



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Lenkiamų gelžbetoninių elementų stiprinamų betono sluoksniu pleišėjimo ir standumo tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Andrius Filipovas
Projekto autorius

Doc. dr. Mindaugas Augonis
Vadovas

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Lenkiamų gelžbetoninių elementų stiprinamų betono sluoksniu pleišėjimo ir standumo tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Andrius Filipovas

Projekto autorius

Doc. dr. Mindaugas Augonis

Vadovas

Lekt. dr. Tadas Zingaila

Recenzentas

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Andrius Filipovas

Lenkiamų gelžbetoninių elementų stiprinamų betono sluoksniu pleišėjimo ir standumo tyrimai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, **Andriaus Filipovo**, baigiamasis projektas tema „Lenkiamų gelžbetoninių elementų stiprinamų betono sluoksniu pleišėjimo ir standumo tyrimai“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Filipovas, Andrius. Lenkiamų gelžbetoninių elementų stiprinamų betono sluoksniu pleišėjimo ir standumo tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Mindaugas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Statybos inžinerija, Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: gelžbetonis, stiprinimas, deformacijos, įtempiai, pleišėjimas.

Kaunas, 2018. 56 p.

Santrauka

Konstrukcijų stiprinimas liejant papildomą betono sluoksnį yra populiarus stiprinimo būdas, tačiau literatūroje nenurodoma skaičiavimo metodika, kaip reikėtų įvertinti konstrukcijos standumo ir pleišėjimo momento pokyčius. Stiprinamos konstrukcijos deformacijų ir įtempių diagramose ties sluoksnio pridėjimo vieta atsiranda lūžis, kuris neleidžia konstrukcijos skaičiuoti kaip vientiso skerspjūvio elemento. Šie netolygumai atsiranda dėl pradinės apkrovos, kol išlietas sluoksnis nepasiekia savo stiprumo savybių ir su stiprinama konstrukcija nepradedą veikti kaip vientisas elementas.

Baigiamajame projekte sudarytos dvi deformacijų skaičiavimo metodikos bei pleišėjimo momento apskaičiavimo metodas, paremtas deformacijų pokyčiais. Norint palyginti skaičiavimo metodikas, sudaryti skerspjūviai su skirtingais stiprinamo sluoksnio parametrais. Taip pat aprašytas monolitinis skerspjūvis, kuris savo geometriniais ir medžiagų parametrais atitinka stiprinamą konstrukciją. Keičiant skerspjūvių geometriją ir medžiagų savybes apskaičiuojamos ir analizuojamos kiekviename skerspjūvio elemente susidarančios deformacijos ir įtempiai.

Filipovas, Andrius. Research of Cracking and Stiffness of Flexural RC Members Strengthened by Concrete Layers. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. doc. Mindaugas Augonis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Civil Engineering, Structural and Building Products Engineering

Keywords: reinforced concrete, strengthening, deformations, stress, cracking.

Kaunas, 2018. 56 pages.

Summary

It is a popular method to strengthen reinforced concrete structures with additional layer of concrete but there is no information how to accurately evaluate deformation, stress and cracking moment changes. A sudden change appears in deformation diagram where additional layer meets strengthened structure. Because of this breaking point it is impossible to calculate structure as a monolithic section. When additional layer is still not hardened reinforced concrete structure takes over its weight load and becomes slightly deformed. Only when layer is stiff enough the whole structure can take over external loads.

There are two deformation and stress calculation methods in this project. Section cracking moment is calculated based on deformation changes of a RC section. To compare methods and results, a strengthened structure has different layers of concrete on the compressed side of section. Different additional layer section and materials were used to analyze deformations in all section elements. Also, monolithic structure was designed to compare differences in deformation and cracking moment.

Turinys

Įvadas	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimo būdai	11
1.1.1. Gelžbetoninių konstrukcijų skerspjūvio didinimas	11
1.1.2. Stiprinimas naudojant plieninius profilius	13
1.1.3. Stiprinimas klijuojant plieninį lakštą	14
1.1.4. Stiprinimas klijuojant anglies arba stiklo pluoštu armuotą polimerinę juostą (FRP).....	15
1.1.5. Stiprinimas į konstrukcijos paviršių įklijuojant FRP strypus	15
1.1.6. Stiprinimas injektuojant epoksidines dervas į konstrukciją.....	16
1.2. Situacija Lietuvoje	16
1.3. Situacijos užsienyje apžvalga	17
2. Skaičiavimo metodai	19
2.1. Pirmas metodas.....	19
2.1.1. Pirmojo metodo apskaičiavimo schema	21
2.1.2. Skerspjūvio geometrinių charakteristikų nustatymas	22
2.1.3. Pradinių deformacijų skaičiavimas.....	23
2.1.4. Sustiprinto skerspjūvio geometrinių charakteristikų apskaičiavimas.....	24
2.1.5. Antrinių deformacijų skaičiavimas.....	25
2.1.6. Suminės deformacijos.....	27
2.1.7. Pleišėjimo momento apskaičiavimas.....	29
2.2. Antrasis metodas.....	31
2.2.1. Antrojo metodo apskaičiavimo schema	31
2.2.2. Skerspjūvio geometrinės charakteristikos ir deformacijų apskaičiavimas	32
2.2.3. Suminės deformacijos ir įtempiai.....	36
2.3. Lyginamieji skaičiavimai	37
3. Rezultatai.....	38
3.1. Apkrovos	39
3.2. Apskaičiuotos deformacijos	40
3.3. Apskaičiuoti įtempiai	47
3.3.1. Armatūros įtempių analizė	52
3.4. Pleišėjimo momentas	53
Išvados.....	55
Literatūros sąrašas.....	56

Paveikslų sąrašas

1 pav. A. Demiro ir M. Tekino tirti gelžbetoniniai apvalkalai [2].....	12
2 pav. a) sijos stiprinimas naudojant lovinius profilius; b) stiprinimas naudojant dvitėjus profilius; c) sijos stiprinimas naudojant kampuočius [3]	13
3 pav. a) sijos tempiamosios zonos stiprinimas; b) sijų stiprinimas kirpimo jėgoms [5]	14
4 pav. sijos, su sustiprinta gniuždomąja dalimi, sluoksnių praslydimas [13]	18
5 pav. pirmojo metodo apskaičiavimo algoritmas	21
6 pav. skerspjūvio schema.....	22
7 pav. a) deformacijų diagrama; b) įtempių diagrama ir atstojamosios jėgos.....	23
8 pav. a) antrojo etapo deformacijų diagrama; b) antrojo etapo įtempių diagrama ir atstojamosios jėgos	25
9 pav. a) suminė deformacijų diagrama; b) suminė įtempių diagrama	27
10 pav. antrojo metodo apskaičiavimo algoritmas	31
11 pav. antrojo metodo skerspjūvio schema bei deformacijų diagramos	32
12 pav. antrojo metodo išskaidyta įtempių diagrama	32
13 pav. sijos atrėmimo ir apkrovimo schema	39
14 pav. schema, nurodanti nagrinėtų deformacijų ir įtempių vietas	40
15 pav. papildomo sluoksnio gniuždomo betono krašto deformacijos (tamprumo ribose)	42
16 pav. papildomo sluoksnio gniuždomo betono krašto deformacijos (vertinant plastiškumą)	42
17 pav. papildomo sluoksnio apatinio krašto deformacijos (tamprumo ribose)	42
18 pav. papildomo sluoksnio apatinio krašto deformacijos (vertinant plastiškumą).....	43
19 pav. stiprinamos konstrukcijos gniuždomo betono krašto deformacijos (tamprumo ribose).....	43
20 pav. stiprinamos konstrukcijos gniuždomo betono krašto deformacijos (vertinant plastiškumą)	43
21 pav. stiprinamos konstrukcijos tempiamo betono krašto deformacijos (tamprumo ribose).....	44
22 pav. stiprinamos konstrukcijos tempiamo betono krašto deformacijos (vertinant plastiškumą) ..	44
23 pav. stiprinamos konstrukcijos tempiamos armatūros As1 deformacijos (tamprumo ribose)	44
24 pav. stiprinamos konstrukcijos tempiamos armatūros As1 deformacijos (vertinant plastiškumą)	45
25 pav. stiprinamos konstrukcijos gniuždomos armatūros As2 deformacijos (tamprumo ribose) ...	45
26 pav. stiprinamos konstrukcijos gniuždomos armatūros As2 deformacijos (vertinant plastiškumą)	45
27 pav. papildomo betono sluoksnio armatūros As3 deformacijos (tamprumo ribose)	46
28 pav. papildomo betono sluoksnio armatūros As3 deformacijos (vertinant plastiškumą)	46
29 pav. betono įtempių priklausomybė nuo sluoksnio storio tamprioje stadijoje	49
30 pav. betono įtempių priklausomybė nuo sluoksnio storio vertinant plastinį betono darbą	49

31 pav. betono įtempių pasiskirstymas dėl praslydimo skirtingais skaičiavimo metodais	49
32 pav. armatūros As1 įtempiai MN_T, 1MET_T ir 2MET_T bandiniams	50
33 pav. armatūros As2 įtempiai MN_T, 1MET_T ir 2MET_T bandiniams	50
34 pav. armatūros As3 įtempiai MN_T, 1MET_T ir 2MET_T bandiniams	51
35 pav. armatūros As1 įtempiai MN_P ir 1MET_P bandiniams.....	51
36 pav. armatūros As2 įtempiai MN_P ir 1MET_P bandiniams.....	51
37 pav. armatūros As3 įtempiai MN_P ir 1MET_P bandiniams.....	52
38 pav. pleišėjimo momentų priklausomybė nuo sluoksnio storio.....	53
39 pav. pleišėjimo momentų priklausomybė nuo betono sluoksnio klasės	53
40 pav. pleišėjimo momentų priklausomybė nuo praslydimo	54

Lentelių sąrašas

1 lentelė. B. Adhikario ir H. Mutsuyoshio tyrimo metu gauti rezultatai [5]	14
2 lentelė. W. H. Chungo sijų bandymo rezultatai [8]	16
3 lentelė. A. P. Lampropoulis eksperimento duomenys [13].....	17
4 lentelė. pirmojo metodo skaičiavimams naudojami dydžiai	20
5 lentelė. skerspjūviai, naudojami sluoksnio storio įtakos skaičiavime	38
6 lentelė. konstrukcijų medžiagų savybės	38
7 lentelė. monolitinės konstrukcijos deformacijos tamprioje stadijoje.....	40
8 lentelė. monolitinės konstrukcijos deformacijos plastinėje stadijoje.....	40
9 lentelė. konstrukcijos deformacijos tamprioje stadijoje, apskaičiuotos 1-uoju metodu	41
10 lentelė. konstrukcijos deformacijos plastinėje stadijoje, apskaičiuotos 1-uoju metodu.....	41
11 lentelė. konstrukcijos deformacijos tamprioje stadijoje, apskaičiuotos 2-uoju metodu.....	41
12 lentelė. monolitinės konstrukcijos įtempiai tamprioje stadijoje	47
13 lentelė. monolitinės konstrukcijos įtempiai vertinant plastinį betono darbą	48
14 lentelė. konstrukcijos įtempiai tamprioje stadijoje, apskaičiuoti 1-uoju metodu	48
15 lentelė. konstrukcijos įtempiai, vertinant plastinį betono darbą, apskaičiuoti 1-uoju metodu	48
15 lentelė. konstrukcijos įtempiai tamprioje stadijoje, apskaičiuoti 2-uoju metodu	48
17 lentelė. pleišėjimo momentų rezultatai.....	53

Ivadas

Darbo aktualumas

Gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimas papildomu betono ar gelžbetonio sluoksniu yra labai populiarus stiprinimo būdas dėl nesudėtingos darbų technologijos ir mažos stiprinimo medžiagų kainos. Toks stiprinimas reikalauja išsamaus įtempių persiskirstymo tarp konstrukcijų sluoksnių ir elementų įvertinimo, kadangi sustiprintoje konstrukcijoje papildomas sluoksnis iki sukietėjimo negali perimti apkrovos, o į darbą įsijungia tik po tam tikro kietėjimo laiko. Tokiu būdu sustiprintos konstrukcijos negalima tiesiogiai skaičiuoti kaip kompozito. Darbe numatomas netolygaus įtempių pasiskirstymo stiprinamoje konstrukcijoje ir stiprinamame sluoksnyje įvertinimas.

Darbo tikslas

Nustatyti ir išanalizuoti, kaip pasiskirsto įtempiai gelžbetoniniame elemente jį sustiprinus liejant papildomą gelžbetonio sluoksnį, naudojant du skaičiavimo metodus.

Darbo uždaviniai

1. Iširti kaip kinta deformacijos ir įtempiai stiprinamoje konstrukcijoje, keičiant naujojo sluoksnio storį;
2. Iširti papildomo betono sluoksnio skirtingų tamprumo modulių daromą įtaką deformacijų ir įtempių pasiskirstymui;
3. Nustatyti kaip kinta pleišėjimo momentas stiprinamoje konstrukcijoje ir palyginti su monolitinio skerspjuvio pleišėjimo momentu;
4. Nustatyti, kokia įtaką konstrukcijos deformacijoms, įtempiams ir pleišėjimo momentui daro praslydimas tarp sluoksnių.

Mokslinis naujumas

Reglamentuose nėra pateikiama metodika tokiu būdu stiprinamoms konstrukcijoms skaičiuoti ir projektuoti. Pasiūlytas stiprinamų lenkiamų gelžbetoninių konstrukcijų skaičiavimo metodas leis tiksliau įvertinti tokių konstrukcijų elgseną ir mechanines savybes.

Praktinė vertė

Labai daug konstrukcijų yra stiprinamos liejant papildomą betono sluoksnį, todėl išanalizuota metodika leis tiksliau įvertinti kaip pasikeičia konstrukcijos elgsena po stiprinimo.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimo būdai

Konstrukcijos stiprinamos kuomet norima pagerinti esamų konstrukcijų būklę. Pagrindinė priežastis – konstrukciniai elementai yra pasenę, nebetinkami eksploatuoti. Su tokia problema dažniausiai susiduriama kai norima rekonstruoti senus pastatus. Rekonstrukcijos metu dažnai pakeičiama jų naudojimo paskirtis, keičiama pastatų konstrukcinė schema, dėl šios priežasties gali padidėti naudojimo apkrovos.

Renkantis stiprinimo metodą, reikia įvertinti: kiek padidės konstrukcinio elemento laikomoji galia po stiprinimo; kokie yra matmenų apribojimai; ar yra patogus priėjimas prie stiprinamos konstrukcijos; kokia yra naudojamų medžiagų bei darbų atlikimo kaina ir trukmė.

1.1.1. Gelžbetoninių konstrukcijų skerspjuvio didinimas

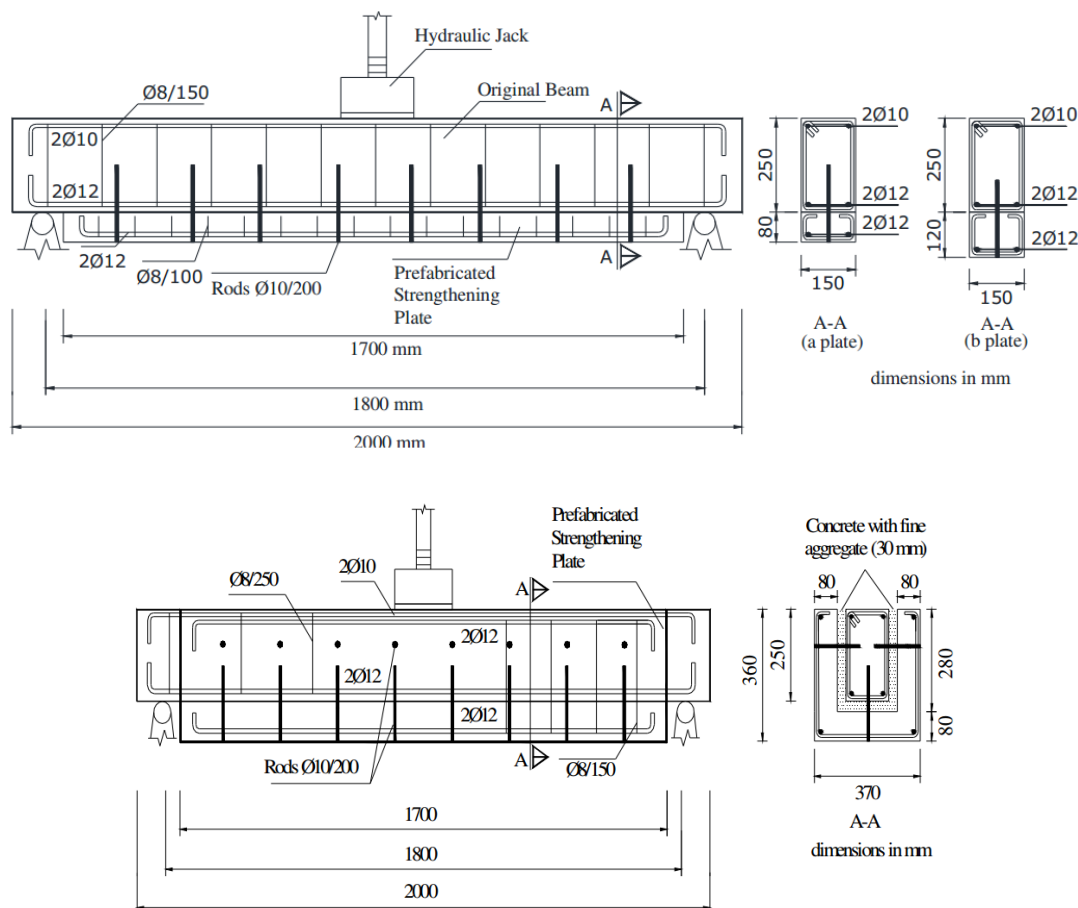
Tokį stiprinimo būdą galima naudoti įvairioms konstrukcijoms – kolonoms, sijoms, perdangos plokštėms. Skerspjuvio didinimo metodas skaidomas į dvi grupes: 1) kai ant stiprinamos konstrukcijos liejamas naujas betono sluoksnis, armuotas įprasta arba iš anksto įtempinama armatūra; 2) didinant skerspjuvį surenkamais gelžbetoniniais antdėklais.

Naujo betono sluoksnio liejimas ant stiprinamos konstrukcijos yra vienas iš seniausių ir pigiausių metodų, nes tam naudojamos pigiausios medžiagos, lyginant su kitais stiprinimo būdais. Tam, kad būtų padidinta konstrukcijos laikomoji galia, turi būti užtikrintas bendras stiprinamos konstrukcijos ir naujo betono sluoksnio darbas. Pavyzdžiui, surenkamų kiaurymėtu plokščių paviršius prieš stiprinant turi būti šiurkštus, nelygumų aukštis 5–6,35 mm, pagal ACI 318 ir CSA A12.3 standartus. Taip pat gali tekti naudoti įvairius priedus, kurie didina betono ir konstrukcijos tarpusavio sukibimą. Papildomų medžiagų (priedų) naudojimas stipriai padidina šio metodo kainą (A. Adawi *et al*, 2016). Jei sukibimo neįmano išgauti vien dėl nepakankamo šiurkštumo, stiprinamos sijos, kolonos ar plokštės paviršiuje yra išgręžiamos skylės, į kurias statomi armatūros strypai ir įtvirtinami injektuojant specialų betono mišinį. Užtikrinus gerą sukibimą, ant stiprinamos konstrukcijos montuojamas armatūros tinklas arba karkasas, kuris užliejamas betono sluoksniu. Naudojant iš anksto įtempiamą armatūrą, konstrukcijos paviršiuje padaromi kanalai, pro kuriuos prakišama įtempinama armatūra. Kanalai užbetonuojami, o kai betonas pasiekia reikalingą stiprį, armatūra įtempinama ir į kanalus prileidžiama specialaus betono mišinio.

Kitas būdas padidinti elemento skerspjuvį yra gamyklose pagamintų gelžbetoninių antdėklų montavimas ant konstrukcijos. Pavyzdžiui, ant sijų gali būti montuojami stačiakampio skerspjuvio

antdėklai iš vienos arba kelių konstrukcijos pusių, arba iškart paruošti U formos skerspjūvio antdėklai. Gaminant tokius elementus, juose yra įmontuojami inkariniai strypai, kuriais antdėklai pritvirtinami prie konstrukcijų. Tvirtinimui naudojama epoksidine derva.

A. Demiras ir M. Tekinas [2] atliko bandymus, kurių metu nustatė kaip pakinta stiprinamos konstrukcijos laikomoji galia naudojant skirtingus antdėklus.



1 pav. A. Demiro ir M. Tekino tirti gelžbetoniniai apvalkalai [2]

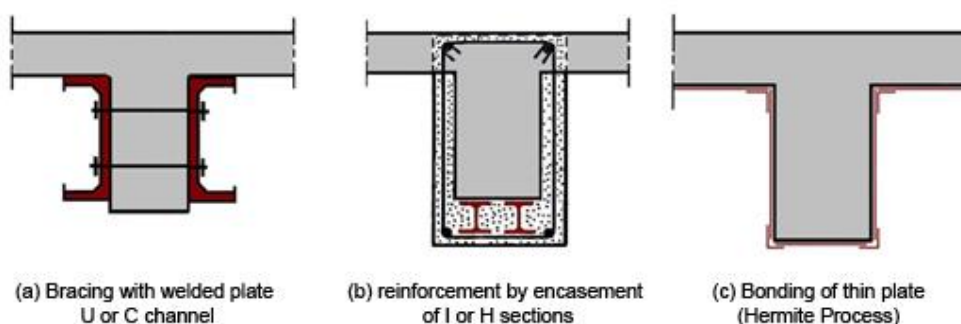
Tyrimo metu buvo naudojami skirtingi gelžbetoniniai antdėklai, pavaizduoti 1 pav.. Pagal gautus rezultatus buvo nustatyta, kad naudojant stačiakampio skerspjūvio antdėklus, sių laikomoji galia padidėjo 41 %, o naudojant U formos antdėklus – 76 %. Kadangi teoriniuose skaičiavimuose nebuvo vertinamas inkarų ir epoksidinės dervos darbas, faktiniai ir teoriniai duomenys nesutapo (A. Dermi, M. Tekin, 2011).

Skerspjūvio didinimo metodą, kai betonas yra liejamas vietoje, naudoti verta tuomet, kai yra dideli konstrukcijų plotai, pavyzdžiui, perdangų plokštės. Kitais atvejais reikia daug skirtingų klojinių, kurių gamyba labai pailgina darbų atlikimo laiką. Naudoti antdėklus patartina, kuomet yra daug vienodų konstrukcijų. Tokiu atveju gamykloje jie gaminami vienodi. Didžiausi trūkumai –

konstrukcijose reikia išgręžti skyles, kurios turi labai tiksliai sutapti su antdėklų inkariniais strypais, taip pat skerspjūvio didinimo metodą ne visada įmanoma taikyti dėl ribotos erdvės.

1.1.2. Stiprinimas naudojant plieninius profilius

Dar vienas iš senesnių gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimo būdų yra toks, kuomet prie konstrukcijos yra tvirtinami plieniniai profiliai (kampuočiai, loviai, dvitėjai profiliai ir t. t.). Metodus išpopuliarėjo dėl konstrukcijos paprastumo ir trumpos darbų atlikimo trukmės. Prieš stiprinant konstrukcijas yra įvertinamas laikomosios galios sumažėjimas, kuris kompensuojamas metalinio profilio laikomąja galia. Stiprinant sijas, kurioms nereikalingas didelis laikomosios galios prieaugis, dažnai naudojami kampuočiai arba loviniai profiliai. Kitais atvejais naudojami dvitėjai profiliai (M. A. El-Reedy, 2010). Šių elementų tvirtinimui prie konstrukcijos naudojami varžtai.



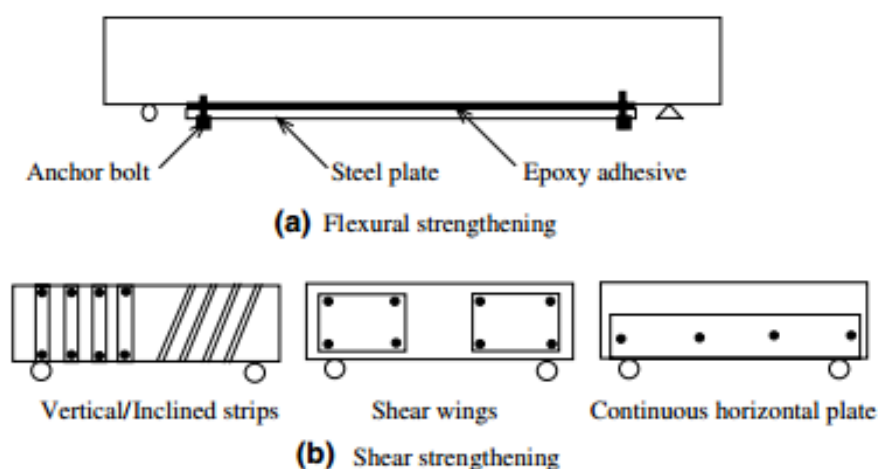
2 pav. a) sijos stiprinimas naudojant lovinius profilius; b) stiprinimas naudojant dvitėjus profilius; c) sijos stiprinimas naudojant kampuočius [3]

Kolonos dažniausiai stiprinamos naudojant plieninius kampuočius, kurie išdėstomi kolonos kampuose. Tam tikru žingsniu kampuočiai sujungiami horizontaliomis plieninėmis juostomis, šie elementai tarpusavyje yra suvirinami. Maži tarpai tarp plieninio karkaso ir kolonos yra užglaistomi naudojant cementą ar epoksidinę dervą. Toks metodas reikalauja mažai vietos, lyginant su gelžbetoniais antdėklais (A.M Tarabia, H.F. Albakry, 2014).

A.M. Tarabis ir H.F. Albakris [4] atliko bandymus su kvadratinio skerspjūvio kolonomis, kurių metu nustatyta, kad naudojant plieninius kampuočius, sujungtus juostomis, kolonos laikomoji galia padidėja nuo 35 % iki 110 %. Taip pat nustatyta, kad tarpams užpildyti naudojant epoksidinę dervą vietoje cementinio skiedinio, stiprumas padidėja, tačiau lyginant dervų ir cemento kainą, naudoti epoksidines dervas nėra racionalu.

1.1.3. Stiprinimas klijuojant plieninį lakštą

Prie stiprinamų konstrukcijų, dažniausiai gelžbetoninių sijų, epoksidine derva yra klijuojami plieniniai lakštai. Lakštų forma ir padėtis parenkama pagal tai, kokioje konstrukcijos vietoje ir kokioms veikiančioms jėgoms reikia padidinti sijų atsparumą. Norint padidinti atsparumą lenkimo įrąžoms, dažniausiai vientisi plieniniai lakštai klijuojami konstrukcijos tempiamosioje zonoje. Jei norima padidinti atsparumą kirpimo jėgoms, galimos įvairios plieno gaminių formos, pavyzdžiui, kampu pasvirusios plokštelės arba stačiakampės plokštelės didžiausių skersinių jėgų veikimo zonoje, taip pat gali būti naudojamas lakštas, priklijuotas ant sijos sienelės išilgai visu konstrukcijos ilgiu (Bimal Babu Adhikary *et al*, 2005).



3 pav. a) sijos tempiamosios zonos stiprinimas; b) sijų stiprinimas kirpimo jėgoms [5]

Nors lakštai yra klijuojami su epoksidine derva, juos vis tiek reikia tvirtinti papildomais varžtais. B. B. Adhikaris ir H. Mutsuyoshis [5] ištyrė kaip kinta dvitramės sijos, sustiprintos plieniniu lakštu ties sienele, laikomoji galia, kai ji yra apkraunama taškine jėga per sijos vidurį. Pagal gautus duomenis nustatyta, kad tokiu būdu stiprintų sijų laikomoji galia padidėja iki 35 %, priklausomai nuo naudojamo lakšto storio.

1 lentelė. B. Adhikario ir H. Mutsuyoshio tyrimo metu gauti rezultatai [5]

Properties of reinforcement and steel plates			Experimental results			
Reinforcement or steel plates	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Beam no.	Diagonal crack strength (kN)	Ultimate shear strength (kN)	Relative strength
6 mm diameter bar	346	192	C-1	36.7	98.2	1.00
22 mm diameter bar	391	186	C-2	63.7	116.4	1.19
2.3 mm thick plate	378	209	C-3	63.3	106.3	1.08
4.5 mm thick plate	382	198	C-4	63.7	126.4	1.29
6.0 mm thick plate	398	210	C-5	80.8	132.4	1.35

Šio metodo trūkumai: lakštai yra didelio svorio, todėl apsunkina montavimo darbus; plienas lengvai koroduoja, reikalingas metalo paviršiaus padengimas antikorozinėmis priemonėmis; lakštai yra gaminami ribotų matmenų, todėl gali būti reikalingi papildomi sujungimai; naudojant plieno lakštus

tempiamojoje zonoje, stipriai padidėja skerspjūvio armavimo koeficientas, todėl viršijus leistinas apkrovas, konstrukcija suyra staiga, kai nebeatlaiko betono gniuždomoji zona.

1.1.4. Stiprinimas klijuojant anglies arba stiklo pluoštu armuotą polimerinę juostą (FRP)

Rinkoje pasirodžius pluoštu armuotiems polimerams, buvo pradėta daug tyrimų, kuriais buvo tiriama, kaip pasikeičia konstrukcijų elgsena, veikiant skirtingoms jėgoms. Pluoštu armuotų polimerinių juostų stiprumo ir standumo santykiai lyginant su savuoju svoriu yra dideli. Ši medžiaga lengvai formuojama, gali būti naudojama ant įvairių formų paviršių, taip pat pasižymi nesudėtingu montavimu.

Giuseppis Spadea ir kiti [6], atliko gelžbetoninių konstrukcijų, sustiprintų pluoštu armuotų polimerų juostomis, stiprumo bandymus. Bandymo metu buvo tiriamos įvairios konstrukcijų apklijavimo konfigūracijos ir kaip jos paveikia konstrukcijos atsparumą lenkimo momentui ir skersinėms jėgoms. Sijos su priklijuota anglies pluoštu armuotų polimerų juosta (CFRP), pritvirtinta tik prie sijos tempiamosios zonos, atlaikė didesnes apkrovas nei kontrolinis bandinys, tačiau suiro trapiai, pasiekus maksimalią laikomąją galią. Suirimas buvo staigus, kai juostos atsiklijavo nuo konstrukcijos. Kitų bandinių, kurių polimerais armuotos juostos buvo klijuojamos didesniame plote, suirimas buvo labiau plastiškas, o laikomoji galia padidėjo daugiau. Kadangi abiem atvejais bandiniai suiro staiga, nebuvo galima nustatyti tikslaus laikomosios galios prieaugio (Giuseppe Spadea *et al*, 2015).

1.1.5. Stiprinimas į konstrukcijos paviršių įklijuojant FRP strypus

FRP strypai gaminami iš tokių pačių polimerų kaip ir FRP juostos. Naudojami anglies arba stiklo pluošto polimerai. Stiprinant konstrukcijas tokiais strypais, reikia įvertinti strypo tipą, įklijavimo ilgį bei griovelių didumą. Šis metodas skirtas padidinti konstrukcinių elementų lenkiamąjį stiprį bei atsparumą skersinėms jėgoms. Metodas patogus tuo, kad konstrukcijos matmenys visiškai nepadidėja. Pavyzdžiui, stiprinant daugiaatramių sijų tempiamąją zoną ties atrama, kuri yra sijos viršutinėje dalyje, nereikia keisti grindų konstrukcijos sluoksnių. Stiprinant kitais būdais, tokiose vietose padidėtų sijos skerspjūvis.

Prieš montuojant FRP strypus, konstrukcijose reikiama kryptimi padaromi grioveliai. Iki pusės pripildomi epoksidine derva, tuomet dedami strypai, likęs tarpas iki konstrukcijos paviršiaus užpildomas ta pačia derva.

De Lorenzis ir kiti [7], tyrė sijas, kurių tempiamojoje zonoje buvo sumontuoti FRP strypai. Bandiniuose buvo naudojami ir anglies, ir stiklo pluoštu armuotų polimerų strypai, tai pat buvo daromi nevienodi strypų ilgiai bei grioveliai. Dauguma bandinių suiro dėl epoksidinės dervos

skilimo arba dervos atšokimo nuo betono. Tik keliuose iš bandinių sutrūkinėjo betonas. Nustatyta, kad didinant griovelio gylį ir plotį, bendras sijos stiprumas didėjo nuo 8 % iki 24 %, nes didėjo epoksidinės dervos sluoksnis, kuris padidino atsparumą skilimui. Taip pat nustatyta, kad didinant strypų įklįjavimo ilgį, galutinis stiprumas didėja, tačiau vidutinis sukibimo stiprumas sumažėjo dėl nelygaus sukibimo įtempių pasiskirstymo (De Lorenzis *et al*, 2000).

1.1.6. Stiprinimas injektuojant epoksidines dervas į konstrukciją

Gelžbetoninės konstrukcijos laikui bėgant gali sutrūkinėti dėl įvairių priežasčių. Šie įtrūkimai gali ženkliai sumažinti konstrukcijos laikomąją galią, konstrukcija pasidaro nesandari, praleidžia vandenį, dėl kurio gali prasidėti armatūros korozija. Vienas paprasčiausių būdų įtrūkimams užtaisyti yra į gelžbetoninę konstrukciją injektuoti epoksidinę dervą.

Mokslininkas Dr. H. W. Chungas [8] atliko bandymus su trimis sijomis. Dviatramės sijos pirmiausiai buvo apkrautos dviem koncentruotomis jėgomis ir lenkiamos. Išmatuotos jėgos, ties kuriomis atsivėrė plyšiai ir ties kuriomis sijos visiškai suiro. Atliekant šį bandymą nustatyti ir sijų įlinkiai. Į tas pačias sijas po bandymo buvo injektuojama epoksidinė derva. Injektuojama tose vietose, kur pasirodė didžiausi plyšiai. Atstačius sijas į pradinę padėtį ir sustingus epoksidinei dervai, sijos pakartotinai buvo bandomos. Bandymų rezultatai parodė, kad 1) atnaujinimo procesas pilnai atstatė sijos vientisumą; 2) lenkiamieji sijų stiprumai yra ne mažesni už kontrolinių sijų; 3) atnaujinta sija yra šiek tiek standesnė nei kontrolinė, bet plastiškumo praradimas nežymus; 4) užtaisyti plyšiai iš naujo neatsivėrė net ir sijos lūžimo stadijoje (Dr. W. H. Chung, 1981).

2 lentelė. W. H. Chungo sijų bandymo rezultatai [8]

	Beam 1		Beam 2		Beam 3	
	Original	Repaired	Original	Repaired	Original	Repaired
Cracking load(lb)	1,400	1,500	1,300	1,300	1,300	1,600
Ultimate load(lb)	10,000	10,600	9,600	10,000	9,700	9,900
Max. deflection(in)	1.27	1.26	1.27	1.48	1.10	1.03
No. of cracks repaired	—	10	—	13	—	6

1.2. Situacija Lietuvoje

Nagrinėjant literatūrą ir mokslinius straipsnius, duomenų, apie įtempių ir deformacijų pasiskirstymą gelžbetoninės konstrukcijos su papildomu betono sluoksniu skerspjuvyje, nerasta.

1.3. Situacijos užsienyje apžvalga

A. P. Lampropoulis ir kt. [9], aprašė eksperimentinius bandymus stiprinant gelžbetonines sijas naudojant ypač stiprų fibromis armuotą betoną. Pagrindinis tikslas buvo ištirti trijose pusėse sustiprintos sijos elgseną, tačiau norėdami palyginti rezultatus taip pat ištyrė sijas, kurios buvo sustiprintos papildomu betono sluoksniu tiek tempiamojoje, tiek gniuždomoje sijos dalyse.

Bandymuose naudotos gelžbetoninės sijos, kurių skerspjūvis 150 x 250 mm, sijos armuotos tempiamojoje dalyje. Stiprinant papildomu betono sluoksniu, pradinės konstrukcijos paviršius buvo pašlirktintas iki 2–3 mm gylio nelygumų. Stiprinimui panaudotas ypač stiprus betonas, kurio sluoksnio storis siekė 50 mm. Atlikus eksperimentus nustatyta, kad stiprinant sijas tiek gniuždomoje dalyje, tiek tempiamojoje dalyje, rezultatai gaunami panašūs. Abiem atvejais sijos stiprumas padidėjo apie 30 % [11].

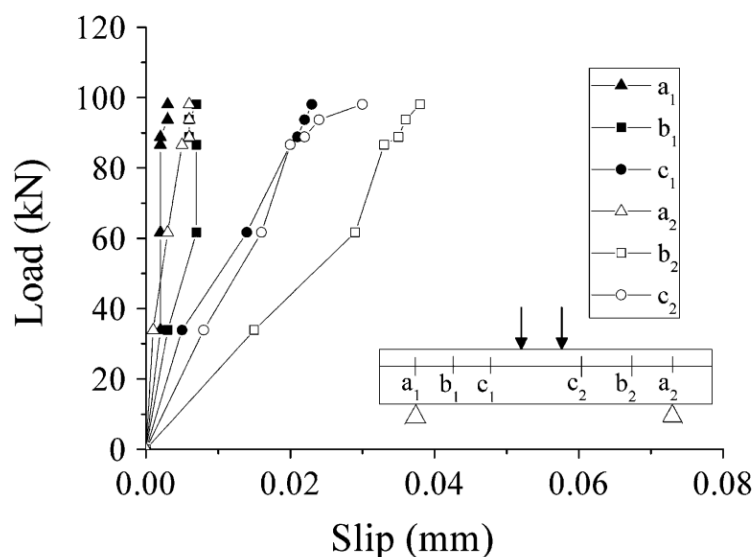
Šis mokslininkas kitame savo straipsnyje [13] aprašo eksperimentą, kurio metu nagrinėjo dviejų betono sluoksnių tarpusavio elgseną sąlyčio zonoje.

Eksperimento metu naudota 10 gelžbetoninių sijų: kontrolinė sija 150 x 250 mm, monolitinės sijos 150 x 300 mm ir dviejų sluoksnių sustiprintos sijos, kurių nauji betono sluoksniai yra tiek tempiamojoje, tiek gniuždomoje dalyse.

3 lentelė. A. P. Lampropoulis eksperimento duomenys [13]

Specimen	Description	Cross section		Tensile reinforcement
O ₁	Control	150 mm × 250 mm		2Φ12
M _{T1}	Monolithic	150 mm × 300 mm		4Φ12
M _{T2}	Monolithic	150 mm × 300 mm		4Φ12
M _{C1}	Monolithic	150 mm × 300 mm		2Φ12
M _{C2}	Monolithic	150 mm × 300 mm		2Φ12
Strengthened specimens				
Specimen	Strengthened side	Type of interface	Strengthened length (mm)	Tensile reinforcement
T ₁	Tensile	Rough	2200	2Φ12 + 2Φ12
T _{NA}	Tensile	Rough	1850	2Φ12 + 2Φ12
T ₂	Tensile	Not well roughened	2200	2Φ12 + 2Φ12
C ₁	Compressive	Rough	2200	2Φ12
C ₂	Compressive	Rough	2200	2Φ12

Lentelėje nurodomas sustiprintų sijų šiurkštumas iki užliejant naują betono sluoksnį. Eilutėse, pažymėtose „šiurkštus“, nelygumų gylis siekia 2–3 mm, o eilutėse, pažymėtose „nepakankamai šiurkštus“, nelygumų gylis siekia 1–2 mm. Šių eksperimentų metu nebuvo naudojama papildoma inkarinė armatūra tarp sluoksnių, kadangi buvo tiriamas sluoksnių praslydimas. Sijos apkrautos dvejomis koncentruotomis jėgomis, kurios sudarė grynojo lenkimo sąlygas.



4 pav. sijos, su sustiprinta gniuždomąja dalimi, sluoksnių praslydimas [13]

A. P. Lampropoulis [13] gavo rezultatus, kad sustiprinus siją gniuždomoje dalyje, praslydimas tarp sluoksnių neviršija 0,06 mm. Remiantis šiais duomenimis, daroma išvada, kad konstrukciją galima laikyti beveik monolitine. Graikijos nacionaliniame kode nurodoma, kad praslydimas tarp sluoksnių yra leidžiamas: 0,2 mm tinkamumo ribiniam būviui ir 2,0 mm saugos ribiniam būviui [13].

Remiantis kitais eksperimento rezultatais, norint pasiekti gerą sukibimą naujo sluoksniu tempiamojoje zonoje ir traktuoti, kad konstrukcija yra monolitinė, turi būti užtikrintas labai aukštas paviršiaus šiurkštumas. Taip pat naujas sluoksnis turi būti pratęstas per visą konstrukcijos ilgį. Nesilaikant šių reikalavimų, bandinys, su dalinai užlietu betono sluoksniu, suiro, kuomet naujas betono sluoksnis visiškai atsikabino nuo stiprinamos konstrukcijos (O. T. Tsioulou, A. P. Lampropoulos, *et al*, 2013).

Atlikus literatūros analizę, nustatyta, kad panašios konstrukcijos yra ištirtos eksperimentiškai, tačiau nėra sudaryta tiksli skaičiavimo metodika. Nebuvo rasta Lietuvoje atliktų tyrimų, kurie susiję su gelžbetoninių lenkiamų elementų stiprinimu liejant papildomą betono sluoksnį. Užsienio mokslininkų atliktuose eksperimentuose yra bandomos laboratorijose pagamintos sijos, kurios iki sukietėjimo nebuvo laikomos projektinėje padėtyje. Todėl ir būtina nustatyti, kokią įtaką turi ant konstrukcijos liejamas sluoksnis iki jo pilno sukietėjimo, kadangi naujas sluoksnis esamai konstrukcijai, kuri yra projektinėje padėtyje, suteikia pradines deformacijas ir įtempius.

2. Skaičiavimo metodai

Darbe bus nagrinėjamas sijos stiprinimo papildomu betono sluoksniu uždavinys, kurio sprendimui sudaromi du skaičiavimo metodai. Abiejuose skaičiavimuose vertinamos pradinės sijos deformacijos nuo papildomo sluoksnio apkrovos.

Atsižvelgiant į galimą realią situaciją, pasirinkta, kad stiprinama konstrukcija yra sumontuota projektinėje padėtyje ir nėra galimybės jos demontuoti. Pradinėje stiprinimo stadijoje nuo konstrukcijos yra pašalinamos ją veikiančios apkrovos, siją veikia tik jos savojo svorio jėgos. Stiprinamos konstrukcijos paviršius yra paruošiamas, šiurkštinamas iki literatūroje [13] aprašytos ribos – 2–3 mm.

Paruošus konstrukciją stiprinimui, liejamas naujas betono sluoksnis, kuriam yra priskiriami atitinkami parametrai – stiprinamo sluoksnio aukštis, betono klasė, armatūros kiekis, apsauginiai betono sluoksnio storiai. Kol betono sluoksnis nesukietėjo, jis konstrukcijai perduoda apkrovą nuo savojo svorio. Dėl šios apkrovos esama konstrukcija deformuojasi, susidaro pradiniai įtempiai skerspjūvyje, o tik sukietėjus papildomam sluoksniui jis gali perimti kitas, pvz., naudojimo apkrovas.

Papildomai yra vertinamas dalinis sluoksnio praslydimas. Apkrovus sustiprintą konstrukciją, gali pasireikšti dalinis sluoksnių praslydimas, kurio dydis yra ištirtas laboratorinėmis sąlygomis ir aprašytas literatūroje [13]. Pagal atliktus bandymus galima nustatyti santykinės praslydimo deformacijas.

2.1. Pirmas metodas

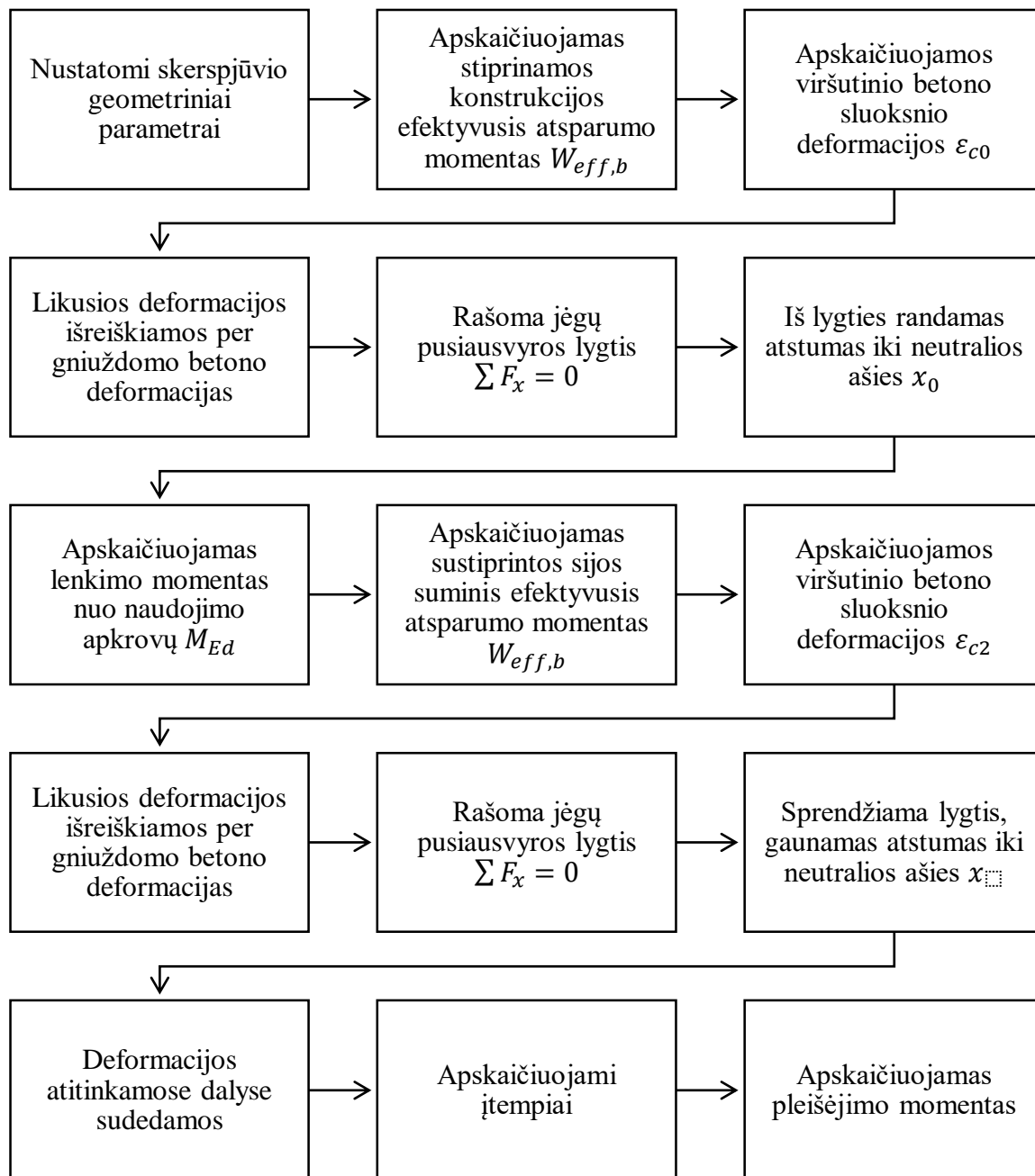
Pirmasis metodas yra pagrįstas superpozicijos principu. Pirmiausiai apskaičiuojamos konstrukcijos deformacijos ir įtempiai nuo lenkimo momento, kuris atsiranda nuo konstrukcijos savojo svorio ir naujo betono sluoksnio svorio. Vėliau sudaroma sudėtinio skerspjūvio schema, laikoma, kad naujasis sluoksnis sukietėjo. Apskaičiuojamos deformacijos ir įtempiai nuo antrinio lenkimo momento, kuris atsiranda nuo nustatytos naudojimo apkrovos. Galiausiai, atitinkamos skerspjūvio deformacijos yra sudedamos ir gaunamos suminės.

4 lentelė. pirmojo metodo skaičiavimams naudojami dydžiai

Stiprinama konstrukcija	
Charakteristika	Žymėjimas
Skerspjūvio aukštis	h_1
Skerspjūvio plotis	b_1
Tempiamosios zonos armatūra	A_{s1}
Gniuždomosios zonos armatūra	A_{s2}
Tempiamos armatūros apsauginis betono sluoksnis*	a_1
Gniuždomos armatūros apsauginis betono sluoksnis*	a_2
Betono deformacijų modulis	E_{c1}
Armatūros deformacijų modulis	E_s
Papildomas betono sluoksnis	
Sluoksnio storis	h_2
Sluoksnio plotis	b_2
Sluoksnio armatūra	A_{s3}
Armatūros apsauginis betono sluoksnis*	a_3
Betono deformacijų modulis	$E_{c,i}$
Armatūros deformacijų modulis	E_s
Bendrai naudojami dydžiai	
Pradinis lenkimo momentas	M_0
Suminis lenkimo momentas	M_{Ed}

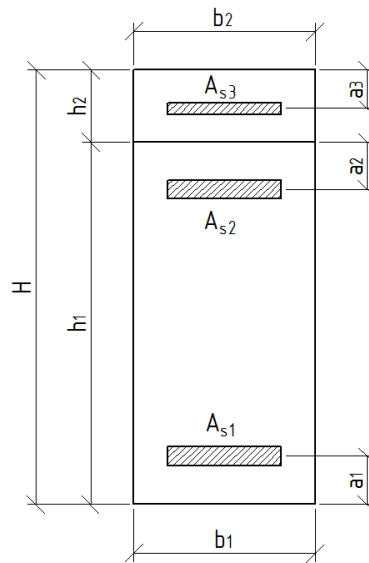
* – apsauginis sluoksnis priimtas iki armatūros skerspjūvio centro.

2.1.1. Pirmojo metodo apskaičiavimo schema



5 pav. pirmojo metodo apskaičiavimo algoritmas

2.1.2. Skerspjūvio geometrinių charakteristikų nustatymas



6 pav. skerspjūvio schema

Kadangi pavaizduotas skerspjūvis yra kompozitinis ir susideda iš betono bei armatūros, todėl pradžioje reikia nusistatyti redukcijos koeficientą, kurį naudosiu tolimesniuose skerspjūvio geometrinių charakteristikų apskaičiavimuose. Pradžioje skaičiuojamos apatinės skerspjūvio dalies, t.y., tik stiprinamos konstrukcijos, charakteristikos.

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{c1}} \quad (2.1.2.1)$$

Apskaičiuojamas efektyvusis skerspjūvio plotas

$$A_{eff,1} = b_1 h_1 + \alpha_{s1} A_{s1} + \alpha_{s1} A_{s2} \quad (2.1.2.2)$$

Efektyvusis statinis momentas, kurio lygtis rašoma apie skerspjūvio apačią

$$S_{eff,1} = b_1 h_1 \frac{h_1}{2} + \alpha_{s1} A_{s1} a_1 + \alpha_{s1} A_{s2} (h_1 - a_2) \quad (2.1.2.3)$$

Randamas atstumas iki konstrukcijos skerspjūvio centro

$$y_{c,1} = \frac{S_{eff,1}}{A_{eff,1}} \quad (2.1.2.4)$$

Skaičiuojamas efektyvusis inercijos momentas

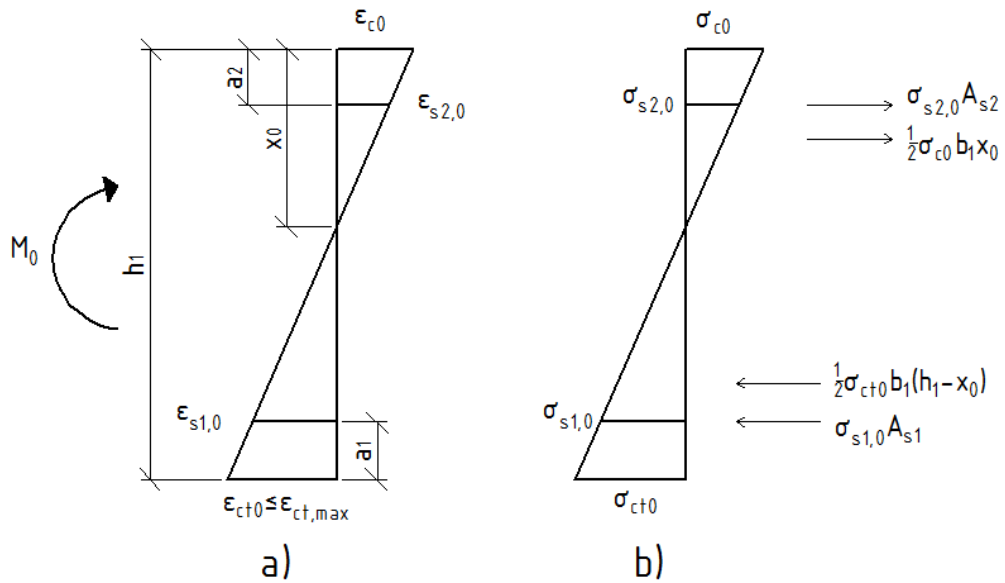
$$I_{eff,1} = \frac{b_1 h_1^3}{12} + b_1 h_1 \left(\frac{h_1}{2} - y_{c,1} \right)^2 + \alpha_{s1} A_{s1} (y_{c,1} - a_1)^2 + \alpha_{s1} A_{s2} (h_1 - y_{c1} - a_2)^2 \quad (2.1.2.5)$$

Apskaičiuojamas stiprinamo skerspjūvio efektyvusis atsparumo momentas

$$W_{eff,b1} = \frac{I_{eff,1}}{y_{c1}} \quad (2.1.2.6)$$

2.1.3. Pradinių deformacijų (prieš stiprinimą) skaičiavimas

Apskaičiuojamas lenkimo momentas, veikiantis stiprinamą konstrukciją. Lenkimo momentą sudaro esamos sijos ir užlieto betono sluoksnio svoris. Turint lenkimo momentą, galime apskaičiuoti pradines betono deformacijas.



7 pav. a) deformacijų diagrama; b) įtempių diagrama ir atstojamosios jėgos

Viršutinio betono krašto deformacija apskaičiuojama pagal formulę

$$\varepsilon_{c0} = \frac{M_0}{W_{eff,b1} E_{c1}} \quad (2.1.3.1)$$

Kitos deformacijos išreiškiamos proporcijomis per nežinomąjį x_0

$$\varepsilon_{ct0} = \frac{\varepsilon_{c0} (h_1 - x_0)}{x_0} \quad (2.1.3.2)$$

$$\varepsilon_{s1,0} = \frac{\varepsilon_{c0}(h_1 - x_0 - a_1)}{x_0} \quad (2.1.3.3)$$

$$\varepsilon_{s2,0} = \frac{\varepsilon_{c0}(x_0 - a_2)}{x_0} \quad (2.1.3.4)$$

Turint visas išraiškas su tuo pačiu nežinomuoju, rašoma jėgų projekcijų lygtis $\sum F_x = 0$.

$$\frac{1}{2} \varepsilon_{c0} E_{c1} b_1 x_0 + \varepsilon_{s2,0} E_s A_{s2} - \varepsilon_{s1,0} E_s A_{s1} - \frac{1}{2} \varepsilon_{ct0} E_{c1} b_1 (h_1 - x_0) = 0 \quad (2.1.3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \varepsilon_{c0} E_{c1} b_1 x_0 + \frac{\varepsilon_{c0}(x_0 - a_2)}{x_0} E_s A_{s2} - \frac{\varepsilon_{c0}(h_1 - x_0 - a_1)}{x_0} E_s A_{s1} \\ - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{c0}(h_1 - x_0)}{x_0} E_{c1} b_1 (h_1 - x_0) = 0 \end{aligned} \quad (2.1.3.6)$$

Apskaičiavus lygtį, randamos visos pradinės deformacijos. Priimame, kad užlietas betono sluoksnis jau pasiekė pakankamą stiprumą, konstrukcija yra apkraunama naudojimo apkrovomis. Kadangi skerspjūvis pasidarė vientisas, perskaičiuojamos geometrinės charakteristikos, įtraukiant sukietėjusį sluoksnį.

2.1.4. Sustiprinto skerspjūvio geometrinių charakteristikų apskaičiavimas

Kadangi priimame, kad esamos konstrukcijos ir naujo betono sluoksnio betonų charakteristikos skiriasi, t.y. skiriasi deformacijų moduliai, reikia įvesti papildomą redukcijos koeficientą.

$$\alpha_{c1} = \frac{E_{c2}}{E_{c1}} \quad (2.1.4.1)$$

Efektyvusis skerspjūvio plotas

$$A_{eff,2} = b_1 h_1 + \alpha_{s1} A_{s1} + \alpha_{s1} A_{s2} + \alpha_{c1} b_2 h_2 + \alpha_{s1} A_{s3} \quad (2.1.4.2)$$

Efektyvusis statinis momentas apie sustiprintos konstrukcijos apačią

$$\begin{aligned} S_{eff,2} = b_1 h_1 \frac{h_1}{2} + \alpha_{s1} A_{s1} a_1 + \alpha_{s1} A_{s2} (h_1 - a_2) + \alpha_{c1} b_2 h_2 \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right) \\ + \alpha_{s1} A_{s3} (H - a_3) \end{aligned} \quad (2.1.4.3)$$

Atstumas iki skerspjūvio svorio centro

$$y_{c,2} = \frac{S_{eff,2}}{A_{eff,2}} \quad (2.1.4.4)$$

Efektyvusis skerspjūvio inercijos momentas

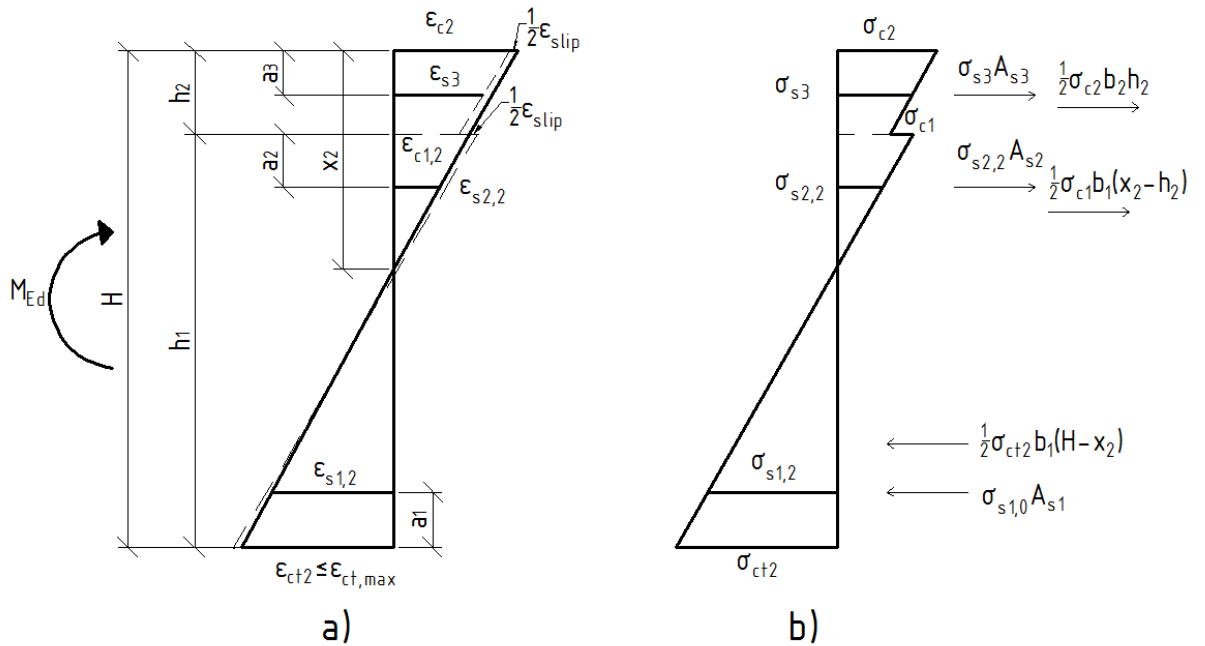
$$\begin{aligned}
I_{eff,2} = & \frac{b_1 h_1^3}{12} + b_1 h_1 \left(\frac{h_1}{2} - y_{c,2} \right)^2 + \frac{b_2 h_2^3}{12} \alpha_{c1} + \alpha_{c1} b_2 h_2 \left(H - y_{c,2} - \frac{h_2}{2} \right)^2 \\
& + \alpha_{s1} A_{s1} (y_{c,2} - a_1)^2 + \alpha_{s1} A_{s2} (h_1 - y_{c,2} - a_2)^2 \\
& + \alpha_{s1} A_{s3} (H - y_{c,2} - a_3)^2
\end{aligned} \quad (2.1.4.5)$$

Efektyvusis atsparumo momentas

$$W_{eff,b2} = \frac{I_{eff,2}}{y_{c,2}} \quad (2.1.4.6)$$

2.1.5. Antrinių deformacijų skaičiavimas

Antrinės deformacijos susidaro nuo pilnai apkrautos konstrukcijos ir sluoksnių praslydimo. Kadangi deformacijos nuo savojo svorio buvo įvertintos pradiniam etape, šiame skaičiavime lenkimo momentas apskaičiuojamas tik nuo išorinio kintamo poveikio.



8 pav. a) antrojo etapo deformacijų diagrama; b) antrojo etapo įtempių diagrama ir atstojamosios jėgos

Skaičiuojant deformacijas nuo išorinio poveikio, diagramoje papildomai pažymimos sluoksnių praslydimo deformacijos, kurios apskaičiuojamos pagal Lampropoulos A. [13] eksperimentų rezultatus. Bandymų metu gautas 0,06 mm praslydimas tarp sluoksnių, kai visas konstrukcijos ilgis yra 2,20 m. Tuomet santykinės deformacijos apskaičiuojamos taip:

$$\epsilon_{slip} = \frac{\Delta s}{L} = \frac{0,06}{2200} = 2,7272 \cdot 10^{-5} \quad (2.1.5.1)$$

Viršutinio betono krašto deformacija apskaičiuojama pagal formulę

$$\varepsilon_{c2} = \frac{M_{Ed}}{W_{eff,b2}E_{c1}} \quad (2.1.5.2)$$

Kitos deformacijos išreiškiamos proporcijomis per nežinomąjį x_2

$$\varepsilon_{ct2} = \frac{\varepsilon_{c2}(H - x_2)}{x_2} \quad (2.1.5.3)$$

$$\varepsilon_{c1,2}^v = \frac{\varepsilon_{c2}(x_2 - h_2)}{x_2} \quad (2.1.5.4)$$

$$\varepsilon_{c1,2}^a = \frac{\varepsilon_{c2}(x_2 - h_2)}{x_2} \quad (2.1.5.5)$$

$$\varepsilon_{s1,2} = \frac{\varepsilon_{c2}(H - x_2 - a_1)}{x_2} \quad (2.1.5.6)$$

$$\varepsilon_{s2,2} = \frac{\varepsilon_{c2}(x_2 - h_2 - a_2)}{x_2} \quad (2.1.5.7)$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{\varepsilon_{c2}(x_2 - a_3)}{x_2} \quad (2.1.5.8)$$

$$\varepsilon_{ct,slip} = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(H - x_2)}{x_2 - h_2} \quad (2.1.5.9)$$

$$\varepsilon_{s1,slip} = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(H - x_2 - a_1)}{x_2 - h_2} \quad (2.1.5.10)$$

$$\varepsilon_{s2,slip} = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(x_2 - h_2 - a_2)}{x_2 - h_2} \quad (2.1.5.11)$$

Turint visas išraiškas su tuo pačiu nežinomuojų, rašoma jėgų projekcijų lygtis $\sum F_x = 0$.

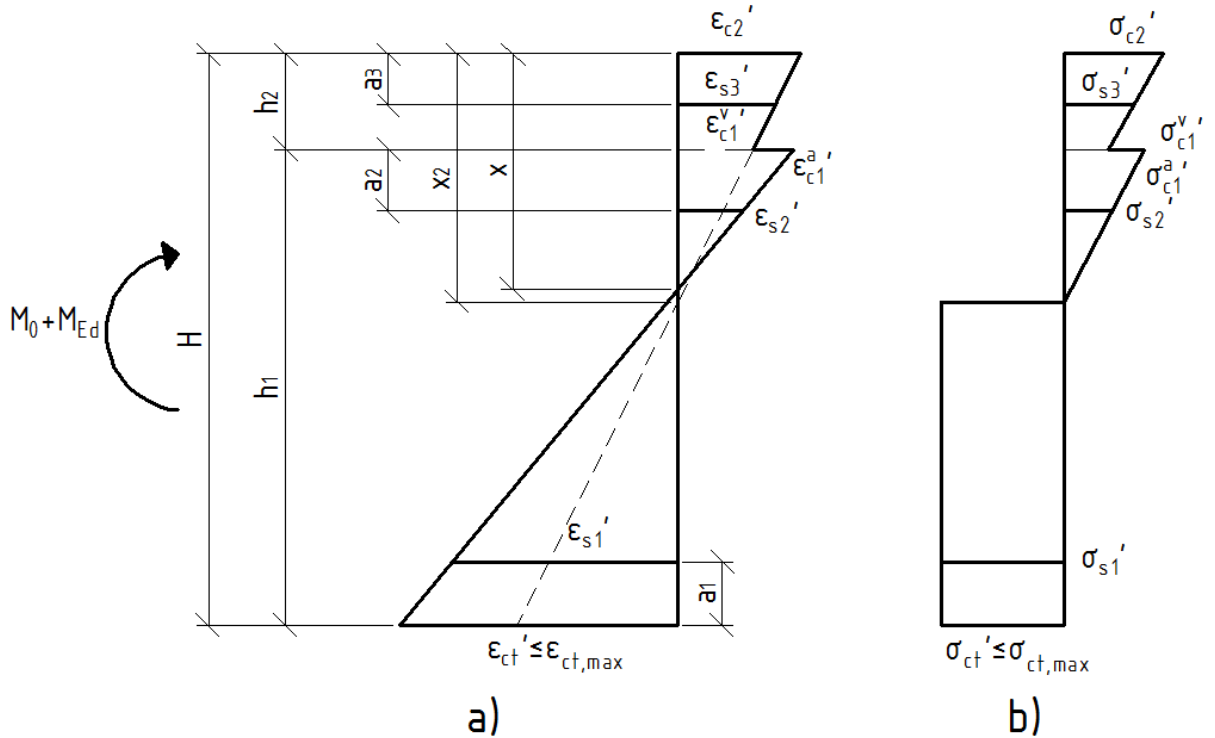
$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(\varepsilon_{c2} - \varepsilon_{slip} + \varepsilon_{c1,2}^v)E_{c2}b_2h_2 + \frac{1}{2}(\varepsilon_{c1,2}^a + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_{c1}b_1(x_2 - h_2) \\ & - (\varepsilon_{ct2} + \varepsilon_{ct,slip})E_{c1}b_1(H - x_2) + (\varepsilon_{s3} - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_sA_{s3} \\ & + (\varepsilon_{s2,2} + \varepsilon_{s2,slip})E_sA_{s2} - (\varepsilon_{s1,2} + \varepsilon_{s1,slip})E_sA_{s1} = 0 \end{aligned} \quad (2.1.5.12)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \left(\varepsilon_{c2} + \frac{\varepsilon_{c2}(x_2 - h_2)}{x_2} - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} \right) E_{c2} b_2 h_2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{c2}(x_2 - h_2)}{x_2} \right. \\
& \quad \left. + \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} \right) E_{c1} b_1 (x_2 - h_2) \\
& \quad - \left(\frac{\varepsilon_{c2}(H - x_2)}{x_2} + \frac{\frac{1}{2} \varepsilon_{slip} (H - x_2)}{x_2 - h_2} \right) E_{c1} b_1 (H - x_2) \\
& \quad + \left(\frac{\varepsilon_{c2}(x_2 - a_3)}{x_2} - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} \right) E_s A_{s3} + \left(\frac{\varepsilon_{c2}(x_2 - h_2 - a_2)}{x_2} \right. \\
& \quad \left. + \frac{\frac{1}{2} \varepsilon_{slip} (x_2 - h_2 - a_2)}{x_2 - h_2} \right) E_s A_{s2} - \left(\frac{\varepsilon_{c2}(H - x_2 - a_1)}{x_2} \right. \\
& \quad \left. + \frac{\frac{1}{2} \varepsilon_{slip} (H - x_2 - a_1)}{x_2 - h_2} \right) E_s A_{s1} = 0
\end{aligned} \tag{2.1.5.13}$$

Išsprendus lygtį randamas atstumas iki neutralios ašies, kuri naudojant apskaičiuojamos nežinomos deformacijos.

2.1.6. Suminės deformacijos

Turint dviejų etapų deformacijų dydžius, apskaičiuojamos suminės visos konstrukcijos deformacijos ir įtempiai.



9 pav. a) suminė deformacijų diagrama; b) suminė įtempių diagrama

Naujo betono sluoksnio viršaus deformacija ir įtempiai

$$\varepsilon'_{c2} = \varepsilon_{c2} - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} \quad (2.1.6.1)$$

$$\sigma'_{c2} = \varepsilon'_{c2} E_{c2}$$

Naujo betono sluoksnio apačios deformacija ir įtempiai

$$\varepsilon'^{v}_{c1,2} = \varepsilon^v_{c1,2} - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} \quad (2.1.6.2)$$

$$\sigma'^{v}_{c1} = \varepsilon'^{v}_{c1,2} E_{c2}$$

Esamos konstrukcijos betono viršaus deformacijos ir įtempiai

$$\varepsilon'^a_{c1} = \varepsilon^a_{c1,2} + \varepsilon_{c0} + \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} \quad (2.1.6.3)$$

$$\sigma'^a_{c1} = \varepsilon'^a_{c1} E_{c1}$$

Esamos konstrukcijos gniuždomos armatūros deformacijos ir įtempiai

$$\varepsilon'^{s2}_s = \varepsilon_{s2,2} + \varepsilon_{s2,0} + \varepsilon_{s2,slip} \quad (2.1.6.4)$$

$$\sigma'^{s2}_s = \varepsilon'^{s2}_s E_s$$

Esamos konstrukcijos tempiamos armatūros deformacijos ir įtempiai

$$\varepsilon'^{s1}_s = \varepsilon_{s1,2} + \varepsilon_{s1,0} + \varepsilon_{s1,slip} \quad (2.1.6.5)$$

$$\sigma'^{s1}_s = \varepsilon'^{s1}_s E_s$$

Naujo betono sluoksnio armatūros deformacijos ir įtempiai

$$\varepsilon'_{s3} = \varepsilon_{s3} - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} \quad (2.1.7.6)$$

$$\sigma'_{s3} = \varepsilon'_{s3} E_s$$

Esamos konstrukcijos tempiamo betono deformacijos ir įtempiai

$$\varepsilon'_{ct} = \varepsilon_{ct0} + \varepsilon_{ct2} + \varepsilon_{ct,slip} \quad (2.1.6.7)$$

$$\sigma'_{ct} = \varepsilon'_{ct} E_{c1}$$

2.1.7. Pleišėjimo momento apskaičiavimas

Norint rasti pleišėjimo momentą, naudojama pradinė ir suminė deformacijų diagramos. Pradinės deformacijos nesikeičia, kadangi jos priklauso nuo sustiprintos konstrukcijos svorio. Apskaičiavimui naudojamos jėgų projekcijų ir lenkimo momentų lygtys. Pleišėjimo momento skaičiavimas naudojant deformacijų diagramą yra paremtas tuo, kad tempiamame betono krašte bus pasiektos ribinės tempiamo betono deformacijos. Jos, kaip žinomas dydis, yra naudojamos lygčių sudarime.

$$\sum F_x = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(\varepsilon_{c2}'' + \varepsilon_{c1,2}'' - \varepsilon_{slip})E_{c2}b_2h_2 + \frac{1}{2}(\varepsilon_{c1,2}'' + \varepsilon_{c0} + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_{c1}b_1(x_{crc} - h_2) - (\varepsilon_{ct,lim} \\ - \varepsilon_{ct,0} - \varepsilon_{ct,slip}'')E_{c1}b_1(H - x_{crc}) + (\varepsilon_{s3}'' - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_sA_{s3} + (\varepsilon_{s2,2}'' \\ + \varepsilon_{s2,0} + \varepsilon_{s2,slip})E_sA_{s2} - (\varepsilon_{s1,2}'' + \varepsilon_{s1,0} + \varepsilon_{s1,slip})E_sA_{s1} = 0 \end{aligned} \quad (2.1.7.1)$$

$$\sum M = M_{crc}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(\varepsilon_{c2}'' + \varepsilon_{c1,2}'' - \varepsilon_{slip})E_{c2}b_2h_2(H - \frac{1}{3}h_2) + \frac{1}{2}(\varepsilon_{c1,2}'' + \varepsilon_{c0} \\ + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_{c1}b_1(x_{crc} - h_2)(h_1 - \frac{1}{3}(x_{crc} - h_2)) - (\varepsilon_{ct,lim} - \varepsilon_{ct,0} \\ - \varepsilon_{ct,slip}'')E_{c1}b_1(H - x_{crc}) \cdot \frac{1}{2}(H - x_{crc}) + (\varepsilon_{s3}'' - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_sA_{s3}(H \\ - a_3) + (\varepsilon_{s2,2}'' + \varepsilon_{s2,0} + \varepsilon_{s2,slip})E_sA_{s2}(h_1 - a_2) \\ - (\varepsilon_{s1,2}'' + \varepsilon_{s1,0} + \varepsilon_{s1,slip})E_sA_{s1}a_1 = M_{crc} \end{aligned} \quad (2.1.7.2)$$

Jėgų projekcijų lygtyje vienintelis žinomas dydis yra ribinės tempiamo betono deformacijos. Naudojant žinomą deformaciją, kitos yra išreiškiamos iš proporcijų.

$$\varepsilon_{c2}'' = \frac{\varepsilon_{ct,lim}x_{crc}}{H - x_{crc}} \quad (2.1.7.3)$$

$$\varepsilon_{s3}'' = \frac{\varepsilon_{ct,lim}(x_{crc} - a_3)}{H - x_{crc}} \quad (2.1.7.4)$$

$$\varepsilon_{c1,2}'' = \frac{\varepsilon_{ct,lim}(x_{crc} - h_2)}{H - x_{crc}} \quad (2.1.7.5)$$

$$\varepsilon_{s2,2}'' = \frac{\varepsilon_{ct,lim}(x_{crc} - h_2 - a_2)}{H - x_{crc}} \quad (2.1.7.6)$$

$$\varepsilon_{s1,2}'' = \frac{\varepsilon_{ct,lim}(H - x_{crc} - a_1)}{H - x_{crc}} \quad (2.1.7.7)$$

$$\varepsilon_{ct,slip}'' = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(H - x_{crc})}{x_{crc} - h_2} \quad (2.1.7.8)$$

$$\varepsilon_{s1,slip}'' = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(H - x_{crc} - a_1)}{x_{crc} - h_2} \quad (2.1.7.9)$$

$$\varepsilon_{s2,slip}'' = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(x_{crc} - h_2 - a_1)}{x_{crc} - h_2} \quad (2.1.7.10)$$

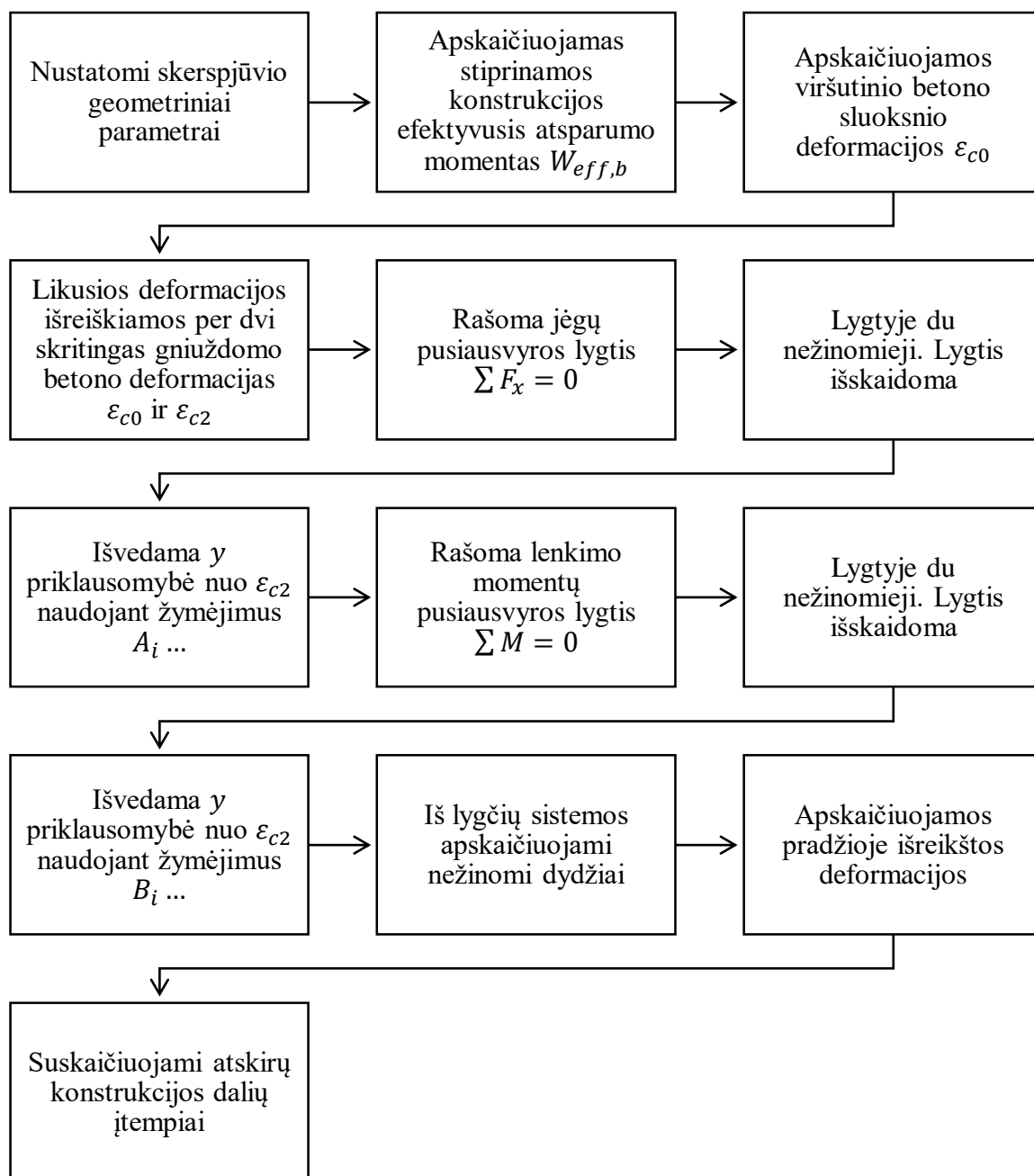
I jėgų projekcijų lygtį įstačius 2.1.7.3 ... 2.1.7.10 išraiškas, randamas atstumas iki neutralios ašies plyšio atsiradimo metu. Visi apskaičiuoti dydžiai yra naudojami momentų lygtyje, iš kurios randamas pleišėjimo momentas.

2.2. Antrasis metodas

Antrajam metodui iš karto sudaroma galutinė deformacijų diagrama, su daugiau nežinomųjų. Pastebėta, kad diagramą galima išskaidyti į dvi dalis ir dydžius išreikšiant vieną per kitą, sudaryti lygtis su dviem nežinomaisiais. Sprendžiant sudarytas lygtis, nustatyta, kad antrojo metodo skaičiavimai galioja tik tamprioje betono stadijoje.

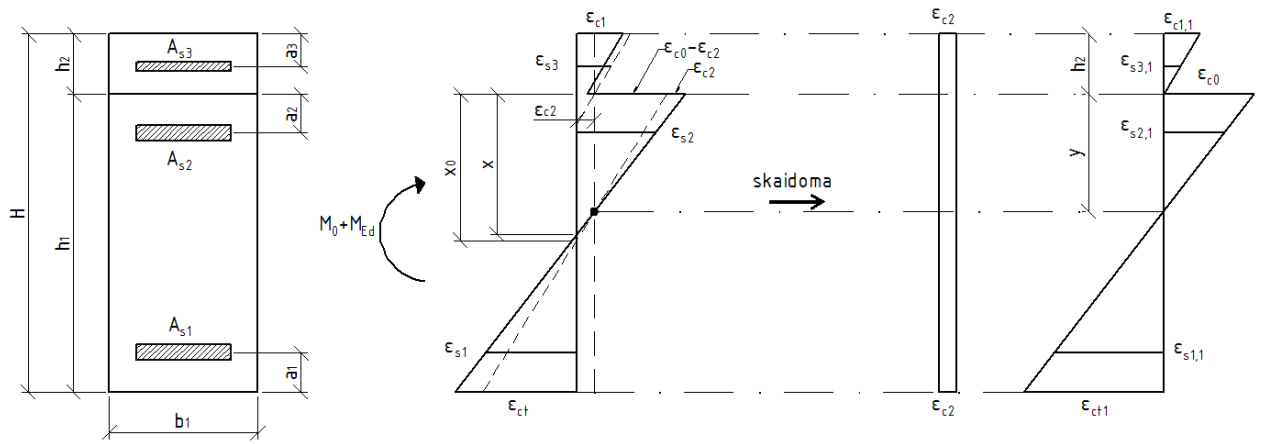
Skaičiavimams naudojami tie patys kintamieji dydžiai kaip ir nurodyta 4 lentelėje.

2.2.1. Antrojo metodo apskaičiavimo schema

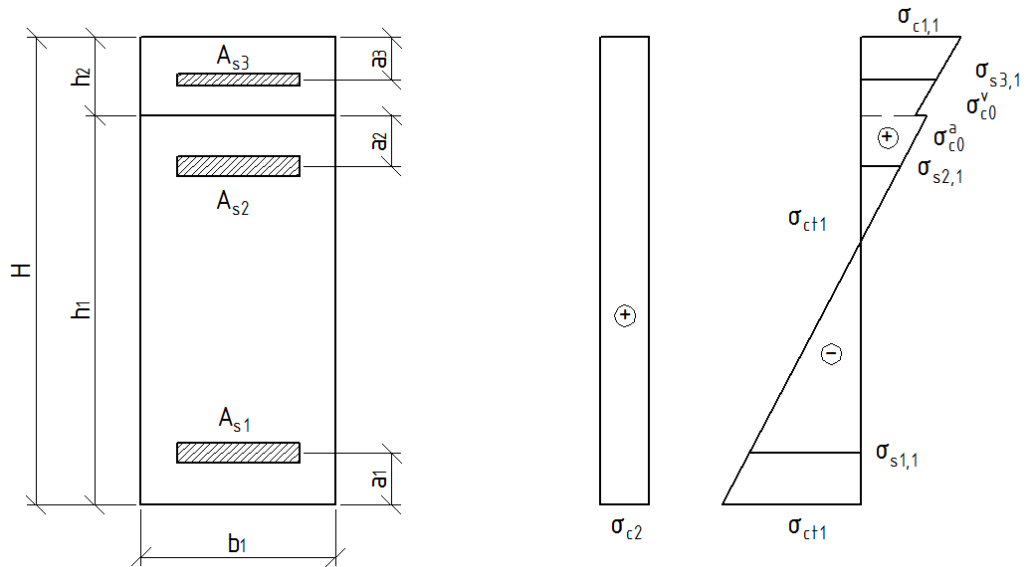


10 pav. antrojo metodo apskaičiavimo algoritmas

2.2.2. Skerspjūvio geometrinės charakteristikos ir deformacijų apskaičiavimas



11 pav. antrojo metodo skerspjūvio schema bei deformacijų diagramos



12 pav. antrojo metodo išskaidyta įtempių diagrama

Geometrinės skerspjūvio charakteristikos apskaičiuojamos taip pat, kaip parodyta 2.1.2.1 ... 2.1.2.6 formulėse.

Pilnoje diagramoje matomas taškas, kuriame kertasi deformacijų kreivės. Jis nuo ašies yra nutolęs per dydį ε_{c2} , o nuo esamos konstrukcijos viršaus - per dydį y . Išskaidant diagramą yra aiškiai matomi nežinomi dydžiai, kuriuos reikia išsireikšti.

Pirmoji žinoma elemento deformacija yra ε_{c0} , ji apskaičiuojama:

$$\varepsilon_{c0} = \frac{M_0}{W_{eff,b1} E_{c1}} \quad (2.2.2.1)$$

Kitos deformacijos yra išreiškiamos per dydžius ε_{c0} ir ε_{c2} . Papildomai užrašomos deformacijų išraiškos, kurios dėl praslydimo atsiranda kai kuriose skerspjūvio dalyse.

$$\varepsilon_{c1,1} = \frac{\varepsilon_{c2}h_2}{y} \quad (2.2.2.2)$$

$$\varepsilon_{ct1} = \frac{\varepsilon_{c0}(h_1 - y)}{y} \quad (2.2.2.3)$$

$$\varepsilon_{s1,1} = \frac{\varepsilon_{c0}(h_1 - y - a_1)}{y} \quad (2.2.2.4)$$

$$\varepsilon_{s2,1} = \frac{\varepsilon_{c0}(y - a_2)}{y} \quad (2.2.2.5)$$

$$\varepsilon_{s3,1} = \frac{\varepsilon_{c2}(h_2 - a_3)}{y} \quad (2.2.2.6)$$

$$\varepsilon_{ct,slip} = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(h_1 - y)}{y} \quad (2.2.2.7)$$

$$\varepsilon_{s1,slip} = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(h_1 - y - a_1)}{y} \quad (2.2.2.8)$$

$$\varepsilon_{s2,slip} = \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(y - a_2)}{y} \quad (2.2.2.9)$$

Turint išreikštus dydžius, galima parašyti dvi lygtis – jėgų projekcijų (2.2.2.10) ir lenkimo momentų (2.2.2.11).

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(\varepsilon_{c1,1} - \varepsilon_{slip})E_{c2}b_2h_2 + (\varepsilon_{s3,1} + \varepsilon_{c2} - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_sA_{s3} + \frac{1}{2}(\varepsilon_{c0} + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_{c1}b_1y + \\ & (\varepsilon_{s2,1} + \varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s2,slip})E_sA_{s2} - (\varepsilon_{s1,1} + \varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s1,slip})E_sA_{s1} - \frac{1}{2}(\varepsilon_{ct1} + \\ & \varepsilon_{ct,slip})E_{c1}b_1(h_1 - y) + \varepsilon_{c2}E_{c1}b_1h_1 + \varepsilon_{c2}E_{c2}b_2h_2 = 0 \end{aligned} \quad (2.2.2.10)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2}(\varepsilon_{c1,1} - \varepsilon_{slip})E_{c2}b_2h_2(h_1 + \frac{2}{3}h_2) + (\varepsilon_{s3,1} + \varepsilon_{c2} - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_sA_{s3}(H - a_3) + \frac{1}{2}(\varepsilon_{c0} \\
& + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_{c1}b_1y(h_1 - \frac{1}{3}y) + (\varepsilon_{s2,1} + \varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s2,slip})E_sA_{s2}(h_1 - a_2) \\
& - (\varepsilon_{s1,1} + \varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s1,slip})E_sA_{s1}a_1 - \frac{1}{2}(\varepsilon_{ct1} + \varepsilon_{ct,slip})E_{c1}b_1(h_1 - y) \\
& \cdot \frac{1}{3}(h_1 - y) + \varepsilon_{c2}E_{c1}b_1h_1 \cdot \frac{1}{2}h_1 + \varepsilon_{c2}E_{c2}b_2h_2(h_1 + \frac{1}{2}h_2) = M_{Ed}
\end{aligned} \tag{2.2.2.11}$$

Pirmiausiai sprendžiama jėgų projekcijų lygtis. Vietoje nežinomųjų įstatomos deformacijų išraiškos, parodytos 2.2.2.2 ... 2.2.2.9 formulėse.

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_{c2}h_2}{y} - \varepsilon_{slip}\right)E_{c2}b_2h_2 + \left(\frac{\varepsilon_{c2}(h_2-a_3)}{y} + \varepsilon_{c2} - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip}\right)E_sA_{s3} + \frac{1}{2}(\varepsilon_{c0} + \\
& \frac{1}{2}\varepsilon_{slip})E_{c1}b_1y + \left(\frac{\varepsilon_{c0}(y-a_2)}{y} + \varepsilon_{c2} + \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(y-a_2)}{y}\right)E_sA_{s2} - \left(\frac{\varepsilon_{c0}(h_1-y-a_1)}{y} + \varepsilon_{c2} + \right. \\
& \left. \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(h_1-y-a_1)}{y}\right)E_sA_{s1} - \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_{c0}(h_1-y)}{y} + \frac{\frac{1}{2}\varepsilon_{slip}(h_1-y)}{y}\right)E_{c1}b_1(h_1 - y) + \varepsilon_{c2}E_{c1}b_1h_1 + \\
& \varepsilon_{c2}E_{c2}b_2h_2 = 0
\end{aligned} \tag{2.2.2.12}$$

Lygtis išskaidoma ir pertvarkoma, o dedamosioms, kurios yra žinomos sudaromi nauji žymėjimai $A_1 \dots A_4$.

$$\begin{aligned}
A_1 = & \varepsilon_{c0}E_sA_{s1}a_1 - \varepsilon_{c0}E_sA_{s2}a_2 + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip}E_sA_{s1}a_1 - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip}E_sA_{s2}a_2 - \varepsilon_{c0}E_sA_{s1}h_1 \\
& - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip}E_sA_{s1}h_1 - \frac{1}{2}\varepsilon_{c0}E_{c1}b_1h_1^2 - \frac{1}{4}\varepsilon_{slip}E_{c1}b_1h_1^2
\end{aligned} \tag{2.2.2.13}$$

$$A_2 = -E_sA_{s3}a_3 + E_sA_{s3}h_2 + \frac{1}{2}E_{c2}b_2h_2^2 \tag{2.2.2.14}$$

$$\begin{aligned}
A_3 = & \varepsilon_{c0}E_sA_{s1} + \varepsilon_{c0}E_sA_{s2} + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip}E_sA_{s1} + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip}E_sA_{s2} - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip}E_sA_{s3} \\
& + \varepsilon_{c0}E_{c1}b_1h_1 + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip}E_{c1}b_1h_1 - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip}E_{c2}b_2h_2
\end{aligned} \tag{2.2.2.15}$$

$$A_4 = -E_sA_{s1} + E_sA_{s2} + E_sA_{s3} + E_{c1}b_1h_1 + E_{c2}b_2h_2 \tag{2.2.2.16}$$

Šiomis išraiškomis galima aprašyti y dydį

$$y = \frac{-A_1 - A_2\varepsilon_{c2}}{A_3 + \varepsilon_{c2}A_4} \tag{2.2.2.17}$$

Įstačius žymėjimus, išskleidžiama momentų lygtis

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{c2} h_2}{y} - \varepsilon_{slip} \right) E_{c2} b_2 h_2 \left(h_1 + \frac{2}{3} h_2 \right) + \left(\frac{\varepsilon_{c2} (h_2 - a_3)}{y} + \varepsilon_{c2} - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} \right) E_s A_{s3} (H \\
& - a_3) + \frac{1}{2} (\varepsilon_{c0} + \frac{1}{2} \varepsilon_{slip}) E_{c1} b_1 y \left(h_1 - \frac{1}{3} y \right) \\
& + \left(\frac{\varepsilon_{c0} (y - a_2)}{y} + \varepsilon_{c2} + \frac{\frac{1}{2} \varepsilon_{slip} (y - a_2)}{y} \right) E_s A_{s2} (h_1 - a_2) \\
& - \left(\frac{\varepsilon_{c0} (h_1 - y - a_1)}{y} + \varepsilon_{c2} + \frac{\frac{1}{2} \varepsilon_{slip} (h_1 - y - a_1)}{y} \right) E_s A_{s1} a_1 \\
& - \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{c0} (h_1 - y)}{y} + \frac{\frac{1}{2} \varepsilon_{slip} (h_1 - y)}{y} \right) E_{c1} b_1 (h_1 - y) \cdot \frac{1}{3} (h_1 - y) \\
& + \varepsilon_{c2} E_{c1} b_1 h_1 \cdot \frac{1}{2} h_1 + \varepsilon_{c2} E_{c2} b_2 h_2 \left(h_1 + \frac{1}{2} h_2 \right) = M_{Ed}
\end{aligned} \tag{2.2.2.18}$$

Išskleidus momentų lygtį yra įvedami nauji žymėjimai $B_1 \dots B_4$, kuriuose visi nariai yra žinomi

$$\begin{aligned}
B_1 = & \varepsilon_{c0} E_s A_{s1} a_1^2 + \varepsilon_{c0} E_s A_{s2} a_2^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} E_s A_{s1} a_1^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} E_s A_{s2} a_2^2 - \frac{1}{6} \varepsilon_{c0} E_{c1} b_1 h_1^3 \\
& - \frac{1}{12} \varepsilon_{slip} E_{c1} b_1 h_2^3 - \varepsilon_{c0} E_s A_{s1} h_1 a_1 - \varepsilon_{c0} E_s A_{s2} a_2 h_1 \\
& - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} E_s A_{s1} a_1 h_1 - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} E_s A_{s2} a_2 h_1
\end{aligned} \tag{2.2.2.19}$$

$$\begin{aligned}
B_2 = & -E_s A_{s3} a_3 h_2 + E_s A_{s3} H h_2 - E_s A_{s3} H a_3 + \frac{1}{2} E_{c2} b_2 h_1 h_2^2 + \frac{1}{3} E_{c2} b_2 h_2^3 \\
& + E_s A_{s3} a_3^2
\end{aligned} \tag{2.2.2.20}$$

$$\begin{aligned}
B_3 = & -M_{Ed} + \frac{1}{2} \varepsilon_{c0} E_{c1} b_1 h_1^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_{slip} E_{c1} b_1 h_1^2 - \frac{1}{3} \varepsilon_{slip} E_{c2} b_2 h_2^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} E_s A_{s3} H \\
& + \varepsilon_{c0} E_s A_{s1} a_1 - \varepsilon_{c0} E_s A_{s2} a_2 + \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} E_s A_{s1} a_1 - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} E_s A_{s2} a_2 \\
& + \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} E_s A_{s3} a_3 + \varepsilon_{c0} E_s A_{s2} h_1 + \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} E_s A_{s2} h_1 - \frac{1}{2} \varepsilon_{slip} E_c b_2 h_1 h_2
\end{aligned} \tag{2.2.2.21}$$

$$\begin{aligned}
B_4 = & \frac{1}{2} E_{c1} b_1 h_1^2 + \frac{1}{2} E_{c2} b_2 h_2^2 + E_s A_{s3} H - E_s A_{s1} a_1 - E_s A_{s2} a_2 - E_s A_{s3} a_3 \\
& + E_s A_{s2} h_1 + E_{c2} b_2 h_1 h_2
\end{aligned} \tag{2.2.2.22}$$

Momentų lygtį galime užrašyti taip

$$B_1 + B_2 \varepsilon_{c2} + B_3 y + B_4 \varepsilon_{c2} y = 0 \tag{2.2.2.23}$$

Į šią momentų lygtį yra statoma 2.2.2.17 išraiška, taip surandamas nežinomas ε_{c2}

$$B_1 + B_2\varepsilon_{c2} + B_3 \frac{-A_1 - A_2\varepsilon_{c2}}{A_3 + \varepsilon_{c2}A_4} + B_4\varepsilon_{c2} \frac{-A_1 - A_2\varepsilon_{c2}}{A_3 + \varepsilon_{c2}A_4} = 0 \quad (2.2.2.24)$$

2.2.3. Suminės deformacijos ir įtempiai

Naujo betono sluoksnio viršaus deformacija ir įtempiai

$$\varepsilon'_{c2} = \varepsilon_{c1,1} + \varepsilon_{c2} + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip} \quad (2.2.3.1)$$

$$\sigma_{c1} = \varepsilon_{c2}'E_{c2}$$

$$\varepsilon_{c1a} = \varepsilon_{c0} + \varepsilon_{c2} + \frac{1}{2}\varepsilon_{slip}$$

Esamos konstrukcijos betono viršaus deformacijos ir įtempiai

$$\varepsilon_{c1v} = \varepsilon_{c2} - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip} \quad (2.2.3.2)$$

$$\sigma_{c1}^a = \varepsilon_{c1a}E_{c1}$$

$$\sigma_{c1}^v = \varepsilon_{c1v}E_{c2}$$

Esamos konstrukcijos gniuždomos armatūros deformacijos ir įtempiai

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{s2,1} + \varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s2,slip} \quad (2.2.3.3)$$

$$\sigma_{s2} = \varepsilon_{s2}E_s$$

Esamos konstrukcijos tempiamos armatūros deformacijos ir įtempiai

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s1,1} - \varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s1,slip} \quad (2.2.3.4)$$

$$\sigma_{s1} = \varepsilon_{s1}E_s$$

Naujo betono sluoksnio armatūros deformacijos ir įtempiai

$$\varepsilon_{s3} = \varepsilon_{s3,1} + \varepsilon_{c2} - \frac{1}{2}\varepsilon_{slip} \quad (2.2.3.5)$$

$$\sigma_{s3} = \varepsilon_{s3}E_s$$

Esamos konstrukcijos tempiamo betono deformacijos ir įtempiai

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{ct1} - \varepsilon_{ct2} + \varepsilon_{ct,slip} \quad (2.2.3.6)$$

$$\sigma_{ct} = \varepsilon_{ct}E_{c1}$$

2.3. Lyginamieji skaičiavimai

Palyginimui apskaičiuojama monolitinė konstrukcija, kurioje nėra pradinių įtempių. Taip galėsime įvertinti netolygų įtempių pasiskirstymą konstrukcijoje po stiprinimo.

Skaičiavimai atliekami tokiu pačiu principu, nagrinėjant atsirandančias deformacijas, o skaičiavimų seka atrodo taip:

1. Sudaroma monolitinė konstrukcija, kurios skerspjūvio geometrija ir geometrinės charakteristikos atitinka stiprinamą konstrukciją su betono sluoksniu;
2. Sudaroma deformacijų diagrama. Kadangi pradinių įtempių konstrukcijoje nėra, deformacijos pasiskirsto tolygiai;
3. Apskaičiuojama žinoma gniuždomo betono krašto deformacija, o likusių dalių deformacijos aprašomos naudojant proporcijas;
4. Sudaroma jėgų projekcijų lygtis, iš lygties randamas atstumas iki neutralios ašies;
5. Apskaičiuojamos visos skerspjūvio deformacijos ir įtempiai.

Toliau ieškomas monolitinės konstrukcijos pleišėjimo momentas.

6. Skaičiuojant pleišėjimo momentą, žinoma dedamoji yra tempiamo betono ribinė deformacija;
7. Išreiškiami likusieji dydžiai;
8. Rašoma nauja jėgų pusiausvyros lygtis, apskaičiuojamas atstumas iki neutralios ašies plyšio atsiradimo metu;
9. Apskaičiuojamos nežinomų dalių deformacijos;
10. Rašoma lenkimo momentų lygtis, kuri yra lygi pleišėjimo momentui.

Gauti rezultatai lyginami tarpusavyje, prieš tai padarant tokias prielaidas:

- Rezultatai, gauti skaičiuojant pirmuoju ir antruoju metodais, tarpusavyje lyginami tik tamprioje stadijoje, nes antrasis metodas yra sudarytas būtent šiai sąlygai;
- Monolitinės konstrukcijos pleišėjimo momentas lyginamas priimant, kad naujo betono sluoksnio ir stiprinamos konstrukcijos medžiagų savybės sutampa.

3. Rezultatai

Pirmiausiai nagrinėjama sluoksnio storio įtaka deformacijoms ir įtempiams. 5 lentelėje surašyti skerspjūviai, kurie naudojami skaičiavimuose.

5 lentelė. skerspjūviai, naudojami sluoksnio storio įtakos skaičiavime

Numeris	Skerspjūvis ($b_1 \times h_1$), mm	Stiprinamo sluoksnio storis h_2 , mm	Apsauginiai betono sluoksniai, mm			Armatūros skerspjūvio plotai, cm^2		
			a_1	a_2	a_3	A_{s1}	A_{s2}	A_{s3}
1	300 x 500	100	40	30	25	3,08	2,26	2,26
2		150	40	30	25	3,08	2,26	2,26
3		200	40	30	25	3,08	2,26	2,26
4		150	40	30	25	3,08	2,26	2,26
MN 1	300 x 600	-	40	130	25	3,08	2,26	2,26
MN 2	300 x 650	-	40	180	25	3,08	2,26	2,26
MN 3	300 x 700	-	40	230	25	3,08	2,26	2,26

Toliau deformacijos ir įtempiai perskaičiuojami naudojant skirtingų stiprumų betoną. Šiam skaičiavimui naudojamos medžiagos:

6 lentelė. konstrukcijų medžiagų savybės

Numeris	Skerspjūvis ($b_1 \times h_1$), mm	Stiprinamo sluoksnio storis h_2 , mm	Konstrukcijos betonas			Sluoksnio betonas		
			Klasė	f_{ck} , MPa	E_c , GPa	Klasė	f_{ck} , MPa	E_c , GPa
4	300 x 500	150	C30/37	30	32	C16/20	16	29
5						C30/37	30	32
6						C45/55	45	36
7						C30/37	30	32
MN 1	300 x 600	-	C30/37	30	32	-		
MN 2	300 x 650	-						
MN 3	300 x 700	-						

Su lentelėse aprašytais skerspjūviais buvo atlikti skaičiavimai dviejose betono darbo stadijose – kuomet tempiamas betonas dirba tampriai ir plastiškai.

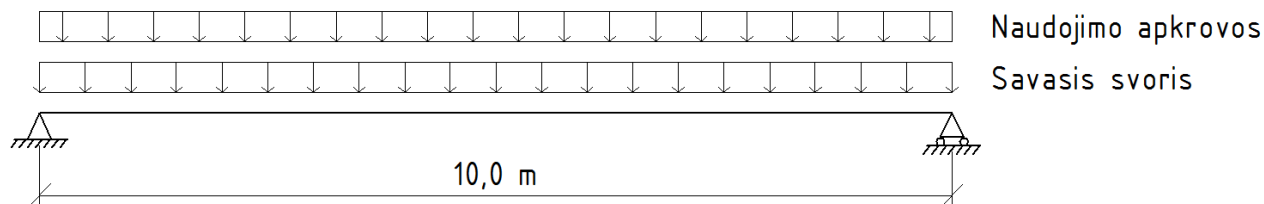
Numeriais 1–3 pažymėtų skerspjūvių deformacijos, įtempiai ir pleišėjimo momentas buvo išanalizuoti, keičiant stiprinamo sluoksnio storį. Stiprinamos konstrukcijos ir sluoksnio betono savybės priimtos vienodos.

Numeriais 4–6 pažymėti skerspjūviai išanalizuoti keičiant papildomo sluoksnio betono savybes. Skaičiavimuose priimamas skerspjūvis, kurio geometrija nekinta.

Skerspjūviui Nr. 7 apskaičiuotos deformacijos, įtempiai ir pleišėjimo momentas, kuomet tarp sluoksnių neįvyksta praslydimas. Šiam skaičiavimui parinktas 150 mm storio papildomas betono sluoksnis, o konstrukcijai ir papildomam sluoksniui naudotas C30/37 stiprumo klasės betonas.

3.1. Apkrovos

Skaičiuojant apkrovas buvo pasirinkta sija, kurios ilgis $L = 10,0$ m. Sija laisvai atremta dviem galais kaip parodyta scheme.



13 pav. sijos atrėmimo ir apkrovimo schema

Konstrukcijos apkrovos ir lenkimo momentai:

Apkrovai nuo savojo svorio
(konstrukcijos ir naujo sluoksnio)
apskaičiuoti naudojama formulė

$$g_{ss,i} = 25 \cdot b_i \cdot h_i, \text{ kN/m}, \quad (3.2.1)$$

čia 25 – gelžbetonio tankis, kN/m^3 .

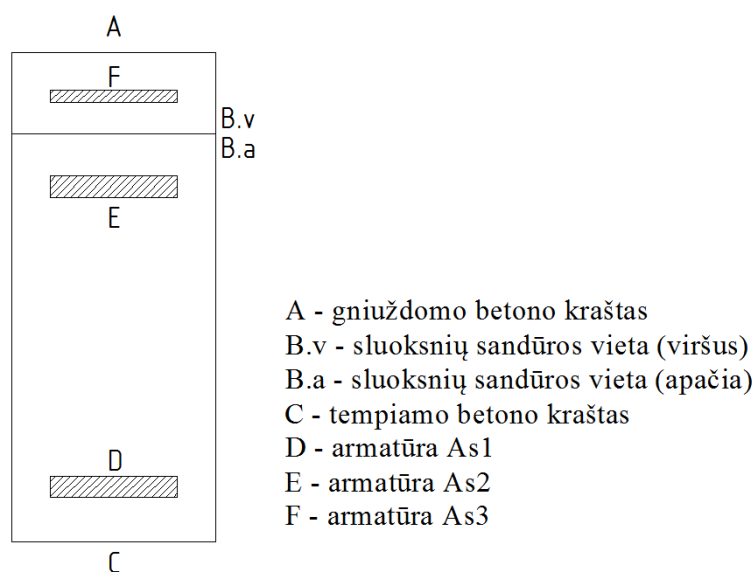
Naudojimo apkrova po stiprinimo

$$q_{naud} = 5,0 \dots 10,0 \text{ kN/m}$$

Lenkimo momentui apskaičiuoti
naudojama formulė

$$M_i = \frac{g_i(q_i) \cdot L^2}{8}, \text{ kNm} \quad (3.2.2)$$

3.2. Apskaičiuotos deformacijos



14 pav. schema, nurodanti nagrinėtų deformacijų ir įtempių vietas

Žymėjimas:

MN (1MET, 2MET)_T(P)_1...7

- MN – monolitinė konstrukcija
- 1MET – pirmuoju metodu skaičiuota konstrukcija
- 2MET – antruoju metodu skaičiuota konstrukcija
- T – betono darbas tamprioje stadijoje
- P – betono darbas plastinėje stadijoje
- 1...10 – bandinio numeris, pagal 5 ir 6 lenteles.

7 lentelė. monolitinės konstrukcijos deformacijos tamprioje stadijoje

Bandinys	Deformacijos taškuose, $\times 10^{-4}$						
	A	B.v	B.a	C	D	E	F
MN_T_1	1,965	1,308		1,974	1,711	1,110	1,801
MN_T_2	1,748	0,940		1,753	1,537	0,779	1,614
MN_T_3	1,570	0,672		1,571	1,392	0,538	1,458

8 lentelė. monolitinės konstrukcijos deformacijos plastinėje stadijoje

Bandinys	Deformacijos taškuose, $\times 10^{-4}$						
	A	B.v	B.a	C	D	E	F
MN_P_1	3,000	2,142		2,142	1,800	1,886	2,785
MN_P_2	2,634	1,593		1,877	1,560	1,385	2,46
MN_P_3	2,336	1,194		1,662	1,434	1,022	2,193

9 lentelė. konstrukcijos deformacijos tamprioje stadijoje, apskaičiuotos 1-uoju metodu

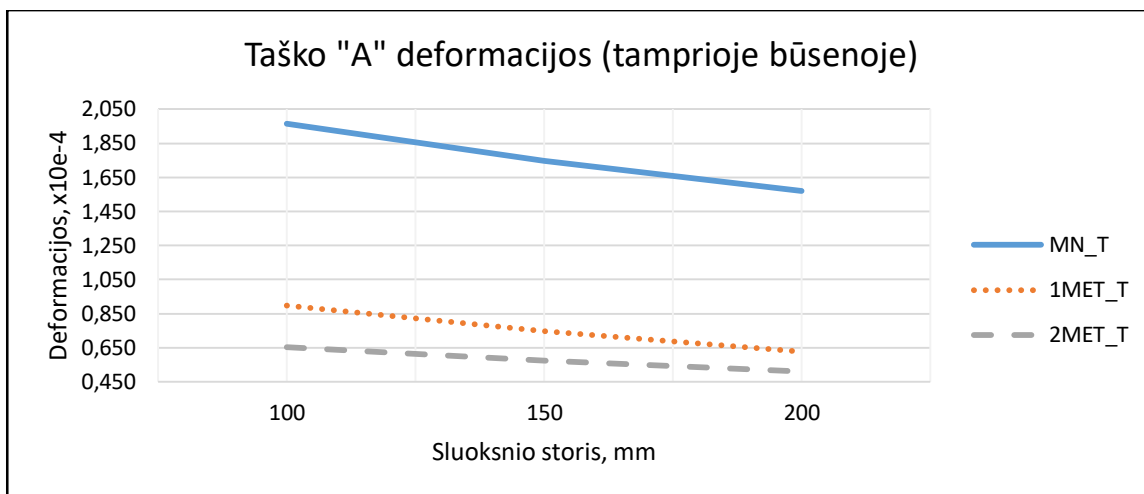
Bandinys	Deformacijos taškuose, $\times 10^{-4}$						
	A	B.v	B.a	C	D	E	F
1MET_T_1	0,898	0,567	2,177	2,467	2,096	1,898	0,815
1MET_T_2	0,749	0,367	2,089	2,418	2,057	1,818	0,685
1MET_T_3	0,629	0,233	2,066	2,403	2,046	1,798	0,58
1MET_T_4	0,769	0,383	2,104	2,413	2,051	1,833	0,705
1MET_T_5	0,749	0,367	2,089	2,418	2,057	1,818	0,685
1MET_T_6	0,725	0,349	2,07	2,426	2,067	1,801	0,663
1MET_T_7	0,885	0,476	1,925	2,329	1,989	1,67	0,817

10 lentelė. konstrukcijos deformacijos plastinėje stadijoje, apskaičiuotos 1-uoju metodu

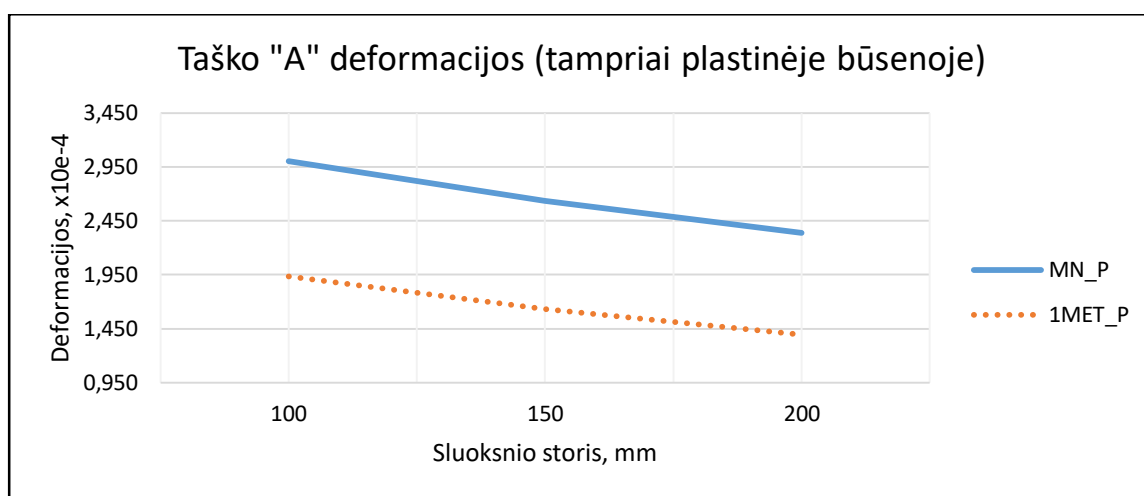
Bandinys	Deformacijos taškuose, $\times 10^{-4}$						
	A	B.v	B.a	C	D	E	F
1MET_P_1	1,932	1,351	2,961	2,881	2,414	2,61	1,787
1MET_P_2	1,634	0,53	2,674	2,771	2,336	2,348	1,521
1MET_P_3	1,395	0,675	2,508	2,708	2,291	2,195	1,305
1MET_P_4	1,675	0,985	2,706	2,765	2,327	2,378	1,56
1MET_P_5	1,634	0,953	2,674	2,771	2,336	2,348	1,521
1MET_P_6	1,587	0,916	2,637	2,782	2,349	2,311	1,475
1MET_P_7	1,771	1,071	2,52	2,703	2,286	2,206	1,654

11 lentelė. konstrukcijos deformacijos tamprioje stadijoje, apskaičiuotos 2-uoju metodu

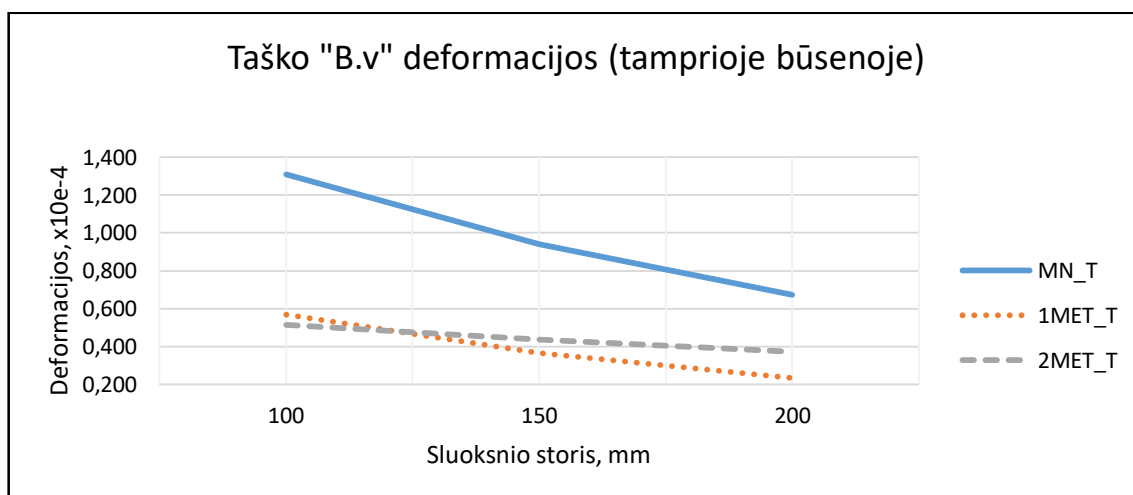
Bandinys	Deformacijos taškuose, $\times 10^{-4}$						
	A	B.v	B.a	C	D	E	F
2MET_T_1	0,652	0,515	2,125	1,897	1,676	1,878	0,728
2MET_T_2	0,575	0,438	2,160	1,940	1,693	1,908	0,7
2MET_T_3	0,509	0,373	2,206	2,010	1,740	1,948	0,657
2MET_T_4	0,608	0,472	2,193	1,930	1,683	1,940	0,747
2MET_T_5	0,575	0,438	2,160	1,940	1,693	1,908	0,7
2MET_T_6	0,535	0,399	2,120	1,952	1,705	1,871	0,646
2MET_T_7	0,881	0,881	2,329	1,886	1,549	2,076	1,223



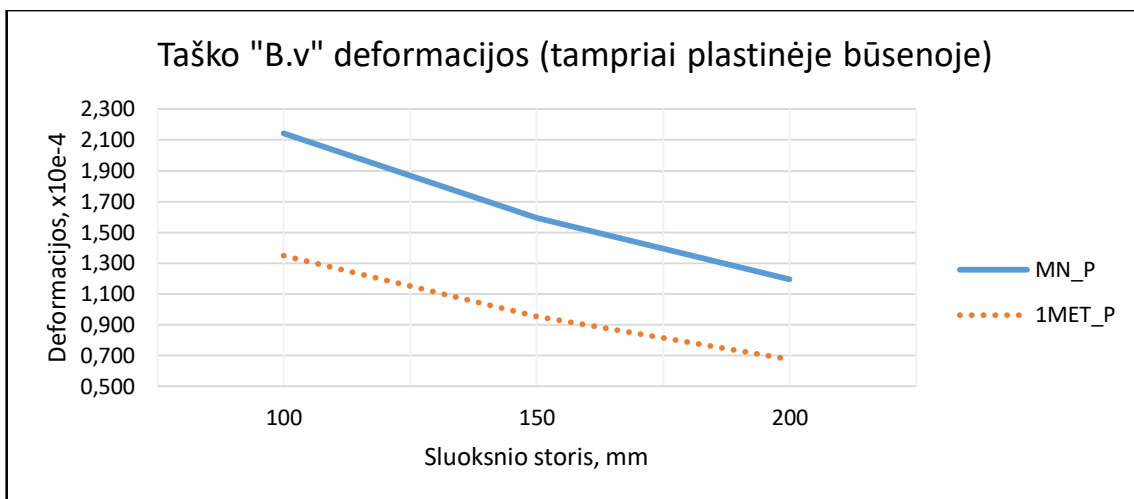
15 pav. papildomo sluoksnio gniuždomo betono krašto deformacijos (tamprumo ribose)



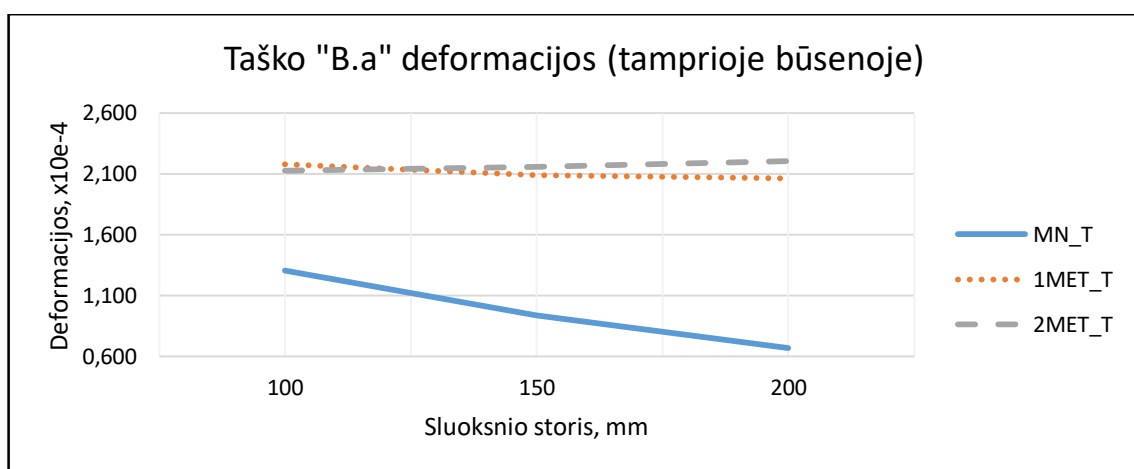
16 pav. papildomo sluoksnio gniuždomo betono krašto deformacijos (vertinant plastiškumą)



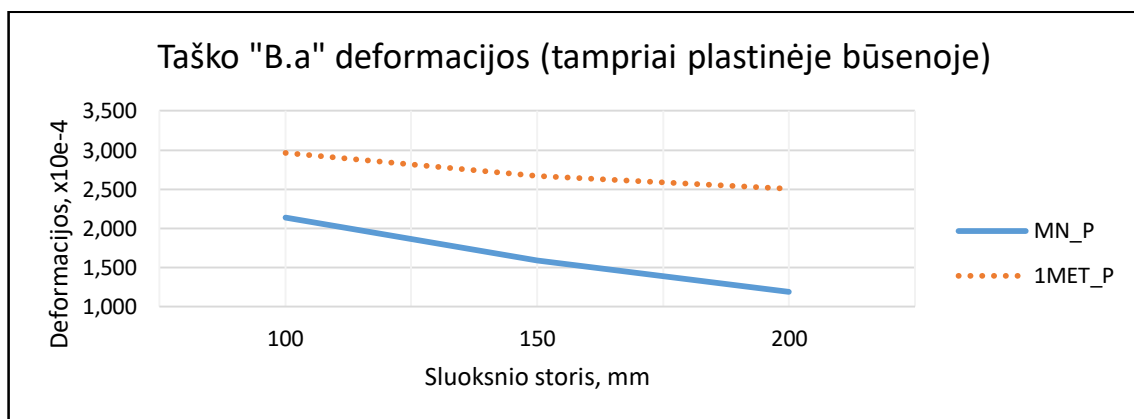
17 pav. papildomo sluoksnio apatinio krašto deformacijos (tamprumo ribose)



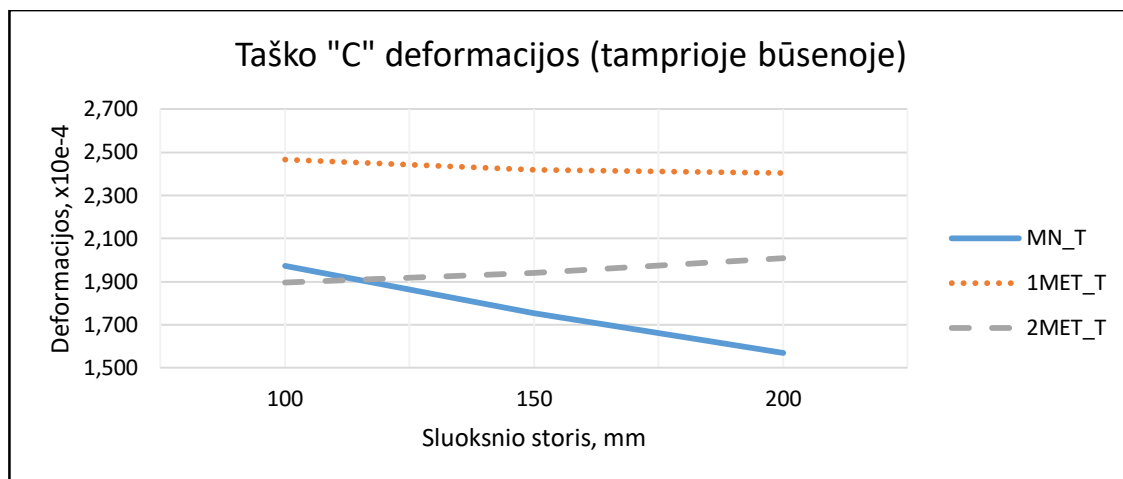
18 pav. papildomo sluoksnio apatinio krašto deformacijos (vertinant plastiškumą)



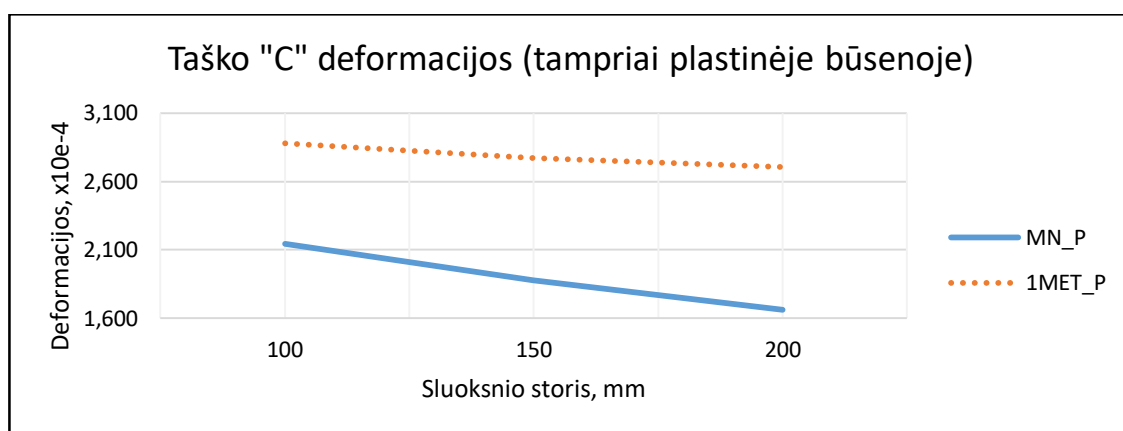
19 pav. stiprinamos konstrukcijos gniuždomo betono krašto deformacijos (tamprumo ribose)



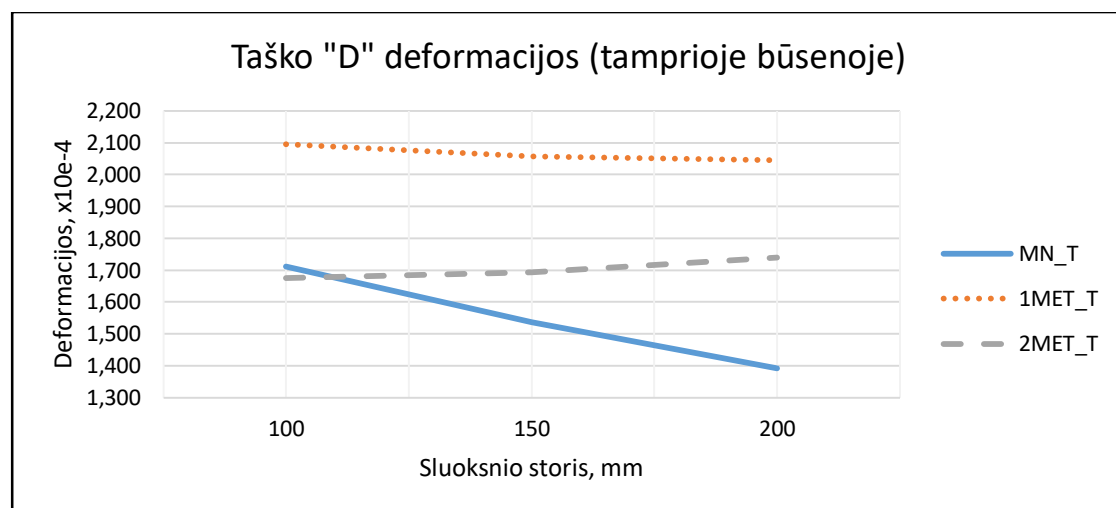
20 pav. stiprinamos konstrukcijos gniuždomo betono krašto deformacijos (vertinant plastiškumą)



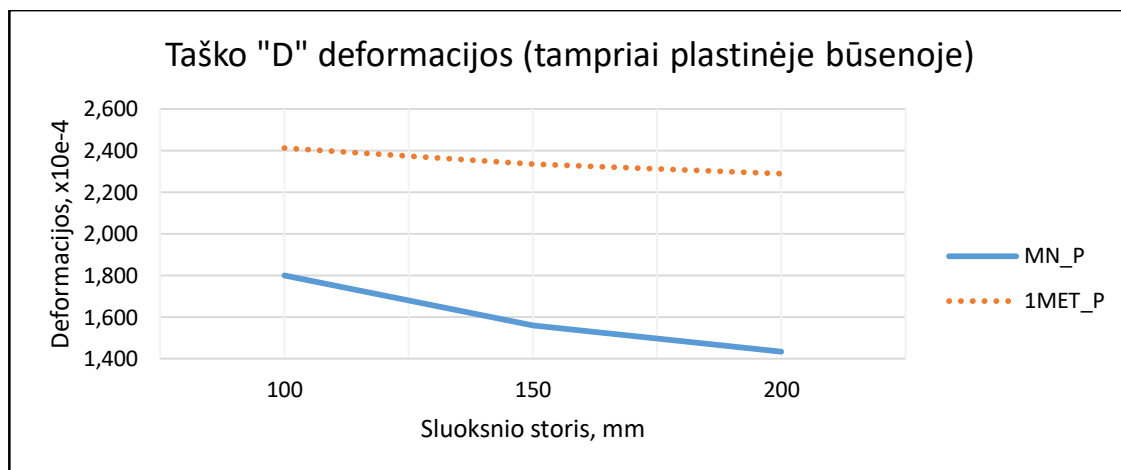
21 pav. stiprinamos konstrukcijos tempiamo betono krašto deformacijos (tamprumo ribose)



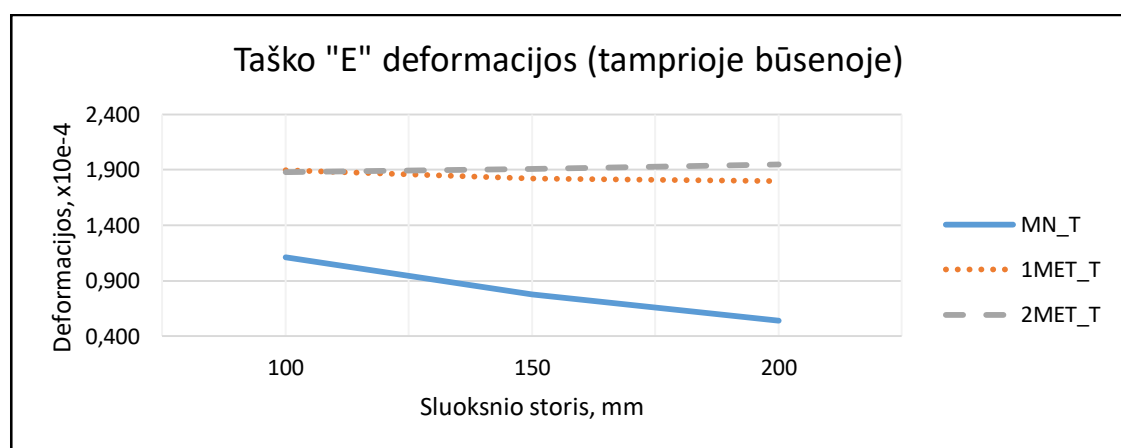
22 pav. stiprinamos konstrukcijos tempiamo betono krašto deformacijos (vertinant plastiškumą)



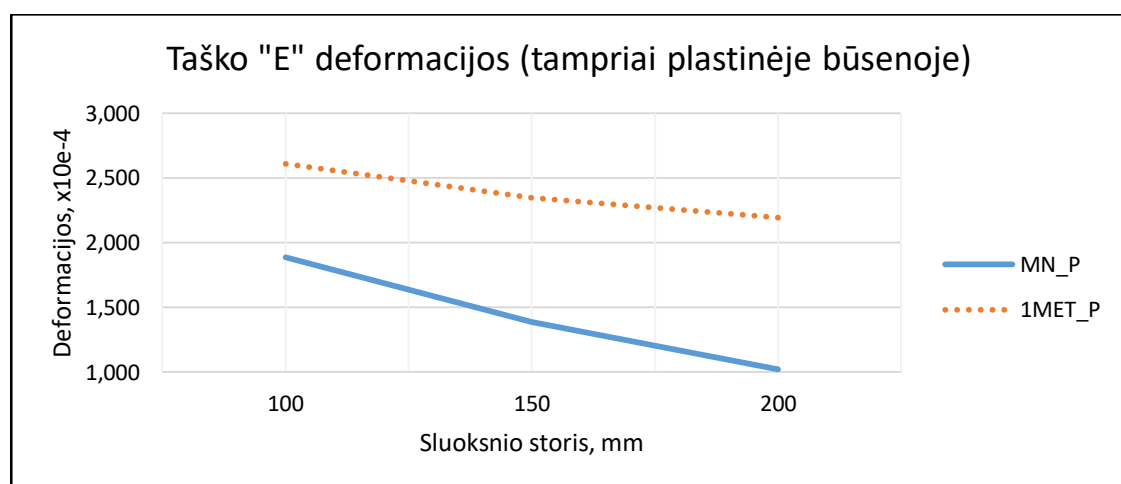
23 pav. stiprinamos konstrukcijos tempiamos armatūros As1 deformacijos (tamprumo ribose)



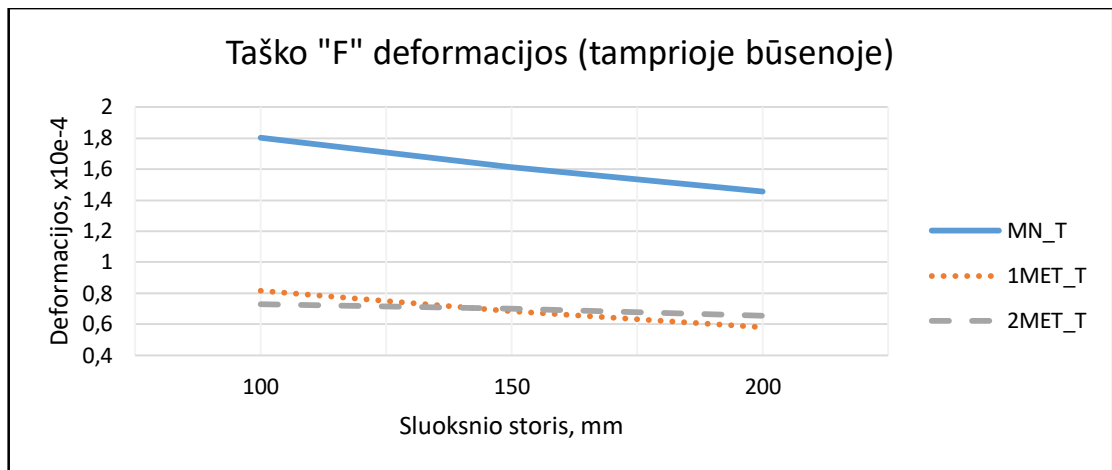
24 pav. stiprinamos konstrukcijos tempiamos armatūros As1 deformacijos (vertinant plastiškumą)



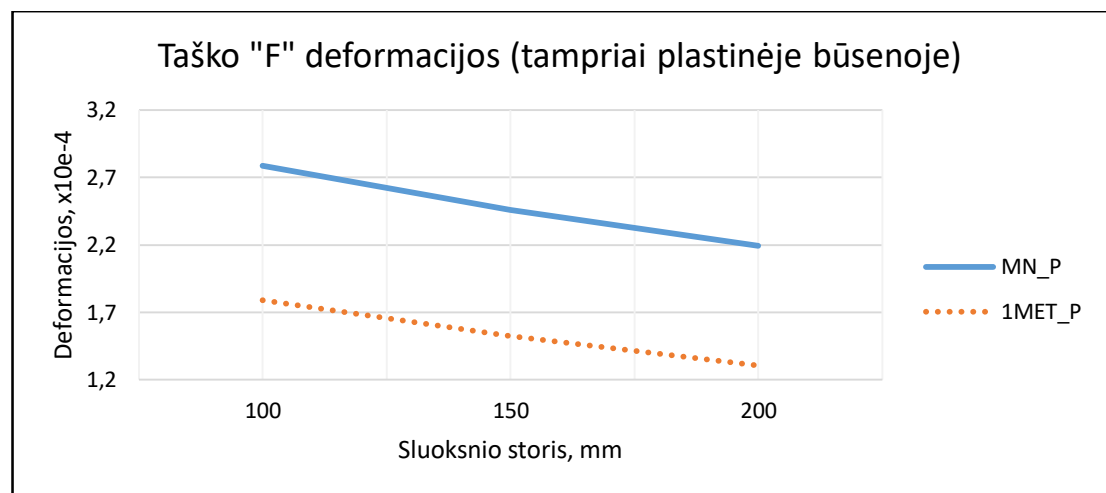
25 pav. stiprinamos konstrukcijos gniuždomos armatūros As2 deformacijos (tamprumo ribose)



26 pav. stiprinamos konstrukcijos gniuždomos armatūros As2 deformacijos (vertinant plastiškumą)



27 pav. papildomo betono sluoksnio armatūros As3 deformacijos (tampromo ribose)



28 pav. papildomo betono sluoksnio armatūros As3 deformacijos (vertinant plastiškumą)

Skaičiuojant vientisą skerspjūvį, konstrukcijos skerspjūvyje deformacijos pasiskirsto tolygiai ir didžiausios reikšmės yra pasiekiamos skerspjūvio viršutinėje ir apatinėje dalyse. Sudarius dvi skaičiavimo metodikas, kurios leidžia įvertinti naujai išlietą betono sluoksnį, pastebėta, kad gniuždomo ir tempiamo betono deformacijos išauga. Deformacijų padidėjimas dėl gniuždymo pastebėtas ne pridėto sluoksnio viršuje, tačiau esamos konstrukcijos viršutinėje dalyje. Nors praslydimas yra nedidelis ir literatūroje rašoma, kad sustiprintą konstrukciją galima skaičiuoti kaip monolitinį skerspjūvį, tačiau papildomo sluoksnio deformacijos sumažėja iki 55 %, o esamos konstrukcijos – išauga per 40 %.

Sluoksnio storis didžiausią įtaką daro gniuždomiems elementams, t.y., didžiausi deformacijų pokyčiai atsiranda papildomame betono sluoksnyje, o artėjant link tempiamos betono dalies mažėja. Padidinus sluoksnį 50 mm, gniuždymo deformacijos esamoje konstrukcijoje sumažėja tik apie 5 %.

Naujo sluoksnio betono klasės keitimas didelės įtakos deformacijų pasiskirstymui neturi. Vienintelis dydis, kuris įvertina betono savybes yra deformacijų modulis, tačiau aukštinant betono

klasę, deformacijų modulis kinta nežymiai. Betono klasę padidinus nuo C16/30 iki C45/55, esamos konstrukcijos gniuždomo betono deformacijos sumažėja 3 %.

Visose deformacijų skaičiavimuose buvo vertinamas sluoksnių praslydimas, o vieno skerspjuvio deformacijos apskaičiuotos, kuomet sluoksniai nepraslysta. Jeigu sluoksniai praslysta, papildomo sluoksnio deformacijos sumažėja, tačiau jos išauga esamoje konstrukcijoje. Esant visiškai standžiam sukibimui, viršutinis sluoksnis deformuojasi 8 % daugiau, esamos konstrukcijos gniuždomo krašto deformacijos sumažėja 5,5 %, tempiamo krašto – 2,5 %.

Armatūros deformacijos, kaip ir betono, kinta tuo pačiu dėsniumu. Lyginant su monolitine konstrukcija, armatūros A_{s1} deformacijos yra 25 % didesnės, A_{s2} – 28 % didesnės, A_{s3} – sumažėja 36 %.

Esant nedidelėms apkrovoms, kuomet tempiamas konstrukcijos betonas dirba tampriai, deformacijos armatūroje beveik nepriklauso nuo papildomo sluoksnio storio. Padidinus apkrovą ir skaičiavimuose įvertinus plastinį tempiamo betono darbą, armatūros deformacijų priklausomybė nuo papildomo sluoksnio storio išryškėjo. Sluoksnio storį padidinus nuo 100 mm iki 200 mm, tempiamos armatūros deformacijos sumažėjo 5,1 %, esamos konstrukcijos gniuždomos armatūros – 16 %, o papildomo sluoksnio armatūros – 27 %.

Kaip ir betono deformacijoms, betono klasės keitimas (didinimas ar mažinimas) armatūros deformacijoms įtakos beveik neturi.

Dėl sluoksnio praslydimo, armatūros A_{s3} deformacijos sumažėja 8 %, A_{s1} deformacijos išauga 2,2 %, o A_{s2} deformacijos išauga 6,2 %.

3.3. Apskaičiuoti įtempiai

12 lentelė. monolitinės konstrukcijos įtempiai tamprioje stadijoje

Bandinys	Įtempiai taškuose, MPa						
	A	B.v	B.a	C	D	E	F
MN_T_1	6,29	4,19	4,19	6,32	34,23	22,23	36,02
MN_T_2	5,59	3,01	3,01	5,61	30,75	15,58	32,28
MN_T_3	5,02	2,15	2,15	5,03	27,84	10,76	29,16

13 lentelė. monolitinės konstrukcijos įtempiai vertinant plastinį betono darbą

Bandinys	Įtempiai taškuose, MPa						
	A	B.v	B.a	C	D	E	F
MN_P_1	9,6	6,86	6,86	6,85	35,99	37,71	55,71
MN_P_2	8,43	5,1	5,1	6,01	31,99	27,69	49,21
MN_P_3	7,47	3,82	3,82	5,32	28,67	20,45	43,86

14 lentelė. konstrukcijos įtempiai tamprioje stadijoje, apskaičiuoti 1-uoju metodu

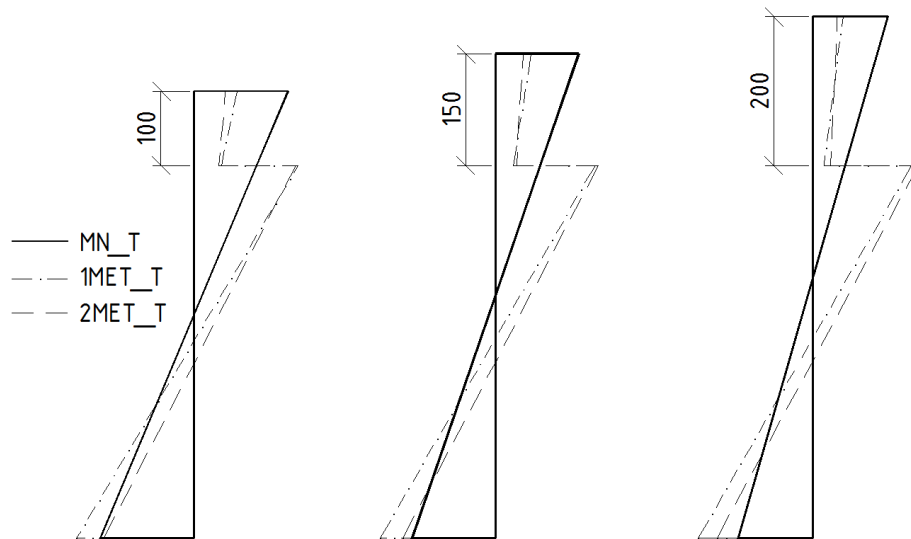
Bandinys	Įtempiai taškuose, MPa						
	A	B.v	B.a	C	D	E	F
1MET_T_1	2,87	1,81	6,97	7,90	41,91	37,96	16,3
1MET_T_2	2,40	1,18	6,68	7,74	41,15	36,37	13,71
1MET_T_3	2,01	0,74	6,61	7,69	40,92	35,96	11,6
1MET_T_4	2,23	1,11	6,73	7,72	41,02	36,66	14,1
1MET_T_5	2,40	1,18	6,68	7,74	41,15	36,37	13,71
1MET_T_6	2,61	1,26	6,63	7,76	41,33	36,01	13,26
1MET_T_7	2,83	1,52	6,16	7,45	39,78	33,39	16,34

15 lentelė. konstrukcijos įtempiai, vertinant plastinį betono darbą, apskaičiuoti 1-uoju metodu

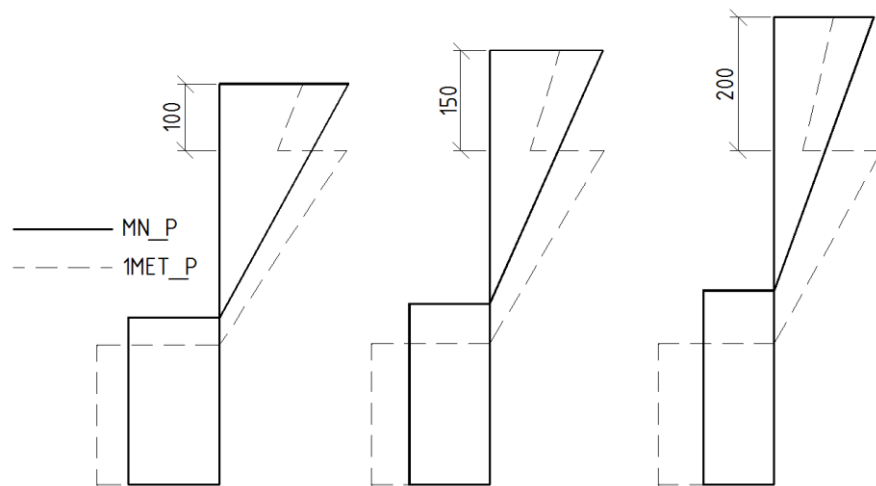
Bandinys	Įtempiai taškuose, MPa						
	A	B.v	B.a	C	D	E	F
1MET_P_1	6,18	4,32	9,47	9,22	48,28	52,21	35,74
1MET_P_2	5,23	3,05	8,56	8,87	46,72	46,95	30,41
1MET_P_3	4,47	2,16	8,03	8,67	45,82	43,90	26,11
1MET_P_4	4,86	2,86	8,66	8,85	46,54	47,55	31,19
1MET_P_5	5,23	3,05	8,56	8,87	46,72	46,95	30,41
1MET_P_6	5,71	3,30	8,44	8,92	46,97	46,24	29,51
1MET_P_7	5,67	3,43	8,06	8,65	45,71	44,12	33,08

16 lentelė. konstrukcijos įtempiai tamprioje stadijoje, apskaičiuoti 2-uoju metodu

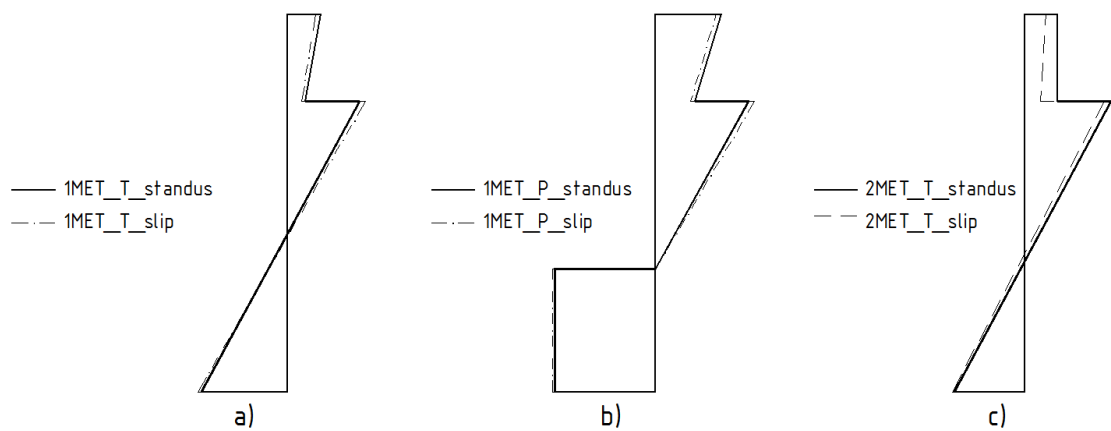
Bandinys	Įtempiai taškuose, MPa						
	A	B.v	B.a	C	D	E	F
2MET_T_1	2,09	1,65	6,8	6,07	33,52	37,55	14,55
2MET_T_2	1,84	1,4	6,91	6,21	33,86	38,17	14
2MET_T_3	1,63	1,19	7,06	6,43	34,79	38,97	13,13
2MET_T_4	1,76	1,37	7,02	6,18	33,66	38,81	14,94
2MET_T_5	1,84	1,4	6,91	6,21	33,86	38,17	14
2MET_T_6	1,93	1,44	6,79	6,25	34,09	37,42	12,91
2MET_T_7	2,82	2,82	7,45	6,04	30,97	41,53	24,45



29 pav. betono įtempių priklausomybė nuo slukksnio storio tamprioje stadijoje



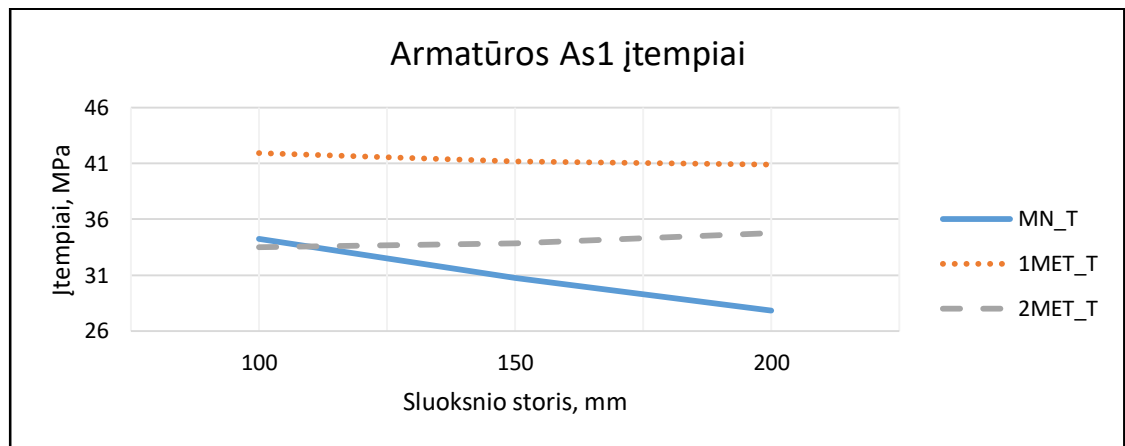
30 pav. betono įtempių priklausomybė nuo slukksnio storio vertinant plastinį betono darbą



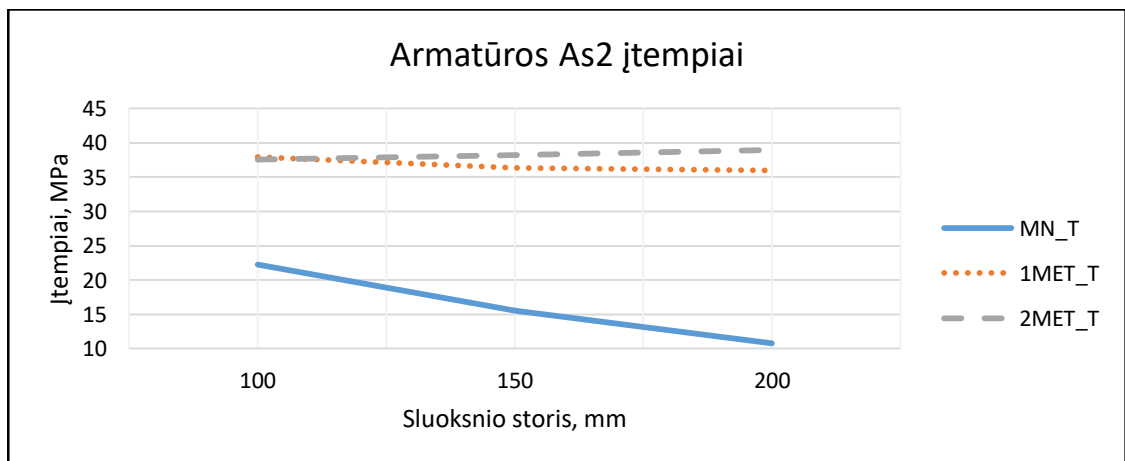
31 pav. betono įtempių pasiskirstymas dėl praslydimo skirtingais skaičiavimo metodais

29–31 pav. storesne linija pavaizduotos atitinkamo skerspjūvio monolitinės konstrukcijos betono įtempiai, punktyrinėmis linijomis – 1-uoju ir 2-uoju metodais apskaičiuoti betono įtempiai po stiprinimo.

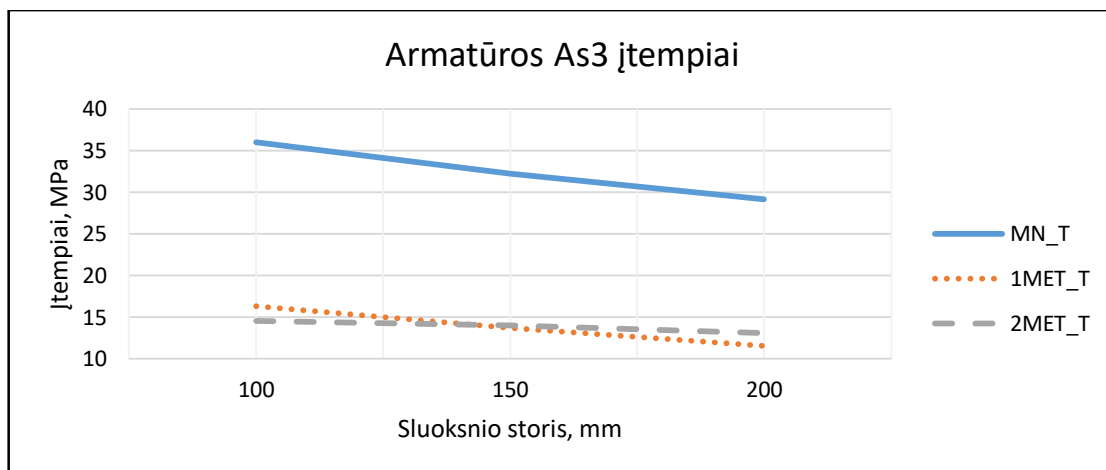
Iš betono įtempių diagramų matyti, kad didžiausias skirtumas tarp sustiprintos ir monolitinės konstrukcijos yra sluoksnio pridėjimo vietoje. Papildomo sluoksnio apačioje įtempiai yra mažesni, lyginant su vientisu skerspjūviu. Esant nedidelėms apkrovoms, skirtumas sluoksnio apačioje siekia 65 %. Dėl to, kad papildomas sluoksnis perima tik dalį išorinės apkrovos, stiprinamos konstrukcijos gniuždomo betono įtempiai padidėja apie 60 %.



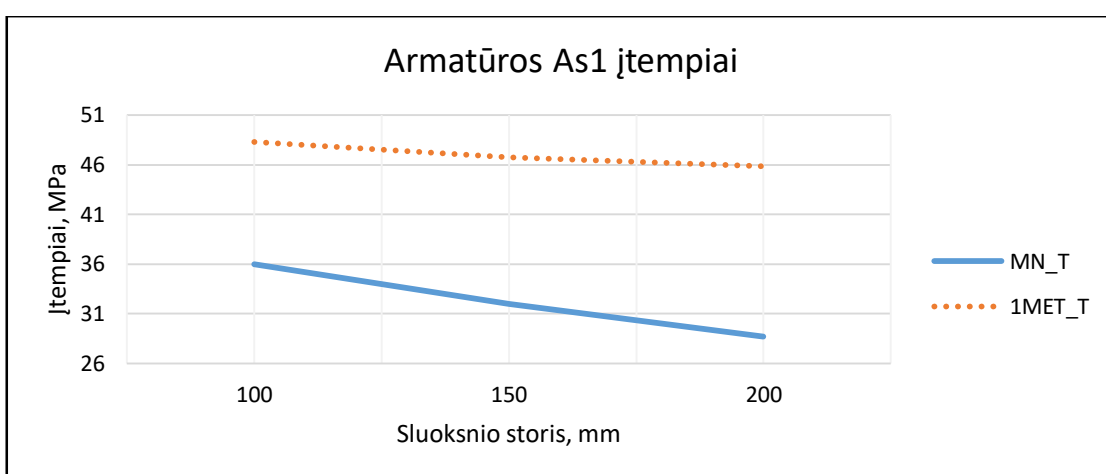
32 pav. armatūros As1 įtempiai MN_T, 1MET_T ir 2MET_T bandiniams



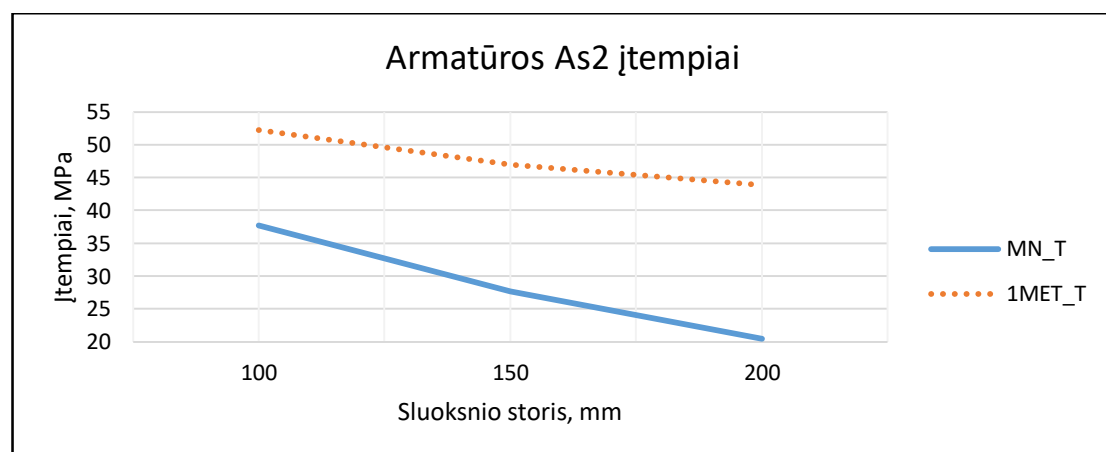
33 pav. armatūros As2 įtempiai MN_T, 1MET_T ir 2MET_T bandiniams



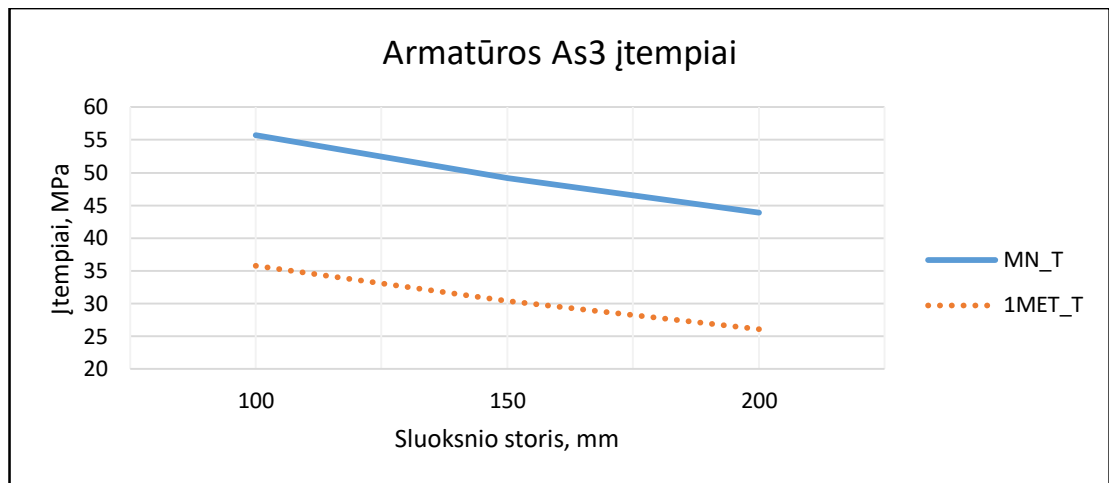
34 pav. armatūros As3 ģtempiei MN_T, 1MET_T ir 2MET_T bandinams



35 pav. armatūros As1 ģtempiei MN_P ir 1MET_P bandinams



36 pav. armatūros As2 ģtempiei MN_P ir 1MET_P bandinams



37 pav. armatūros As3 įtempiai MN_P ir 1MET_P bandiniams

3.3.1. Armatūros įtempių analizė

Didinant papildomo sluoksnio storį, armatūros įtempiai mažėja tolygiai. Didžiausias skirtumas matomas armatūroje A_{s3} , mažiausias – A_{s1} . Padidinus sluoksnio storį 50 mm, papildomo sluoksnio armatūroje įtempiai sumažėja apie 15 %, o esamos konstrukcijos tempiamojoje armatūroje apie 3 %.

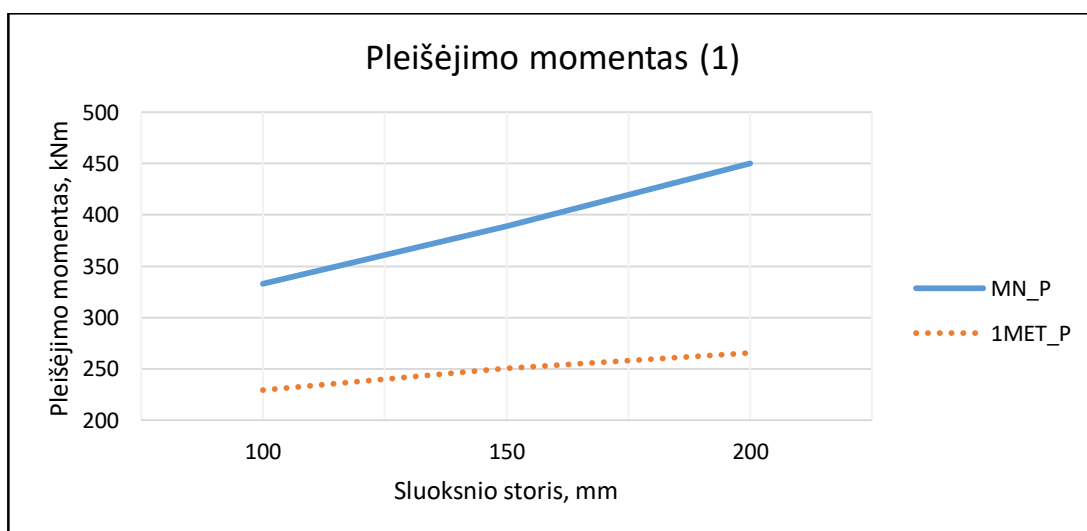
Nors betono klasė lygtyse yra įvertinama, jos keitimas armatūros įtempiams įtakos beveik nedaro.

Įvertinus, kad sluoksniai tarpusavyje gali praslysti, nustatyta, kad papildomo sluoksnio armatūroje įtempiai sumažėtų 8 %, tačiau esamos konstrukcijos armatūros įtempiai išaugtų. Gniuždomos konstrukcijos armatūros įtempiai padidėtų 6 %, o tempiamos armatūros įtempiai – 2 %.

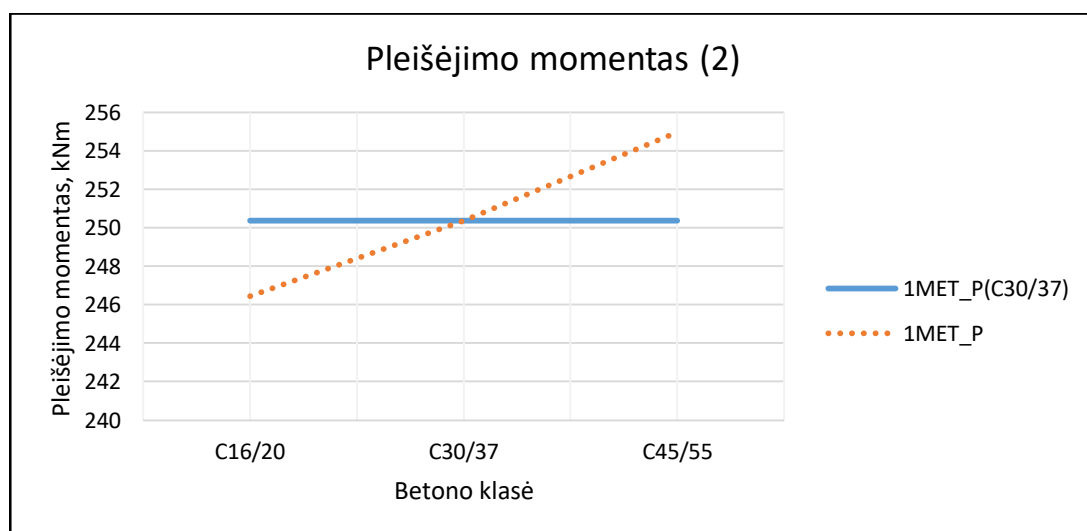
3.4. Pleišėjimo momentas

17 lentelė. pleišėjimo momentų rezultatai

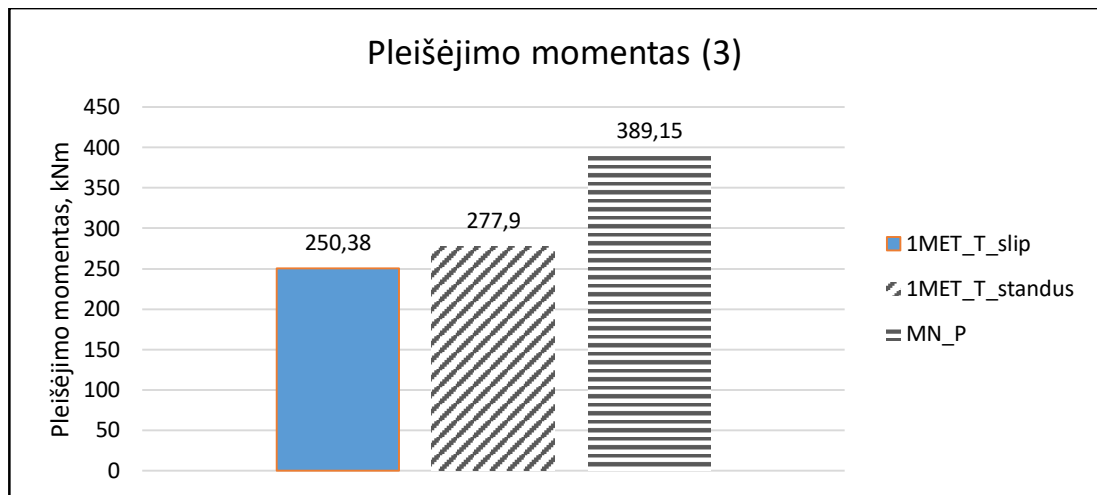
Bandinys	Pleišėjimo momentas, kNm
MN_P_1	332,9
MN_P_2	389,15
MN_P_3	450,02
1MET_P_1	229,63
1MET_P_2	250,38
1MET_P_3	265,51
1MET_P_4	246,45
1MET_P_5	250,38
1MET_P_6	254,95
1MET_P_7	277,9



38 pav. pleišėjimo momentų priklausomybė nuo sluoksnio storio



39 pav. pleišėjimo momentų priklausomybė nuo betono sluoksnio klasės



40 pav. pleišėjimo momentų priklausomybė nuo praslydimo

Apskaičiuoti ir palyginti bandinių MN_P ir 1MET_P pleišėjimo momentai. Dėl to, kad po stiprinimo įtempiai pasiskirsto netolygiai, momentų skirtumas yra didelis. Pagal grafiką matyti, kad monolitinėje konstrukcijoje didinant skerspjūvį, pleišėjimo momentas auga sparčiau, o sustiprintoje konstrukcijoje kreivė yra gultesnė.

Sustiprinus konstrukciją 50 mm betono sluoksniu ir lyginant ją su atitinkamo skerspjūvio monolitine konstrukcija, skirtumas tarp pleišėjimo momentų siekia nuo 20 iki 40 %.

Sustiprintoje konstrukcijoje pleišėjimo momentai taip pat apskaičiuoti, kai betono klasės tarp konstrukcijos ir sluoksnio skiriasi. Iš grafiko ir lentelės duomenų matyti, kad didelės įtakos betono klasė nedaro. Jei papildomo sluoksnio betono klasė yra žemesnė nei esamos konstrukcijos, gaunamas 1,5 % mažesnis pleišėjimo momentas, jei betono klasė yra aukštesnė – gaunamas 1,8 % prieaugis.

Paskutinėje diagramoje pavaizduotas pleišėjimo momentas nuo praslydimo. Jeigu skaičiavimuose priimama, kad sluoksniai sukimba standžiai gaunamas 277,9 kNm pleišėjimo momentas. Jei konstrukcijos sluoksniai praslysta, pleišėjimo momentas sumažėja iki 250,38 kNm, tai yra 10 % mažiau.

Išvados

Sudarytos dvi sustiprinto skerspjūvio skaičiavimo metodikos, kurios leidžia tiksliau įvertinti stiprinimo įtaką konstrukcijai. Pirmasis metodas paremtas superpozicijos principu, kuomet deformacijos, atsirandančios nuo skirtingų poveikių, yra sudedamos atskirai. Antrajame metode sprendžiamos lygtys, kurioje visi poveikiai iškart yra vertinami, tačiau šis metodas taikytinas tik betono tamprumo stadijoje.

Abiem metodais nustatyta, kokią įtaką daro betono sluoksnio storis. Pradinis konstrukcijos stiprinimas 100 mm storio betono sluoksniu deformacijas ir įtempius konstrukcijoje sumažina 30 %, toliau kiekvienas papildomas 50 mm betono sluoksnis deformacijas ir įtempius mažina 15 %.

Įvairiais stiprinimo atvejais apskaičiuotas pleišėjimo momentas palygintas su padidinto skerspjūvio monolitine konstrukcija. Nustatyta, kad padidinus betono sluoksnio storį 50 mm, pleišėjimo momentas padidėjo 5,7 %, padidinus sluoksnio betono klasę iš C16/20 iki C45/55 pleišėjimo momentas padidėjo 3,4 %. Darytina išvada, kad sustiprintos konstrukcijos kaip vientiso elemento skaičiuoti negalima, kadangi, dėl pradinių įtempių, pleišėjimo momento skirtumas yra akivaizdus ir lyginant su vientisa konstrukcija mažesnis 28 %.

Skaičiavimuose vertinamas sluoksnių praslydimas ir nustatyta jo įtaką elemento standumui. Sluoksniams praslydus, papildomame betono sluoksnyje deformacijos sumažėja 8 %, tačiau jos išauga stiprinamoje konstrukcijoje – gniuždomojoje zonoje 5,5 %, tempiamojoje 2,5 %.

Atlikti skaičiavimai parodė, kad nors ir sluoksnis prie konstrukcijos yra pritvirtinamas standžiai, deformacijos ir įtempiai nėra tolygiai kintantys visame skerspjūvyje kaip monolitinėje konstrukcijoje. Šis netolygus deformacijų pasiskirstymas neleidžia elemento skaičiuoti kaip vientiso skerspjūvio. Norint sumažinti netolygų deformacijų ir įtempių pasiskirstymą, prieš stiprinant konstrukciją ji turi būti išramstyta, kad užliejus naują betono sluoksnį nesusidarytų pradinės deformacijos iki sluoksnio sukietėjimo.

Literatūros sąrašas

1. ADAWI, A. ir kt. Finite element modeling of the composite action between hollow core slabs and the topping concrete. *Engineering Structures*. 2016, 124 (2016) 30-315.
2. DEMIR, A., TEKIN, M. Strengthening of reinforced concrete (RC) beams with prefabricated reinforced concrete (RC) plates. *Scientific Research and Essays Vol. 6(21)*, pp. 4577-4586, 30 September, 2011. ISSN 1992-2248.
3. EL-REEDY, A. M. *Construction Management and Design of Industrial Concrete and Steel Structures*. Taylor & Francis, 2010. ISBN 1439815992, 9781439815991.
4. TARABIA, A. M., ALBAKRY, H. F. Strengthening of RC columns by steel angles and strips. *Alexandria Engineering Journal*. 2014, 53, 615-626.
5. ADHIKARY, B. B., MUTSUYOSHI, H. Shear strengthening of RC beams with web-bonded continuous steel plates. *Construction and Building Materials* 20. 2006, 296-307.
6. SPADEA, G. ir kt. Structural effectiveness of FRP materials in strengthening RC beams. *Engineering Structures*. 2015, 631-641.
7. LORENZIS, L. D. ir kt. Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods. *International Meeting on Composite Materials, PLAST*. 2000, Milan.
8. CHUNG, H. W., Epoxy Repaired Reinforced Concrete Beams. *ACI Journal*, Vol. 72, No. 5, May 1975, pp. 233-234.
9. BARAN, E. Effects of cast-in-place concrete topping on flexural response of precast concrete hollow-core slabs. *Engineering Structures* 98. 2015, 109-117.
10. FERNANDES, H., LUCIO, V., RAMOS, A. Strengthening of RC slabs with reinforced concrete overlay on the tensile face. *Engineering Structures* 132. 2017, 540-550.
11. LAMPROPOULOS A. P., PASCHALIS S. A., ir kt. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), *Engineering Structures*, 2016, Vol. 106.
12. KOROL, E. ir kt. Model of stressed-strained state of multi-layered reinforced concrete structure with the use of composite reinforcement. *Materials Science and Engineering*. 2018. 365 (2018) 052033.
13. LAMPROPOULOS A., ir kt. Experimental investigation of interface behavior of RC beams strengthened with concrete layers. *Construction and Building Materials* 40. 2013, 50-59.
14. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1992-1:2005]. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*.