijos ϵ_{slip}



44 pav. Stiprinamo sluoksnio viršutinės armatūros įtempių $\sigma_{As2.1}$ priklausomybė nuo praslydimo deformacijos ϵ_{slip}



45 pav. Stiprinamo sluoksnio apatinės armatūros įtempių $\sigma_{As2,2}$ priklausomybė nuo praslydimas deformacijos ϵ_{slip}

Stiprinamo sluoksnio betono ir armatūros įtempiai bei papildomo sluoksnio armatūros įtempiai, įvertinus ilgalaikius poveikius, buvo gauti didesni. Vertinant trumpalaikius poveikius didesni įtempiai buvo gauti tik papildomame betono sluoksnyje.

Iš papildomo sluoksnio betono įtempių diagramos pirmo modelio skaičiavimuose matomas spartus įtempių didėjimas tiek viršutiniame, tiek apatiniame krašte. Šis staigus pokytis lyginant su antru modeliu atsiranda dėl to, kad papildomo sluoksnio tamprumo modulis yra 2,7 kartus didesnis nei antro skaičiavimu metu naudojamas efektyvusis betono tamprumo modulis. Šis tamprumo modulių skirtumas atsiranda dėl valkšnumo. Pirmo modelio skaičiavimuose, praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{slip,max}$, įtempiai viršutiniame betono krašte didėja po 0,229 MPa, apatiniame po 1,028 MPa, atitinkamai bendras padidėjimas yra 0,916 MPa ir 4,111 MPa. Antro modelio skaičiavimuose, praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{slip,max}$, įtempiai viršutiniame betono krašte mažėja po 0,0475 MPa, apatiniame didėja po 0,3257 MPa, atitinkamai bendras pokytis yra 0,19 MPa ir 1,303 MPa.

Stiprinamojo betono sluoksnio įtempiai abiem skaičiavimo modeliais kinta panašiai. Vertinant trumpalaikius poveikius, praslydimui tarp sluoksnių padidėjus 25 %, įtempiai viršutiniame betono krašte didėja po 0,734 MPa, apatiniame po 0,412 MPa, atitinkamai bendras padidėjimas yra 2,936 MPa ir 1,648 MPa. Vertinant ilgalaikius poveikius, praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{slip,max}$, įtempiai viršutiniame betono krašte didėja po 0,433 MPa, apatiniame po 0,2563 MPa, atitinkamai bendras padidėjimas yra 1,732 MPa ir 1,025 MPa.

Papildomo sluoksnio armatūros įtempiai, pilnai praslydus elementams, pasidaro lygūs nuliui, kadangi armatūra yra orientuota papildomo sluoksnio neutraliosios ašies atžvilgiu. Bent šiek tiek sukibus elementams armatūroje atsiranda įtempiai. Antru skaičiavimo modeliu gauti įtempiai visais atvejais buvo 27 % didesni nei pirmuoju skaičiavimo modeliu gauti įtempiai. Praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{slip,max}$, armatūros įtempiai abiem skaičiavimo modeliais mažėja po 25 %.

Vertinant trumpalaikius poveikius, praslydimui tarp sluoksnių padidėjus 25 %, įtempiai viršutinėje stiprinamo sluoksnio armatūroje didėja po 8,349 MPa, apatinėje po 3,255 MPa, atitinkamai bendras padidėjimas yra 33,39 MPa ir 13,02 MPa. Vertinant ilgalaikius poveikius, praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{\text{slip.max}}$, įtempiai viršutinėje stiprinamo sluoksnio armatūroje didėja po 4,9 MPa, apatinėje po 2,095 MPa, atitinkamai bendras padidėjimas yra 19,59 MPa ir 8,38 MPa.

3.7. Sustiprintos konstrukcijos įlinkiai

Šiame skyriuje yra lyginami konstrukcijos įlinkiai, esant skirtingam praslydimui. Rezultatai pateikiami vertinant tiek trumpalaikius, tiek ilgalaikius poveikius.

Dviatramės konstrukcijos įlinkis:

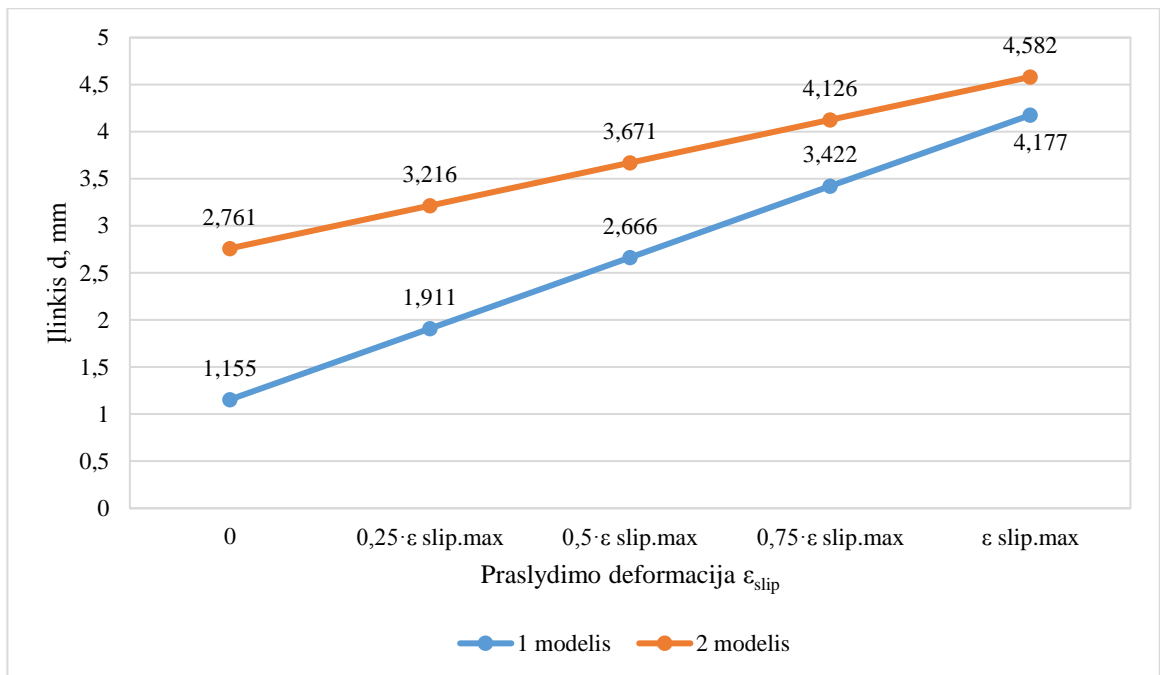
$$d = \frac{5}{48} \cdot \left(\frac{1}{r}\right) \cdot L^2. \quad (3.7.1)$$

19 lentelė. Konstrukcijos įlinkiai ir kreiviai, vertinant trumpalaikius poveikius

Konstrukcijos tipas	Praslydimas deformacija	Konstrukcijos įlinkis ir kreivis	
		$d, \text{ mm}$	$\left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{10^{-6}}{\text{mm}}$
Konstrukcija sustiprinta papildomu betono sluoksniu	0	1,155	0,6931
	$0,25 \cdot \epsilon_{\text{slip.max}}$	1,911	1,146
	$0,5 \cdot \epsilon_{\text{slip.max}}$	2,666	1,6
	$0,75 \cdot \epsilon_{\text{slip.max}}$	3,422	2,053
	$\epsilon_{\text{slip.max}}$	4,177	2,506
Konstrukcija nesustiprinta papildomu betono sluoksniu	-	4,842	2,905

20 lentelė. Konstrukcijos įlinkiai ir kreiviai, vertinant ilgalaikius poveikius

Konstrukcijos tipas	Praslydimas deformacija	Konstrukcijos įlinkis ir kreivis	
		$d, \text{ mm}$	$\left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{10^{-6}}{\text{mm}}$
Konstrukcija sustiprinta papildomu betono sluoksniu	0	2,761	1,656
	$0,25 \cdot \epsilon_{\text{slip.max}}$	3,216	1,93
	$0,5 \cdot \epsilon_{\text{slip.max}}$	3,671	2,203
	$0,75 \cdot \epsilon_{\text{slip.max}}$	4,126	2,476
	$\epsilon_{\text{slip.max}}$	4,582	2,749
Konstrukcija nesustiprinta papildomu betono sluoksniu	-	4,85	2,91



46 pav. Sustiprintos konstrukcijos įlinkio d priklausomybė nuo praslydimos deformacijos ϵ_{slip}

Nagrinėjant įlinkio diagramą nuo trumpalaikių poveikių, pastebėta, jog praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{slip.max}$, įlinkis didėja tiesiškai po $0,7555$ mm arba atitinkamai po $65,4$ %, bendrai įlinkis padidėja $3,022$ mm arba $3,62$ kartus.

Įlinkis nuo ilgalaikių poveikių didėjo šiek tiek lėčiau. Praslydimui tarp sluoksnių didėjant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{slip.max}$, įlinkis didėja po $0,455$ mm arba atitinkamai $16,5$ %, bendrai įlinkis padidėja $1,82$ mm arba 66 %.

Visuose taškuose įlinkis, įvertinus ilgalaikius poveikius, gautas didesnis už įlinkį, vertinant trumpalaikius poveikius. Įlinkio skirtumas svyravo nuo $0,4$ mm iki $1,6$ mm. Pilnai praslydus elementams įlinkiai beveik susivienodina.

Užtikrinus pilną sukibimą tarp sluoksnių konstrukcijos įlinkį, vertinant ilgalaikius poveikius, galima sumažinti 43 %, o vertinant trumpalaikius poveikius – 76 %. Tačiau abi stadijas reikėtų vertinti lygiagrečiai.

Išvados

1. Literatūros analizėje buvo išnagrinėti monolitinių perdangų stiprinimo būdai ir pastebėta, jog nėra pateikiama tiksli papildomu betono sluoksniu stiprinamų konstrukcijų skaičiavimo metodika, kuri leistų analitiškai analizuoti įtempių pasiskirstymą tarp dviejų betono sluoksnių, įvertinant šlyties tarp jų ir betono ilgalaikių deformacijų įtaką.
2. Atlikus skaičiavimus pastebėta, jog užtikrinus pilną sukibimą tarp sluoksnių, konstrukcijos normalinio pjūvio laikomoji galia padidėja du kartus, o pleišėjimo momentas 66 %. Atsiradus mažo dydžio praslydimui, pleišėjimo momento reikšmė staigiai sumažėja, o praslydimui dar labiau didėjant, šio dydžio kitimas lėtėja.
3. Atsirandant praslydimui, stiprinamam sluoksniui tenkantis lenkimo momentas didėja, o papildomam sluoksniui – mažėja. Pastarajam sluoksniui, įvertinus trumpalaikius poveikius, tenka didesnis lenkimo momentas nei vertinant ilgalaikius poveikius. Tai parodo, jog senstant konstrukcijoms stiprinimo efektyvumas mažėja ir stiprinamasis sluoksnis perima vis didesnę lenkimo momentą. Maksimalios šlyties jėgos, vertinant trumpalaikius poveikius, yra 1,82 karto didesnės už jėgas, gautas vertinant ilgalaikius poveikius. Vertinant ilgalaikius poveikius, dėl didelės traukumo deformacijos papildomame sluoksnyje, šlyties jėgos plokštės tarpatrio viduryje sumažėja, o ties atramomis padidėja ir yra priešingos krypties nei plokštės viduryje. Tai yra naudinga, nes sumažėja maksimali šlyties jėga.
4. Beveik visuose taškuose absoliutinis deformacijų ir įtempių dydis gautas didesnis, vertinant ilgalaikes deformacijas. Šie dydžiai praslystant sluoksniams didėja, o jų kitimas yra panašus, išskyrus papildomo sluoksniu įtempių kitimą. Dėl beveik 3 kartus didesnio papildomo sluoksniu tamprumo modulio, vertinant tik trumpalaikius poveikius, jam tenkantys įtempiai kinta gana sparčiai. Apatinio krašto įtempiai, pilnai praslydus elementams, padidėja daugiau nei 4 MPa, tuo tarpu antro modelio skaičiavimuose šis dydis pakinta tik per 1,3 MPa. Įtempių prieaugis skiriasi net trimis kartais.
5. Sluoksniams praslystant dydžiu $0,25 \cdot \epsilon_{slip,max}$, įlinkis pirmo modelio skaičiavimuose didėja po 0,75 mm. Antro modelio skaičiavimuose didėja po 0,45 mm. Įlinkis visuose taškuose, įvertinus ilgalaikius poveikius, gautas didesnis nei vertinant tik trumpalaikius poveikius, tačiau trumpalaikių poveikių metu įlinkis praslydus sluoksniams didėja sparčiau.

Literatūros sąrašas

1. MOSTAKHDEMIN HOSSEINI, M.R., DIAS, S.J.E. and BARROS, J.A.O. Effectiveness of Prestressed NSM CFRP Laminates for the Flexural Strengthening of RC Slabs. *Composite Structures*, 2014, vol. 111. pp. 249-258 ISSN 0263-8223. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.12.018>.
2. REZAZADEH, M., COSTA, I. and BARROS, J. Influence of Prestress Level on NSM CFRP Laminates for the Flexural Strengthening of RC Beams. *Composite Structures*, 2014, vol. 116. pp. 489-500 ISSN 0263-8223. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.043>.
3. HAWILEH, R.A., NAWAZ, W., ABDALLA, J.A. and SAQAN, E.I. Effect of Flexural CFRP Sheets on Shear Resistance of Reinforced Concrete Beams. *Composite Structures*, 2015, vol. 122. pp. 468-476 ISSN 0263-8223. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.010>.
4. SI LARBI, A., CONTAMINE, R., FERRIER, E. and HAMELIN, P. Shear Strengthening of RC Beams with Textile Reinforced Concrete (TRC) Plate. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, no. 10. pp. 1928-1936 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.008>.
5. OEHLERS, D.J., PARK, S.M. and MOHAMED ALI, M.S. A Structural Engineering Approach to Adhesive Bonding Longitudinal Plates to RC Beams and Slabs. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, vol. 34, no. 9. pp. 887-897 ISSN 1359-835X. DOI [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00153-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00153-2).
6. HAWILEH, R.A., RASHEED, H.A., ABDALLA, J.A. and AL-TAMIMI, A.K. Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Hybrid Fiber Reinforced Polymer Systems. *Materials & Design*, 2014, vol. 53. pp. 972-982 ISSN 0261-3069. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.087>.
7. EL MAADDAWY, T. and SOUDKI, K. Strengthening of Reinforced Concrete Slabs with Mechanically-Anchored Unbonded FRP System. *Construction and Building Materials*, 2008, vol. 22, no. 4. pp. 444-455 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.022>.
8. HAMAD, B., MASRI, A., BASHA, H. and BAALBAKI, O. Behavior of T-Shaped Reinforced Concrete Beams Partially Confined by Structural Steel. *Construction and Building Materials*, 2011, vol. 25, no. 2. pp. 1037-1043 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.075>.
9. RAKGATE, S.M. and DUNDU, M. Effectiveness of Surface Preparation on the Capacity of Plated Reinforced Concrete Beams. *Structures*, 2018, vol. 14. pp. 348-357 ISSN 2352-0124. DOI <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.04.004>.
10. ZHU, Y., ZHANG, Y., HUSSEIN, H.H. and CHEN, G. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Or Slabs using Ultra-High Performance Concrete (UHPC): A State of the Art Review. *Engineering Structures*, 2020, vol. 205. pp. 110035 ISSN 0141-0296. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110035>.
11. LAMPROPOULOS, A.P., PASCHALIS, S.A., TSIIOULOU, O.T. and DRITSOS, S.E. Strengthening of Reinforced Concrete Beams using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Engineering Structures*, 2016, vol. 106. pp. 370-384 ISSN 0141-0296. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.042>.

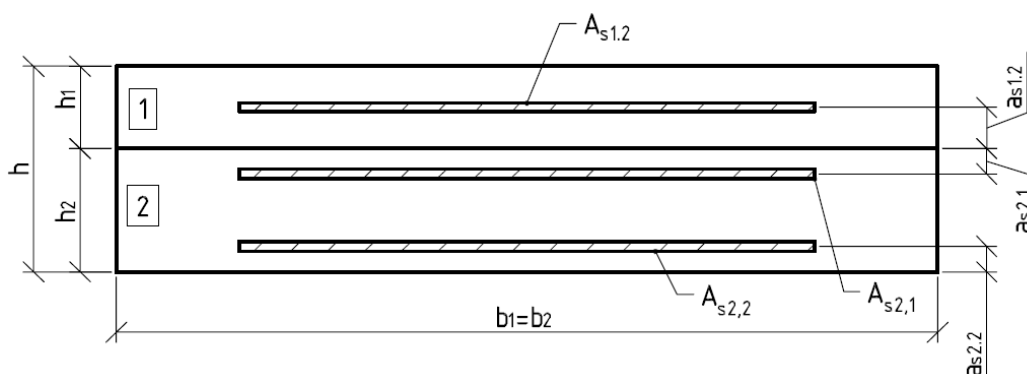
12. Marčiukaitis Gediminas and Valivonis Juozas. *Lengvosios Sluoksniuotosios Statybinės Konstrukcijos: Mokomoji Knyga*. Vilnius: „Technika“, 2007 ISBN 978-9955-28-124-5.
13. Eurokodas 2. *Gelžbetoninių Konstrukcijų Projektavimas. 1-1 Dalis. Bendrosios Ir Pastatų Taisyklės*. 2005-04-15; Lietuviška versija: 2007-09-29 ed. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
14. JOHNSON, R.P. *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns, and Frames for Buildings*. 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2004 ISBN 9781405100359.
15. IBRAHIM, I.S., et al. Experimental Study on the Shear Behaviour of Precast Concrete Hollow Core Slabs with Concrete Topping. *Engineering Structures*, 2016, vol. 125. pp. 80-90 ISSN 0141-0296. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.005>.
16. ADAWI, A., YOUSSEF, M.A. and MESHALY, M.E. Experimental Investigation of the Composite Action between Hollowcore Slabs with Machine-Cast Finish and Concrete Topping. *Engineering Structures*, May 15, 2015, vol. 91. pp. 1-15 ISSN 0141-0296. DOI 10.1016/j.engstruct.2015.02.018.
17. ASTM E965. *Standard Test Method for Measuring Pavement Macrot texture Depth using a Volumetric Technique*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
18. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.
19. GARBACZ, A., COURARD, L. and BISSONNETTE, B. A Surface Engineering Approach Applicable to Concrete Repair Engineering. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, Mar 1, 2013, vol. 61, no. 1. pp. 73-84 ISSN 0239-7528. DOI 10.2478/bpasts-2013-0006.
20. SANTOS, P.M.D. and Júlio, Eduardo N. B. S. A State-of-the-Art Review on Roughness Quantification Methods for Concrete Surfaces. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 38. pp. 912-923 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.045>.
21. SILFWERBRAND, J. Shear Bond Strength in Repaired Concrete Structures. *Materials and Structures*, Jul, 2003, vol. 36, no. 260. pp. 419-424 ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/13859.
22. Júlio, Eduardo N. B. S., BRANCO, F.A.B. and SILVA, V.D. Concrete-to-Concrete Bond Strength. Influence of the Roughness of the Substrate Surface. *Construction and Building Materials*, 2004, vol. 18, no. 9. pp. 675-681 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.023>.
23. SANTOS, P.M.D., Júlio, Eduardo N. B. S. and SILVA, V.D. Correlation between Concrete-to-Concrete Bond Strength and the Roughness of the Substrate Surface. *Construction and Building Materials*, 2007, vol. 21, no. 8. pp. 1688-1695 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.044>.
24. GARBACZ, A., COURARD, L. and KOSTANA, K. Characterization of Concrete Surface Roughness and its Relation to Adhesion in Repair Systems. *Materials Characterization*, 2006, vol. 56, no. 4. pp. 281-289 ISSN 1044-5803. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.10.014>.

25. IOVINELLA, I., PROTA, A. and MAZZOTTI, C. Influence of Surface Roughness on the Bond of FRP Laminates to Concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 40. pp. 533-542 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.112>.
26. TAYEH, B.A., ABU BAKAR, B.H., MEGAT JOHARI, M.A. and VOO, Y.L. Mechanical and Permeability Properties of the Interface between Normal Concrete Substrate and Ultra High Performance Fiber Concrete Overlay. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 36. pp. 538-548 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.013>.
27. SUN, Q., et al. Monotonic and Cyclic Behavior of Headed Steel Stud Anchors Welded through Profiled Steel Deck. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, vol. 157. pp. 121-131 ISSN 0143-974X. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.022>.
28. FERNANDES, H., LÚCIO, V. and RAMOS, A. Strengthening of RC Slabs with Reinforced Concrete Overlay on the Tensile Face. *Engineering Structures*, 2017, vol. 132. pp. 540-550 ISSN 0141-0296. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.011>.
29. COSTA, H., CARMO, R.N.F. and JÚLIO, E. Influence of Lightweight Aggregates Concrete on the Bond Strength of Concrete-to-Concrete Interfaces. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 180. pp. 519-530 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.011>.
30. YUAN, C., et al. Effect of Aggregate Size on the Dynamic Interfacial Bond Behaviour between Basalt Fiber Reinforced Polymer Sheets and Concrete. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 227. pp. 116584 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.310>.
31. GUO, T., XIE, Y. and WENG, X. Evaluation of the Bond Strength of a Novel Concrete for Rapid Patch Repair of Pavements. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 186. pp. 790-800 ISSN 0950-0618. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.007>.

Priedai

1 priedas. Stiprinamo sluoksnio normalinio pjūvio stiprumo skaičiavimas

Skaičiuojamas stiprinamo sluoksnio (elemento indeksas – 2) normalinio pjūvio stiprumas.



P.1.1 pav. Skaičiuojamo skerspjūvio schema

Armatūros tempiamasis stipris: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$.

Armatūros dalinis patikimumo koeficientas: $\gamma_m = 1,15$.

Betono dalinis patikimumo koeficientas: $\gamma_c = 1,5$.

Papildomi koeficientai: $\eta = 1$, $\lambda = 0,8$.

Koeficientas, įvertinantis stačiakampio formos įtempių pasiskirstymo diagramą: $\alpha = 0,9$.

Ribinė betono gniuždymo deformacija: $\varepsilon_{cu} = 0,0035$.

Papildomi duomenys iš ankstesnių skaičiavimų: $f_{ck,2} = 30 \text{ MPa}$, $E_s = 200 \text{ GPa}$, $h_2 = 200 \text{ mm}$, $b_2 = 1000 \text{ mm}$, $a_{s2,1} = 36 \text{ mm}$, $a_{s2,2} = 36 \text{ mm}$, $A_{s2,1} = 5,655 \text{ cm}^2$, $A_{s2,2} = 5,655 \text{ cm}^2$.

Skaičiuotinis plieno tempiamasis stipris:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = 434,8 \text{ MPa.} \quad (\text{P.1.1})$$

Skaičiuotinis betono gniuždomasis stipris:

$$f_{cd,2} = \frac{\alpha \cdot f_{ck,2}}{\gamma_c} = 18 \text{ MPa.} \quad (\text{P.1.2})$$

Skaičiuotinės santykinės tempiamos armatūros deformacijos:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = 0,002174. \quad (\text{P.1.3})$$

Ribinis santykinis gniuždomos zonos aukštis:

$$\xi_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} = 0,617. \quad (\text{P.1.4})$$

Darbo aukštis:

$$d_2 = h_2 - a_{s2.2} = 164 \text{ mm.} \quad (\text{P.1.5})$$

Ribinis gniuždomos zonos aukštis:

$$x_{lim.2} = d_2 \cdot \xi_{lim} = 101,2 \text{ mm.} \quad (\text{P.1.6})$$

Gniuždomos zonos aukštis (nevertinant armatūros $A_{s2.1}$):

$$x_2 = \frac{f_{yd} \cdot A_{s2.2}}{\eta \cdot \lambda \cdot f_{cd.2} \cdot b_2} = 17,07 \text{ mm.} \quad (\text{P.1.7})$$

Armatūra $A_{s2.1}$ yra tempiama, todėl priaartėjimo būdu apskaičiuojami tikslūs armatūros įtempiai ir gniuždomos zonos aukštis. Perskaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis, pasirenkant armatūros $A_{s2.1}$ įtempius lygius f_{yd} :

$$x_2 = \frac{f_{yd} \cdot A_{s2.2} + f_{yd} \cdot A_{s2.1}}{\eta \cdot \lambda \cdot f_{cd.2} \cdot b_2} = 34,15 \text{ mm.} \quad (\text{P.1.8})$$

Patikslinti armatūros $A_{s2.1}$ įtempiai:

$$\sigma_{2.1.1} = \varepsilon_{cu} \cdot E_s \cdot \left(\frac{a_{s2.1} - x_2}{x_2} \right) = 37,97 \text{ MPa.} \quad (\text{P.1.9})$$

Įtempių f_{yd} ir $\sigma_{2.1.1}$ vidurkis:

$$\sigma'_{2.1.1} = \frac{f_{yd} + \sigma_{2.1.1}}{2} = 236,4 \text{ MPa.} \quad (\text{P.1.10})$$

Perskaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis, naudojant patikslintus įtempius:

$$x_2 = \frac{f_{yd} \cdot A_{s2.2} + \sigma'_{2.1.1} \cdot A_{s2.1}}{\eta \cdot \lambda \cdot f_{cd.2} \cdot b_2} = 26,36 \text{ mm.} \quad (\text{P.1.11})$$

Patikslinti armatūros $A_{s2.1}$ įtempiai:

$$\sigma_{2.1.2} = \varepsilon_{cu} \cdot E_s \cdot \left(\frac{a_{s2.1} - x_2}{x_2} \right) = 256,1 \text{ MPa.} \quad (\text{P.1.12})$$

Įtempių $\sigma'_{2.1.1}$ ir $\sigma_{2.1.2}$ vidurkis:

$$\sigma'_{2.1.2} = \frac{\sigma'_{2.1.1} + \sigma_{2.1.2}}{2} = 246,3 \text{ MPa.} \quad (\text{P.1.13})$$

Perskaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis, naudojant patikslintus įtempius:

$$x_2 = \frac{f_{yd} \cdot A_{s2.2} + \sigma'_{2.1.2} \cdot A_{s2.1}}{\eta \cdot \lambda \cdot f_{cd.2} \cdot b_2} = 26,74 \text{ mm.} \quad (\text{P.1.14})$$

Patikslinti armatūros $A_{s2.1}$ įtempiai:

$$\sigma_{2.1.3} = \varepsilon_{cu} \cdot E_s \cdot \left(\frac{a_{s2.1} - x_2}{x_2} \right) = 242,3 \text{ MPa.} \quad (\text{P.1.15})$$

Įtempių $\sigma'_{2.1.2}$ ir $\sigma_{2.1.3}$ vidurkis:

$$\sigma'_{2.1.3} = \frac{\sigma'_{2.1.2} + \sigma_{2.1.3}}{2} = 244,3 \text{ MPa.} \quad (\text{P.1.16})$$

Daugiau priartėjimų nebedaroma, nes įtempiai kinta labai mažai. Perskaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis, naudojant patikslintus įtempius:

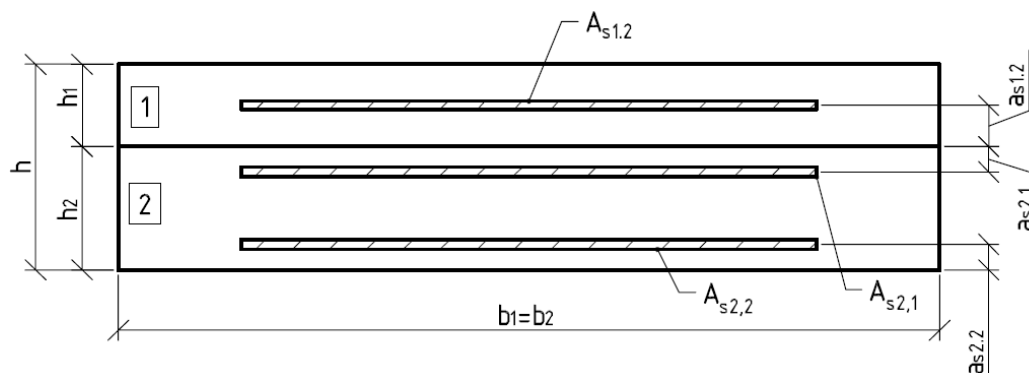
$$x_2 = \frac{f_{yd} \cdot A_{s2.2} + \sigma'_{2.1.3} \cdot A_{s2.1}}{\eta \cdot \lambda \cdot f_{cd.2} \cdot b_2} = 26,67 \text{ mm.} \quad (\text{P.1.17})$$

Normalinio pjūvio stiprumas:

$$M_{Rd.2} = \eta \cdot \lambda \cdot x_2 \cdot f_{cd.2} \cdot b_2 \cdot (d_2 - 0,5 \cdot \lambda \cdot x_2) - \sigma'_{2.1.3} \cdot A_{s2.1} \cdot (h_2 - a_{s2.2} - a_{s2.1}) = 41,2 \text{ kNm.} \quad (\text{P.1.18})$$

2 priedas. Papildomo sluoksnio normalinio pjūvio stiprumo skaičiavimas

Skaičiuojamas papildomo sluoksnio (elemento indeksas – 1) normalinio pjūvio stiprumas.



P.2.1 pav. Skaičiuojamo skerspjūvio schema

Armatūros tempiamasis stipris: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$.

Armatūros dalinis patikimumo koeficientas: $\gamma_m = 1,15$.

Betono dalinis patikimumo koeficientas: $\gamma_c = 1,5$.

Papildomi koeficientai: $\eta = 1$, $\lambda = 0,8$.

Koeficientas, įvertinantis stačiakampio formos įtempių pasiskirstymo diagramą: $\alpha = 0,9$.

Ribinė betono gniuždymo deformacija: $\varepsilon_{cu} = 0,0035$.

Papildomi duomenys iš ankstesnių skaičiavimų: $f_{ck,1} = 30 \text{ MPa}$, $E_s = 200 \text{ GPa}$, $h_1 = 80 \text{ mm}$, $b_1 = 1000 \text{ mm}$, $a_{s1,2} = 40 \text{ mm}$, $A_{s1,2} = 15,39 \text{ cm}^2$.

Skaičiuotinis plieno tempiamasis stipris:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = 434,8 \text{ MPa}. \quad (\text{P.2.1})$$

Skaičiuotinis betono gniuždomasis stipris:

$$f_{cd,1} = \frac{\alpha \cdot f_{ck,1}}{\gamma_c} = 18 \text{ MPa}. \quad (\text{P.2.2})$$

Skaičiuotinės santykinės tempiamos armatūros deformacijos:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = 0,002174. \quad (\text{P.2.3})$$

Ribinis santykinis gniuždomos zonos aukštis:

$$\xi_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} = 0,617. \quad (\text{P.2.4})$$

Darbo aukštis:

$$d_1 = h_1 - a_{s1,2} = 40 \text{ mm}. \quad (\text{P.2.5})$$

Ribinis gniuždomos zonos aukštis:

$$x_{lim.1} = d_1 \cdot \xi_{lim} = 24,67 \text{ mm.} \quad (\text{P.2.6})$$

Gniuždomos zonos aukštis:

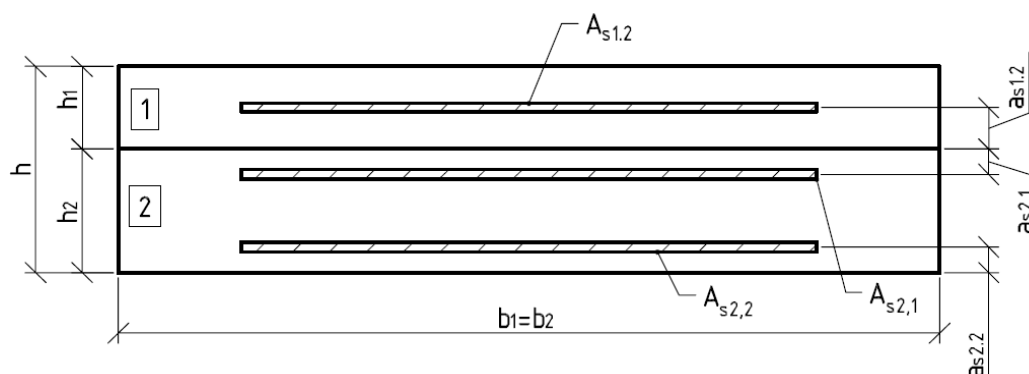
$$x_1 = \frac{f_{yd} \cdot A_{s1.2}}{\eta \cdot \lambda \cdot f_{cd.1} \cdot b_1} = 46,48 \text{ mm.} \quad (\text{P.2.7})$$

Kadangi $x_1 > x_{lim.1}$, todėl pasirenkama $x_1 = x_{lim.1}$ ir normalinio pjūvio stiprumas skaičiuojamas su šia reikšme:

$$M_{Rd} = \eta \cdot \lambda \cdot x_{lim.1} \cdot f_{cd.1} \cdot b_1 \cdot (d_1 - 0,5 \cdot \lambda \cdot x_{lim.1}) = 10,71 \text{ kNm.} \quad (\text{P.2.8})$$

3 priedas. Sustiprintos konstrukcijos normalinio pjūvio stiprumo skaičiavimai, esant pilnam sukibimui tarp sluoksnių

Skaičiuojamas sustiprintos konstrukcijos normalinio pjūvio stiprumas, kai tarp sluoksnių yra pilnas sukibimas.



P.3.1 pav. Skaičiuojamo skerspjūvio schema

Armatūros tempiamasis stipris: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$.

Armatūros dalinis patikimumo koeficientas: $\gamma_m = 1,15$.

Betono dalinis patikimumo koeficientas: $\gamma_c = 1,5$.

Papildomi koeficientai: $\eta = 1$, $\lambda = 0,8$.

Koeficientas, įvertinantis stačiakampio formos įtempių pasiskirstymo diagramą: $\alpha = 0,9$.

Ribinė betono gniuždymo deformacija: $\varepsilon_{cu} = 0,0035$.

Papildomi duomenys iš ankstesnių skaičiavimų: $f_{ck.1} = 30 \text{ MPa}$, $f_{ck.2} = 30 \text{ MPa}$, $E_s = 200 \text{ GPa}$, $h_1 = 80 \text{ mm}$, $h_2 = 200 \text{ mm}$, $b_1 = 1000 \text{ mm}$, $b_2 = 1000 \text{ mm}$, $a_{s1.2} = 40 \text{ mm}$, $a_{s2.1} = 36 \text{ mm}$, $a_{s2.2} = 36 \text{ mm}$, $A_{s1.2} = 15,39 \text{ cm}^2$, $A_{s2.1} = 5,655 \text{ cm}^2$, $A_{s2.2} = 5,655 \text{ cm}^2$.

Skaičiuotinis plieno tempiamasis stipris:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_m} = 434,8 \text{ MPa.} \quad (\text{P.3.1})$$

Skaičiuotinis plieno gniuždomasis stipris:

$$f_{scd} = f_{yd} = 434,8 \text{ MPa.} \quad (\text{P.3.2})$$

Skaičiuotinis papildomo betono sluoksnio gniuždomasis stipris:

$$f_{cd.1} = \frac{\alpha \cdot f_{ck.1}}{\gamma_c} = 18 \text{ MPa.} \quad (\text{P.3.3})$$

Skaičiuotinis esamo betono sluoksnio gniuždomasis stipris:

$$f_{cd.2} = \frac{\alpha \cdot f_{ck.2}}{\gamma_c} = 18 \text{ MPa}. \quad (\text{P.3.4})$$

Skaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis, spėjama, jog neutrali ašis bus papildomame sluoksnyje, todėl nevertinamas stiprinamo sluoksnio betonas. Armatūrai $A_{s1.2}$ pasirenkami įtempiai f_{scd} , o armatūrai $A_{s2.1}$ apskaičiuojami tikrieji įtempiai.

$$\eta \cdot f_{cd.1} \cdot b_1 \cdot \lambda \cdot x + f_{scd} \cdot A_{s1.2} + \frac{\varepsilon_{cu} \cdot (x - h_1 - a_{s2.1})}{x} \cdot E_s \cdot A_{s2.1} = f_{yd} \cdot A_{s2.2}. \quad (\text{P.3.5})$$

Išsprendus lygčių sistemą, gaunamas gniuždomos zonos aukštis $x = 34,78 \text{ mm}$. Pagal gniuždomos zonos aukštį matosi, jog ir armatūra $A_{s1.2}$ yra tempiama. Perskaičiuojamas gniuždomos zonos aukštis pasirenkant, jog armatūros $A_{s2.1}$ įtempiai yra f_{yd} , o armatūrai $A_{s1.2}$ apskaičiuojami tikrieji įtempiai.

$$\eta \cdot f_{cd.1} \cdot b_1 \cdot \lambda \cdot x + \frac{\varepsilon_{cu} \cdot (x - h_1 + a_{s1.2})}{x} \cdot E_s \cdot A_{s1.2} = f_{yd} \cdot A_{s2.2} + f_{yd} \cdot A_{s2.1}. \quad (\text{P.3.6})$$

Išsprendus lygčių sistemą, gaunamas gniuždomos zonos aukštis $x = 38,03 \text{ mm}$.

Armatūros $A_{s1.2}$ deformacija:

$$\varepsilon_{s1.2} = \frac{\varepsilon_{cu} \cdot (x - h_1 + a_{s1.2})}{x} = -1,815 \cdot 10^{-4}. \quad (\text{P.3.7})$$

Pakeičiamas armatūros $A_{s1.2}$ deformacijos ženklas, nes armatūra yra tempiama. Armatūros $A_{s1.2}$ deformacija $\varepsilon_{s1.2} = 1,815 \cdot 10^{-4}$.

Armatūros $A_{s1.2}$ įtempiai:

$$\sigma_{s1.2} = \varepsilon_{s1.2} \cdot E_s = 36,3 \text{ MPa}. \quad (\text{P.3.8})$$

Skaičiavimų patikrinimas. Gniuždomo betono atstojamoji jėga:

$$F_G = F_{c1} = \eta \cdot f_{cd.1} \cdot b_1 \cdot \lambda \cdot x = 547,6 \text{ kN}. \quad (\text{P.3.9})$$

Armatūros $A_{s2.2}$ atstojamoji jėga:

$$F_{s2.2} = f_{yd} \cdot A_{s2.2} = 245,86 \text{ kN}. \quad (\text{P.3.10})$$

Armatūros $A_{s2.1}$ atstojamoji jėga:

$$F_{s2.1} = f_{yd} \cdot A_{s2.1} = 245,86 \text{ kN}. \quad (\text{P.3.11})$$

Armatūros $A_{s1.2}$ atstojamoji jėga:

$$F_{s1.2} = \sigma_{s1.2} \cdot A_{s1.2} = 55,88 \text{ kN}. \quad (\text{P.3.12})$$

Tempiamos jėgos atstojamoji:

$$F_T = F_{s2.2} + F_{s2.1} + F_{s1.2} = 547,6 \text{ kN}. \quad (\text{P.3.13})$$

Tempiamos ir gniuždomos jėgos atstojamosios yra lygios, skaičiavimai atlikti teisingai. Skaičiuojama sustiprintos konstrukcijos normalinio pjūvio laikomoji galia:

$$M_{Rd} = F_{c1} \cdot \left(h_1 + h_2 - a_{s2.2} - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) - F_{s2.1} \cdot (h_2 - a_{s2.2} - a_{s2.1}) - F_{s1.2} \cdot (h_2 - a_{s2.2} + a_{s1.2}) = 82,46 \text{ kNm}. \quad (\text{P.3.14})$$