



Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Linas Juknevičius

**Viduriniojo sluoksnio supleišėjimo įtaka lenkiamųjų
trislauksnių gelžbetoninių konstrukcijų elgsenai**

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

Vilnius, 2006

Disertacija rengta 1999–2006 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Disertacija ginama eksternu.

Darbo mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Jonas Gediminas MARČIUKAITIS (Vilniaus Gedimino technikos
universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T)

Turinys

Bendroji disertacinio darbo charakteristika	5
1. Lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų skaičiavimo metodų analizė	9
1.1. Lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų pleišėtumo ir laikomosios galios skaičiavimas	11
1.2. Sluoksnių susitraukimo deformacijų įvertinimas	23
1.3. Išvados	25
2. Lenkiamųjų armuotų trisluoksnių elementų stiprumo ir supleišėjimo skaičiavimo metodas	27
2.1. Įvadas	27
2.2. Prielaidos	28
2.3. Įtempių ir deformacijų būvio analizė ir skaičiuojamojo modelio sudarymas	29
2.4. Pradinių įtempių, susidariusių dėl skirtingų sluoksnių susitraukimo deformacijų, nustatymas	32
2.5. Neutraliosios ašies padėties nustatymas	46
2.6. Supleišėjimo momento nustatymas	55
2.7. Laikomosios galios nustatymas	62
2.8. Išvados	67
3. Eksperimentinis lenkiamųjų trisluoksnių sijų laikomosios galios bei pleišėtumo tyrimas	69
3.1. Betono fizikinių ir mechaninių savybių priklausomybė nuo mišinio sudėties ir panaudotų priedų	69
3.2. Mišinio sudėties įtaka betono laisvojo susitraukimo deformacijoms	82
3.3. Eksperimentinis lenkiamųjų trisluoksnių sijų įtempių ir deformacijų būvio tyrimas	86
3.4. Išvados	100
4. Eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė ir palyginimas su teorinių skaičiavimų rezultatais	102
4.1. Pasiūlyto skaičiavimo metodo rezultatų palyginimas su eksperimentiškai gautais rezultatais	102
4.2. Tinkamo skaičiuojamojo modelio parinkimas pasiūlytam skaičiavimo metodui	109

4.3. Trisluoksnio elemento geometrinių bei fizikinių ir mechaninių charakteristikų įtaka pasiūlyto skaičiavimo metodo rezultatams	111
4.4. Išvados	116
5. Pagrindinės darbo išvados, rezultatai ir rekomendacijos.....	118
Literatūros sąrašas.....	120

Bendroji disertacinio darbo charakteristika

Darbo aktualumas

Lietuvoje, kaip ir visame pasaulyje, sparčiai auga sluoksniuotųjų konstrukcijų taikymas statyboje. Dėl pasaulyje nuolat brangstančių visų rūšių kuro kainų – šiuolaikinėje statyboje efektyvių mažo šilumos pralaidumo konstrukcijų kūrimas yra vienas iš pagrindinių uždavinių. Be to, daugelio šalių normatyviniuose statybą reglamentuojančiuose dokumentuose yra nuolat didinami statinių atitvarinių konstrukcijų termoizoliacinių savybių reikalavimai. Atsiranda vis naujesnių statybinių medžiagų, iš kurių galima projektuoti aukšto efektyvumo konstrukcijas, kurios pasižymi geromis šilumos ir drėgmės izoliacinėmis savybėmis bei mažu svoriu. Pagal šiuo metu Europoje galiojančius normatyvinius atitvarinių konstrukcijų šilumos varžos reikalavimus vienasluoksnių konstrukcijų panaudojimas yra neefektyvus. Vienasluoksnių konstrukcijų panaudojimas ne visuomet leidžia pilnai išnaudoti medžiagų mechanines savybes. Pavyzdžiui, ekscentriškai gniuždomų ir lenkiamųjų elementų viduryje įtempiai būna ženkliai mažesni negu elementų kraštuose. Tai rodo, kad sluoksniuotųjų elementų atveju vidurinysis sluoksnis gali būti gaminamas iš silpnėsnių ir tuo pačiu pigesnių medžiagų. Viduriniojo sluoksnio arba sluoksnių paskirtis – sujungti išorinius sluoksnius ir perskirstyti įtempius skerspjuvyje. Tokios konstrukcijos susideda iš dviejų ar daugiau skirtingų medžiagų sluoksnių, kurių kiekvienas turi maksimaliai išnaudoti savo gerąsias savybes. Laikomąją galią paprastai užtikrina armatūra ir išoriniai sluoksniai, pagaminti iš įprastojo arba su specialiais priedais paruošto sunkiojo betono. Tuo tarpu šilumos izoliacinę funkciją dažniausiai atlieka sluoksnis, pagamintas iš lengvojo betono, dujų silikatbetonio, keramzitbetonio ar panašių medžiagų. Dažniausiai statyboje tokio tipo lenkiamos sluoksniuotosios konstrukcijos būna perdangos ar denginio plokštės, užbetonuotos denginio juostos ir panašiai.

Mokslinėje literatūroje yra pateikta pakankamai daug sluoksniuotųjų konstrukcijų skaičiavimo metodų, bet jie dažniausiai yra sudėtingi arba nepritaikomi esant tokiai medžiagai, kaip gelžbetonis. Be to, daugumoje skaičiavimo metodų neįvertinama galimybė, kad vidurinysis sluoksnis gali supleišėti anksčiau už išorinius sluoksnius, kuriuose veikia didesni normaliniai įtempiai. Viduriniuosiuose sluoksniuose iš ypač lengvų arba silpnų betono tipo medžiagų (pvz., putbetonio, smėlbetonio) susitraukimo deformacijos būna kelis kartus didesnės nei išoriniuose sluoksniuose. Todėl viduriniuosiuose sluoksniuose plyšiai gali atsirasti dar iki eksploatacinėje stadijoje. Lenkiamieji sluoksniuotieji elementai gali įgauti

labai sudėtingą įtempių ir deformacijų būvį, kurį būtina teisingai įvertinti, norint suprojektuoti efektyvias ir patikimas statybines konstrukcijas.

Šiame darbe pasiūlytas lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių konstrukcijų laikomosios galios ir išorinio tempiamojo sluoksnio supleišėjimo skaičiavimo metodas, įvertinantis viduriniojo sluoksnio supleišėjimą, betono susitraukimo deformacijas ir sluoksnių medžiagų fizikines ir mechanines charakteristikas.

Tyrimų objektas ir metodai

Pagrindinis šio darbo tyrimo objektas yra lenkiamieji armuoti sluoksniuotieji elementai, pagaminti iš betono tipo medžiagų. Tyrimams buvo naudojama literatūroje pateikiamų sluoksniuotųjų gelžbetoninių elementų skaičiavimo metodų analizė. Buvo atlikti eksperimentai su trisluoksniomis gelžbetoninėmis sijomis, kurių vidurinysis sluoksnis pagamintas iš lengvų betono tipo medžiagų. Taip pat buvo atlikta eilė eksperimentų tiriant skirtingų betonų fizikines ir mechanines savybes ir jų susitraukimo deformacijas.

Pagrindinis darbo tikslas

Pasiūlyti lenkiamųjų gelžbetoninių trisluoksnių elementų laikomosios galios bei išorinio sluoksnio supleišėjimo skaičiavimo metodą, leidžiantį įvertinti viduriniojo sluoksnio supleišėjimo bei skirtingų sluoksnių susitraukimo deformacijų įtaką bendram elemento darbui.

Uždaviniai

Šiam tikslui pasiekti sprendžiami tokie uždaviniai:

1. Atlikti literatūroje pateikiamų lenkiamųjų sluoksniuotųjų gelžbetoninių elementų skaičiavimo metodų analizę.
2. Atlikti lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų būvio analizę.
3. Atlikti betono susitraukimo deformacijų įtakos trisluoksnių gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų būviui analizę.

4. Atlikti parametrinę skirtingų betonų fizikinių ir mechaninių savybių įtakos lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių elementų laikomajai galiai ir supleišėjimo momentui analizę.

Naujumas ir originalumas

1. Pasiūlytas lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių elementų laikomosios galios ir išorinio sluoksnio supleišėjimo momento skaičiavimo metodas, leidžiantis įvertinti viduriniojo sluoksnio pleišetumą ir skirtingas sluoksnių betono susitraukimo deformacijas.
2. Eksperimentinių tyrimų būdu gauta naujų duomenų apie lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių sijų viduriniojo sluoksnio supleišėjimo įtaką išorinių sluoksnių deformacijoms.
3. Eksperimentinių tyrimų būdu gauta naujų duomenų apie polietilpropileno pluošto įtaką betono deformacinėms savybėms ir laisvojo susitraukimo deformacijoms.
4. Kiekybiškai įvertinta įvairių betono fizikinių ir mechaninių charakteristikų įtaka lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių elementų laikomosios galios ir supleišėjimo momento skaičiavimo rezultatams.

Ginamieji teiginiai

- Plyšiai lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių elementų viduriniajame sluoksnyje turi įtakos elemento išorinių sluoksnių supleišėjimo momentui bei viso elemento laikomajai galiai.
- Pasiūlytas lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių elementų supleišėjimo momento ir laikomosios galios skaičiavimo metodas leidžia įvertinti viduriniojo sluoksnio pleišetumą ir skirtingas sluoksnių betono susitraukimo deformacijas.

Darbo aprobavimas ir publikacijos

Pagrindiniai disertacinio darbo rezultatai buvo paskelbti 5 moksliniuose straipsniuose, iš kurių 2 recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose. Disertacinio darbo rezultatai pristatyti šiose technikos mokslo konferencijose:

- 3-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, vykusioje Vilniuje 2000 m. kovo 31 d.

- 4-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, vykusioje Vilniuje 2001 m. kovo 30 d.
- 6-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, vykusioje Vilniuje 2003 m. kovo 27 d.
- 8-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Modern Building Materials, Structures and Techniques“, vykusioje Vilniuje 2004 m. gegužės 19–21 d.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Disertacijoje yra 131 puslapis, 59 iliustracijos, 10 lentelių, 131 bibliografijos šaltinio sąrašas.

1. Lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų skaičiavimo metodų analizė

Šiuolaikinėje statyboje žymi dalis statinio elementų projektuojami ir gaminami kaip sluoksniuotieji elementai. Šiuo metu statyboje populiariausi trisluoksnių elemento pavyzdžiai yra konstrukciniai elementai, kurių išoriniai sluoksniai pagaminti iš armuoto betono, o viduriniajame sluoksnyje naudojama geras termoizoliacinės savybės turinti akmens vata arba putų polistireno plokštės. Prie šio tipo atitvarinių elementų taip pat galima priskirti ir mūrines sienas, kurių viduryje paliktas tarpas užpildytas gerai šilumą izoliuojančiomis medžiagomis. Šio tipo trisluoksnių elementai taip pat pasižymi keliais svarbiais trūkumais. Dėl tokiu atveju būtinų ryšių tarp išorinių sluoksnių – viduriniajame sluoksnyje atsiranda šalčio tilteliai. Be to, viduriniojo sluoksnių įrengimas įmanomas tik rankiniu būdu, todėl žymiai padidėja tokių elementų gamybos laiko sąnaudos ir tuo pačiu galutinė kaina. Dar vienas svarbus ne betono tipo termoizoliacinių medžiagų trūkumas – jų degumas bei labai žymus termoizoliacinių savybių suprastėjimas patekus drėgmei. Todėl tokio tipo elementuose vidurinis sluoksnis paprastai dar būna papildomai apsaugomas nuo drėgmės ir ugnies poveikio, o tai dar labiau padidina galutinę statybinio elemento kainą bei gamybos laiko sąnaudas.

Dėl aukščiau minėtų priežasčių dažniausiai statyboje pasitaikantis tokių elementų pavyzdys yra trisluoksnių konstrukcijos, kurių išoriniai sluoksniai yra armuoti ir pagaminti iš paprastojo betono, o vidurinis sluoksnis parenkamas pagal paskirtį: turintis arba geras termoizoliacinės, arba konstrukcinės, arba abi savybės. Viduriniajam sluoksniui, kuris turi tenkinti tiek termoizoliacinius, tiek konstrukcinius reikalavimus, pagaminti gali būti naudojamos įvairios betono tipo medžiagos: putbetonis, keramzitbetonis, betonas su polistireno granulėmis, medžio drožlėmis ir pan.

Vienas didžiausių šio tipo trisluoksnių elementų privalumų yra tai, kad jų gamyba vykdoma vienu technologiniu ciklu, t.y. nuosekliai liejant vieną sluoksnį po kito. Toks gamybos būdas užtikrina patikimą ir standų ryšį tarp sluoksnių. Dėl to sumažėja poreikis papildomai stiprinti ryšį tarp sluoksnių brangiais plieno gaminiais (skersine armatūra, apkabomis, inkarais, dispersine armatūra ir pan.). Todėl tokių trisluoksnių elementų gamybos kaštai bei laiko sąnaudos praktiškai nesiskiria nuo vienasluoksnių elementų gamybos [121].

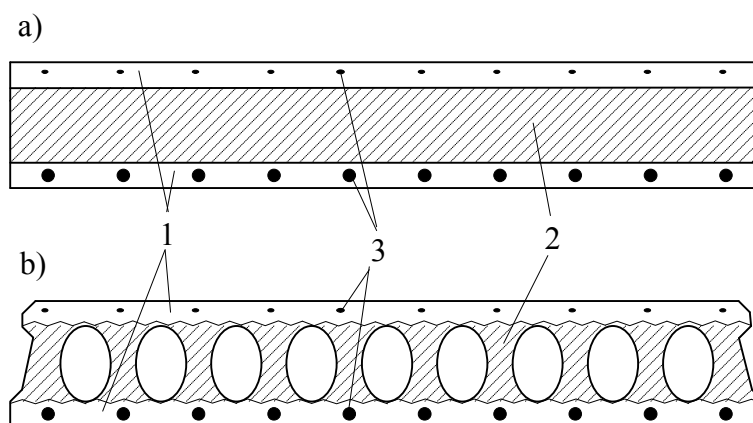
Trisluoksnių elementų išoriniams sluoksniams paprastai naudojamas 1400–2000 kg/m³ tankio betonas, o viduriniajam sluoksniui – apie 400 kg/m³ lengvasis betonas, pvz., keramzitbetonis ir pan. Išorinių sluoksnių storis gali būti 3–10 cm ir daugiausiai priklauso nuo

minimalių išilginės armatūros išdėstymo bei apsauginio betono sluoksnio reikalavimų. Viduriniojo sluoksnio storis daugiausiai priklauso nuo reikalingo konstrukcijos šilumos laidumo ir įtempių, kuriuos jis perimtų kartu su išoriniais sluoksniais.

Trisluoksnių elementų viduriniojo sluoksnio gamybai taip pat galima naudoti tą patį betoną, kaip ir išoriniams sluoksniams, tik su skirtingos frakcijos lengvu užpildu (pvz., polistireno granulėmis). Tokių betonų stipris paprastai yra 20–30 MPa išoriniuose sluoksniuose ir 3–4 MPa viduriniajame sluoksnyje. Sluoksnių tankis atitinkamai 1100–1400 kg/m³ ir 550–600 kg/m³.

Trisluoksnės konstrukcijos, kurių tiek išoriniai, tiek vidurinis sluoksniai pagaminti iš betono tipo medžiagų buvo sukurtos tam, kad išspręstų tradicinių trisluoksnių (su viduriniu sluoksniu iš mineralinės vatos ar polistireno) konstrukcijų problemas. Daug problemų sukelia ryšiai tarp išorinių sluoksnių. Tačiau vidurinį sluoksnį gaminant iš betono tipo medžiagų – tarp sluoksnių susidaro standus ryšys, užtikrinantis efektyvų viso skerspjuvio darbą bei nereikalaujantis papildomų plieninių ryšių.

Jeigu konstrukcijai nekeliami termoizoliaciniai reikalavimai, tai vidurinieji sluoksniai, priklausomai nuo įtempių pasiskirstymo skerspjuvyje, gali būti gaminami iš silpnėsnių bei pigesnių betono tipo medžiagų. Labiausiai paplitę tokio tipo efektyvios konstrukcijos pavyzdžiai yra tuštumėtos perdangų plokštės, kurių vidurinis sluoksnis gaminamas iš pigesnio smėlbetonio (1.1 pav.) [60, 121].



1.1 pav. Sluoksniuotieji elementai: a) trisluoksnė perdanga; b) trisluoksnė perdangos plokštė; 1 – išoriniai sluoksniai, pagaminti iš stipraus betono; 2 – vidurinis sluoksnis, pagamintas iš silpnėsnių betono; 3 – armatūros strypai

Visų sluoksniuotųjų konstrukcijų pranašumas prieš vienasluoksnes konstrukcijas slypi visų sluoksnių bendro darbo užtikrinime. Tai pasiekama ryšių tarp sluoksnių pagalba, tačiau jų efektyvumas priklauso nuo visos eilės konstrukcinių ir technologinių veiksnių, kurių įtaka šio tipo konstrukcijų darbui nėra pilnai išanalizuota. Tai yra viena iš priežasčių, stabdančių šių konstrukcijų platesnį panaudojimą. Trūkstant duomenų apie kontaktinės zonos tarp sluoksnių elgseną veikiant apkrovai, negalima sukurti ir tikslesnių šio tipo konstrukcijų skaičiavimo metodų.

Pasaulinėje statyboje populiarėjant sluoksniuotosioms konstrukcijoms – atsiranda vis didesnis tokių elementų skaičiavimo metodų poreikis. Įvairių šalių normatyviniuose dokumentuose ir mokslinėje literatūroje yra pateikta pakankamai daug skirtingų sluoksniuotųjų elementų skaičiavimo metodų. Dėl savo paprastumo dažniausiai yra naudojami empiriniai sluoksniuotųjų elementų skaičiavimo metodai. Skirtinguose metoduose yra daromos skirtingos prielaidos, taip pat dažniausiai tokie reiškiniai kaip betono susitraukimas, pleišėjimas ir stiprumas yra nagrinėjami atskirai. Mokslinėje literatūroje yra pateikta ir teorinių-analitinių skaičiavimo metodų, tačiau jie dėl savo pakankamai sudėtingo matematinio aparato yra sunkiai tiesiogiai pritaikomi statybos inžinerijoje.

Šiame skyriuje bus apžvelgti dažniausiai naudojami lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų pleišėjimo bei stiprumo skaičiavimo metodai, taip pat įvairūs betono susitraukimo deformacijų įvertinimo metodai.

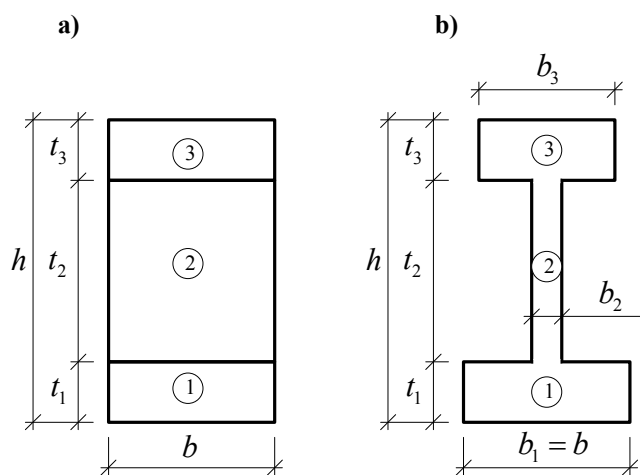
1.1. Lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų pleišėjimo ir laikomosios galios skaičiavimas

Lenkiamuose sluoksniuotuose elementuose susidaro labai sudėtingas įtempių ir deformacijų būvis, kurį matematiškai tiksliai aprašyti yra pakankamai sunku. Dėl skirtingų normalinių įtempių vienuose lenkiamo sluoksniuotojo elemento sluoksniuose plyšiai gali atsirasti, o kituose – ne [60, 76, 121, 123]. Dėl sudėtingo įtempių ir deformacijų būvio lenkiamųjų sluoksniuotųjų gelžbetoninių elementų skaičiavimui negalima tiesiogiai pritaikyti klasikinės gelžbetonio teorijos. Praktiniam sluoksniuotųjų konstrukcijų skaičiavimui dažniausiai yra daromos prielaidos, kurios bent dalinai leidžia panaudoti klasikinę gelžbetonio teoriją. Skaičiuojant sluoksniuotųjų konstrukcijų su standžiais ryšiais tarp sluoksnių stiprumą

ir pleišetumą normaliniame pjūvyje, dauguma autorių daro beveik vienodas prielaidas. Jos yra panašios į tas prielaidas, kurios daromos skaičiuojant vienasluoksnes konstrukcijas:

- galioja plokščių pjūvių hipotezė, t.y. deformacijų pasiskirstymo pagal skerspjūvio aukštį priklausomybė yra tiesialinijinė;
- pjūviai pagal aukštį nesusispaudžia;
- gniuždoma zona dirba tamprioje stadijoje;
- tempiamuosiuose sluoksniuose pasireiškia plastinės deformacijos;
- viduriniuosiuose sluoksniuose įtempimų epiūra gali būti įvairių formų;
- kontaktas tarp sluoksnių yra standus.

Dažniausiai praktikoje naudojami supaprastinti lenkiamųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų skaičiavimo metodai, kai visi konstrukcijos sluoksniai medžiagos stiprumo arba tamprumo modulio atžvilgiu redukuojami į vieno (dažniausiai – stipriausiojo) sluoksnio medžiagą ir konstrukcija skaičiuojama kaip vienasluoksnis sudėtingo skerspjūvio elementas (1.2 pav.).



1.2 pav. Trisluoksnio elemento skerspjūvis, redukuotas pagal apatinio išorinio sluoksnio medžiagos tamprumo modulį: a) faktinis skerspjūvis; b) redukuotas skerspjūvis

Skaičiuojant lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų stiprumą normaliniame pjūvyje taip pat galima išskirti du atvejus: 1) kai į gniuždomą zoną patenka tik vienas sluoksnis ir 2) kai į gniuždomą zoną patenka daugiau negu vienas sluoksnis. Pirmuoju atveju praktiniam laikomosios galios skaičiavimui dažniausiai siūloma naudotis klasikine gelžbetonio teorija, t.y. elementą skaičiuoti kaip vienasluoksnį. Antruoju atveju dažniausiai siūloma redukuoti

skerspjūvį pagal stipriausio sluoksnio pradinį tamprumo modulį. Tada bendras viso elemento ir visų sluoksnių aukštis lieka nepakitęs, tačiau redukuotas sluoksnių plotis apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$b_{eff,i} = \frac{b_i \cdot E_i}{E_j}; \quad (1.1)$$

- čia: E_j – medžiagos, į kurią redukuojamas visas skerspjūvis, pradinis tamprumo modulis;
 b_i – faktinis redukuojamo sluoksnio plotis;
 E_i – redukuojamo sluoksnio pradinis tamprumo modulis.

Tokiu būdu gaunamas tėjinis arba dvitėjis elementas, kurį toliau galima skaičiuoti kaip įprastą sudėtingos skerspjūvio formos gelžbetoninį lenkiamą elementą (1.2 pav., b).

Sluoksniuotą skerspjūvį galima redukuoti pagal sluoksnių medžiagos stiprį gniuždant. Šiuo atveju galima redukuoti skerspjūvį pagal stipresnįjį arba silpnesnįjį sluoksnį. Bet koku atveju, po redukavimo vis tiek gaunamas dvitėjis arba tėjinis skerspjūvis. Tėjinis skerspjūvis gaunamas tuo atveju, kai laikoma, kad į gniuždomą zoną patenka du sluoksniai, o visas tempiančias jėgas pagal klasikinę gelžbetonio teoriją perima tik pagrindinė išilginė armatūra.

Mokslinėje literatūroje pateiktas ir patikslintas sluoksnių redukavimo pagal medžiagas metodas [121]. Šiuo atveju apskaičiuojamas redukuotas betono gniuždomasis stipris, tai pat atskiru koeficientu įvertinamas kiekvieno sluoksnio savybių (ypač stiprio) išnaudojimas. Sluoksnių redukuotas betono stipris apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$f_{eff} = \frac{m_1 \cdot f_1 \cdot A_1 + m_2 \cdot f_2 \cdot A_2}{A_1 + A_2}; \quad (1.2)$$

- čia: A_i – faktinis sluoksnio skerspjūvis;
 f_i – betono prizminis gniuždomasis stipris;
 m_i – koeficientas, įvertinantis kokia sluoksnio stiprumo dalis yra naudojama.

Sluoksnių redukavimo metodai yra tobulinami daugelio šalių mokslininkų, tame tarpe ir Lietuvos [22]. Redukuotų sluoksnių plotį siūloma apskaičiuoti pagal tokią formulę:

$$b_{eff,i} = b \cdot \frac{m_i \cdot f_i}{m_1 \cdot f_1}; \quad (1.3)$$

čia: f_i – sluoksnio, kuris redukuojamas į pagrindinę medžiagą, stipris;
 f_1 – sluoksnio, į kurio medžiagą redukuojami kiti sluoksniai, stipris;
 m_1 ir m_i – sluoksnių darbo sąlygų koeficientai, įvertinantys sluoksnių medžiagų stiprio ir kitų savybių išnaudojimą.

Paprasčiausiu atveju sluoksnių darbo sąlygų koeficientą galima nustatyti pagal tokią formulę:

$$m = \frac{f_1 \cdot E_2}{f_2 \cdot E_1}. \quad (1.4)$$

Tačiau augant įtempiams skirtingų tipų betonų plastinės deformacijos bei deformacijų moduliai kinta skirtingai. Tai ypač aktualu tais atvejais, kai išoriniai sluoksniai yra pagaminti iš sunkaus betono, o viduriniai – iš žymiai silpnesnio lengvo betono. Jei dviejų greta esančių sluoksnių deformacijos yra lygios, t.y. nėra praslydimo tarp sluoksnių ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$), tai koeficientą m siūloma apskaičiuoti pagal tokią formulę [22]:

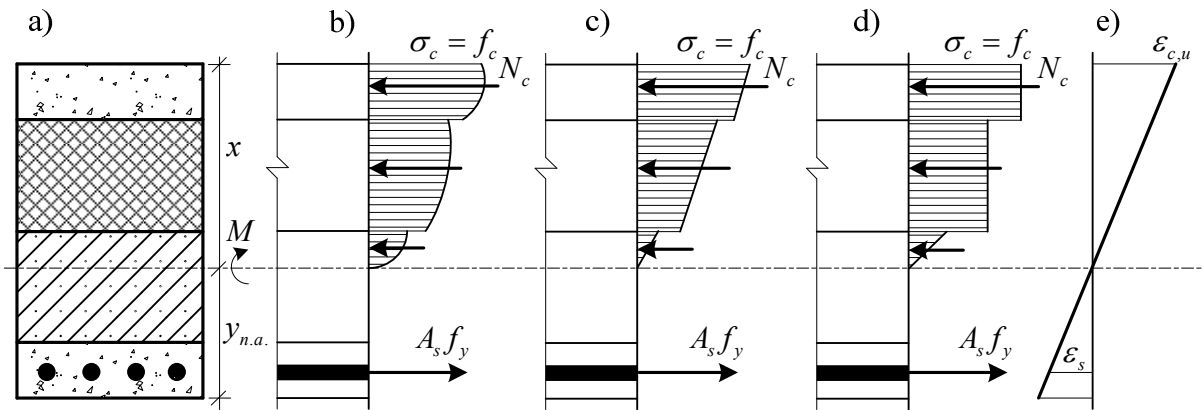
$$m = 1 - \left[1 - \frac{f_1 \cdot E_2 \cdot (1 - 0,8^{k_2})}{f_2 \cdot E_1 \cdot (1 - 0,8^{k_1})} \right]^{\frac{1}{k_2}}; \quad (1.5)$$

čia: k – koeficientas, įvertinantis medžiagos tipo, stiprio, tamprumo modulio ir tankio įtaką deformavimosi charakteristikoms.

Visi sluoksniuotųjų elementų skaičiavimui naudojami redukavimo metodai yra apytiksliai ir jų tikslumas labai priklauso nuo elemento skerspjūvio, armavimo bei santykio tarp atskirų sluoksnių stiprumo ir deformatyvumo savybių. Pagrindinis šio skaičiavimo metodo trūkumas yra tas, kad jis ne visada teisingai parodo lenkiamo sluoksniuotojo elemento suirimo pobūdį. Pavyzdžiui, šiuo metodu redukavus trislauksnio elemento skerspjūvį, normaliniame pjūvyje suirimo metu ribinės betono įtempių reikšmės bus pasiektos tik

išoriniame sluoksnyje. Tuo tarpu viduriniajame sluoksnyje apskaičiuoti normaliniai įtempiai priklausys nuo santykio tarp viduriniojo ir išorinio sluoksnių pradinių tamprumo modulių. Todėl šiuo metodu skaičiuojant lenkiamas sluoksniuotas konstrukcijas yra neįvertinama galimybė, kad viduriniajame sluoksnyje įtempiai ribines reikšmes gali pasiekti anksčiau negu išoriniuose sluoksniuose.

Sluoksniuotųjų elementų laikomąją galią galima apskaičiuoti ir neredukuojant skerspjuvio, tačiau įvertinant skirtingas sluoksnių medžiagų savybes. Šiuo atveju taip pat daroma prielaida, kad kontaktas tarp sluoksnių yra standus. Įtempių pasiskirstymo forma kiekviename sluoksnyje gali būti aprašoma kaip kreivalinijinė, trapecinė arba stačiakampė (1.3 pav.) [22].



1.3 pav. Įtempių pasiskirstymo gniuždomosios zonos sluoksniuose formos: a) skerspjuvis; b) kreivalinijinė; c) trapecinė; d) stačiakampė; e) deformacijų pasiskirstymas

Ribinis gniuždomosios zonos aukštis gali būti apskaičiuojamas pagal žinomas vienasluoksniams gelžbetoniniams elementams taikomas formules. Tačiau dėl skirtingų sluoksnių medžiagų savybių, betono gniuždomasis stipris turi būti apskaičiuotas pagal tokią formulę:

$$f_c = \frac{\sum (f_{c,i} \cdot S_i)}{S}; \quad (1.6)$$

čia: $f_{c,i}$ – i -ojo sluoksnio medžiagos gniuždomasis stipris;

S_i – i -ojo sluoksnio statinis momentas skerspjuvio krašto atžvilgiu;

S – viso skerspjuvio statinis momentas skerspjuvio krašto atžvilgiu.

Šiuo atveju taip pat daroma prielaida, kad gniuždomojoje zonoje esantis betonas dirba tamprioje stadijoje. Tuo tarpu skaičiuojant tempiamojoje zonoje dirbančio betono deformacijas – turi būti įvertintas betono tamprumo koeficientas $\nu_{c,i}$. Daugelio autorių atlikti tyrimai parodė, kad tamprumo koeficientas yra kintamas dydis ir priklauso nuo tamprumo modulio, medžiagos struktūros ir įtempių intensyvumo. Todėl žinant įtempius, tamprumo koeficientą rekomenduojama nustatyti taip [22]:

$$\nu_c = 1 - \left(1 - \frac{E_0}{A + E_0} \right) \cdot \frac{\sigma_c}{f_c}; \quad (1.7)$$

čia: E_0, f_c – atitinkamai medžiagos tamprumo modulis ir stipris;

σ_c – įtempiai betone;

A – koeficientas, priklausančias nuo medžiagos tipo ir struktūros. $A=48 \times 10^3$ – sunkiajam betonui, $A=18 \times 10^3$ – lengvajam betonui, $A=16 \times 10^3$ – akytajam betonui.

Tačiau (1.7) formulė ne visada gali būti pritaikyta dėl tos priežasties, kad tikslūs įtempiai sluoksniuotame skerspjuvyje yra nežinomi. Kai žinomos deformacijos ir medžiagos tamprumo modulis – įtempius galima apskaičiuoti pagal žinomą medžiagų mechanikos formulę. Tačiau įtempiai priklauso ir nuo tamprumo koeficiento, kuris – savo ruožtu – priklauso nuo įtempių intensyvumo. Tokiu atveju praktiniams skaičiavimams tamprumo koeficientą rekomenduojama priimti lygų 0,5.

Kai įtempiai sluoksniuose ir neutraliosios ašies padėtis skerspjuvyje yra žinomi, galima apskaičiuoti lenkiamo sluoksniuotojo elemento laikomąją galią, kurią sudaro visų gniuždomojoje zonoje esančių sluoksnių atlaikomų lenkimo momentų suma:

$$M \leq M_u = \sum M_i + M_{i,x}; \quad (1.8)$$

čia: M_i – pilnai į gniuždomąją zoną patenkančių sluoksnių atlaikomi lenkimo momentai;

$M_{i,x}$ – dalinai į gniuždomąją zoną patenkančio sluoksnio atlaikomas lenkimo momentas.

Sluoksnių redukavimo metodas taip pat naudojamas ir sluoksniuotųjų konstrukcijų sluoksnių pleišetumui skaičiuoti. Tačiau dėl aukščiau išvardintų priežasčių sluoksnių redukavimo metodu galima apskaičiuoti tik išorinių sluoksnių pleišetumą, nes redukavus skerspjūvį į vieną medžiagą išoriniame labiau tempiamajame sluoksnyje ribiniai tempimo įtempiai visada bus pasiekti anksčiau negu mažiau tempiamajame viduriniajame sluoksnyje. Todėl galima teigti, kad sluoksnių redukavimo metodai, kartu su plokščiųjų pjūvių hipoteze, duoda pakankamai tikslius rezultatus tik tuo atveju, kai išorinių ir viduriniųjų sluoksnių medžiagų deformatyvumo charakteristikos skiriasi nežymiai.

Tuo atveju, kai viduriniųjų ir išorinių sluoksnių deformatyvumo savybės žymiai skiriasi ir viduriniojo sluoksnio šlyties modulis yra santykinai mažas – sluoksnių redukavimo metodo paklaidos dydis gali žymiai padidėti. Tokiu atveju siūloma naudoti kitus skaičiavimo metodus. Vienas jų yra sudėtinių strypų teorija. Pagal sudėtinių strypų teoriją laikoma, kad kiekvienas sudėtinis strypas dirba pagal medžiagų mechanikos dėsnius (iš dalies galioja ir plokščių pjūvių hipotezė), o sudėtinių strypų bei ryšių tarp jų medžiagos deformuojasi pagal Huko dėsnį iki tam tikros žinomos ribos, už kurios pasireiškia plastinės deformacijos [125]. Šis metodas reikalauja tikslų duomenų apie kontakto tarp sluoksnių zoną. Kai gretimi sluoksniai yra pagaminti iš betono tipo medžiagų, kontaktinėje zonoje medžiagos dažnai sustiprėja, tačiau tiksliai kiekybiškai nustatyti sustiprėjimo dydį yra sudėtinga, nes šis efektas priklauso nuo daugelio technologinių veiksnių. Dėl šios priežasties ir pakankamai sudėtingo matematinio aparato, sudėtinių strypų teoriją sudėtinga pritaikyti sluoksniuotųjų gelžbetoninių elementų skaičiavimui.

Sluoksniuotųjų konstrukcijų laikomosios galios bei pleišetumo skaičiavimui gali būti naudojamas ir baigtinių elementų metodas [88]. Tačiau jis yra pakankamai sudėtingas ir reikalauja ne tik tikslų duomenų apie sluoksnių medžiagų bei kontakto tarp sluoksnių savybes, bet ir brangios kompiuterinės techninės ir programinės įrangos.

„Sandwich“ tipo elementai taip pat skaičiuojami kaip sluoksniuotieji elementai [65, 82]. Tačiau „sandwich“ tipo elementuose išoriniai sluoksniai dažniausiai būna pagaminti iš plonos aliuminio arba plieno skardos, o vidurinieji sluoksniai – iš lengvos termoizoliacinės medžiagos. Išorinių sluoksnių skardos storis paprastai yra labai mažas, palyginus su viduriniu sluoksniu. Dėl to įtempių pasiskirstymas išoriniuose sluoksniuose dažniausiai yra neįvertinamas. Skaičiuojamosiose schemose įtempiai išoriniuose sluoksniuose paprastai žymimi kaip atstojamoji ašinė jėga. Dėl šios priežasties bei naudojamų medžiagų mechaninių

savybių skirtumo – „sandwich“ plokščių skaičiavimo metodikos negalima tiesiogiai pritaikyti lenkiamųjų sluoksniuotųjų gelžbetoninių elementų laikomosios galios skaičiavimui.

Panašios skaičiuojamosios schemas naudojamos ir skaičiuojant papildomais išoriniais sluoksniais sustiprintų gelžbetoninių konstrukcijų laikomąją galią [7, 25–28, 33, 37, 42, 44, 71, 83, 94, 101, 109, 111, 113, 114]. Tačiau sustiprinimui naudojama medžiaga, kaip ir „sandwich“ tipo elementuose, paprastai būna labai plona ir įtempiai joje aprašomi kaip atstojamoji ašinė jėga. Be to, sustiprinimui dažniausiai naudojamos ne betono tipo medžiagos: stiklo pluošto audinys, plieno lakštas ir pan. Šių medžiagų deformatyvumo charakteristikos skiriasi nuo betono tipo medžiagų, todėl sustiprintų konstrukcijų skaičiavimo metodų taip pat negalima tiesiogiai pritaikyti lenkiamųjų sluoksniuotųjų gelžbetoninių elementų laikomosios galios skaičiavimui.

Daugelis gelžbetoninių elementų skaičiavimo metodų daro prielaidą, kad betonas gniuždomojoje zonoje dirba tamprioje stadijoje. Tačiau literatūroje yra pateikta ir tokių sluoksniuotųjų elementų skaičiavimo metodų, kurie įvertina betono deformatyvumo charakteristikų netiesiškumą. Šiuo atveju betono gniuždomuosius ir tempiamuosius stiprius siūloma apskaičiuoti pagal tokias formules [120]:

$$\sigma_c = \frac{E_{cu} \cdot \varepsilon_c \cdot (1 + D_{cu} \cdot \varepsilon_c)}{1 + C_{cu} \cdot \varepsilon_c}; \quad (1.9)$$

$$\sigma_{ct} = \frac{E_{cu} \cdot \varepsilon_{ct} \cdot (1 + D_{ctu} \cdot \varepsilon_{ct})}{1 + C_{ctu} \cdot \varepsilon_{ct}}; \quad (1.10)$$

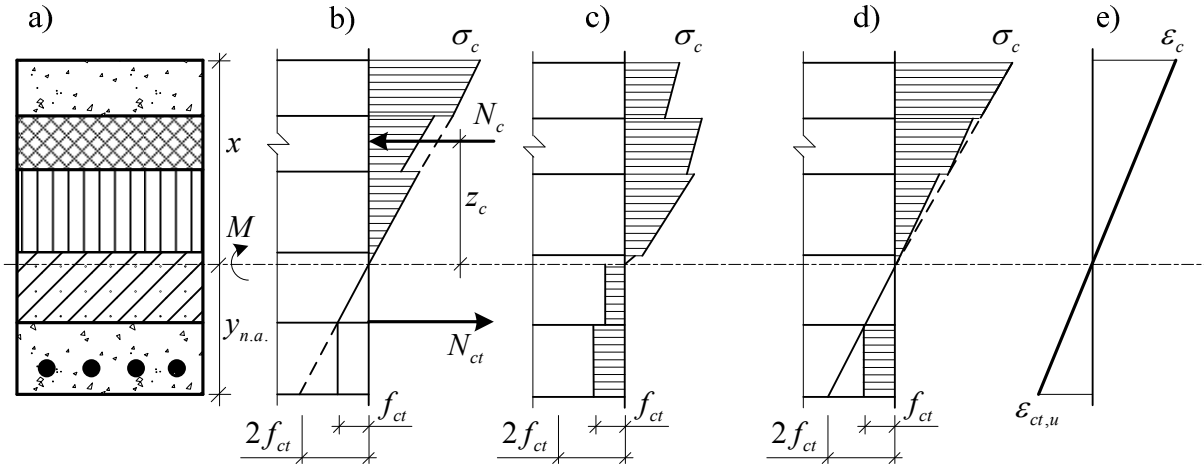
čia: E_{cu} – pradinis betono tamprumo modulis;

D_{cu} , C_{cu} , D_{ctu} ir C_{ctu} – betono netiesiškumo parametrai, priklausantys nuo įtempių ir deformacijų būvio skerspjūvyje.

Tačiau įtempių ir deformacijų būvis sluoksniuotame skerspjūvyje dažniausiai būna labai sudėtingas (ypač įvertinus dėl betono susitraukimo deformacijų atsiradusius įtempius). Todėl skaičiavimo metodų, įvertinančių betono savybių netiesiškumą, pritaikymas sluoksniuotiesiems gelžbetoniniams elementams yra sudėtingas arba neįmanomas dėl trūkstamų duomenų.

Skaičiuojant lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų pleišetumą taip pat daromos prielaidos, panašios į tas, kurios daromos sluoksniuotųjų elementų laikomosios galios

skaičiavime. Pleištumo skaičiavimui gali būti naudojamos įvairios skaičiuojamosios schemos (1.4 pav.) [22].



1.4 pav. Itempių ir deformacijų pasiskirstymo schemos lenkiamame daugiasluoksniame elemente:
a) skerspjūvis; b) kai vidurinis sluoksnis dirba tampriai; c) kai tempiamuosiuose sluoksniuose betonai pasiekia ribines reikšmes; d) kai vidurinis sluoksnis yra supleišėjęs; e) deformacijų pasiskirstymas

Itempius tempiamajame betone siūloma apskaičiuoti pagal tokią formulę:

$$\sigma_{ct,i} = \frac{E_{c,i} \cdot \varepsilon_{ct,i}}{1 - \frac{C}{f_{ct}} \cdot E_{c,i} \cdot \varepsilon_{c,i}}; \quad (1.11)$$

čia: $C = 1 - \frac{E_0}{A + E_0}.$

Kai įtempiai išorinio sluoksnio betone (labiausiai tempiamajame taške) pasiekia ribines reikšmes, viduriniuosiuose tempiamuosiuose sluoksniuose betono įtempius galima nustatyti taip:

$$\sigma_{ct,i} = f_{ct} \cdot \frac{E_{c,i}}{E_c} \cdot \frac{y_{n.a.} - y_i}{y_{n.a.}}; \quad (1.12)$$

čia: $E_{c,i}$ ir E_c – atitinkamai viduriniojo ir išorinio sluoksnių betono tamprumo moduliai;

$y_{n.a.}$ – neutraliosios ašies padėtis (1.4 pav.);

y_i – skaičiuojamojo taško atstumas nuo elemento tempiamojo krašto.

Pagal šią formulę galima nustatyti ar atsiras plyšiai viduriniuosiuose sluoksniuose. Jei galioja sąlyga $\sigma_{ct,i} < \alpha \cdot f_{ct,i}$, tai viduriniuosiuose sluoksniuose plyšių nebus. Čia α – koeficientas, įvertinantis įtempių persiskirstymą tarp sluoksnių bei paviršių kontaktinių sluoksnių sustiprėjimą. Tyrimai parodė, kad α kinta nuo 1,01 iki 1,1 [123]. Jei vidiniame tempiamajame sluoksnyje $\sigma_{ct,i} > \alpha \cdot f_{ct,i}$, tai vidurinis sluoksnis supleišėjęs ir jo darbas nevertinamas. Tačiau tokiu būdu negalima įvertinti pradinių įtempių, atsiradusių dėl skirtingų sluoksnių betono susitraukimo deformacijų.

Išorinio tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentas yra lygus visų tempiamojoje zonoje esančių sluoksnių (ir armatūros) atlaikomų lenkimo momentų apie visų gniuždomų jėgų atstojamąją, sumai:

$$M_{cr} \leq \sum M_{ct,i} + M_s; \quad (1.13)$$

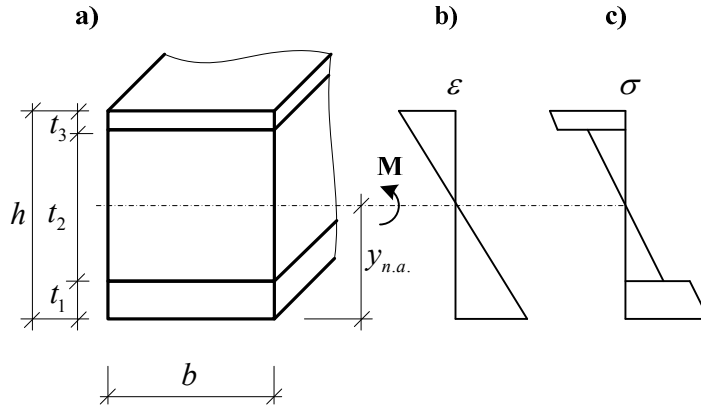
čia: $M_{ct,i}$ – tempiamojoje zonoje esančio i -ojo sluoksnio atlaikomas lenkimo momentas apie visų gniuždomų jėgų atstojamąją jėgą;

M_s – tempiamosios armatūros atlaikomas lenkimo momentas apie tą patį tašką.

Viduriniųjų sluoksnių pleišėtumas panašiai skaičiuojamas ir sustiprintų gelžbetoninių elementų atveju [12, 13, 45, 66, 89, 94, 96]. Šiuo atveju „viduriniu“ sluoksniu tampa vienasluoksnis gelžbetoninis elementas, o „išoriniu“ sluoksniu – iš išorės pritvirtinta (dažniausiai – priklijuota) stiprinamoji medžiaga. Tačiau šiuo atveju įtempių ir deformacijų būvis skiriasi nuo sluoksniuotųjų gelžbetoninių elementų (dėl skirtingų medžiagų). Todėl, kaip ir skaičiuojant laikomąją galią, sustiprintų gelžbetoninių elementų skaičiavimo metodų negalima tiesiogiai pritaikyti lenkiamųjų gelžbetoninių sluoksniuotųjų elementų išorinio sluoksnio supleišėjimo momento skaičiavimui.

Skaičiuojant tiek lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų laikomąją galią, tiek supleišėjimo momentą – būtina nustatyti neutraliosios ašies padėtį skerspjuvyje. Mokslinėje literatūroje yra

pasiūlytas daugiasluoksnių lenkiamųjų elementų neutraliosios ašies nustatymo metodas [14, 15, 115].



1.5 pav. Lenkiamo trisluoksnio elemento neutraliosios ašies padėties nustatymas: a) skerspjūvis; b) deformacijų pasiskirstymo diagrama; c) įtempių pasiskirstymo diagrama

Neutraliosios ašies padėties skaičiavimui daromos šios prielaidos [14, 115]:

- pjūviai išlieka plokšti ir normaliniai išilginiam sijos pluoštui, nepriklausomai nuo to, ar sijos medžiaga yra linijiniai tampri;
- ašinės deformacijos pagal sijos aukštį pasiskirsto tiesiškai;
- nėra praslydimo tarp sluoksnių.

Remiantis šiomis prielaidomis galima užrašyti tokią lygtį:

$$\frac{\varepsilon_1'}{y_{n.a.}} = \frac{\varepsilon_1''}{(y_{n.a.} - t_1)} = \frac{\varepsilon_2''}{(t_1 + t_2 - y_{n.a.})} = \frac{\varepsilon_3''}{(t_1 + t_2 + t_3 - y_{n.a.})}; \quad (1.14)$$

čia: ε_i' ir ε_i'' – apatinio ir viršutinio i -ojo sluoksnio santykinės deformacijos;
 t_i – i -ojo sluoksnio storis.

Pagal 1.5 paveikslą, $\varepsilon_1'' = \varepsilon_2'$ ir $\varepsilon_2'' = \varepsilon_3'$, todėl pusiausvyros lygtis:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 + \sigma''_1) \cdot b_1 \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot \sigma'_2 \cdot b_2 \cdot t_1 \cdot (y_{n.a.} - t_1) - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \sigma'_2 \cdot b_2 \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_2 - y_{n.a.}) - \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 + \sigma''_3) \cdot b_3 \cdot t_3 = 0. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Remiantis žinoma lygtimi $\sigma = \varepsilon \cdot E$ ir atlikus matematinius pertvarkymus, galima gauti lygtį neutraliosios ašies padėties nustatymui:

$$y_{n.a.} = \frac{B_1 \cdot t_1 + B_2 \cdot t_2 + B_3 \cdot t_3 + 2 \cdot (B_2 \cdot t_1 + B_3 \cdot (t_1 + t_2))}{2 \cdot (B_1 + B_2 + B_3)}; \quad (1.16)$$

čia: $B_i = E_i \cdot t_i \cdot b_i$ – sluoksnio standumas.

Tokiu pačiu principu sudaryta ir universali daugiasluoksnio lenkiamo elemento neutraliosios ašies padėties nustatymo formulė:

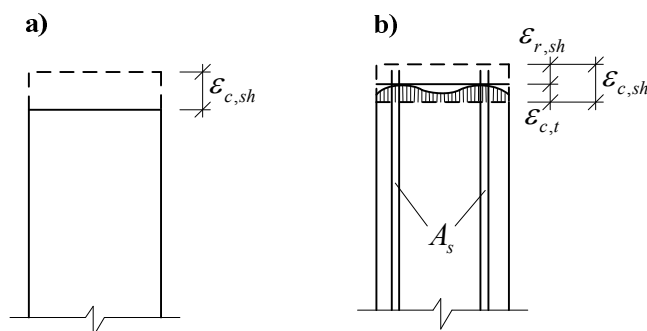
$$y_{n.a.} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i \cdot t_i + 2 \cdot \sum_{i=2}^n B_i \cdot \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{2 \cdot \sum_{i=2}^n B_i}. \quad (1.17)$$

Tačiau šių lygčių negalima tiesiogiai pritaikyti sluoksniuotosioms sijoms, pagamintoms iš betono tipo medžiagų bei su vienu ar daugiau armuotų sluoksnių. Tempiamosios betono tipo medžiagos deformatyvumo charakteristikos skiriasi nuo gniuždomosios medžiagos deformatyvumo charakteristikų. Todėl norint aukščiau minėtą neutraliosios ašies padėties nustatymo metodą pritaikyti sluoksniuotosioms gelžbetoninėms konstrukcijoms – reikia papildomai įvertinti tempiamojo betono tamprumo charakteristikas. Armatūra taip pat turi būti įvertinta kaip atskiras narys pusiausvyros ir kitose lygtyse. Be to, šis metodas neleidžia nustatyti susitraukimo deformacijų įtakos neutraliosios ašies padėčiai.

1.2. Sluoksnių susitraukimo deformacijų įvertinimas

Betono susitraukimu yra vadinamas reiškinys, kai nesant jokios išorinės apkrovos elemento tūris mažėja dėl jo kietėjimo metu vykstančios cemento hidratacijos ir drėgnumo kaitos. Betono susitraukimo deformacijos priklauso ne tik nuo paties betono mišinio sudėties bei aplinkos sąlygų, bet ir nuo kietėjimo laiko. Dėl to mokslinėje literatūroje betono susitraukimo deformacijoms apskaičiuoti dažniausiai pateikiamos lygtys yra laiko funkcija. Daugumoje įvairių autorių siūlomuose betono susitraukimą aprašančiuose modeliuose įvertinami panašūs faktoriai: betono kietėjimo pradžia ir trukmė, maksimalios santykinės betono susitraukimo deformacijos, aplinkos drėgmė, skerspjūvio forma, cemento tipas ir pan. [5, 18, 20, 30, 35, 43, 45, 54, 61, 63, 86, 99]. Betono susitraukimo deformacijų nustatymui gali būti naudojami šie metodai (dar vadinami betono susitraukimą aprašančiais modeliais): Amerikos betono instituto sukurtas ACI 209 modelis, Eurocode 2 naudojamas EC2/CEB 90 modelis, čekų kilmės mokslininko Bažant sukurtas Bazant B3 modelis, Gardner-Lockman (GL2000) modelis, Sakata modelis [18, 35, 43, 99]. Šie betono susitraukimą aprašantys modeliai yra žinomiausi ir dažniausiai naudojami statybos inžinerijoje (tiesiogiai arba netiesiogiai įtraukiant juos į normatyvinius statinių projektavimą reglamentuojančius dokumentus).

Visi praktiškai naudojami betono susitraukimą aprašantys modeliai yra empiriniai, todėl jų tikslumas daugiausiai priklauso nuo naudojamų koeficientų tikslumo. Be to, statybos pramonėje dažniausiai naudojamas armuotas betonas, t.y. gelžbetonis, todėl norint nustatyti tokio elemento susitraukimo deformacijas, reikia įvertinti ir armatūros pasipriešinimą betono laisvojo susitraukimo deformacijoms.



1.6 pav. Dėl betono susitraukimo deformacijų atsiradęs įtempis ir deformacijų būvis simetriškai armuotuose gelžbetoniniuose elementuose: a) nearmuoto betono susitraukimo deformacijos; b) dėl susitraukimo armuotame betone atsiradę įtempiai betone ir armatūroje

1.6 paveiksle pavaizduota daugelio autorių naudojamos armuoto ir nearmuoto betono susitraukimo schemos. Armuoto betono susitraukimo deformacijos $\varepsilon_{r,sh}$ yra mažesnės už nearmuoto betono susitraukimo deformacijas $\varepsilon_{c,sh}$, nes armuotame betone dėl armatūros pasipriešinimo atsiranda tempimo deformacijos $\varepsilon_{c,t}$. Armuoto betono susitraukimo deformacijos gali būti apskaičiuojamos pagal tokią lygtį:

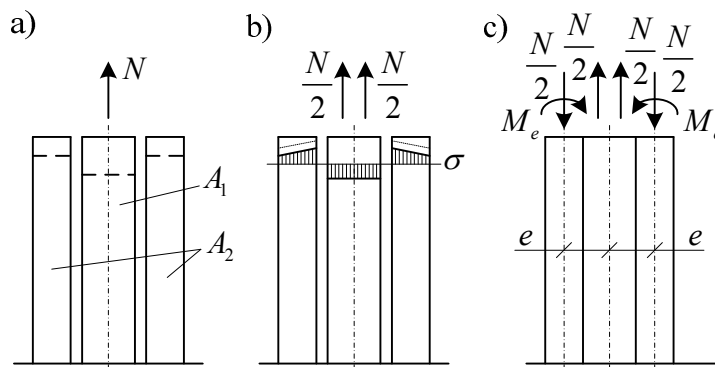
$$\varepsilon_{r,sh} = \varepsilon_{c,sh} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{\mu \cdot E_s}{\gamma_t \cdot E_c}} \right); \quad (1.18)$$

čia: γ_t – betono tampriai plastinių deformacijų koeficientas tempiant. Jis kinta nuo 0,15 iki 1. Praktiniams skaičiavimams rekomenduojama priimti 0,5;

$\mu = \frac{A}{A_s}$ – armavimo koeficientas;

E_c ir E_s – atitinkamai betono ir armatūros deformacijų moduliai.

Mokslinėje literatūroje yra pateiktas simetriškai armuotų trisluoksnių mūrinių elementų susitraukimo deformacijų įtakos jų įtempių ir deformacijų būviui įvertinimo metodas (1.7 pav.) [76].



1.7 pav. Deformacijų ir įtempių pasiskirstymo schemos: a) laisvas sluoksnių deformavimasis (susitraukimas); b) įtempių pasiskirstymas; c) ašinės jėgos ir momentai sluoksniuose

Esant simetriškam skerspjūviui, išoriniuose sluoksniuose veikia vienodos ašinės jėgos, lygios $0,5 N$, todėl dėl jų atsiradęs lenkimo momentas:

$$M_e = 0,5 \cdot N \cdot e; \quad (1.19)$$

čia: e – atstumas tarp viduriniojo ir išorinio sluoksnių svorio centrų.

Mūrą skaičiuojant kaip tamprų kūną, įtempių pasiskirstymą išoriniuose sluoksniuose galima aprašyti pagal žinomą medžiagų mechanikos lygtį:

$$\sigma = \frac{N}{A_1} \pm \frac{M_e \cdot y}{I}. \quad (1.20)$$

Tačiau aukščiau pateikta metodika negali būti pritaikyta nuo betono susitraukimo atsiradusių įtempių nustatymui sluoksniuotuose gelžbetoniniuose elementuose, pagamintuose iš skirtingų medžiagų sluoksnių, kurių storis bei armavimo koeficientas yra nesimetriški. Sluoksniuotųjų konstrukcijų atveju betono laisvojo susitraukimo deformacijas varžo ne tik armatūra, bet ir gretimi, mažiau besitraukiantys arba visiškai nesitraukiantys sluoksniai [11, 12, 30, 45, 66, 89, 94, 96]. Vienu ar kitu būdu suvaržytos betono laisvojo susitraukimo deformacijos betone sukelia tempimo įtempius, kuriems viršijus betono tempiamąjį stiprį – betonas supleišėja.

1.3. Išvados

1. Dauguma gelžbetoninių lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų laikomosios galios bei supleišėjimo skaičiavimo metodų paremti sluoksnių redukavimo metodu.
2. Taikant sluoksnių redukavimo metodą negalima tiksliai įvertinti visų medžiagų deformacinių savybių ir tuo pačiu neįmanoma įvertinti galimybės, kad vidurinieji sluoksniai supleišėja anksčiau negu išorinis labiausiai tempiamas sluoksnis.
3. Mokslinėje literatūroje yra pateikta sluoksniuotųjų elementų skaičiavimo metodų, tačiau jie paremti tamprumo teorija ir sunkiai pritaikomi gelžbetoniniams sluoksniuotiesiems elementams.
4. Nėra lenkiamųjų sluoksniuotųjų gelžbetoninių elementų supleišėjimo ir laikomosios galios skaičiavimo metodo, įvertinančio galimą viduriniojo sluoksnio supleišėjimą ir

pradinį įtempių ir deformacijų būvį, atsiradusį sluoksniuotajame gelžbetoniniame elemente dėl skirtingų sluoksnių medžiagų savybių ir betonų susitraukimo deformacijų.

2. Lenkiamųjų armuotų trisluoksnių elementų stiprumo ir supleišėjimo skaičiavimo metodas

Atlikus literatūroje pateikiamų lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų skaičiavimo metodų analizę paaiškėjo, kad nėra paprasto inžinerinio skaičiavimo metodo, įvertinančio skirtingas sluoksnių susitraukimo deformacijas ir viduriniųjų sluoksnių pleišetumą. Todėl šio skyriaus tikslas yra pasiūlyti inžinerinį skaičiavimo metodą, kuris įvertintų tiek pradinį įtempių ir deformacijų būvį dėl susitraukimo, tiek galimus plyšius ne tik išoriniuose, bet ir vidiniuose sluoksniuose (tai dažnai ignoruojama panašiuose skaičiavimo metoduose).

2.1. Įvadas

Statybos inžinerijoje dažniausiai pasitaikančios sluoksniuotosios konstrukcijos yra trisluoksniai elementai su stiprumą užtikrinančiais išoriniais sluoksniais ir lengvu geras termoizoliacines savybes užtikrinančiu viduriniu sluoksniu. Tokio skerspjūvio elementai gali būti naudojami kaip denginiai, perdangos ir kitos statinio dalys.

Trisluoksnės konstrukcijos dažniausiai projektuojamos su santykinai lengvu ir silpnu viduriniu sluoksniu, kuris atlieka ne tik termoizoliacinę funkciją, bet ir palengvina statybinį elementą. Vidurinysis sluoksnis taip pat užtikrina lenkiamo elemento standumą. Palyginus su išoriniais sluoksniais, viduriniajame sluoksnyje naudojamos medžiagos gali būti kelis ar keliolika kartų mažesnio stiprumo. Dėl tokios konstrukcijos viduriniajame sluoksnyje plyšiai gali atsirasti anksčiau nei išoriniame labiau tempiamajame sluoksnyje. Plyšiai išoriniuose sluoksniuose dažniausiai yra neleistini, nes per juos į viduriniuosius sluoksnius gali prasiskverbti drėgmė, kuri žymiai pablogina viduriniojo sluoksnio termoizoliacines savybes. Tuo tarpu plyšiai viduriniuosiuose sluoksniuose pakeičia įtempių ir deformacijų būvį ir tokiu būdu tai turi įtakos išorinių tempiamų sluoksnių elgsenai veikiant apkrovai.

Analizuojant įtempių ir deformacijų tarpusavio priklausomybę veikiant ribinėms apkrovoms, labai svarbu yra kuo tiksliau nustatyti tempiamojo betono deformacines savybes. Betoninių elementų plastinės deformacijos gali būti išreikštos tamprumo koeficiento pagalba – $\nu_c = \varepsilon_{c,el} / \varepsilon_c$, kur $\varepsilon_{c,el}$ yra tampriosios betono deformacijos, o ε_c yra pilnos betono

deformacijos. Idealiai tampriai medžiagai tamprumo koeficientas $\nu = 1$, o idealiai plastiškai – $\nu = 0$. Nepaisant to, kad lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų laikomąją galią iš esmės užtikrina išoriniai sluoksniai iš sunkaus betono ir juose esanti armatūra, labai svarbu nustatyti viduriniųjų sluoksnių deformacinių savybių ir supleišėjimo įtaką išorinių sluoksnių pleišetumui ir tuo pačiu visam lenkiamo elemento darbui.

Daugiau kaip 60 metų sluoksniuotosios konstrukcijos su standžiais sluoksniais buvo skaičiuojamos „redukuotų pjūvių metodu“, tačiau šis metodas negali įvertinti visų gelžbetonio deformacinių savybių. Taip pat įvairių autorių siūlomi skaičiavimo metodai dažniausiai neįvertina pradinio įtempių ir deformacijų būvio, kuris gali atsirasti dėl betono laisvojo susitraukimo deformacijų. Todėl pastaruoju metu įvairių šalių mokslininkų, tame tarpe ir Lietuvos, yra siūlomi tobulesni skaičiavimo metodai, tiksliau įvertinantys gelžbetonio deformacines charakteristikas [8, 17, 52, 56, 93, 100]. Tiksliausiai deformacines savybes (tiek tiesines, tiek netiesines) gali įvertinti baigtinių elementų metodai. Tačiau baigtinių elementų skaičiavimo metodai yra sudėtingi, be to skaičiavimams reikalinga brangi techninė bei programinė įranga, todėl šie metodai ne visada gali būti praktiškai pritaikomi statybos inžinerijoje.

Norint supaprastinti skaičiavimus (žymiai neprarandant tikslumo) visame pasaulyje yra atliekami lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų eksperimentiniai tyrimai ir gautų rezultatų pagrindu daromos skaičiavimus supaprastinančios prielaidos. Šiame darbe pateiktas skaičiavimo metodas taip pat remiasi keliomis prielaidomis, kurios yra daromos daugumos mokslininkų. Skaičiavimo metodas yra paremtas daugelio kitų autorių darbais, kurių dalis yra skirti vienasluoksnių konstrukcijų, sustiprintų išoriniais sluoksniais arba armatūra, skaičiavimui [6, 7, 10, 15, 25–28, 33, 34, 37, 44, 60, 66, 68, 71, 72, 77–79, 82, 83, 89, 94, 101, 106, 107, 109, 111–116, 122, 126]. Siūlomas skaičiavimo metodas leidžia įvertinti pradinius įtempius dėl susitraukimo deformacijų, lenkimo momento sukeltus įtempius bei galimą viduriniojo sluoksnio supleišėjimą.

2.2. Prielaidos

Lenkiamose sluoksniuotosiose konstrukcijose gali susidaryti labai sudėtingas įtempių ir deformacijų būvis. Norint supaprastinti tokių elementų stiprumo bei pleišetumo skaičiavimus ir pritaikyti inžineriniams tikslams – daromos šios prielaidos:

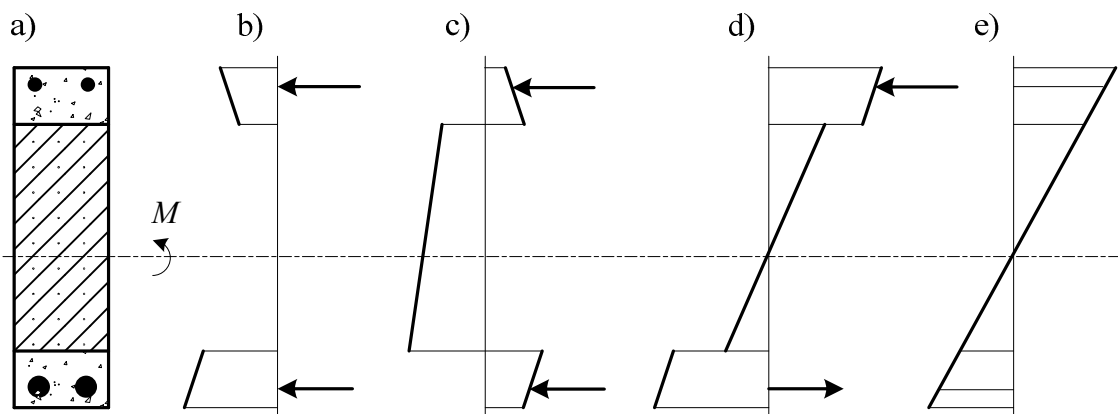
1. galioja plokščių pjūvių hipotezė, t.y. deformacijų pasiskirstymas pjūvyje yra tiesialinijinis;
2. armatūra ir gniuždomas betonas dirba tamprioje stadijoje;
3. tempiamas betonas dirba tampriai-plastinėje stadijoje;
4. sluoksniuose įtempių pasiskirstymo diagramos gali būti įvairių formų;
5. kontaktas tarp sluoksnių yra standus;
6. pjūviai pagal aukštį nesusispaudžia.

Taikant šias prielaidas įtempių ir deformacijų pasiskirstymo skerspjūvyje matematinį aprašymą ir tuo pačiu tolimesnį skaičiavimą galima labai supaprastinti. Aukščiau minėtomis prielaidomis bus paremtas visas toliau pateiktas inžinerinis lenkiamųjų trisluoksnių elementų skaičiavimo metodas. Panašias prielaidas skaičiavimuose priima ir kiti autoriai [13, 14, 65, 77, 79, 119, 121, 123].

Šiame darbe pasiūlytas lenkiamų trisluoksnių gelžbetoninių elementų laikomosios galios ir pleišetumo skaičiavimo metodas leidžia įvertinti viduriniojo sluoksnio pleišetumą ir skirtingas sluoksnių susitraukimo deformacijas, tačiau šis skaičiavimo metodas yra pritaikytas trumpalaikiai apkrovai ir neleidžia tiesiogiai įvertinti betono valkšnumo įtakos. Kita vertus, visose deformacijose bei įtempiuose aprašančiose lygtyse yra tamprumo koeficientas, taip pat yra žinoma, kad dėl valkšnumo keičiasi medžiagos tamprumo modulis. Todėl valkšnumo įtaką įvertinti galima atlikus papildomus tyrimus bei atitinkamai pakoregavus tamprumo koeficientą.

2.3. Įtempių ir deformacijų būvio analizė ir skaičiuojamojo modelio sudarymas

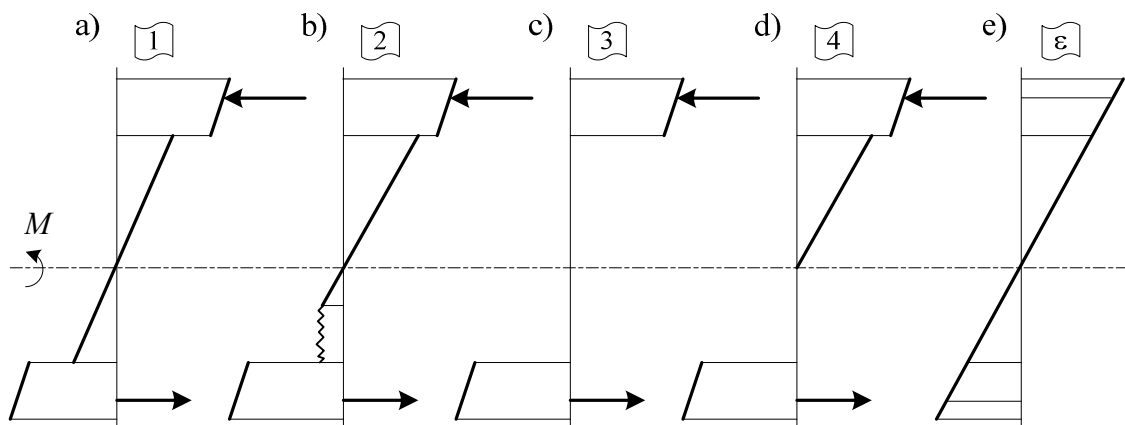
Įtempių ir deformacijų būvis lenkiamuose trisluoksniuose elementuose daugiausiai priklauso nuo jų gamybai naudotų medžiagų deformacinių charakteristikų. Šiame darbe nagrinėjamos trisluoksnės sijos, pagamintos iš betono tipo medžiagų, o daugelis fizikinių ir mechaninių betono charakteristikų nėra tiesinės. Todėl reali įtempių ir deformacijų pasiskirstymo lenkiamųjų trisluoksnių elementų skerspjūvyje diagrama yra netiesialinijinė ir jos matematinis aprašymas yra pakankamai sudėtingas. Be to, įvertinant įtempius ne tik nuo lenkimo momento, bet ir susitraukimo deformacijų, galutinis (suminis) įtempių deformacijų būvis turi būti skaičiuojamas keliais etapais (2.1 pav.).



2.1 pav. Įtempių ir deformacijų būvis lenkiamame trisluoksniame gelžbetoniniame elemente: a – tipinis skerspjūvis; b – įtempiai išoriniuose sluoksniuose dėl betono susitraukimo deformacijų ir armatūros pasipriešinimo; c – įtempiai visame skerspjūvyje dėl sluoksnių susitraukimo deformacijų skirtumo; d – lenkimo momento sukelti įtempiai; e – lenkimo momento sukeltų deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Skaičiuojant tokius lenkiamuosius sluoksniuotuosius elementus pirmiausia turi būti nustatomi įtempiai, atsiradę dėl išorinių sluoksnių betono susitraukimo deformacijų (2.1 pav., b). Tada pagal įtempius apskaičiavus išorinių sluoksnių deformacijas bei palyginus jas su viduriniojo sluoksniu betono laisvojo susitraukimo deformacijomis, galima apskaičiuoti įtempius visame skerspjūvyje, atsiradusius dėl skirtingų sluoksnių susitraukimo deformacijų (2.1 pav., c). Tokiu atveju pradinis įtempių ir deformacijų būvis dėl betono susitraukimo deformacijų bus lygus 2.1 paveiksle, b ir c pavaizduotų įtempių pasiskirstymo diagramų sumai. Šie suminiai įtempiai vėliau turi būti įvertinami skaičiuojant įtempius nuo lenkimo momento (2.1 pav., d). Dėl prielaidos apie standų kontaktą tarp sluoksnių, deformacijų pasiskirstymo skerspjūvyje diagrama bus tiesialinijinė (2.1 pav., e).

Pritaikius 2.2 skyriuje paminėtas prielaidas – visas lenkimo momento sukeltų įtempių ir deformacijų pasiskirstymo skerspjūvyje diagramas galima nubraižyti tiesiškai. Tačiau net ir tiesialinijinės diagramos gali būti labai įvairios, t.y. nėra vienos universalios įtempių ir deformacijų būvį nusakančios diagramos, tinkančios visiems lenkiamiesiems trisluoksniams elementams. Nepaisant to, lenkiamųjų trisluoksnių elementų skaičiavimui būtina žinoti (arba parinkti) įtempių ir deformacijų pasiskirstymo skerspjūvyje pobūdį. Galima išskirti keletą įtempių ir deformacijų pasiskirstymo skerspjūvyje diagramų, charakteringų lenkiamiesiems armuotiems trisluoksniams elementams, pagamintiems iš betono tipo medžiagų (2.2 pav.).



2.2 pav. Charakteringas įtempių ir deformacijų būvis lenkiamuose trisluoksniuose gelžbetoniniuose elementuose: a – 1 atvejis, kai visi sluoksniai nesupleišėję; b – 2 atvejis, kai viduriniojo sluoksnio tempiamojoje dalyje yra plyšys; c – 3 atvejis, kai vidurinis sluoksnis visiškai supleišėjęs; d – 4 atvejis, kai plyšys viduriniajame sluoksnyje užsiveria veikiant lenkimo momentui; e – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

2.2 paveiksle pateikti įtempių ir deformacijų būvio atvejai neatspindi visų įmanomų atvejų, tačiau jie yra labiausiai atitinkantys realų įtempių ir deformacijų pasiskirstymą tokio tipo lenkiamuose elementuose. Skaičiavimo metu pagal iš anksto žinomas fizikines ir mechanines lenkiamą elementą sudarančių medžiagų charakteristikas (arba pastebėtus dėl skirtingų betono susitraukimo deformacijų atsiradusius plyšius) turėtų būti pasirenkamas labiausiai konkrečiu atveju tinkantis atvejis. Vėliau pagal pasirinktą įtempių ir deformacijų pasiskirstymo atvejį sudaromas visas skaičiavimo modelis. Pasirinkus vieną ar kitą skaičiavimo modelį galutiniai skaičiavimo rezultatai gali skirtis, todėl teisingo skaičiavimo modelio pasirinkimas yra labai svarbi skaičiavimo dalis. Pasirinktas skaičiavimo modelis turi būti kuo labiau panašus į realų įtempių ir deformacijų būvį.

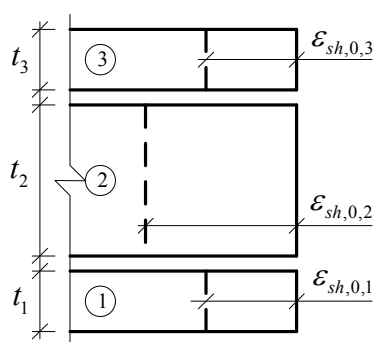
Realus įtempių ir deformacijų būvis daugiausiai priklauso nuo trisluoksnio elemento geometrinių ir deformacinių charakteristikų. Daugeliu atveju šios charakteristikos yra žinomos arba gali būti nustatytos, todėl jau iš pat pradžių galima nuspręsti kuris iš charakteringų skaičiavimo modelių tinka labiausiai. Tačiau skaičiavimo metu turi būti patikrintas pasirinkto skaičiavimo modelio atitikimas gautiems rezultatams. Ypač svarbu, kad apskaičiuotieji įtempiai ar deformacijos nekeistų savo ženklo (nebūtų neigiami), nes tokiu atveju keičiasi įtempių ir deformacijų pasiskirstymo skerspjūvyje pobūdis ir skaičiuojamąjį modelį bei formules reikia pakeisti, t.y. uždavinį perskaičiuoti.

Parenkant ar sudarant lenkiamųjų trisluoksnių elementų skaičiavimo modelį, reikia įvertinti ir pradinį įtempių ir deformacijų būvį, kuris susidaro dėl skirtingų betono laisvojo susitraukimo deformacijų skirtinguose sluoksniuose bei armatūros pasipriešinimo šioms deformacijoms. Dėl betono susitraukimo atsiradę pradiniai įtempiai turi būti sumuojami su įtempiais, atsirandančiais elemento lenkimo metu.

Jei atlikus skaičiavimus gauti rezultatai prieštarauja (pagal ženklą ar pobūdį) pasirinkto skaičiavimo modelio sudarymo principui – uždavinys turėtų būti perskaiciuojamas pagal kitą, geriau realų įtempių ir deformacijų būvį atitinkantį skaičiavimo modelį.

2.4. Pradinių įtempių, susidariusių dėl skirtingų sluoksnių susitraukimo deformacijų, nustatymas

Pagaminus trisluksnį elementą, kurio skirtingiems sluoksniams panaudotos skirtingos medžiagos, jo sluoksniai (tiksliau – betonas) kietėjimo metu traukiasi ir tuo būdu sukuria pradinį įtempių ir deformacijų būvį. Kadangi dauguma statybos pramonėje naudojamų elementų yra trisluksniai, šiame darbe bus nagrinėjamas trisluksnis elementas, kurio išoriniai sluoksniai yra armuoti ir pagaminti iš sunkiojo betono. Tuo tarpu vidurinis sluoksnis pagamintas iš lengvų ir geras termoizoliacines savybes turinčių betono tipo medžiagų, tokių kaip putbetonis, keramzitbetonis ir pan. (2.3 pav.).



2.3 pav. Trisluksnio elemento, pagaminto iš betono tipo medžiagų, laisvojo susitraukimo deformacijos (kai išoriniai sluoksniai pagaminti iš armuoto sunkaus betono, o vidurinis – iš lengvo geras termoizoliacines savybes turinčio betono)

Dėl didesnių viduriniojo sluoksniu betono susitraukimo deformacijų (2.3 pav.) – išoriniai sluoksniai bus apspaudžiami, o viduriniajame sluoksnyje atsiras tempimo įtempiai.

Be to, dėl išoriniuose sluoksniuose esančios išilginės armatūros, kurios laisvosios susitraukimo deformacijos yra lygios nuliui, išorinių sluoksnių betone atsiranda papildomi tempimo įtempiai. Dėl pusiausvyros sąlygų galima teigti, kad tokio paties dydžio – bet jau gniuždymo – deformacijos atsiranda armatūroje, kuri priešinasi išorinių sluoksnių betono laisvojo susitraukimo deformacijoms. Skaičiuojant betono susitraukimo deformacijų sukeltus pradinis įtempius yra remiamasi prielaida, kad tiek kontaktas tarp armatūros ir betono, tiek kontaktas tarp gretimų sluoksnių yra visiškai standus. Tokiu atveju išoriniai lėčiau besitraukiantys sluoksniai taip pat priešinasi viduriniojo sluoksnio susitraukimui, kaip ir armatūra priešinasi išorinių sluoksnių betono susitraukimui.

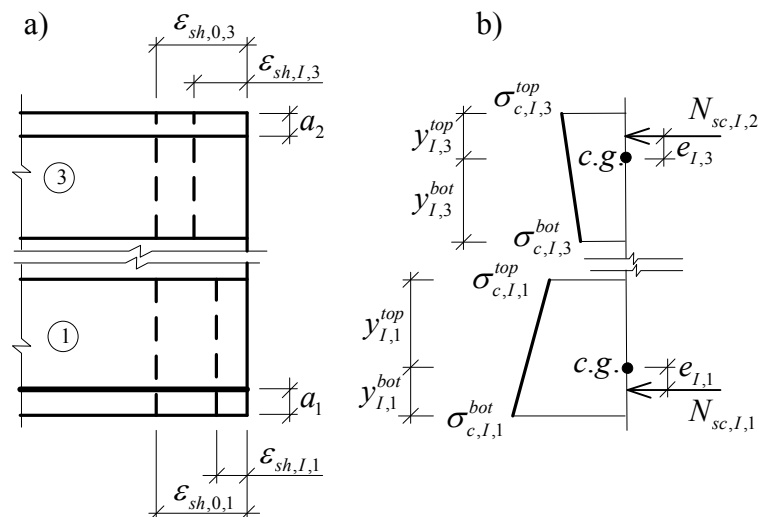
Norint nustatyti pradinį įtempį ir deformacijų būvį trisluoksnėse betono tipo sijose su armuotais išoriniais sluoksniais, reikia žinoti geometrines lenkiamo elemento charakteristikas, t.y. trisluoksnio elemento aukštį ir plotį, kiekvieno sluoksnio aukštį, armatūros išoriniuose sluoksniuose strypų skersmenį ir skaičių bei jų išdėstymo vietą. Taip pat reikia žinoti fizikines ir mechanines kiekvienos trisluoksniame elemente panaudotos medžiagos charakteristikas, t.y. kiekvieno sluoksnio betono ir išorinių sluoksnių armatūros gniuždomuosius ir tempiamuosius stiprius, taip pat tamprumo modulius, tempiamojo betono tamprumo koeficientą ir kiekvieno sluoksnio betono laisvojo (nesuvaržyto) susitraukimo deformacijų dydį.

Betono tipo medžiagų laisvojo susitraukimo deformacijos gali būti nustatomos tiek teoriškai, tiek eksperimentiniu būdu. Betonas kiekviename trisluoksnio elemento sluoksnyje gali būti skirtingas, todėl laisvojo susitraukimo deformacijų dydis nustatomas kiekvienam sluoksniui atskirai. Mokslinėje literatūroje yra pateikta pakankamai daug metodikų, leidžiančių nustatyti betono laisvųjų susitraukimo deformacijų dydį (pateikta 1-ame skyriuje). Paprastai skirtingi metodai gali būti taikomi konkrečiomis sąlygomis (betono sudėtis, kietėjimo sąlygos ir pan.). Reikia tik pasirinkti metodą, labiausiai tinkantį skaičiuojamam elementui ir jo gamybos (kietėjimo) sąlygoms. Šiame darbe pagrindinis dėmesys bus skiriamas ne betono laisvųjų susitraukimo deformacijų dydžio nustatymui, o trisluoksnio elemento su armuotais išoriniais sluoksniais pradinio įtempio ir deformacijų būvio, atsiradusio dėl betono susitraukimo, nustatymui.

Skaičiuojant pradinis įtempius, atsiradusius dėl susitraukimo deformacijų, taip pat reikia parinkti skaičiuojamąjį modelį. Šiuo atveju parinkti teisingą skaičiuojamąjį modelį yra paprasčiau, nes dauguma trisluoksnių elementų yra projektuojami ir gaminami tuo pačiu principu, t.y. su stipriais išoriniais sluoksniais ir silpnesniu viduriniu sluoksniu. Taip pat yra

žinoma, kad daugumos lengvųjų betonų laisvosios susitraukimo deformacijos yra žymiai didesnės už sunkiojo betono laisvojo susitraukimo deformacijas [5, 16, 20, 21, 23, 36, 38, 45, 46, 49, 53, 54, 61, 63, 64, 70, 75, 80, 86, 91, 92, 97, 103, 110]. Todėl viduriniajam sluoksniui traukiantis daugiau už išorinius – pastarieji yra apspaudžiami, o viduriniajame sluoksnyje atsiranda tempimo įtempiai. Tačiau lenkiamieji trisluoksniai elementai gali būti pagaminti ir su surenkamu viduriniu sluoksniu. Tokiu atveju tarpas tarp viduriniajame sluoksnyje esančių elementų gali būti laikomas plyšiu per visą sluoksnio aukštį. Be to, surenkamų elementų laisvosios susitraukimo deformacijos lygios nuliui. Todėl nustatant pradinį įtempių ir deformacijų būvį turi būti nagrinėjami du charakteringi skaičiavimo atvejai: 1) kai traukiasi visi trisluoksnio elemento sluoksniai ir 2) kai traukiasi tik išoriniai armuoti sluoksniai.

Nagrinėjant sluoksnius atskirai, viduriniajame nearmuotame sluoksnyje dėl betono laisvojo susitraukimo deformacijų jokie normaliniai įtempiai neatsiranda, nes betonui niekas netrukdo trauktis. Išoriniuose sluoksniuose dėl armatūros pasipriešinimo betono susitraukimui armatūroje atsiranda gniuždymo, o betone – tempimo normaliniai įtempiai. Armatūros svorio centras dažnai nesutampa su sluoksnio svorio centru, todėl įtempių atstojamoji ašinė jėga veikia su ekscentricitetu ir sluoksnyje atsiranda lenkimo momentas. Betono tempimo deformacijos didesnės tame sluoksnio krašte, kuris yra arčiau armatūros svorio centro.



2.4 pav. Betono susitraukimo deformacijų sukeltas įtempių ir deformacijų būvis išoriniuose trisluoksnio elemento sluoksniuose: a – deformacijos; b – įtempiai

Žinant sluoksniams pagaminti naudotų betono tipo medžiagų laisvojo susitraukimo deformacijas $\varepsilon_{sh,0,i}$, galima nustatyti betono ir armatūros išoriniuose sluoksniuose deformacijas bei įtempius, susidariusius dėl armatūros pasipriešinimo betono susitraukimui (2.4 pav., b).

Tiek betonas, tiek armatūra deformuojasi vienodai [76], t.y. kontaktas tarp jų visiškai standus, todėl galima apskaičiuoti vidutines gniuždymo deformacijas armatūroje (ir tuo pačiu visame sluoksnyje) (2.4 pav., a):

$$\varepsilon_{sh,I,i} = \frac{\varepsilon_{sh,0,i}}{1 + \alpha_i \cdot \rho_i} \quad (2.1)$$

Tada vidutiniai gniuždymo įtempiai i -ojoje armatūroje:

$$\sigma_{sc,I,i} = \varepsilon_{sh,I,i} \cdot E_{s,i} = \frac{\varepsilon_{sh,0,i} \cdot E_{s,i}}{1 + \alpha_i \cdot \rho_i} \quad (2.2)$$

čia: $\alpha_i = \frac{E_{s,i}}{E_{c,i} \cdot \nu_i}$;

$$\rho_i = \frac{A_{s,i}}{A_{c,i}};$$

$E_{s,i}$ ir $E_{c,i}$ – atitinkamai i -osios armatūros ir i -ojo sluoksnio betono pradiniai tamprumo moduliai;

$A_{s,i}$ ir $A_{c,i}$ – atitinkamai i -osios armatūros ir i -ojo sluoksnio betono skerspjūvio plotai;

ν_i – i -ojo sluoksnio tempiamojo betono tamprumo koeficientas.

Čia ir toliau priimama, kad trisluoksnio elemento sluoksniai numeruojami nuo tempiamojo apatinio sluoksnio: 1-as (apatinis, tempiamas), 2-as (vidurinysis) ir 3-as (viršutinis, gniuždomas). Pagrindinė (tempiama) armatūra žymima apatiniu indeksu 1, o pagalbinė gniuždoma armatūra – apatiniu indeksu 2. Deformacijas ir įtempius atskirai nagrinėjant sluoksnio viršutiniame ir apatiniame kraštuose – jie atskiriami viršutiniais indeksais: „*top*“ sluoksnio viršutiniam kraštui ir „*bot*“ – sluoksnio apatiniam kraštui.

Armatūra dar papildomai žymima indeksu „s“ (gniuždymo atveju – „sc“), o betonas – indeksu „c“. Figūros svorio centras žymimas indeksu „c.g.“. Sluoksnių storis (aukštis) žymimas raide „t“, o plotis – „b“. Atstumas nuo išorinio elemento krašto iki armatūros svorio centro žymimas raide „a“. Redukuoti dydžiai žymimi apatiniu indeksu „eff“. Armatūros skersmuo žymimas simboliu „φ“. Dėl to, kad pradinis įtempių ir deformacijų būvis skaičiuojamais keliais etapais – atitinkamo etapo metu atsiradę įtempiai ir deformacijos taip pat atskiriami apatiniais indeksais: „0“ – laisvojo betono susitraukimo metu; „I“ – skaičiuojant atskirai išorinius sluoksnius; „II“ – skaičiuojant visą skerspjūvį. Betono susitraukimo sukeltos deformacijos ir įtempiai visada žymimi su indeksu „sh“.

Gniuždymo įtempių atstojamąją ašinę jėgą, kurios pridėjimo vieta skerspjūvyje sutampa su armatūros svorio centru, galima apskaičiuoti vidutinius įtempius padauginus iš armatūros skerspjūvio ploto:

$$N_{sc,I,i} = \sigma_{sc,I,i} \cdot A_{s,i} \quad (2.3)$$

Tokiu atveju, kai armatūros svorio centras nesutampa su sluoksnio svorio centru – ašinė jėga veikia su ekscentricitetu ir sluoksnyje atsiranda lenkimo momentas (2.4 pav., b):

$$M_{I,i} = N_{sc,I,i} \cdot e_{I,i} \quad (2.4)$$

Ekscentricitetas šiuo atveju lygus atstumui nuo armatūros svorio centro iki į vieną sluoksnio medžiagą (betoną) redukuoto sluoksnio skerspjūvio svorio centro, t.y. lygus atstumui tarp gniuždymo ir tempimo atstojamųjų ašinių jėgų poros:

$$e_{I,i} = y_{s,I,i} \quad (2.5)$$

Redukuoto sluoksnio svorio centro padėtis nustatoma pagal žinomas medžiagų mechanikos formules, įvertinant tiek geometrines, tiek mechanines armatūros ir betono charakteristikas.

Sluoksnio betono ir armatūros statiniai momentai:

$$S_{c,I,i} = 0 ; \quad (2.6)$$

$$S_{s,I,i} = A_{s,i} \cdot \frac{E_{s,i}}{E_{c,i}} \cdot \left(\frac{t_i}{2} - a_i \right). \quad (2.7)$$

Tada atstumas nuo betono svorio centro iki redukuoto sluoksnio svorio centro (2.4 pav., b):

$$y_{c,I,i} = \frac{\sum S_{I,i}}{\sum A_{I,i}} = \frac{S_{s,I,i}}{t_i \cdot b_i - A_{s,i} + A_{s,i} \cdot \frac{E_{s,i}}{E_{c,i}}}. \quad (2.8)$$

Atstumas nuo armatūros svorio centro iki redukuoto sluoksnio svorio centro:

$$y_{s,I,i} = \frac{t_i}{2} - y_{c,I,i} - a_i. \quad (2.9)$$

Redukuoto į betono medžiagą sluoksnio svorio centro padėtis, t.y. atstumas nuo sluoksnio išorinio krašto iki redukuoto to paties sluoksnio svorio centro:

$$y_{c,g.,I,i} = y_{s,I,i} + a_i. \quad (2.10)$$

Taip pat turi būti perskaičiuotas ir pagal betono medžiagos tamprumo modulį redukuoto sluoksnio skerspjūvio plotas:

$$A_{eff,i} = A_{c,i} + A_{s,i} \cdot \frac{E_{s,i}}{E_{c,i}}. \quad (2.11)$$

Tada redukuoto sluoksnio skerspjūvio inercijos momentas:

$$I_{eff,i} = \frac{b_i \cdot t_i^3}{12} - \frac{\pi \cdot \phi_{s,i}^4}{64} \cdot n_i + \frac{\left(32 \cdot A_{s,i} \cdot \frac{E_{s,i}}{E_{c,i}} \right)^2}{\pi} \cdot n_i + A_{c,i} \cdot y_{c,I,i}^2 + A_{s,i} \cdot \frac{E_{s,i}}{E_{c,i}} \cdot y_{s,I,i}^2; \quad (2.12)$$

čia n_i – sluoksnyje esančių armatūros strypų skaičius.

Skaičiuojant įtempius abiejuose sluoksnio kraštuose, reikia nustatyti atstumus nuo redukuoto sluoksnio svorio centro iki sluoksnio apatinio bei viršutinio kraštų. Jie apskaičiuojami skirtingai 1-ajam (apatiniam) sluoksniui ir 3-ajam (viršutiniam) sluoksniui:

$$y_{I,1}^{bot} = y_{c,g.,I,1}; \quad (2.13)$$

$$y_{I,1}^{top} = t_1 - y_{c,g.,I,1}; \quad (2.14)$$

$$y_{I,3}^{bot} = t_3 - y_{c,g.,I,3}; \quad (2.15)$$

$$y_{I,3}^{top} = y_{c,g.,I,3}. \quad (2.16)$$

Normaliniai betono įtempiai išoriniuose sluoksniuose didesni tuose kraštuose, kurie yra arčiau sluoksnyje išdėstytos armatūros svorio centro. Todėl apatiniame sluoksnyje įtempiai bus didesni sluoksnio apačioje, o viršutiniame – sluoksnio viršuje (2.4 pav.):

$$\sigma_{c,I,1}^{bot} = \frac{N_{sc,I,1}}{A_{eff,1}} + \frac{M_{I,1} \cdot y_{I,1}^{bot}}{I_{eff,1}}; \quad (2.17)$$

$$\sigma_{c,I,1}^{top} = \frac{N_{sc,I,1}}{A_{eff,1}} - \frac{M_{I,1} \cdot y_{I,1}^{top}}{I_{eff,1}}; \quad (2.18)$$

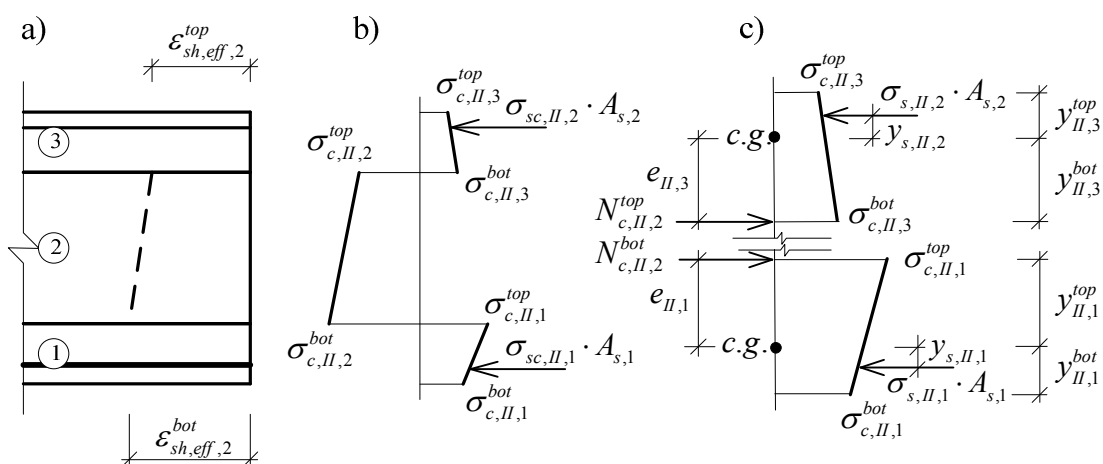
$$\sigma_{c,I,3}^{bot} = \frac{N_{sc,I,2}}{A_{eff,3}} - \frac{M_{I,3} \cdot y_{I,3}^{bot}}{I_{eff,3}}; \quad (2.19)$$

$$\sigma_{c,I,3}^{top} = \frac{N_{sc,I,2}}{A_{eff,3}} + \frac{M_{I,3} \cdot y_{I,3}^{top}}{I_{eff,3}}; \quad (2.20)$$

Turint visų sluoksnių susitraukimo deformacijas (įvertinus armatūros įtaką išoriniuose sluoksniuose), pagal analogiškas formules galima apskaičiuoti ir įtempius, kurie atsiranda dėl skirtingų sluoksnių susitraukimo deformacijų ir remiantis prielaida, kad kontaktas tarp

sluoksnių yra standus. Dėl to, kad viduriniajame sluoksnyje susitraukimo deformacijos yra žymiai didesnės už išorinių sluoksnių susitraukimo deformacijas – viduriniajame sluoksnyje atsiranda tempimo įtempiai, o išoriniuose sluoksniuose (tiek betone, tiek armatūroje) – papildomi gniuždymo įtempiai.

Skaičiuojamąją schemą galima redukuoti deformacijas išoriniuose sluoksniuose prilyginus nuliui, o viduriniojo sluoksnio apatiniame ir viršutiniame krašte deformacijas prilyginus skirtumui tarp viduriniojo ir gretimo jam išorinio sluoksnio susitraukimo deformacijų (2.5 pav., a).



2.5 pav. Skirtingo sluoksnių betono susitraukimo deformacijų sukeltas įtempių ir deformacijų būvis visame trisluoksnių elemento skerspjūvyje: a – redukuotos deformacijos; b – įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje; c – didesnių viduriniojo sluoksnio susitraukimo deformacijų sukelti įtempiai išoriniuose sluoksniuose

Viduriniojo sluoksnio betono laisvojo susitraukimo deformacijos yra didesnės už išorinių sluoksnių deformacijas (ypač įvertinus armatūros pasipriešinimą betono susitraukimui). Todėl redukuotos deformacijos viduriniojo sluoksnio apatiniame ir viršutiniame kraštuose bus lygios skirtumui tarp gretimų sluoksnių deformacijų.

$$\varepsilon_{sh,eff,2}^{bot} = \varepsilon_{sh,0,2} - \varepsilon_{sh,I,1} ; \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_{sh,eff,2}^{top} = \varepsilon_{sh,0,2} - \varepsilon_{sh,I,3} . \quad (2.22)$$

Normaliniai įtempiai, atsiradę dėl skirtingų sluoksnių susitraukimo deformacijų, gali būti apskaičiuojami pagal formules analogiškas įtempių skaičiavimui išoriniuose

sluoksniuose. Tik šiuo atveju visas skerspjūvis turi būti redukuojamas į vieną medžiagą (pagal viduriniojo sluoksnio betono tamprumo modulį), o išoriniai sluoksniai skaičiuojami kaip išorinė gniuždoma armatūra. Taip pat daroma prielaida, kad viena pusė viduriniojo sluoksnio veikia vieną išorinį sluoksnį, o kita pusė – kitą išorinį sluoksnį (atitinkamai).

Pirmiausiai pagal redukuotas deformacijas apskaičiuojami normaliniai tempimo įtempimai abiejuose viduriniojo sluoksnio kraštuose ir nustatoma sluoksnyje veikianti atstojamoji ašinė tempimo jėga.

Dėl išorinio apatinio sluoksnio pasipriešinimo viduriniojo sluoksnio susitraukimo deformacijoms, vidutinės tempimo deformacijos viduriniojo sluoksnio apatiniame krašte:

$$\varepsilon_{sh,II,2}^{bot} = \frac{\varepsilon_{sh,eff,2}^{bot} \cdot \alpha_{eff,1} \cdot \kappa_{eff,1}}{1 + \alpha_{eff,1} \cdot \kappa_{eff,1}}. \quad (2.23)$$

Tada normaliniai tempimo įtempiai viduriniojo sluoksnio apatiniame krašte gali būti apskaičiuoti pagal Huko dėsnį bei įvertinus tempiamojo betono tamprumo koeficientą:

$$\sigma_{c,II,2}^{bot} = \varepsilon_{sh,eff,2}^{bot} \cdot E_{c,2} \cdot \nu_2 = \frac{\varepsilon_{sh,eff,2}^{bot} \cdot E_{c,1} \cdot \kappa_{eff,1}}{1 + \alpha_{eff,1} \cdot \kappa_{eff,1}}. \quad (2.24)$$

Vidutinės tempimo deformacijos bei įtempiai viduriniojo sluoksnio viršutiniame krašte apskaičiuojami analogiškai:

$$\varepsilon_{sh,II,2}^{top} = \frac{\varepsilon_{sh,eff,2}^{bot} \cdot \alpha_{eff,3} \cdot \kappa_{eff,3}}{1 + \alpha_{eff,3} \cdot \kappa_{eff,3}}; \quad (2.25)$$

$$\sigma_{c,II,2}^{top} = \varepsilon_{sh,eff,2}^{top} \cdot E_{c,2} \cdot \nu_2 = \frac{\varepsilon_{sh,eff,2}^{bot} \cdot E_{c,3} \cdot \kappa_{eff,3}}{1 + \alpha_{eff,3} \cdot \kappa_{eff,3}}; \quad (2.26)$$

čia: $\alpha_{eff,1} = \frac{E_{c,1}}{E_{c,2} \cdot \nu_2};$

$$\kappa_{eff,1} = \frac{2 \cdot A_{eff,1}}{A_{c,2}};$$

$$\alpha_{eff,3} = \frac{E_{c,3}}{E_{c,2} \cdot \nu_2};$$

$$\kappa_{eff,3} = \frac{2 \cdot A_{eff,3}}{A_{c,2}}.$$

Dėl nevienodo armatūros kiekio išoriniuose sluoksniuose įtempiai viduriniojo sluoksnio kraštuose taip pat skirtingi. Deformacijų tarp gretimų sluoksnių skirtumai, o tuo pačiu ir tempimo įtempiai viduriniajame sluoksnyje didesni krašte ties tuo išoriniu sluoksniu, kuriame yra pagrindinė armatūra.

Žinant įtempius viduriniojo sluoksnio kraštuose, juos galima išreikšti per dvi atstojamąsias ašines jėgas, kurių kiekviena veiks vieną išorinį sluoksnį. Pagal jėgų superpozicijos principą galima teigti, kad išorinius sluoksnius vidurinysis sluoksnis veikia per kontaktą tarp sluoksnių, todėl jėgų pridėjimo vieta sutampa su kontaktu tarp sluoksnių (2.5 pav., c). Dėl prielaidos, kad pusė viduriniojo sluoksnio veikia vieną išorinį sluoksnį, o kita pusė – kitą, galima apskaičiuoti išorinius sluoksnius veikiančių įtempių atstojamąsias ašines jėgas:

$$N_{c,II,2}^{bot} = \frac{(2 \cdot \sigma_{c,II,2}^{bot} + \sigma_{c,II,2}^{top})}{8} \cdot t_2 \cdot b_2; \quad (2.27)$$

$$N_{c,II,2}^{top} = \frac{(2 \cdot \sigma_{c,II,2}^{top} + \sigma_{c,II,2}^{bot})}{8} \cdot t_2 \cdot b_2. \quad (2.28)$$

Viduriniajame sluoksnyje veikianti tempiančių normalinių įtempių atstojamoji ašinė jėga pagal pusiausvyros sąlygą yra lygi išoriniuose sluoksniuose veikiančių gniuždančių normalinių įtempių atstojamųjų ašinių jėgų sumai. O dėl to, kad atstojamųjų gniuždančių ašinių jėgų pridėjimo taškai nesutampa su išorinių sluoksnių skerspjūvių svorio centrais – jėgos išorinius sluoksnius veikia su ekscentricitetais ir juose atsiranda papildomi lenkimo momentai.

Atstojamųjų išorinius sluoksnius gniuždančių jėgų pridėjimo taškų koordinatės sutaps su atitinkamo sluoksnio kraštu besiribojančiu su viduriniu sluoksniu, todėl ekscentricitetas, t.y. atstumas nuo atstojamųjų ašinių jėgų pridėjimo taškų iki išorinių sluoksnių svorio centrų (2.5 pav., c):

$$e_{II,1} = y_{II,1}^{top}; \quad (2.29)$$

$$e_{II,3} = y_{II,3}^{bot}. \quad (2.30)$$

Redukuotų išorinių sluoksnių skerspjūvių svorio centrai jau buvo apskaičiuoti ankstesniame skaičiavimo etape, todėl:

$$y_{II,i}^j = y_{I,i}^j. \quad (2.31)$$

Per kontakto zoną veikiančios ašinės jėgos išoriniuose sluoksniuose gniuždo ne tik betoną, bet ir jame esančią armatūrą, todėl turi būti apskaičiuoti ir atstumai nuo redukuotų sluoksnių svorio centrų iki sluoksniuose esančios armatūros svorio centrų:

$$y_{s,II,1} = y_{II,1}^{bot} - a_1; \quad (2.32)$$

$$y_{s,II,2} = y_{II,3}^{top} - a_2. \quad (2.33)$$

Žinant veikiančias ašines jėgas ir ekscentricitetus, galima apskaičiuoti išoriniuose sluoksniuose veikiančius papildomus lenkimo momentus:

$$M_{II,1} = N_{c,II,2}^{bot} \cdot e_{II,1}; \quad (2.34)$$

$$M_{II,3} = N_{c,II,2}^{top} \cdot e_{II,3}. \quad (2.35)$$

Tada pagal 2.5 paveiksle pateiktą skaičiuojamąją schemą galima užrašyti lygtis išorinių sluoksnių kraštuose atsirandančių papildomų normalinių įtempių nustatymui:

$$\sigma_{c,II,1}^{bot} = \frac{N_{c,II,2}^{bot}}{A_{eff,1}} + \frac{M_{II,1} \cdot y_{II,1}^{bot}}{I_{eff,1}}; \quad (2.36)$$

$$\sigma_{c,II,1}^{top} = \frac{N_{c,II,2}^{top}}{A_{eff,1}} - \frac{M_{II,1} \cdot y_{II,1}^{top}}{I_{eff,1}}; \quad (2.37)$$

$$\sigma_{c,II,3}^{bot} = \frac{N_{c,II,2}^{top}}{A_{eff,3}} - \frac{M_{II,3} \cdot y_{II,3}^{bot}}{I_{eff,3}}; \quad (2.38)$$

$$\sigma_{c,II,3}^{top} = \frac{N_{c,II,2}^{top}}{A_{eff,3}} + \frac{M_{II,3} \cdot y_{II,3}^{top}}{I_{eff,3}}. \quad (2.39)$$

Papildomi normaliniai įtempiai išorinių sluoksnių armatūroje gali būti apskaičiuojami pasinaudojus Huko dėsnio ir prielaida, kad gelžbetoniniuose elementuose armatūros deformacijos yra lygios betono deformacijoms ties armatūra. Tada įtempiai armatūroje:

$$\sigma_{s,II,1} = \varepsilon_{s,II,1} \cdot E_{s,1} = \sigma_{c,II,1}^{s,1} \cdot \frac{E_{s,1}}{E_{c,1}} = \left(\frac{N_{c,II,2}^{bot}}{A_{eff,1}} + \frac{M_{II,1} \cdot y_{s,II,1}}{I_{eff,1}} \right) \cdot \frac{E_{s,1}}{E_{c,1}}; \quad (2.40)$$

$$\sigma_{s,II,2} = \varepsilon_{s,II,2} \cdot E_{s,2} = \sigma_{c,II,3}^{s,2} \cdot \frac{E_{s,2}}{E_{c,3}} = \left(\frac{N_{c,II,2}^{top}}{A_{eff,3}} - \frac{M_{II,3} \cdot y_{s,II,2}}{I_{eff,3}} \right) \cdot \frac{E_{s,2}}{E_{c,3}}; \quad (2.41)$$

čia $\sigma_{c,II,i}^{s,j}$ – normaliniai i -ojo sluoksnio įtempiai betone ties j -ąja armatūra.

Suminiai skerspjūvyje veikiantys normaliniai įtempiai, atsiradę dėl trisluoksniame elemente panaudoto betono laisvojo susitraukimo deformacijų, yra sudaryti iš įtempių, atsiradusių dėl armatūros pasipriešinimo išorinių sluoksnių betono susitraukimo deformacijoms ir įtempių, atsiradusių dėl skirtingo sluoksnių susitraukimo deformacijų dydžio ir standaus kontakto tarp gretimų sluoksnių.

Tada suminiai įtempiai apatiniam sluoksnyje:

$$\sigma_{sh,c,1}^{bot} = \sigma_{c,II,1}^{bot} - \sigma_{c,I,1}^{bot}; \quad (2.42)$$

$$\sigma_{sh,c,1}^{top} = \sigma_{c,II,1}^{top} - \sigma_{c,I,1}^{top}. \quad (2.43)$$

Suminiai tempimo įtempiai viduriniajame sluoksnyje lygūs įtempiams, atsiradusiems dėl skirtingų sluoksnių deformacijų:

$$\sigma_{sh,c,2}^{bot} = \sigma_{c,II,2}^{bot}; \quad (2.44)$$

$$\sigma_{sh,c,2}^{top} = \sigma_{c,II,2}^{top}. \quad (2.45)$$

Suminiai įtempiai viršutiniame sluoksnyje:

$$\sigma_{sh,c,3}^{bot} = \sigma_{c,II,3}^{bot} - \sigma_{c,I,3}^{bot}; \quad (2.46)$$

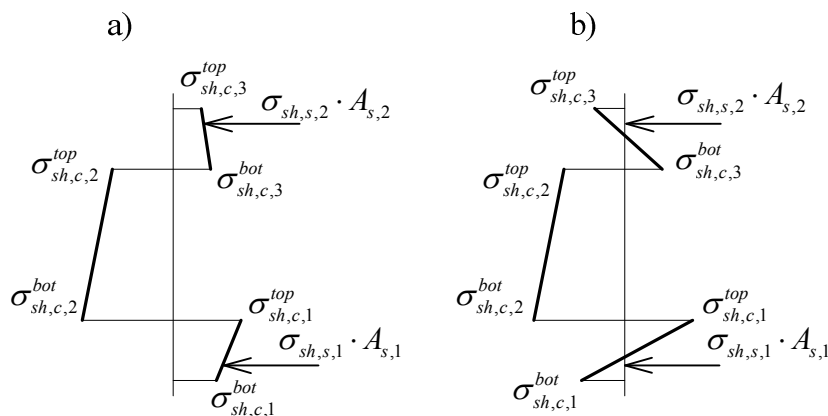
$$\sigma_{sh,c,3}^{top} = \sigma_{c,II,3}^{top} - \sigma_{c,I,3}^{top}. \quad (2.47)$$

Suminiai gniuždymo įtempiai išorinių sluoksnių armatūroje:

$$\sigma_{sh,s,1} = \sigma_{sc,I,1} + \sigma_{s,II,1}; \quad (2.48)$$

$$\sigma_{sh,s,2} = \sigma_{sc,I,2} + \sigma_{s,II,2}. \quad (2.49)$$

Šiuo atveju svarbu įvertinti veikiančių įtempių ženklą. Vidurinysis sluoksnis visada bus tempiamas, todėl išorinių sluoksnių kraštas besiribojantis su viduriniu sluoksniu visada bus gniuždomas. Armatūra išoriniuose sluoksniuose taip pat visais atvejais bus gniuždoma. Tačiau išorinių sluoksnių išoriniuose kraštuose betonas gali būti tiek gniuždomas, tiek tempiamas (2.6 pav., a, b).



2.6 pav. Skirtingo sluoksnių betono susitraukimo deformacijų sukeltas suminis įtempių ir deformacijų būvis visame trisluoksnių elemento skerspjūvyje: a – kai visas išorinis sluoksnis gniuždomas; b – kai išorinių sluoksnių betono išorinė dalis yra tempiama

Suminių įtempių išoriniuose išorinių sluoksnių kraštuose ženklas priklauso nuo to, kurie įtempiai didesni: ar įtempiai nuo armatūros pasipriešinimo išorinių sluoksnių betono susitraukimui, ar įtempiai nuo skirtingų sluoksnių deformacijų. Pagal (2.42), (2.43), (2.46) ir (2.47) lygtis apskaičiuoti įtempiai reiškia suminius gniuždymo įtempius, jei ženklas teigiamas

(2.6 pav., a) ir analogiškai suminius tempimo įtempius, jei ženklas yra neigiamas (2.6 pav., b). Be to, galimas ir atvejis, kai suminių betono įtempių ženklas viename išoriniame sluoksnyje keičiasi, o kitame – ne.

Skaičiuojant pradinį susitraukimo deformacijų įtempių ir deformacijų būvį tuo atveju, kai vidurinysis sluoksnis yra surenkamas, t.y. su plyšiu (tarpu) per visą viduriniojo sluoksnio aukštį, suminiai pradiniai įtempiai bus tiesiog lygūs įtempiams, atsiradusiems dėl išorinių sluoksnių armatūros pasipriešinimo tų pačių sluoksnių betono susitraukimo deformacijoms.

Todėl suminiai įtempiai išorinių sluoksnių betone:

$$\sigma_{sh,c,1}^{bot} = \sigma_{c,I,1}^{bot} ; \quad (2.50)$$

$$\sigma_{sh,c,1}^{top} = \sigma_{c,I,1}^{top} ; \quad (2.51)$$

$$\sigma_{sh,c,3}^{bot} = \sigma_{c,I,3}^{bot} ; \quad (2.52)$$

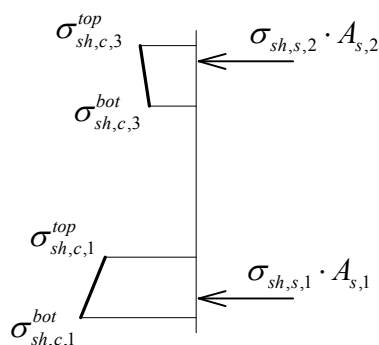
$$\sigma_{sh,c,3}^{top} = \sigma_{c,I,3}^{top} . \quad (2.53)$$

Analogiškai gniuždymo įtempiai išorinių sluoksnių armatūroje:

$$\sigma_{sh,s,1} = \sigma_{sc,I,1} ; \quad (2.54)$$

$$\sigma_{sh,s,2} = \sigma_{sc,I,2} . \quad (2.55)$$

Viduriniajame sluoksnyje suminiai įtempiai lygūs nuliui. Todėl galutinė įtempių pasiskirstymo skerspjūvyje diagrama atrodys taip, kaip parodyta 2.7 paveiksle.



2.7 pav. Suminiai pradiniai įtempiai visame skerspjūvyje dėl išorinių sluoksnių armatūros pasipriešinimo tų pačių sluoksnių betono susitraukimo deformacijoms (kai vidurinysis sluoksnis nevertinamas dėl pleišėtumo)

Tiek vienu atveju (kai traukiasi visi sluoksniai), tiek kitu atveju (kai traukiasi tik išorinių sluoksnių betonas), pagal (2.42–2.49) ir (2.50–2.55) formules apskaičiuotieji suminiai pradiniai įtempiai turi būti įvertinami tolimesniame lenkiamųjų trisluoksnių elementų stiprumo bei pleišėtumo skaičiavime. T.y. pradiniai dėl betono susitraukimo atsiradę įtempiai betone ir armatūroje turi būti sudedami su atitinkamais nuo veikiančio lenkimo momento atsiradusiais įtempiais betone ir armatūroje. Šiuo atveju taip pat svarbu atsižvelgti į veikiančių įtempių ženklą, nes vienu atveju pradinių įtempių ženklas sutampa su lenkimo momento sukeltų įtempių ženklu, kitu atveju – ne.

2.5. Neutraliosios ašies padėties nustatymas

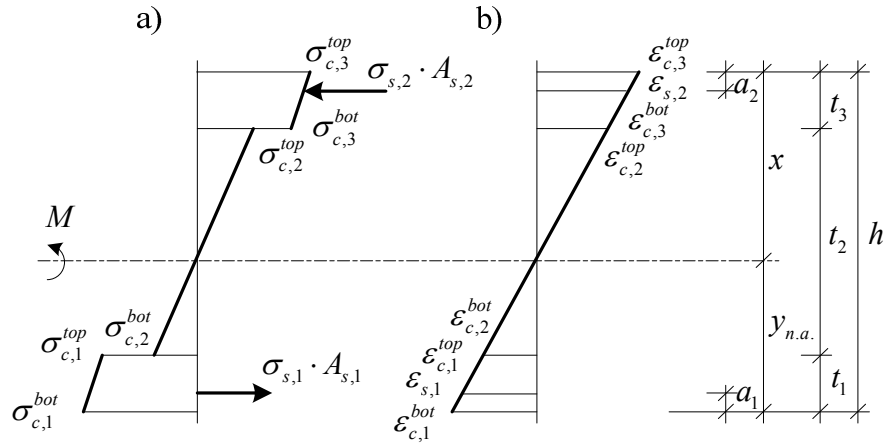
Nustačius pradinį įtempių ir deformacijų būvį, tolimesniems lenkiamųjų trisluoksnių elementų stiprumo ir pleišėtumo skaičiavimams būtina nustatyti neutraliosios ašies padėtį, t.y. gniuždomosios ir tempiamosios zonų aukščius. Skaičiuojant neutraliosios ašies padėtį nagrinėjami keturi labiausiai tikėtini įtempių ir deformacijų būvio atvejai (2.2 pav.). Skaičiavimas atliekamas nustatant normalinius įtempius tempiamuosiuose ir gniuždomuose sluoksniuose bei pagal tų įtempių atstojamąsias ašines jėga sudarant pusiausvyros lygtį

$$\int_A \sigma_i dA = 0 \quad [13].$$

Pasinaudojus prielaida, kad kontaktas tarp sluoksnių visiškai standus, galima teigti, kad kontakto zonoje tarp greta esančių sluoksnių tiesialinijinių deformacijų reikšmės yra lygios, t.y. deformacija sluoksnio viršuje lygi aukščiau esančio sluoksnio apatinės dalies deformacijai. Tokia lygybė normaliniams įtempiams negalioja, nes įvertinamos skirtingos atskirų sluoksnių medžiagų mechaninės charakteristikos. Dėl to įtempiai sluoksnio viršuje nėra lygūs aukščiau esančio sluoksnio apatinės dalies įtempiams.

Tuo atveju, kai veikiant lenkimo momentui į bendrą darbą įsitraukę visi trisluoksnio elemento sluoksniai ir viduriniajame sluoksnyje nėra plyšių, galima sudaryti 2.8 paveiksle pavaizduotą skaičiuojamąją schemą.

Pagal žinomą dėsnį normaliniai įtempiai lygūs santykinų deformacijų ir medžiagos tamprumo modulio sandaugai. Tačiau skaičiuojant tempiamojo betono įtempius, pradinis betono tamprumo modulis turi būti padaugintas iš tamprumo koeficiento.



2.8 pav. Skaičiuojamoji schema neutraliosios ašies padėčiai apskaičiuoti (kai dirba visi sluoksniai ir jie nesupleišėję): a – įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Pagal 2.8 paveikslą pateiktą skaičiuojamąją schemą galima užrašyti tokias normalinių įtempių nustatymo lygtis kiekvienam charakteringam skerspjūvio taškui (tiek betono, tiek armatūros):

$$\sigma_{c,1}^{bot} = \varepsilon_{c,1}^{bot} \cdot E_{c,1} \cdot \nu_1; \quad (2.56)$$

$$\sigma_{c,1}^{top} = \varepsilon_{c,1}^{top} \cdot E_{c,1} \cdot \nu_1; \quad (2.57)$$

$$\sigma_{c,2}^{bot} = \varepsilon_{c,2}^{bot} \cdot E_{c,2} \cdot \nu_2; \quad (2.58)$$

$$\sigma_{c,2}^{top} = \varepsilon_{c,2}^{top} \cdot E_{c,2}; \quad (2.59)$$

$$\sigma_{c,3}^{bot} = \varepsilon_{c,3}^{bot} \cdot E_{c,3}; \quad (2.60)$$

$$\sigma_{c,3}^{top} = \varepsilon_{c,3}^{top} \cdot E_{c,3}; \quad (2.61)$$

$$\sigma_{s,1} = \varepsilon_{s,1} \cdot E_{s,1}; \quad (2.62)$$

$$\sigma_{s,2} = \varepsilon_{s,2} \cdot E_{s,2}. \quad (2.63)$$

Pasinaudojus prielaida, kad deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje tiesialinijinis ir geometrinių trikampių panašumo taisykle, pagal 2.8 paveikslą, b, visas deformacijas trisluoksnių elemento skerspjūvyje galima išreikšti per apatinio labiausiai tempiamojo elemento krašto deformacijas $\varepsilon_{c,1}^{bot}$. Tada visų charakteringų skerspjūvio taškų santykinės deformacijos:

$$\varepsilon_{c,1}^{bot} = \varepsilon_{c,1}^{bot}; \quad (2.64)$$

$$\varepsilon_{c,1}^{top} = \varepsilon_{c,2}^{bot} = \frac{\varepsilon_{c,1}^{bot} \cdot (y_{n.a.} - t_1)}{y_{n.a.}}; \quad (2.65)$$

$$\varepsilon_{c,2}^{top} = \varepsilon_{c,3}^{bot} = \frac{\varepsilon_{c,1}^{bot} \cdot (t_1 + t_2 - y_{n.a.})}{y_{n.a.}}; \quad (2.66)$$

$$\varepsilon_{c,3}^{top} = \frac{\varepsilon_{c,1}^{bot} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 - y_{n.a.})}{y_{n.a.}}; \quad (2.67)$$

$$\varepsilon_{s,1} = \frac{\varepsilon_{c,1}^{bot} \cdot (y_{n.a.} - a_1)}{y_{n.a.}}; \quad (2.68)$$

$$\varepsilon_{s,2} = \frac{\varepsilon_{c,1}^{bot} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 - a_2 - y_{n.a.})}{y_{n.a.}}. \quad (2.69)$$

Pagal normalinių įtempių atstojamąsias (2.8 pav., a) galima sudaryti pusiausvyros apie neutraliąją ašį lygtį $\int_A \sigma_i dA = 0$:

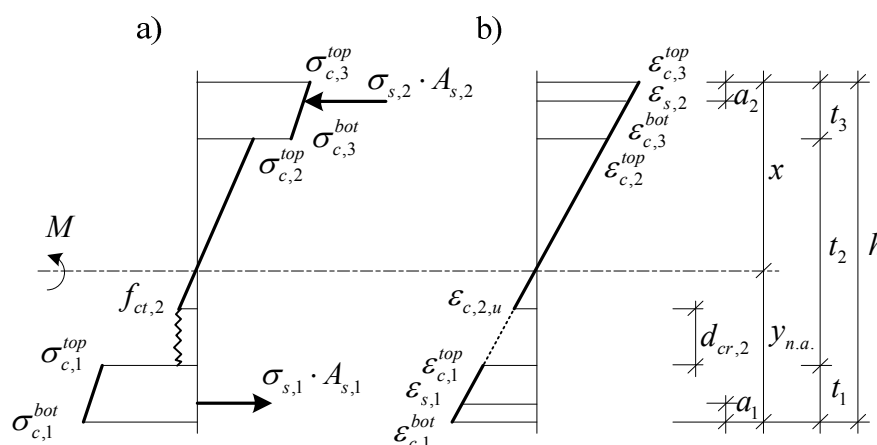
$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c,3}^{bot} + \sigma_{c,3}^{top}) \cdot t_3 \cdot b_3 + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{c,2}^{top} \cdot (t_1 + t_2 - y_{n.a.}) \cdot b_2 + A_{s,2} \cdot \sigma_{s,2} - \\ & \frac{1}{2} \cdot \sigma_{c,2}^{bot} \cdot (y_{n.a.} - t_1) \cdot b_2 - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c,1}^{bot} + \sigma_{c,1}^{top}) \cdot t_1 \cdot b_1 - A_{s,1} \cdot \sigma_{s,1} = 0. \end{aligned} \quad (2.70)$$

Deformacijų reikšmes iš (2.64–2.69) lygčių įrašius į normalinių įtempių lygtis (2.56–2.63), o gautas reikšmes įrašius į pusiausvyros lygtį (2.70) bei atlikus matematinius pertvarkymus, gaunama lygtis neutraliosios ašies padėties nustatymui:

$$\begin{aligned} & [E_{c,2} \cdot b_2 \cdot (1 - \nu_2)] \cdot y_{n.a.}^2 + \\ & [2 \cdot (-E_{c,3} \cdot t_3 \cdot b_3 - E_{c,2} \cdot b_2 \cdot (t_1 \cdot (1 - \nu_2) + t_2)) - E_{c,1} \cdot t_1 \cdot b_1 \cdot \nu_1 - E_{s,1} \cdot A_{s,1} - E_{s,2} \cdot A_{s,2}] \cdot y_{n.a.} + \\ & [E_{c,3} \cdot t_3 \cdot b_3 \cdot (2 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2 + t_3) + E_{c,2} \cdot b_2 \cdot (t_1^2 \cdot (1 - \nu_2) + t_2^2 + 2 \cdot t_1 \cdot t_2) + E_{c,1} \cdot t_1^2 \cdot b_1 \cdot \nu_1 + \\ & 2 \cdot E_{s,1} \cdot A_{s,1} \cdot a_1 + 2 \cdot E_{s,2} \cdot A_{s,2} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 - a_2)] = 0. \end{aligned} \quad (2.71)$$

Gauta lygtis (2.71) sprendžiama kaip kvadratinė lygtis $a \cdot y_{n.a.}^2 + b \cdot y_{n.a.} + c = 0$, kurios diskriminantas $D = b^2 - 4 \cdot a \cdot c$, o sprendiniai yra du: $y_{n.a.} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2 \cdot a}$. Tik vienas iš šių sprendinių yra teigiamas, mažesnis už trisluoksniu elemento skerspjūvio aukštį dydis. Šis sprendinys parodo atstumą nuo lenkiamo elemento apačios iki neutraliosios ašies $y_{n.a.}$ (2.8 pav.). Kitas sprendinys visada gaunamas neigiamas arba didesnis už skerspjūvio aukštį, todėl atmetamas kaip netinkamas.

Tuo atveju, kai lenkiamo trisluoksniu elemento viduriniajame sluoksnyje apatiniame krašte betono ribinės tempimo deformacijos yra pasiekiamos anksčiau negu labiau tempiamajame apatiniame sluoksnyje – viduriniajame sluoksnyje atsiranda plyšys ir tuo pačiu pasikeičia neutralios ašies apskaičiavimo schema (2.9 pav.).



2.9 pav. Skaičiuojamoji schema neutraliosios ašies padėčiai apskaičiuoti (kai viduriniajame sluoksnyje yra plyšys): a – įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Formulė neutraliosios ašies padėčiai apskaičiuoti visais keturiais labiausiai tikėtiniais įtempių ir deformacijų būvio skerspjūvyje atvejais (2.2 pav.) yra gaunama tuo pačiu principu, kaip ir aukščiau aprašytu atveju. Todėl pilnas neutralios ašies padėčiai nustatyti reikalingos formulės išvedimas disertacijoje pateiktas tik vienai skaičiuojamajai schemai – kai visi sluoksniai yra nesupleišę (2.8 pav.). Kitiems trims skaičiavimo atvejams pateikiamos tik skaičiuojamosios schemas ir formulės, kurios skiriasi nuo prieš tai aprašyto atvejo.

Skaičiuojant pagal 2.9 paveiksle pavaizduotą skaičiuojamąją schemą reikia nustatyti ne tik neutraliosios ašies padėtį, bet ir plyšio viduriniajame sluoksnyje gylį $d_{cr,2}$. Įtempiai šiuo

atveju skaičiuojami analogiškai prieš tai aprašytam atvejui, tačiau įtempiai viduriniojo sluoksnio apačioje lygūs nuliui, o įtempiai ties plyšio viršūne lygūs sluoksnio betono tempiamajam stipriui $f_{ct,2}$:

$$\sigma_{c,2}^{bot} = 0; \quad (2.72)$$

$$\sigma_{c,2} = \varepsilon_{c,2,u} \cdot E_{c,2} \cdot \nu_2 = f_{ct,2}. \quad (2.73)$$

Deformacijos taip pat, analogiškai prieš tai aprašytam atvejui, išreiškiamos per apatinio trisluoksnio elemento krašto deformacijas, tačiau tempiamojo betono deformacijos ties plyšio viduriniajame sluoksnyje viršūne pasiekia ribinę reikšmę:

$$\varepsilon_{c,2,u} = \frac{\varepsilon_{c,1}^{bot} \cdot (y_{n.a.} - t_1 - d_{cr,2})}{y_{n.a.}}; \quad (2.74)$$

Pusiausvyros lygtyje eliminuojama supleišėjusi viduriniojo sluoksnio dalis:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c,3}^{bot} + \sigma_{c,3}^{top}) \cdot t_3 \cdot b_3 + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{c,2}^{top} \cdot (t_1 + t_2 - y_{n.a.}) \cdot b_2 + A_{s,2} \cdot \sigma_{s,2} - \\ & \frac{1}{2} \cdot \sigma_{c,2} \cdot (y_{n.a.} - t_1 - d_{cr,2}) \cdot b_2 - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c,1}^{bot} + \sigma_{c,1}^{top}) \cdot t_1 \cdot b_1 - A_{s,1} \cdot \sigma_{s,1} = 0. \end{aligned} \quad (2.75)$$

Pagal įtempių, deformacijų ir pusiausvyros lygtis galima gauti neutralios ašies padėties nustatymo lygtį:

$$\begin{aligned} & [E_{c,2} \cdot b_2 \cdot (1 - \nu_2)] \cdot y_{n.a.}^2 + \\ & [2 \cdot (-E_{c,3} \cdot t_3 \cdot b_3 - E_{c,2} \cdot b_2 \cdot (t_1 \cdot (1 - \nu_2) + t_2 - d_{cr,2} \cdot \nu_2) - \\ & E_{c,1} \cdot t_1 \cdot b_1 \cdot \nu_1 - E_{s,1} \cdot A_{s,1} - E_{s,2} \cdot A_{s,2})] \cdot y_{n.a.} + \\ & [E_{c,3} \cdot t_3 \cdot b_3 \cdot (2 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2 + t_3) + E_{c,2} \cdot b_2 \cdot ((t_1 + t_2)^2 - \nu_2 \cdot (t_1 + d_{cr,2})^2) + \\ & E_{c,1} \cdot t_1^2 \cdot b_1 \cdot \nu_1 + 2 \cdot E_{s,1} \cdot A_{s,1} \cdot a_1 + 2 \cdot E_{s,2} \cdot A_{s,2} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 - a_2)] = 0. \end{aligned} \quad (2.76)$$

Šiuo atveju taip pat gaunama kvadratinė lygtis, kurios tik vienas sprendinys yra teigiamas, mažesnis už trisluoksniu elemento skerspjūvio aukštį dydis. Šis sprendinys parodo atstumą nuo lenkiamo elemento apačios iki neutraliosios ašies $y_{n.a.}$ (2.9 pav.).

Lygtį plyšio viduriniajame sluoksnyje gylio nustatymui galima užrašyti pasinaudojus prielaida, kad deformacijų pasiskirstymo visame skerspjūvyje diagrama yra tiesialinijinė. Tada pagal 2.9 paveikslą, b ir apatinio bei viduriniojo sluoksnių betono ribines deformacijas:

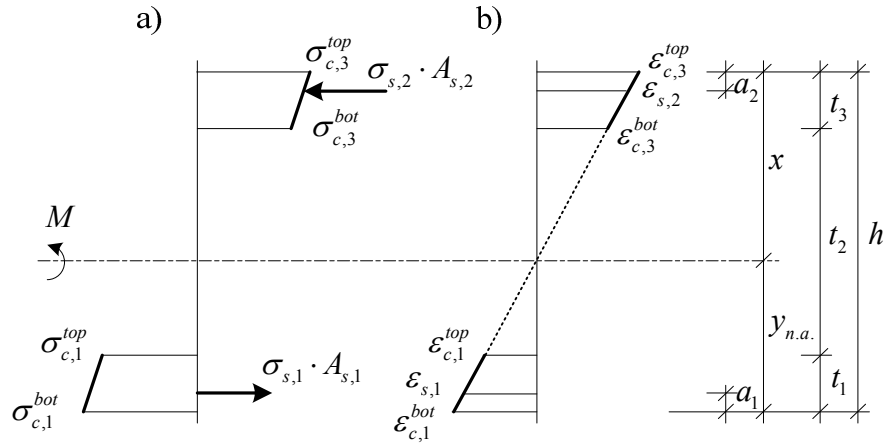
$$d_{cr,2} = y_{n.a.} - t_1 - \frac{\varepsilon_{c,2,u} \cdot y_{n.a.}}{\varepsilon_{c,1,u}}. \quad (2.77)$$

Ribinės tempiamojo betono deformacijos nustatomos pagal Huko dėsnį (įvertinant tamprumo koeficientą):

$$\varepsilon_{c,i,u} = \frac{f_{ct,i}}{E_{c,i} \cdot \nu_i}. \quad (2.78)$$

Tačiau tiek neutraliosios ašies padėties nustatymo lygtis (2.76), tiek plyšio gylio viduriniajame sluoksnyje nustatymo lygtis (2.77) turi po du nežinomuosius ir yra tarpusavyje susijusios: neutraliosios ašies padėtis priklauso nuo plyšio gylio viduriniajame sluoksnyje, o plyšio gylis viduriniajame sluoksnyje priklauso nuo neutraliosios ašies padėties. Todėl šios lygtys turėtų būti sprendžiamos iteracijų būdu. Pirmiausia reikia apskaičiuoti neutraliosios ašies padėtį pagal (2.71) lygtį, kuri skirta nesupleišėjusias skerspjūviui. Tada, žinant pradinę neutraliosios ašies padėtį, pagal (2.77) lygtį galima apskaičiuoti pradinį plyšio viduriniajame sluoksnyje gylį. Vėliau gauta plyšio gylio reikšmė naudojama skaičiuojant neutraliosios ašies padėtį pagal (2.76) lygtį. Tada reikėtų patikslinti neutraliosios ašies padėtį bei plyšio gylį atliekant antrą skaičiavimą pagal (2.76) ir (2.77) lygtis iteraciją. Atlikti teoriniai skaičiavimai parodė, kad užtenka dviejų skaičiavimo iteracijų, nes trečios ir vėlesnių iteracijų metu gauti skaičiavimų rezultatai beveik nesiskiria nuo reikšmių, gautų po dviejų skaičiavimo iteracijų.

Tuo atveju, kai dėl išankstinių susitraukimo deformacijų arba gamybos technologijos ypatumų viduriniajame sluoksnyje yra plyšiai (arba tarpai) per visą sluoksniu aukštį, skaičiuojamoji schema neutraliosios ašies padėčiai nustatyti turi būti tokia kaip parodyta 2.10 paveiksle.



2.10 pav. Skaičiuojamoji schema neutraliosios ašies padėčiai apskaičiuoti (kai viduriniajame sluoksnyje yra plyšys per visą sluoksnio aukštį): a – įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Šiuo atveju laikoma, kad trisluoksniame elemente lenkimo momentą perima tik išoriniai sluoksniai, todėl įtempiai viduriniajame supleišėjusiame sluoksnyje lygūs nuliui:

$$\sigma_{c,2}^{bot} = \sigma_{c,2}^{top} = 0. \quad (2.79)$$

Tada pusiausvyros lygtis:

$$\frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c,3}^{bot} + \sigma_{c,3}^{top}) \cdot t_3 \cdot b_3 + A_{s,2} \cdot \sigma_{s,2} - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c,1}^{bot} + \sigma_{c,1}^{top}) \cdot t_1 \cdot b_1 - A_{s,1} \cdot \sigma_{s,1} = 0. \quad (2.80)$$

Atlikus matematinius pertvarkymus gaunama neutraliosios ašies padėties nustatymo lygtis:

$$y_{n.a.} = [E_{c,3} \cdot t_3 \cdot b_3 \cdot (2 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2 + t_3) + 2 \cdot E_{s,2} \cdot A_{s,2} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 - a_2) - E_{c,1} \cdot t_1^2 \cdot b_1 \cdot \nu_1 - 2 \cdot E_{s,1} \cdot A_{s,1} \cdot a_1] / [2 \cdot (E_{c,3} \cdot t_3 \cdot b_3 + E_{s,2} \cdot A_{s,2} + E_{c,1} \cdot t_1 \cdot b_1 \cdot \nu_1 + E_{s,1} \cdot A_{s,1})]. \quad (2.81)$$

Šiuo atveju (2.81) lygtyje galima pažymėti $B_i = E_i \cdot t_i \cdot b_i$. Tada neutraliosios ašies padėties nustatymo lygtį galima užrašyti paprastesne forma:

$$y_{n.a.} = \frac{B_{c,3} \cdot (2 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2 + t_3) + 2 \cdot B_{s,2} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 - a_2) - B_{c,1} \cdot t_1 \cdot v_1 - 2 \cdot B_{s,1} \cdot a_1}{2 \cdot (B_{c,3} + B_{s,2} + B_{c,1} \cdot v_1 + B_{s,1})}. \quad (2.82)$$

Nagrinėjant skaičiuojamąją schemą su visiškai supleišėjusiu viduriniu sluoksniu (2.10 pav.) reikia įvertinti ir galimybę, kad plyšys gniuždomojoje viduriniojo sluoksnio zonoje dėl veikiančio lenkimo momento užsivers. Plyšys viduriniajame sluoksnyje dėl veikiančio lenkimo momento užsivers ir įsijungs į bendrą sluoksniuotojo elemento darbą tuo atveju, kai viduriniojo sluoksnio gniuždomosios dalies linijinės deformacijos bus didesnės arba lygios plyšio pločiui:

$$w_{cr,2} \leq \Delta l_2^{top} = \varepsilon_{c,2}^{top} \cdot l_{cr,2}; \quad (2.83)$$

čia: $w_{cr,2}$ – plyšio viduriniajame sluoksnyje plotis;

Δl_2^{top} – viduriniojo sluoksnio viršutinio gniuždomojo krašto linijinės deformacijos;

$\varepsilon_{c,2}^{top}$ – viduriniojo sluoksnio viršutinio krašto santykinės deformacijos;

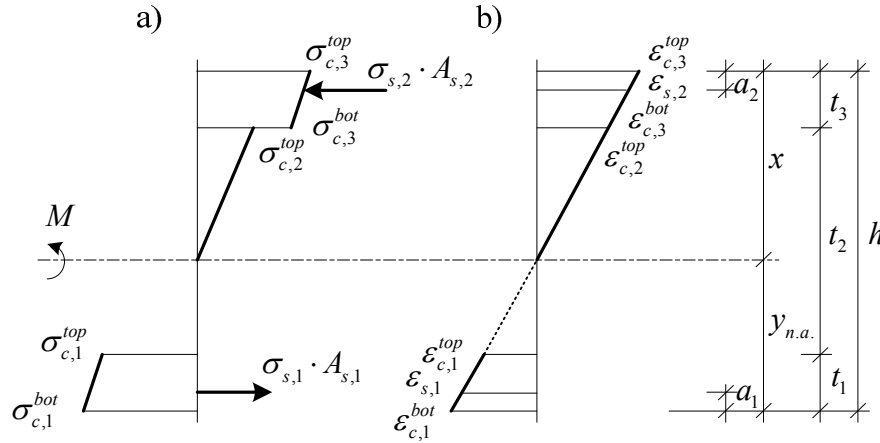
$l_{cr,2}$ – atstumas tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje.

Tuo atveju, kai galioja (2.83) sąlyga, skaičiuojamoji schema neutraliosios ašies padėties nustatymui turi būti tokia, kaip parodyta 2.11 paveiksle. Šiuo atveju veikiant lenkimo momentui plyšys užsiveria tik gniuždomojoje viduriniojo sluoksnio dalyje, tačiau tempiamojoje dalyje įtempiai lieka lygūs nuliui:

$$\sigma_{c,2}^{bot} = 0. \quad (2.84)$$

Tada pusiausvyros lygtis:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c,3}^{bot} + \sigma_{c,3}^{top}) \cdot t_3 \cdot b_3 + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{c,2}^{top} \cdot (t_1 + t_2 - y_{n.a.}) \cdot b_2 + A_{s,2} \cdot \sigma_{s,2} - \\ & - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{c,1}^{bot} + \sigma_{c,1}^{top}) \cdot t_1 \cdot b_1 - A_{s,1} \cdot \sigma_{s,1} = 0. \end{aligned} \quad (2.85)$$



2.11 pav. Skaičiuojamoji schema neutraliosios ašies padėčiai apskaičiuoti (kai viduriniajame sluoksnyje plyšys gniuždomojoje zonoje užsiveria nuo veikiančio lenkimo momento): a – įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Lygtis neutraliosios ašies padėties nustatymui sudaroma analogiškai prieš tai nagrinėtiems atvejams:

$$\begin{aligned} & [E_{c,2} \cdot b_2] \cdot y_{n.a.}^2 + \\ & [2 \cdot (-E_{c,3} \cdot t_3 \cdot b_3 - E_{c,2} \cdot b_2 \cdot (t_1 + t_2) - E_{c,1} \cdot t_1 \cdot b_1 \cdot \nu_1 - E_{s,1} \cdot A_{s,1} - E_{s,2} \cdot A_{s,2})] \cdot y_{n.a.} + \\ & [E_{c,3} \cdot t_3 \cdot b_3 \cdot (2 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2 + t_3) + E_{c,2} \cdot b_2 \cdot (t_1 + t_2)^2 + E_{c,1} \cdot t_1^2 \cdot b_1 \cdot \nu_1 + \\ & 2 \cdot E_{s,1} \cdot A_{s,1} \cdot a_1 + 2 \cdot E_{s,2} \cdot A_{s,2} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 - a_2)] = 0. \end{aligned} \quad (2.86)$$

(2.86) lygtis turi būti sprendžiama kaip kvadratinė lygtis (taip pat, kaip (2.76) lygtis). Tačiau šiuo atveju plyšio gylis viduriniajame sluoksnyje tiesiog bus lygus viduriniojo sluoksnio gniuždomosios dalies aukščiui:

$$d_{cr,2} = y_{n.a.} - t_1. \quad (2.87)$$

Aukščiau pateiktos neutraliosios ašies padėties nustatymo lygtys ((2.71), (2.76), (2.81) ir (2.86)) yra artimos kito autoriaus pasiūlymams [13, 14], tačiau jos papildomai leidžia įvertinti tempiamojo betono deformacinės savybės bei armatūros įtaką bendram lenkiamo sluoksniuotojo elemento darbui.

Skaičiuojant lenkiamųjų trisluoksnių konstrukcijų laikomąją galią, neutraliosios ašies padėtį galima nustatyti pasinaudojus tomis pačiomis prielaidomis. Tačiau šiuo atveju galima daryti papildomą prielaidą, kad įtempiai labiausiai gniuždomajame betono taške ir įtempiai tempiamojoje armatūroje pasiekia savo ribines reikšmes, t.y. $\sigma_{c,3}^{top} = f_{c,3}$ ir $\sigma_{s,1} = f_{y,1}$. Tada pasinaudojus trikampių panašumo taisykle ir prielaida apie tiesialinijinę deformacijų pasiskirstymą, galima užrašyti lygtį neutraliosios ašies padėties nustatymui:

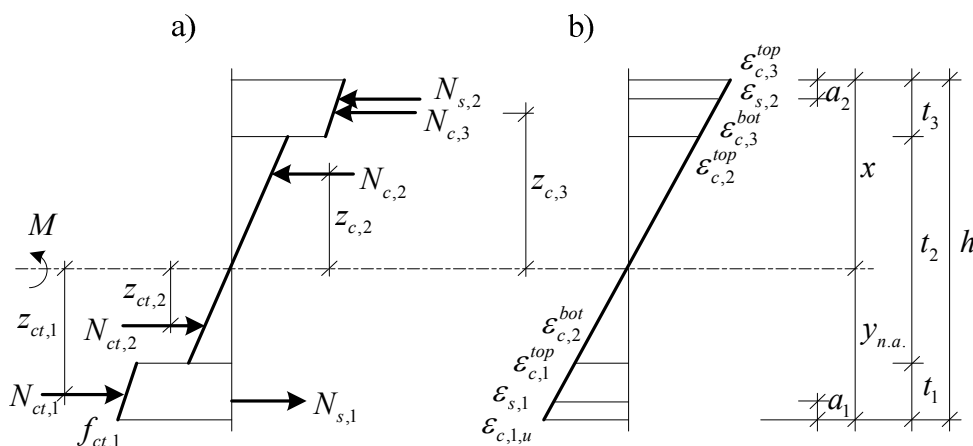
$$y_{n.a.} = \frac{(f_{y,1} + \sigma_{sh,s,1}) \cdot E_{c,3} \cdot (t_1 + t_2 + t_3) + (f_{c,3} - \sigma_{sh,c,3}^{top}) \cdot E_{s,1} \cdot a_1}{(f_{y,1} + \sigma_{sh,s,1}) \cdot E_{c,3} + (f_{c,3} - \sigma_{sh,c,3}^{top}) \cdot E_{s,1}}. \quad (2.88)$$

Jei yra žinomi išankstiniai įtempiai tempiamojoje armatūroje bei gniuždomajame betone – juos taip pat galima įvertinti sumažinant arba padidinant (priklausomai nuo to, ar išankstinių įtempių veikimo kryptis sutampa su lenkimo momento sukeltų įtempių veikimo kryptimi) atitinkamos medžiagos stiprį. (2.88) lygtyje išankstiniai susitraukimo įtempiai įvertinti su sąlyga, kad tiek armatūra, tiek betonas dėl susitraukimo buvo gniuždomi. Jei išankstinių įtempių veikimo kryptis priešinga – atitinkamai turėtų būti pakoreguota ir neutraliosios ašies padėties nustatymo lygtis. Jei išankstinių įtempių trisluoksniame lenkiamame elemente nėra (arba jie nežinomi) – iš (2.88) lygties reikia pašalinti $\sigma_{sh,i}$ narius.

2.6. Supleišėjimo momento nustatymas

Žinant pradinius dėl susitraukimo deformacijų atsiradusius įtempius ir neutraliosios ašies padėtį, galima apskaičiuoti lenkiamo trisluoksnių elemento apatinio sluoksnių supleišėjimo momentą bei elemento laikomąją galią. Skaičiuojant apatinio tempiamojo sluoksnių supleišėjimo momentą remiamasi tomis pačiomis prielaidomis, kaip ir nustatant neutraliosios ašies padėtį. Betonai apatiniame sluoksnyje supleišės, jei tempimo įtempiai

labiausiai tempiamajame sluoksniu krašte bus didesni už betono tempiamąjį stiprį $f_{ct,1}$. Todėl skaičiuojant supleišėjimo momentą laikoma, kad labiausiai tempiamajame lenkiamo trisluoksniu elemento krašte betono įtempiai yra lygūs tempiamajam stipriui, t.y. $\sigma_{c,1}^{bot} = f_{ct,1}$ ir $\varepsilon_{c,1}^{bot} = \varepsilon_{c,1,u}$. Kaip ir neutraliosios ašies padėties nustatyme, skaičiuojant apatinio sluoksniu supleišėjimo momentą nagrinėjami keturi labiausiai tikėtini įtempių ir deformacijų būvio skerspjūvyje atvejai.



2.12 pav. Skaičiuojamoji schema supleišėjimo momentui apskaičiuoti (kai dirba visi sluoksniu ir jie nesupleišę): a – skerspjūvyje veikiančių įtempių pasiskirstymas bei jų atstojamosios ašinės jėgos; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Tuo atveju, kai lenkiamame trisluoksniame elemente dirba ir yra nesupleišę visi sluoksniu, skaičiuojamoji schema supleišėjimo momento nustatymui bus tokia, kaip pavaizduota 2.12 paveiksle. Pasinaudojus 2.2 skyriuje pateiktomis prielaidomis, geometrine trikampių panašumo taisykle ir laikant, kad labiausiai tempiamojo elemento krašto deformacijos pasiekia ribinę reikšmę (2.12 pav.), galima užrašyti lygtis visų skerspjūvio charakteringų taškų (sluoksniu kraštuose ir armatūroje) santykinėms deformacijoms apskaičiuoti:

$$\varepsilon_{c,3}^{top} = \varepsilon_{c,1,u} \cdot \frac{x}{y_{n.a.}}; \quad (2.89)$$

$$\varepsilon_{c,3}^{bot} = \varepsilon_{c,2}^{top} = \varepsilon_{c,1,u} \cdot \frac{x - t_3}{y_{n.a.}}; \quad (2.90)$$

$$\varepsilon_{c,2}^{bot} = \varepsilon_{c,1}^{top} = \varepsilon_{c,1,u} \cdot \frac{y_{n.a.} - t_1}{y_{n.a.}}; \quad (2.91)$$

$$\varepsilon_{c,1}^{bot} = \varepsilon_{c,1,u} = \frac{f_{ct,1}}{E_{c,1} \cdot \nu_1}; \quad (2.92)$$

$$\varepsilon_{s,1} = \varepsilon_{c,1,u} \cdot \frac{y_{n.a.} - a_1}{y_{n.a.}}; \quad (2.93)$$

$$\varepsilon_{s,2} = \varepsilon_{c,1,u} \cdot \frac{x - a_2}{y_{n.a.}}. \quad (2.94)$$

Žinant santykinės deformacijas, visame skerspjūvyje galima nustatyti įtempius, atsiradusius dėl veikiančio lenkimo momento:

$$\sigma_{c,3}^{top} = \frac{\varepsilon_{c,1,u} \cdot x}{y_{n.a.}} \cdot E_{c,3}; \quad (2.95)$$

$$\sigma_{c,3}^{bot} = \frac{\varepsilon_{c,1,u} \cdot (x - t_3)}{y_{n.a.}} \cdot E_{c,3}; \quad (2.96)$$

$$\sigma_{c,2}^{top} = \frac{\varepsilon_{c,1,u} \cdot (x - t_3)}{y_{n.a.}} \cdot E_{c,2}; \quad (2.97)$$

$$\sigma_{c,2}^{bot} = \frac{\varepsilon_{c,1,u} \cdot (y_{n.a.} - t_1)}{y_{n.a.}} \cdot E_{c,2} \cdot \nu_2; \quad (2.98)$$

$$\sigma_{c,1}^{top} = \frac{\varepsilon_{c,1,u} \cdot (y_{n.a.} - t_1)}{y_{n.a.}} \cdot E_{c,1} \cdot \nu_1; \quad (2.99)$$

$$\sigma_{c,1}^{bot} = f_{ct,1}; \quad (2.100)$$

$$\sigma_{s,1} = \frac{\varepsilon_{c,1,u} \cdot (y_{n.a.} - a_1)}{y_{n.a.}} \cdot E_{s,1}; \quad (2.101)$$

$$\sigma_{s,2} = \frac{\varepsilon_{c,1,u} \cdot (x - a_2)}{y_{n.a.}} \cdot E_{s,2}. \quad (2.102)$$

Tačiau pagal 2.12 paveikslą, a skaičiuojant skerspjūvyje veikiančių tempiančių ir gniuždančių įtempių atstojamąsias ašines jėgas, reikia įvertinti ne tik įtempius, atsiradusius dėl veikiančio lenkimo momento, bet ir pradinius įtempius $\sigma_{sh,i}$, atsiradusius skerspjūvyje dėl

betono susitraukimo deformacijų. Priklausomai nuo pradinių įtempių ženklo, jie yra pridedami arba atimami iš įtempių, atsiradusių dėl lenkimo momento:

$$N_{c,3} = \frac{(\sigma_{c,3}^{bot} + \sigma_{sh,c,3}^{bot}) + (\sigma_{c,3}^{top} + \sigma_{sh,c,3}^{top})}{2} \cdot b_3 \cdot t_3; \quad (2.103)$$

$$N_{c,2} = \frac{(\sigma_{c,2}^{top} - \sigma_{sh,c,2}^{top})}{2} \cdot (x - t_3) \cdot b_2; \quad (2.104)$$

$$N_{ct,2} = \frac{(\sigma_{c,2}^{bot} + \sigma_{sh,c,2}^{bot})}{2} \cdot (y_{n.a.} - t_1) \cdot b_2; \quad (2.105)$$

$$N_{ct,1} = \frac{(\sigma_{c,1}^{bot} - \sigma_{sh,c,1}^{bot}) + (\sigma_{c,1}^{top} - \sigma_{sh,c,1}^{top})}{2} \cdot b_1 \cdot t_1; \quad (2.106)$$

$$N_{s,1} = (\sigma_{s,1} - \sigma_{sh,s,1}) \cdot A_{s,1}; \quad (2.107)$$

$$N_{s,2} = (\sigma_{s,2} + \sigma_{sh,s,2}) \cdot A_{s,2}. \quad (2.108)$$

Norint nustatyti kiekvieno sluoksnio atlaikomą lenkimo momentą taip pat reikia žinoti veikiančių įtempių atstojamųjų ašinių jėgų pridėjimo skerspjūvyje taškus (2.12 pav., a):

$$z_{c,3} = x - \frac{t_3 \cdot (2 \cdot (\sigma_{c,3}^{bot} + \sigma_{sh,c,3}^{bot}) + (\sigma_{c,3}^{top} + \sigma_{sh,c,3}^{top}))}{3 \cdot ((\sigma_{c,3}^{bot} + \sigma_{sh,c,3}^{bot}) + (\sigma_{c,3}^{top} + \sigma_{sh,c,3}^{top}))}; \quad (2.109)$$

$$z_{c,2} = \frac{2 \cdot (x - t_3)}{3}; \quad (2.110)$$

$$z_{ct,2} = \frac{2 \cdot (y_{n.a.} - t_1)}{3}; \quad (2.111)$$

$$z_{ct,1} = y_{n.a.} - \frac{t_1 \cdot (2 \cdot (\sigma_{c,1}^{top} - \sigma_{sh,c,1}^{top}) + (\sigma_{c,1}^{bot} - \sigma_{sh,c,1}^{bot}))}{3 \cdot ((\sigma_{c,1}^{top} - \sigma_{sh,c,1}^{top}) + (\sigma_{c,1}^{bot} - \sigma_{sh,c,1}^{bot}))}. \quad (2.112)$$

Žinant skerspjūvyje veikiančias atstojamąsias ašines jėgas ir jų pridėjimo taškus, galima apskaičiuoti kiekvieno sluoksnio betono ir armatūros atlaikomus lenkimo momentus (apie neutraliąją ašį):

$$M_{c,i} = N_{c,i} \cdot z_{c,i}; \quad (2.113)$$

$$M_{ct,i} = N_{ct,i} \cdot z_{ct,i}; \quad (2.114)$$

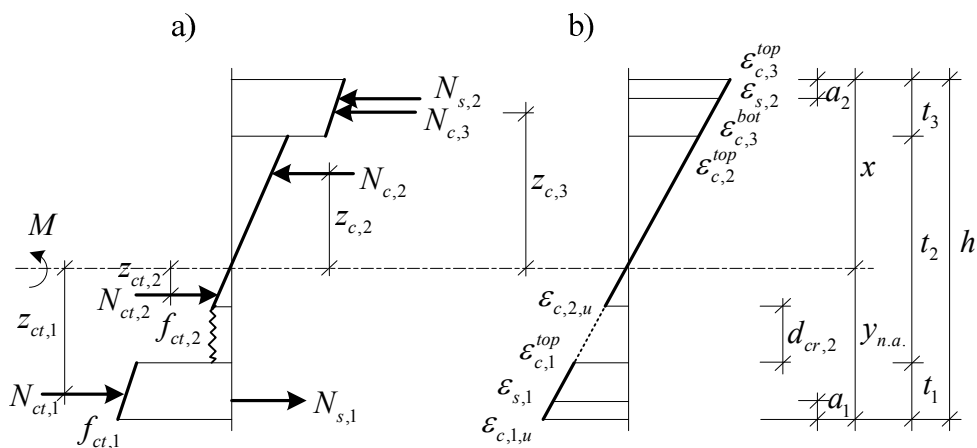
$$M_{s,1} = N_{s,1} \cdot (y_{n.a.} - a_1); \quad (2.115)$$

$$M_{s,2} = N_{s,2} \cdot (x - a_2). \quad (2.116)$$

Lenkiamo trisluoksnio elemento apatinio sluoksnio supleišėjimo momentas yra lygus visų betono sluoksnių ir armatūros momentų apie neutraliąją ašį, sumai:

$$M_{cr,1} \leq \sum(M_{c,i}) + \sum(M_{ct,i}) + \sum(M_{s,i}). \quad (2.117)$$

Tuo atveju, kai dėl pradinių įtempių nuo betono susitraukimo deformacijų, arba dėl įtempių nuo veikiančio lenkimo momento, ar jų sumos, viduriniajame sluoksnyje atsiranda plyšys, apatinio sluoksnio supleišėjimo momentą reikia skaičiuoti pagal skaičiuojamąją schemą, pavaizduotą 2.13 paveiksle.



2.13 pav. Skaičiuojamoji schema supleišėjimo momentui apskaičiuoti (kai viduriniajame sluoksnyje yra plyšys): a – skerspjūvyje veikiančių įtempių pasiskirstymas bei jų atstojamosios ašinės jėgos; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Visais keturiais labiausiai tikėtiniais įtempių ir deformacijų būvio skerspjūvyje atvejais apatinio sluoksnio supleišėjimo momento apskaičiavimo principas yra tas pats. Todėl pilnas supleišėjimo momento apskaičiavimo formulių sąrašas disertacijoje pateiktas tik

skaičiuojamajai schemai, kai visi sluoksniai yra nesupleišę (2.12 pav.). Kitiems trims skaičiavimo atvejams pateikiamos tik skaičiuojamosios schemos ir formulės, kurios skiriasi nuo prieš tai aprašyto atvejo.

Kai viduriniajame sluoksnyje yra plyšys, santykinės deformacijos viduriniojo sluoksnio taške ties plyšio viršūne yra lygios ribinėms tempiamojo betono deformacijoms:

$$\varepsilon_{c,2} = \varepsilon_{c,2,u} = \frac{f_{ct,2}}{E_{c,2} \cdot \nu_2}. \quad (2.118)$$

Todėl įtempiai ties plyšio viršūne taip pat lygūs tempiamojo betono stipriui:

$$\sigma_{c,2} = f_{ct,2}. \quad (2.119)$$

Viduriniojo sluoksnio tempiamojoje (nesupleišėjusioje) zonoje veikiančių įtempių atstojamoji ašinė jėga:

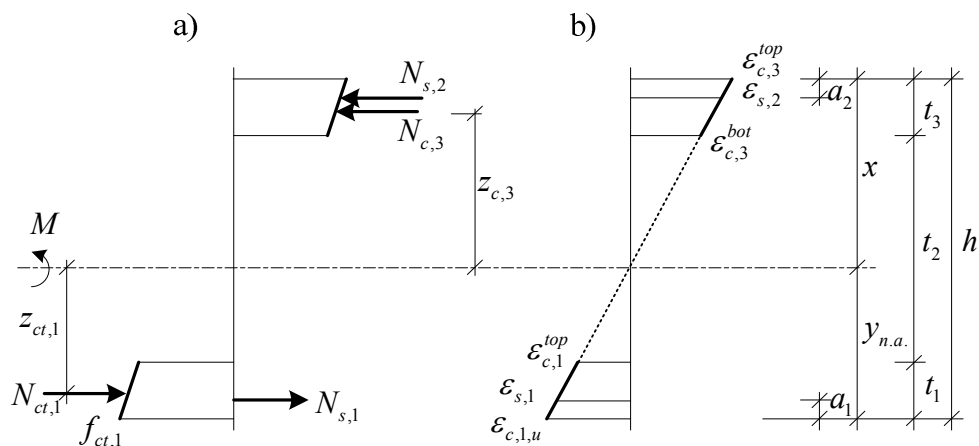
$$N_{ct,2} = \frac{f_{ct,2}}{2} \cdot (y_{n.a.} - t_1 - d_{cr,2}) \cdot b_2. \quad (2.120)$$

Šios atstojamosios ašinės jėgos pridėjimo taško skerspjūvyje koordinatė (2.13 pav., a):

$$z_{ct,2} = \frac{2 \cdot (y_{n.a.} - t_1 - d_{cr,2})}{3}. \quad (2.121)$$

Kiekvieno sluoksnio betono ir armatūros atlaikomi lenkimo momentai (apie neutraliąją ašį) ir galutinis apatinio sluoksnio supleišėjimo momentas apskaičiuojamas pagal analogiškas prieš tai aprašytam atvejui formules (2.113–2.117).

Tuo atveju, kai vidurinis lenkiamo trisluoksnio elemento sluoksnis yra visiškai supleišjęs, apatinio tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentas turi būti skaičiuojama pagal skaičiuojamąją schemą, pateiktą 2.14 paveiksle.



2.14 pav. Skaičiuojamoji schema supleišėjimo momentui apskaičiuoti (kai viduriniajame sluoksnyje yra plyšys per visą sluoksnio aukštį): a – skerspjūvyje veikiančių įtempių pasiskirstymas bei jų atstojamosios ašinės jėgos; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Šiuo atveju įtempiai viduriniajame lenkiamo trisluoksnio elemento sluoksnyje (tiek viršutiniame, tiek apatiniame kraštuose) lygūs nuliui:

$$\sigma_{c,2}^{bot} = \sigma_{c,2}^{top} = 0. \quad (2.122)$$

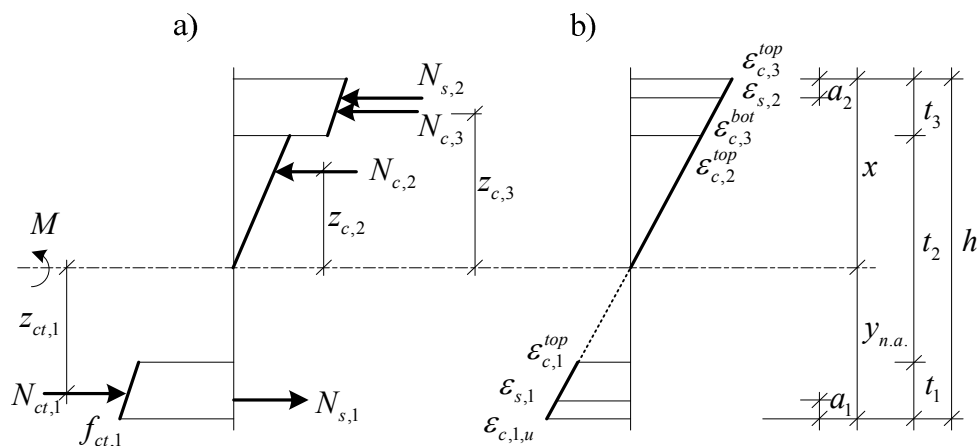
Todėl šių įtempių atstojamosios ašinės jėgos taip pat lygios nuliui:

$$N_{c,2} = N_{ct,2} = 0. \quad (2.123)$$

Supleišėjimo momentą šiuo atveju sudarys tik išorinių sluoksnių betono ir juose esančios armatūros atlaikomi lenkimo momentai apie neutraliąją ašį (2.14 pav., a). Momentus galima apskaičiuoti pagal (2.113–2.117) formules. Tada apatinio sluoksnio supleišėjimo momentas:

$$M_{cr,1} \leq M_{c,3} + M_{ct,1} + \sum (M_{s,i}). \quad (2.124)$$

Tuo atveju, kai plyšys gniuždomojoje viduriniojo sluoksnio zonoje užsiveria dėl veikiančio lenkimo momento (galiojant sąlygai (2.83)), apatinio sluoksnio supleišėjimo momentą reikėtų skaičiuoti pagal skaičiuojamąją schemą, pavaizduotą 2.15 paveiksle.



2.15 pav. Skaičiuojamoji schema supleišėjimo momentui apskaičiuoti (kai viduriniajame sluoksnyje plyšys gniuždomojoje zonoje užsiveria nuo veikiančio lenkimo momento): a – skerspjūvyje veikiančių įtempių pasiskirstymas bei jų atstojamosios ašinės jėgos; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Šiuo atveju tik tempiamosioje viduriniojo sluoksnio zonoje įtempiai lygūs nuliui:

$$\sigma_{c,2}^{bot} = 0. \quad (2.125)$$

Todėl tempiamosioje viduriniojo sluoksnio dalyje įtempių atstojamoji ašinė jėga taip pat lygi nuliui (2.15 pav., a):

$$N_{ct,2} = 0. \quad (2.126)$$

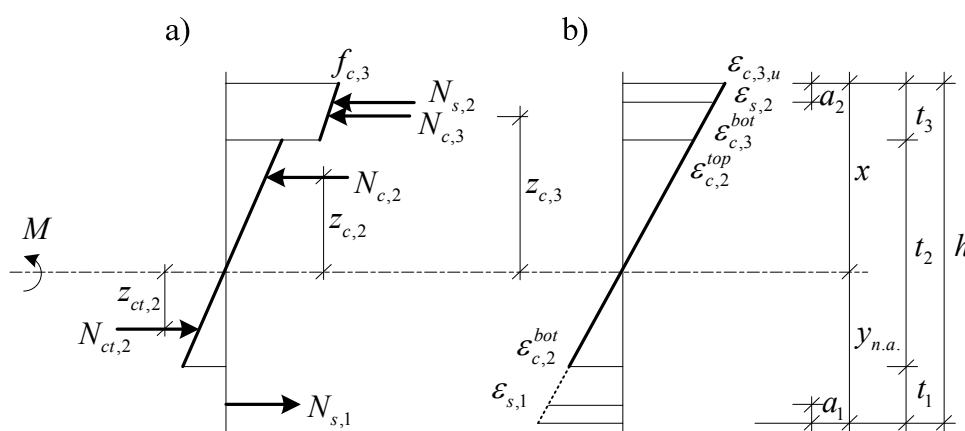
Šiuo atveju sluoksnių betono ir armatūros atlaikomi lenkimo momentai apie neutraliąją ašį gali būti apskaičiuoti pagal (2.113–2.116) formules, pateiktas prieš tai aprašytam įtempių deformacijų būvio skerspjūvyje atvejui. Apatinio sluoksnio supleišėjimo momentas gali būti apskaičiuojamas pagal (2.117) formulę, tačiau be tempiamosios viduriniojo sluoksnio betono dalies $M_{ct,2}$.

2.7. Laikomosios galios nustatymas

Skaičiuojant laikomąją lenkiamųjų trisluoksnių elementų galią, kaip ir skaičiuojant neutraliosios ašies padėtį bei supleišėjimo momentą, daromos 2.2 skyriuje aprašytos

prielaidos. Taip pat, analogiškai supleišėjimo momento skaičiavimui, nagrinėjami keturi labiausiai tikėtini lenkiamųjų trisluoksnių elementų įtempių ir deformacijų būvio atvejai. Tačiau, šiuo atveju santykinės deformacijos visame skerspjūvyje išreiškiamos ne per labiausiai tempiamojo, o pagal labiausiai gniuždomojo taško santykinės deformacijas. Skaičiuojant laikomąją galią taip pat laikoma, kad labiausiai gniuždomajame skerspjūvio taške įtempiai pasiekia gniuždomąjį betono stiprį, t.y. $\sigma_{c,3}^{top} = f_{c,3}$ ir $\varepsilon_{c,3}^{top} = \varepsilon_{c,3,u}$.

Neutraliosios ašies padėtis skaičiuojant lenkiamųjų trisluoksnių elementų laikomąją galią gali būti nustatoma pagal (2.88) formulę.



2.16 pav. Skaičiuojamoji schema laikomajai galiai apskaičiuoti (įvertinant visą viduriniojo sluoksnio darbą tiek gniuždomojoje, tiek tempiamojoje zonoje): a – skerspjūvyje veikiančių įtempių pasiskirstymas bei jų atstojamosios ašinės jėgos; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Tuo atveju, kai lenkiamame trisluoksniame elemente plyšių nėra, skaičiuojamoji schema laikomosios galios nustatymui turėtų būti tokia, kaip parodyta 2.16 paveiksle. Skaičiuojant laikomąją galią visais atvejais laikoma, kad apatiniame labiausiai tempiamajame sluoksnyje betonas yra supleišėjęs, todėl jo darbas nėra vertinamas. Naudojantis trikampių panašumo taisykle, pagal 2.12 paveikslą, b galima užrašyti lygtis santykinų deformacijų nustatymui visuose charakteringuose skerspjūvio taškuose (sluoksnių kraštuose ir ties armatūra). Visas skerspjūvio deformacijas šiuo atveju patogiausia išreikšti per labiausiai gniuždomojo elemento krašto deformacijas:

$$\varepsilon_{c,3}^{top} = \varepsilon_{c,3,u} = \frac{f_{c,3}}{E_{c,1}}; \quad (2.127)$$

$$\varepsilon_{c,3}^{bot} = \varepsilon_{c,2}^{top} = \varepsilon_{c,3,u} \cdot \frac{x - t_3}{x}; \quad (2.128)$$

$$\varepsilon_{c,2}^{bot} = \varepsilon_{c,3,u} \cdot \frac{y_{n.a.} - t_1}{x}; \quad (2.129)$$

$$\varepsilon_{s,1} = \varepsilon_{c,3,u} \cdot \frac{y_{n.a.} - a_1}{x}; \quad (2.130)$$

$$\varepsilon_{s,2} = \varepsilon_{c,3,u} \cdot \frac{x - a_2}{x}. \quad (2.131)$$

Tada skerspjūvyje nuo lenkimo momento atsiradę įtempiai gali būti apskaičiuojami pagal Huko dėsnį bei įvertinus tempiamojo betono mechanines charakteristikas:

$$\sigma_{c,3}^{top} = f_{c,3}; \quad (2.132)$$

$$\sigma_{c,3}^{bot} = \frac{\varepsilon_{c,3,u} \cdot (x - t_3)}{x} \cdot E_{c,3}; \quad (2.133)$$

$$\sigma_{c,2}^{top} = \frac{\varepsilon_{c,3,u} \cdot (x - t_3)}{x} \cdot E_{c,2}; \quad (2.134)$$

$$\sigma_{c,2}^{bot} = \frac{\varepsilon_{c,3,u} \cdot (y_{n.a.} - t_1)}{x} \cdot E_{c,2} \cdot \nu_2; \quad (2.135)$$

$$\sigma_{s,1} = \frac{\varepsilon_{c,3,u} \cdot (y_{n.a.} - a_1)}{x} \cdot E_{s,1}; \quad (2.136)$$

$$\sigma_{s,2} = \frac{\varepsilon_{c,3,u} \cdot (x - a_2)}{x} \cdot E_{s,2}. \quad (2.137)$$

Skaiciuojant skerspjūvyje veikiančių įtempių atstojamąsias ašines jėgas, kaip ir supleišėjimo momento skaičiavime, turi būti įvertinami ne tik įtempiai, atsiradę dėl lenkimo momento, bet ir pradiniai įtempiai, atsiradę dėl betono susitraukimo deformacijų. Todėl skerspjūvyje veikiančių įtempių atstojamąsias ašines jėgas ir jų pridėjimo koordinates (2.16 pav., a) galima apskaičiuoti pagal supleišėjimo momento skaičiavime pateiktas formules (2.103–2.112).

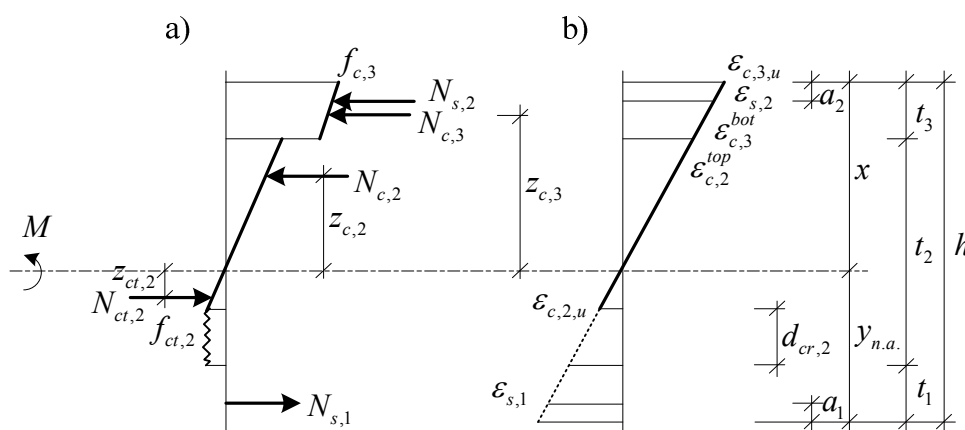
Žinant skerspjūvyje veikiančių įtempių atstojamąsias ašines jėgas bei jų pridėjimo skerspjūvyje koordinates, galima apskaičiuoti sluoksnių betono ir armatūros atlaikomus lenkimo momentus apie neutraliąją ašį (2.113–2.116).

Laikomoji trisluoksnių lenkiamo elemento galia bus lygi visų sluoksnių, išskyrus apatinį, betono ir armatūros atlaikomų lenkimo momentų (apie neutraliąją ašį) sumai:

$$M_u \leq \sum (M_{c,i}) + M_{ct,2} + \sum (M_{s,i}). \quad (2.138)$$

Kaip ir neutraliosios ašies bei supleišėjimo momento skaičiavime, visais keturiais labiausiai tikėtinais įtempių ir deformacijų būvio skerspjūvyje atvejais laikomosios galios apskaičiavimo principas yra tas pats. Todėl pilnas laikomosios galios apskaičiavimo formulų sąrašas disertacijoje pateiktas tik skaičiuojamajai schemai, kai visi sluoksniai yra nesupleišę (2.16 pav.). Kitiems trims skaičiavimo atvejams pateikiamos tik skaičiuojamosios schemas ir formulės, kurios skiriasi nuo prieš tai aprašyto atvejo.

Tuo atveju, kai vidurinis lenkiamo trisluoksnių elemento sluoksnis supleišjęs, laikomosios galios nustatymui turi būti naudojama 2.17 paveiksle pavaizduota skaičiuojamoji schema. Šiuo atveju santykinės deformacijos ties plyšio viduriniajame sluoksnyje viršūnė lygios ribinėms tempiamojo betono deformacijoms (2.118). Todėl įtempiai ties plyšio viršūnė analogiškai lygūs tempiamojo betono stipriui (2.119).



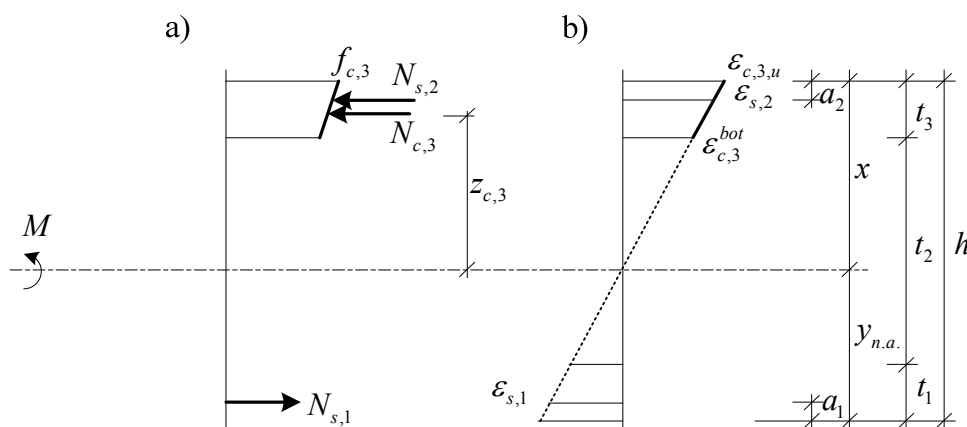
2.17 pav. Skaičiuojamoji schema laikomajai galiai apskaičiuoti (įvertinant viduriniojo sluoksnių darbinę zonoje ir nesupleišusią dalį tempiamojoje zonoje): a – skerspjūvyje veikiančių įtempių pasiskirstymas bei jų atstojamosios ašinės jėgos; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Tada viduriniojo sluoksnių tempiamojoje dalyje virš plyšio veikiančių įtempių atstojamoji ašinė jėga $N_{ct,2}$ ir jos pridėjimo skerspjūvyje koordinatė (2.17 pav., a) gali būti apskaičiuojamos atitinkamai pagal (2.120) ir (2.121) formules. Betono ir armatūros atlaikomi

lenkimo momentai bei laikomoji lenkiamo trisluoksnio elemento galia gali būti apskaičiuoti pagal aukščiau pateiktas (2.113–2.116) ir (2.138) formules.

Tuo atveju, kai vidurinysis lenkiamo trisluoksnio elemento sluoksnis visiškai supleišėjęs (arba vidurinysis sluoksnis surenkamas iš atskirų elementų), laikomąją galią sudaro tik išorinių sluoksnių betono ir juose esančios armatūros atlaikomieji lenkimo momentai. Todėl laikomosios galios apskaičiavimui naudojama 2.18 paveiksle pavaizduota skaičiuojamoji schema.

Šiuo atveju įtempiai visame viduriniajame sluoksnyje lygūs nuliui. Todėl viduriniajame sluoksnyje veikiančių įtempių atstojamosios ašinės jėgos taip pat lygios nuliui ((2.122) ir (2.123) formulės).



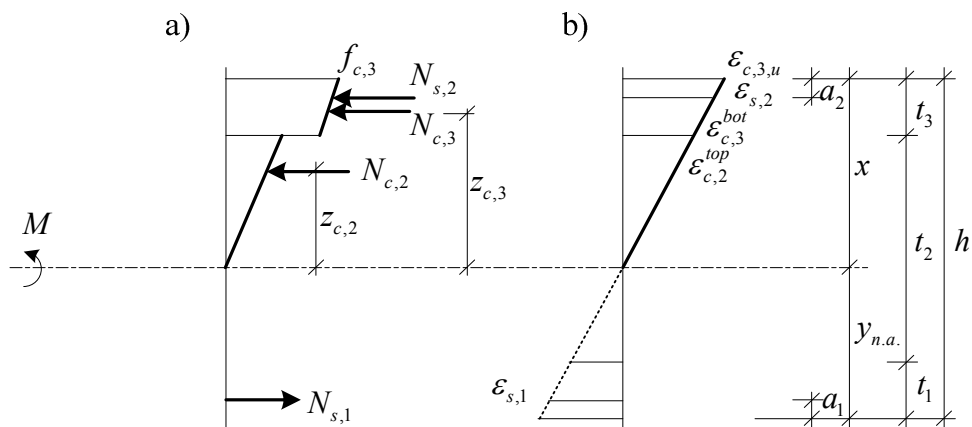
2.18 pav. Skaičiuojamoji schema laikomajai galiai apskaičiuoti (neįvertinant viduriniojo sluoksnio darbo):
a – skerspjūvyje veikiančių įtempių pasiskirstymas bei jų atstojamosios ašinės jėgos; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Sluoksnių betono ir armatūros atlaikomo lenkimo momentai apie neutraliąją ašį gali būti apskaičiuojami pagal (2.113–2.116) formules. Laikomoji galia šiuo atveju:

$$M_u \leq M_{c,3} + \sum (M_{s,i}). \quad (2.139)$$

Tuo atveju, kai viduriniajame sluoksnyje esantis plyšys užsiveria veikiant lenkimo momentui, gniuždoma viduriniojo sluoksnio dalis įsijungia į bendrą lenkiamo elemento darbą. Tokiu atveju lenkiamo trisluoksnio elemento laikomosios galios nustatymui turi būti naudojama 2.19 paveiksle pavaizduota skaičiuojamoji schema. Šiuo atveju įtempiai tik

apatiniame (tempiamajame) viduriniojo sluoksnio krašte lygūs nuliui (2.125). Analogiškai tempiamojoje viduriniojo sluoksnio dalyje veikiančių įtempių atstojamoji ašinė jėga irgi lygi nuliui (2.126).



2.19 pav. Skaičiuojamoji schema laikomajai galiai apskaičiuoti (įvertinant viduriniojo sluoksnio darbą tik gniuždomojoje zonoje): a – skerspjūvyje veikiančių įtempių pasiskirstymas bei jų atstojamosios ašinės jėgos; b – deformacijų pasiskirstymas skerspjūvyje

Kaip ir aukščiau minėtu atveju, laikomąją galią sudarantys betono ir armatūros atlaikomi lenkimo momentai gali būti apskaičiuojami pagal (2.113–2.116) formules. Laikomoji lenkiamo trisluoksnio elemento su užsivėrusiu plyšiu viduriniajame sluoksnyje galia gali būti apskaičiuojama pagal (2.138) formulę, tačiau be tempiamosios viduriniojo sluoksnio dalies ($M_{ct,2}$).

Pagal (2.1–2.139) formules atlikti teoriniai lenkiamųjų trisluoksnių elementų neutraliosios ašies padėties, supleišėjimo momento bei laikomosios galios skaičiavimai bei gautų rezultatų palyginimas su eksperimentiniais duomenimis (pateiktas šio darbo 4-ame skyriuje) parodė, kad pasiūlytas metodas skaičiuoti trisluoksnius lenkiamuosius elementus iš betono tipo medžiagų su armuotais išoriniais sluoksniais yra paprastas ir duoda pakankamai tikslius rezultatus.

2.8. Išvados

1. Pasiūlytas lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių elementų pleišetumo ir laikomosios galios skaičiavimo metodas, leidžiantis įvertinti galimus plyšius viduriniajame sluoksnyje,

nesimetrinį išorinių sluoksnių armavimą bei pradinį įtempių ir deformacijų būvį, atsiradusį dėl skirtingų sluoksnių betonų savybių ir susitraukimo deformacijų.

2. Atlikus analizę nustatyti 4 labiausiai tikėtini įtempių ir deformacijų būvio atvejai lenkiamiesiems trisluoksniams gelžbetoniniams elementams, kurių išoriniai sluoksniai armuoti nesimetriškai, o vidurinysis sluoksnis pagamintas iš lengvų betono tipo medžiagų: kai vidurinysis sluoksnis nesupleišėjęs; kai vidurinysis sluoksnis dalinai supleišėjęs; kai vidurinysis sluoksnis supleišėjęs per visą aukštį; kai plyšys per visą viduriniojo sluoksnio aukštį užsiveria elemento lenkimo metu.
3. Visiems tiriamiems įtempių ir deformacijų būvio atvejams pasiūlytos pradinio įtempių, neutraliosios ašies padėties, apatinio sluoksnio supleišėjimo momento ir viso trisluoksnio lenkiamo elemento laikomosios galios nustatymo formulės, įvertinant viduriniojo sluoksnio supleišėjimą ir skirtingas sluoksnių betonų susitraukimo deformacijas.
4. Skaičiuojant lenkiamuosius trisluoksnius elementus, kurių kontaktas tarp sluoksnių nėra standus – siūlomas skaičiavimo metodas turėtų būti naudojamas kartu su kitais skaičiavimo metodais, kurie leidžia įvertinti šlytį tarp sluoksnių.

3. Ekspirimentinis lenkiamųjų trisluoksnių sijų laikomosios galios bei pleišėtumo tyrimas

Atlikta eilė tyrimų, siekiant eksperimentiškai nustatyti įvairių betono tipo medžiagų fizikines ir mechanines charakteristikas, taip pat iš šių medžiagų pagamintų trisluoksnių sijų betono susitraukimo įtaką pleišėtumui bei plyšio viduriniajame sluoksnyje įtaką bendram sluoksniuotojo elemento darbui. Tam tikslui buvo atlikti lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių sijų eksperimentai. Iš eksperimentinėms sijos naudotų medžiagų buvo pagaminta eilė kontrolinių bandinių. Taip pat buvo matuojamos iš įvairių betono tipo medžiagų pagamintų prizmių laisvosios susitraukimo deformacijos.

3.1. Betono fizikinių ir mechaninių savybių priklausomybė nuo mišinio sudėties ir panaudotų priedų

Skaiciuojant sluoksniuotuosius elementus, pagamintus iš betono tipo medžiagų, būtina kuo tiksliau žinoti kiekvieno sluoksnio medžiagos fizikines ir mechanines charakteristikas. Tarp jų svarbiausios yra medžiagos stipriai gniuždant ir tempiant bei tamprumo modulis. Šioms savybėms nustatyti buvo pagaminta ir išbandyta 140 (100×100×100 mm dydžio) kubelių (po 4 kubelius kiekvienam skirtingam mišiniui) ir 17 (100×100×400 mm dydžio) prizmių.

Siekiant nustatyti betono tipo medžiagų savybių priklausomybę nuo jų gamybai panaudotų medžiagų, buvo pagaminta įvairių betono tipo medžiagų: paprastas sunkusis betonas, betonas su skirtingais kiekiais polipropileno pluošto (dviejų tipų), keramzitbetonis ir putbetonis. Tikslios eksperimente naudotų betono tipo medžiagų mišinių sudėtys pateiktos 3.1 lentelėje.

Gamybos metu polipropileno pluoštas pagal gamintojų rekomendacijas buvo įmaišomas į sausą skiedinį. Tik išmaišius sausą skiedinį buvo pridedamas reikiamas kiekis vandens. Visi bandiniai buvo betonuojami metalinėse formose ir betonavimo metu vibruojami ant vibrostalo 30 sekundžių. Bandiniai iš formų buvo išimti praėjus 3 paroms po betonavimo. Bandinių amžius bandymų metų buvo ne mažesnis kaip 28 paros.

3.1 lentelė. Bandymams naudotų medžiagų mišinių sudėtis (1 m³)

Mišinio kodas	Vanduo, l	Cementas, kg	Smėlis, kg	Skalda, kg	Keramzitas, kg	Keramzito smėlis, kg	Polipropileno pluoštas SuperNet, kg	Polipropileno pluoštas Crackstop, kg	Putos, l	Vandens/ cemento santykis
B001	180	360	910	1220	-	-	-	-	-	0,5
B021	180	360	910	1220	-	-	-	-	-	0,5
B031	180	360	910	1220	-	-	-	-	-	0,5
B032	180	360	910	1220	-	-	-	-	-	0,5
B041	180	360	910	1220	-	-	-	-	-	0,5
B042	180	360	910	1220	-	-	-	-	-	0,5
B043	180	360	910	1220	-	-	-	-	-	0,5
F001	180	360	910	1220	-	-	0,9	-	-	0,5
F002	180	360	910	1220	-	-	2,7	-	-	0,5
F003	180	360	910	1220	-	-	4,5	-	-	0,5
F004	180	360	910	1220	-	-	-	0,6	-	0,5
F005	180	360	910	1220	-	-	-	1,8	-	0,5
F006	180	360	910	1220	-	-	-	3	-	0,5
F021	180	360	910	1220	-	-	-	0,3	-	0,5
F022	180	360	910	1220	-	-	-	0,6	-	0,5
F023	180	360	910	1220	-	-	-	1,2	-	0,5
F024	180	360	910	1220	-	-	-	2,4	-	0,5
F031	180	360	910	1220	-	-	0,9	-	-	0,5
F032	180	360	910	1220	-	-	0,9	-	-	0,5
F041	180	360	910	1220	-	-	-	0,6	-	0,5
F042	180	360	910	1220	-	-	-	1,2	-	0,5
F043	180	360	910	1220	-	-	-	2,4	-	0,5
K001	200	400	-	-	780	-	-	-	-	0,5
K021	281	575	-	-	500	500	-	-	-	0,49
K031	250	311	244	-	731	429	-	-	-	0,8

3.1 lentelės tęsinys. Bandymams naudotų medžiagų mišinių sudėtis (1 m³)

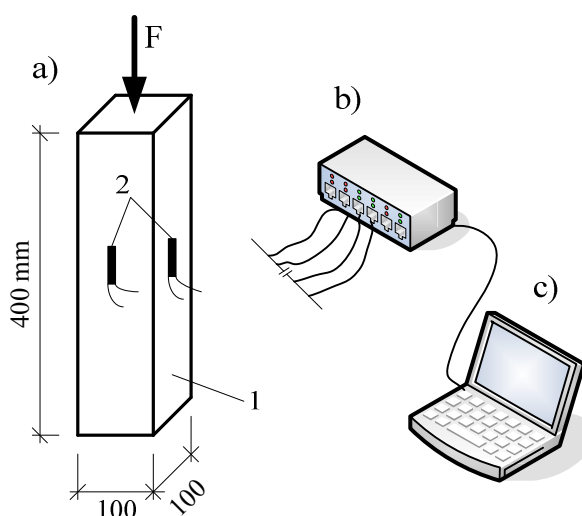
Mišinio kodas	Vanduo, l	Cementas, kg	Smėlis, kg	Skalda, kg	Keramzitas, kg	Keramzito smėlis, kg	Polipropileno pluoštas SuperNet, kg	Polipropileno pluoštas Crackstop, kg	Putos, l	Vandens/cemento santykis
K032	205	335	974	-	511	-	-	-	-	0,6
K033	255	330	239	-	731	429	-	-	-	0,77
K034	205	316	1001	-	511	-	-	-	-	0,65
K035	250	375	-	-	750	688	-	-	-	0,67
K036	250	500	-	-	583	583	-	-	-	0,5
K041	250	375	-	-	750	688	-	-	-	0,67
P001	227	410	410	-	-	-	-	-	636	0,55
P002	192	538	154	-	-	-	-	-	538	0,36
P003	192	538	154	-	-	-	-	-	430	0,36
D041	(visi bandiniai išpjauti iš pramoninių statyboje naudojamų dujų silikatbetonio blokų)									

Siekiant nustatyti pagamintų bandinių fizikines ir mechanines charakteristikas buvo atliekami trijų rūšių bandymai: kubelių gniuždymas, prizmių gniuždymas ir prizmių lenkimas. Kubelių gniuždymo bandymo metu kubeliai prese buvo centruojami ir apkrova tolygiai keliama 0,6 kN/s greičiu iki bandinio suirimo. Bendras kubelių gniuždymo eksperimento vaizdas pateiktas 3.1 paveiksle.



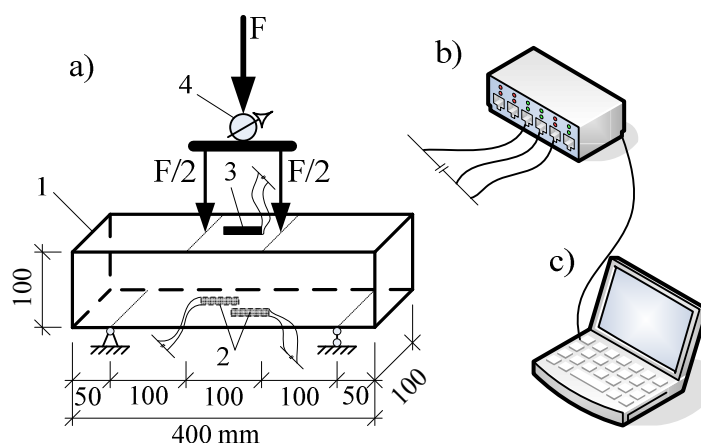
3.1 pav. Kubelių gniuždymo eksperimentas

Medžiagų tamprumo modulio nustatymui buvo atliekami prizmių gniuždymo eksperimentai. Prieš gniuždant prizmes, prie jų šonų buvo priklijuoti deformacijas fiksuojantys tenzodavikliai, kurių matavimo bazė – 50 mm. Bandymo metu prizmė prese buvo centruojama pagal deformacijų indikatorių parodymus. Apkrova buvo keliami pakopomis (ne mažiau kaip 10) iki suirimo. Bandymo metu tenzodaviklių parodymai buvo automatiškai registruojami prie kompiuterio prijungto ALMEMO registravimo prietaiso pagalba. Prizmių gniuždymo eksperimento schema pateikta 3.2 paveiksle.



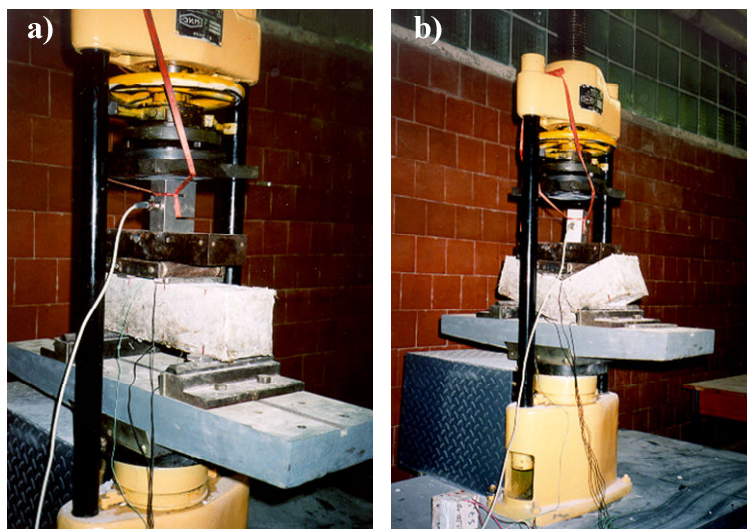
3.2 pav. Prizmių gniuždymo bandymo schema: a – bandinys (1 – gniuždoma prizmė; 2 – tenzodavikliai); b – ALMEMO registravimo prietaisas; c – prietaisus valdantis kompiuteris

Siekiant nustatyti skirtingų betono sudėčių bei panaudotų priedų įtaką gniuždymo ir tempimo deformacijoms, buvo atlikta eilė prizmių lenkimo bandymų. Šiuo atveju prie prizmių tiek tempiamojoje, tiek gniuždomojoje zonos buvo priklijuojami deformacijas matuojantys tenzodavikliai, kurių matavimo bazė – 50 mm. Tempiamojoje zonoje buvo naudojami du tenzodavikliai, o gniuždomojoje zonoje – vienas. Apkrova buvo perduodama per dvi jėgas, tokiu būdu tarp jų prizmės viduryje sudarant grynojo lenkimo zoną, kurioje ir buvo priklijuoti tenzodavikliai. Prizmių lenkimo eksperimento schema pateikta 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Prizmių lenkimo eksperimento schema: a – bandinys (1 – lenkiama prizmė; 2 – tempiami tenzodavikliai; 3 – gniuždomi tenzodavikliai; 4 – elektroninis dinamometras); b – ALMEMO registravimo prietaisas; c – prietaisus valdantis kompiuteris

Apkrova lenkiant prizmę buvo keliama pakopomis (ne mažiau kaip 10) iki suirimo. Kaip ir prizmių gniuždymo eksperimentų metu, elektroninio dinamometro ir tenzodaviklių parodymai buvo automatiškai registruojami prie kompiuterio prijungto ALMEMO registravimo prietaiso pagalba.



3.4 pav. Prizmių lenkimo eksperimentas: a – prieš suirimą; b – po suirimo

Dėl to, kad tempiamajame prizmės krašte buvo priklijuoti du deformacijas matuojantys tenzodavikliai, viename iš jų mikroplyšys atsiradavo neišvengiamai anksčiau nei kitame,

todėl buvo gauta duomenų apie betono priedų (polietilpropileno pluošto) įtaką tempiamosios zonos deformacijų pasiskirstymui. Visos prizmės lenkimo eksperimento metu suiro grynojo lenkimo zonoje, t.y. tarp dviejų apkrovą perduodančių jėgų. Prizmių gniuždymo eksperimento nuotraukos pateiktos 3.4 paveiksle.

Trisluoksnių sijų lenkimo eksperimentuose buvo naudojamas ir dujų silikatbetonis. Norint nustatyti šios medžiagos deformacines savybes, iš gamykloje pagaminto ir statybos pramonėje naudojamo dujų silikatbetonio blokelių buvo išpjauti reikalingų dydžių bandiniai. Prie išpjautų prizmių taip pat buvo priklijuoti deformacijas matuojantys tenzodavikliai, kurių matavimo bazė – 50 mm. Kaip ir sunkiojo betono prizmių lenkimo eksperimentų atveju, elektroninio dinamometro ir tenzodaviklių parodymai buvo automatiškai registruojami prie kompiuterio prijungto ALMEMO registravimo prietaiso pagalba. Dujų silikatbetonio bandinių stipris yra žymiai mažesnis už sunkiojo betono, todėl eksperimentams buvo naudojami tikslesni jėgos perdavimo prietaisai (3.5 pav.).



3.5 pav. Dujų silikatbetonio prizmių lenkimo eksperimentas

Atlikus aukščiau minėtus kubelių ir prizmių gniuždymo bei prizmių lenkimo eksperimentus gauti tokie rezultatai:

- kubelių suirimo gniuždymo jėga (gniuždomasis stipris);
- prizmių suirimo gniuždymo jėga bei išilginių deformacijų priklausomybė nuo normalinių įtempių (tamprumo modulis);
- prizmių suirimo lenkimo momentas (tempiamasis stipris) bei tempiamosios ir gniuždomosios zonos išilginių deformacijų priklausomybė nuo veikiančio lenkimo momento.

Ekspirimentiniams tyrimams buvo naudotas įvairių sudėčių betonas. Paprasto sunkaus (be jokių priemaišų) gniuždomojo betono stipris svyravo nuo 21 iki 31 MPa. Visi eksperimentų metu gauti vidutiniai paprasto gniuždomojo betono stipriai pateikti 3.2 lentelėje. Bandinys, kurio kodas B032, buvo žymiai silpnėsnis, nes jo gamybai naudotas žemesnės klasės cementas. Kiti bandiniai suiro nuo 24–31 MPa apkrovos.

3.2 lentelė. Eksperimentiškai nustatytas sunkiojo betono (be priedų) gniuždomasis prizminis stipris ir pradinis tamprumo modulis

Mišinio kodas	f_c , MPa	E_c , GPa
B001	31	31
B021	31	31
B031	29	30
B032	21	24
B041	25	-
B042	27	-
B043	24	-

Panašūs rezultatai gauti ir gniuždant kubelius, pagamintus iš betono su polietilpropileno pluošto priemaišomis. Eksperimentų metu buvo naudojamas dviejų rūšių polietilpropileno pluoštas: Crackstop ir SuperNet. Tiksliai betonų sudėtis bei panaudotų priedų kiekis pateikti 3.1 lentelėje. Vidutinės gniuždomojo betono su polipropileno pluoštu stiprio reikšmės pateiktos 3.3 lentelėje.

Norint nustatyti polietilpropileno pluošto ir jo kiekio įtaką betono gniuždomajam stipriui, visų bandymų serijų metu buvo paruoštas identiškas sausas skiedinys. Vėliau sausas skiedinys buvo dalinamas į keletą dalių. Tada į kiekvieną dalį atskirai buvo pridedamas polietilpropileno pluoštas (skirtingi kiekiai), o į vieną dalį priedai nebuvo dedami. Po to kiekviena dalis buvo maišoma su vienodu kiekiu vandens ir gauti skiediniai vienu metu betonuojami į kubelių bei prizmių formas. Tokiu būdu gavus bandinius, kurie skyrėsi tik panaudoto polietilpropileno pluošto kiekiu (0–2,4 %), nustatyta, kad polietilpropileno pluoštas jokios pastebimos įtakos gniuždomojo betono stipriui neturi. Panašūs eksperimentiniai

rezultatai buvo gauti ir kitų autorių [1, 2, 4, 9, 11, 12, 19, 24, 29, 31, 32, 39–42, 47, 48, 50, 51, 57, 62, 67, 69, 73, 74, 85, 87, 88, 95, 96, 98, 104, 108, 118].

3.3 lentelė. Eksperimentiškai nustatytas sunkiojo betono su polietilpropileno pluoštu (SuperNet ir CrackStop) gniuždomasis stipris ir pradinis tamprumo modulis

Mišinio kodas	f_c , MPa	E_c , GPa
F001	26	-
F002	26	29
F003	23	-
F004	24	-
F005	22	-
F006	25	-
F021	29	-
F022	33	32
F023	35	-
F024	36	-
F031	29	30
F032	28	29
F041	29	-
F042	27	-
F043	26	-

Šioje disertacijoje nagrinėjami trisluoksniai elementai, kurių vidurinysis sluoksnis pagamintas iš lengvų betono tipo medžiagų. Todėl eksperimentinių tyrimų metu buvo atliekami bandymai su įvairiomis lengvomis betono tipo medžiagomis: putbetonių, keramzitbetonių ir dujų silikatu. Putbetonis ir keramzitbetonis buvo gaminami laboratorijoje (naudojant įvairias sudėtis), o dujų silikatbetonio bandiniai buvo tiesiog išpjaunami iš gamyklinių dujų silikatbetonio blokų. Tikslios bandytų lengvų betonų sudėtys pateiktos 3.1 lentelėje. Eksperimentų metu nustatyta, kad gniuždomasis lengvojo betono stipris gali varijuoti nuo 1 iki 7 MPa (3.4 lentelė).

3.4 lentelė. Eksperimentiškai nustatytas lengvųjų betonų (putbetonio, keramzitbartonio ir dujų silikatbetonio) gniuždomasis stipris ir pradinis tamprumo modulis

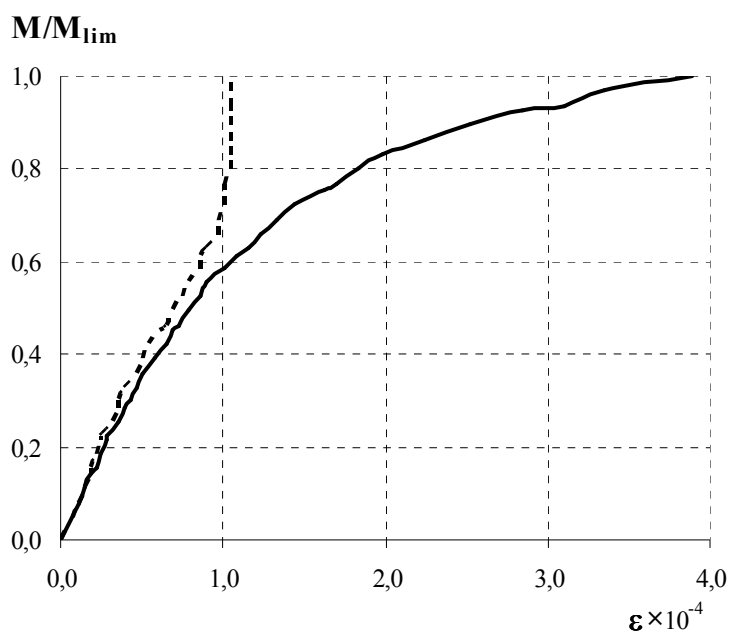
Mišinio kodas	f_c , MPa	E_c , GPa
P001	2,1	0,35
P002	2,8	0,50
P003	1,3	0,10
K001	5,6	-
K021	6,1	-
K031	4,6	2,00
K032	6,2	5,60
K033	4,9	2,20
K034	6,7	6,20
K035	4,7	-
K036	7,1	-
K041	2,4	2,14
D041	2,5	0,48

Silpniausia gauta medžiaga buvo putbetonis, kurio tankis tik apie 270 kg/m^3 , stipriausia gauta medžiaga – keramzitbartonis, kurio gamybai naudotas ne tik stambesnės frakcijos keramzitas, bet ir keramzito smėlis. Nustatytas gniuždomojo dujų silikatbetonio, kurio tankis apie 400 kg/m^3 , stipris buvo panašus į putbetonio – apie 2 MPa (3.4 lentelė). Panašūs gniuždomų lengvų betono tipo medžiagų stipriai gauti ir kitų autorių [3, 55, 58, 59, 70, 81, 84, 90, 121, 124].

Antrame šios disertacijos skyriuje pasiūlyto lenkiamųjų trisluoksnių elementų skaičiavimo metodo rezultatai labiausiai priklauso nuo sluoksnių medžiagų stiprio ir tamprumo modulio santykio, todėl gaminant eksperimentines sijas, iš visų joms naudotų betono tipo medžiagų buvo pagaminti kontroliniai bandiniai: kubeliai (stiprio nustatymui) ir prizmės (tamprumo modulio nustatymui). Atlikus visų naudotų medžiagų gniuždomų prizmių bandymus (3.2 pav.), pagal gautą įtempių ir deformacijų tarpusavio priklausomybę bei pasinaudojus Huko dėsnium, gauti medžiagų tamprumo moduliai (pateikti 3.2, 3.3 ir 3.4 lentelėse).

Šioje disertacijoje nagrinėjami lenkiamieji elementai ir jų įtempių ir deformacijų būvis. Todėl norint nustatyti betono sudėties bei panaudotų priedų įtaką lenkiamųjų elementų deformacinėms savybėms, buvo atliktos kelios lenkiamųjų prizmių bandymų serijos. Buvo lenkiamos prizmės, pagamintos iš sunkiojo betono (su polietilpropileno pluoštu arba be jo), keramzitbetonio, putbetonio ir dujų silikatbetonio. Eksperimentų metu buvo matuojamos kiekvienos prizmės deformacijos tiek tempiamajame, tiek gniuždomajame kraštuose (3.3 pav.).

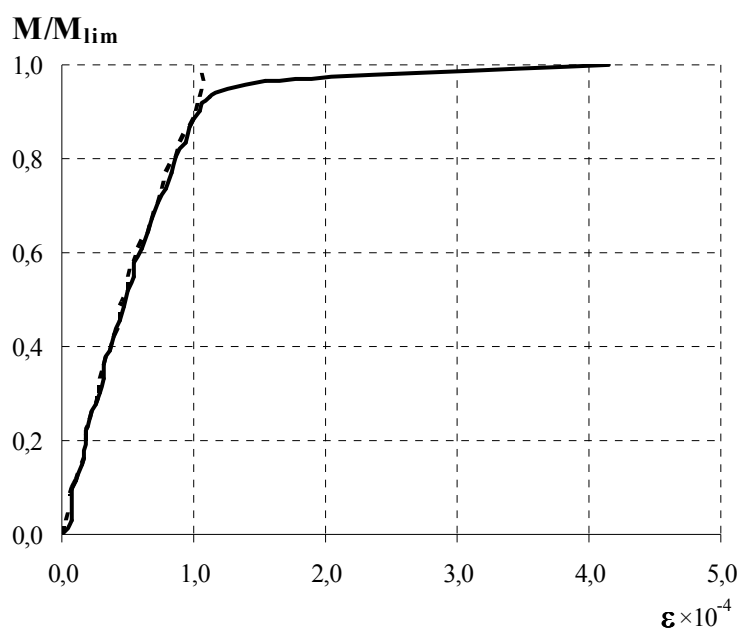
Nors ir laikoma, kad lenkiamųjų betono tipo medžiagų suirimo pobūdis yra staigus, yra žinoma, kad prieš suirimą lenkiamo elemento tempiamojoje zonoje atsiranda mikroplyšiai, kurie lemia iš dalies plastinį suirimo pobūdį. Todėl pagrindinis lenkiamųjų prizmių eksperimentų tikslas buvo nustatyti įvairių betono tipo medžiagų sudėties bei panaudoto polietilpropileno pluošto kiekio įtaką įtempių ir deformacijų tarpusavio priklausomybei lenkiamo elemento tempiamojoje zonoje. Norint užfiksuoti mikroplyšių atsiradimą ir jų įtaką, tempiamajame lenkiamųjų prizmių krašte buvo priklijuoti du deformacijas matuojantys tenzodavikliai (laikant, kad ties vienu iš jų mikroplyšys atsiras neišvengiamai anksčiau, nei ties kitu).



3.6 pav. Lenkiamos prizmės, pagamintos iš paprasto sunkiojo betono, tempiamosios zonos deformacijos (dviejų greta priklijuotų tenzodaviklių duomenys)

Iš paprasto sunkiojo betono (be priemaišų) pagamintos prizmės lenkimo eksperimento rezultatai pateikti 3.6 paveiksle. Pagal tempiamosios zonos deformacijas matuojančių tenzodaviklių parodymus šiuo atveju galima padaryti išvadą, kad tempiamojoje zonoje ties vienu iš tenzodaviklių atsiradus mikroplyšiui, deformacijos toje vietoje padidėja. Tuo pačiu ties kitu tenzodavikliu deformacijos stabilizuojasi ir beveik nedidėja iki elemento suirimo.

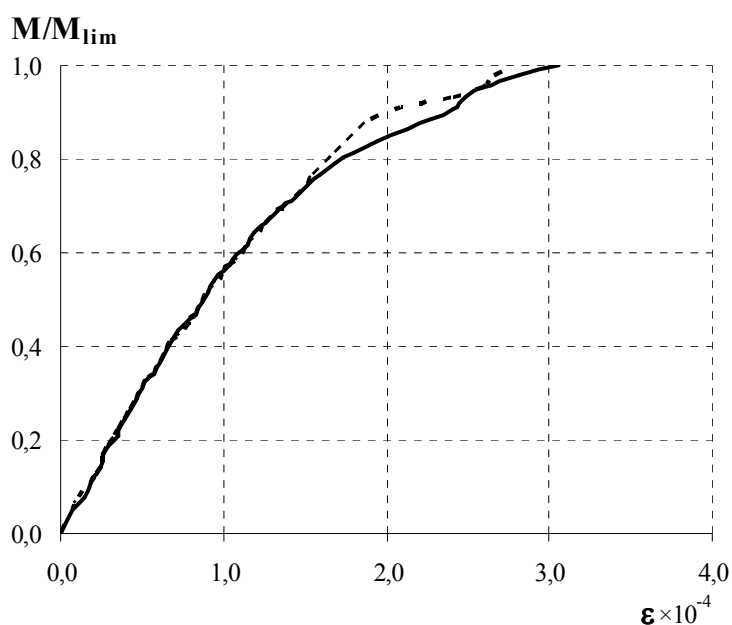
Tačiau naudojant tiek Crackstop, tiek SuperNet polietilpropileno pluoštą, lenkiamųjų prizmių suirimo pobūdis skiriasi nuo aukščiau aprašyto atvejo, kai betonas buvo be priemaišų. Iš sunkiojo betono su polietilpropileno pluoštu pagamintų prizmių lenkimo eksperimentų rezultatai pateikti 3.7 ir 3.8 paveiksluose. Pagal gautus rezultatus galima daryti išvadą, kad polietilpropileno pluošto priemaišos turi įtakos betono elgsenai tempiamojoje zonoje. Ši įtaka pasireiškia tuo, kad tempiamajame betone atsiradus mikroplyšiui, įtempis ties supleišėjusia betono zona perima polietilpropileno pluoštas. Todėl eksperimentų metu visame grynojo lenkimo zonoje esančio tempiamojo lenkiamos prizmės krašto betone deformacijos pasiskirstė praktiškai vienodai iki pat bandinių suirimo (3.7 ir 3.8 pav.).



3.7 pav. Lenkiamos prizmės, pagamintos iš sunkiojo betono su polietilpropileno pluoštu SuperNet, tempiamosios zonos deformacijos (dviejų greta priklijuotų tenzodaviklių duomenys)

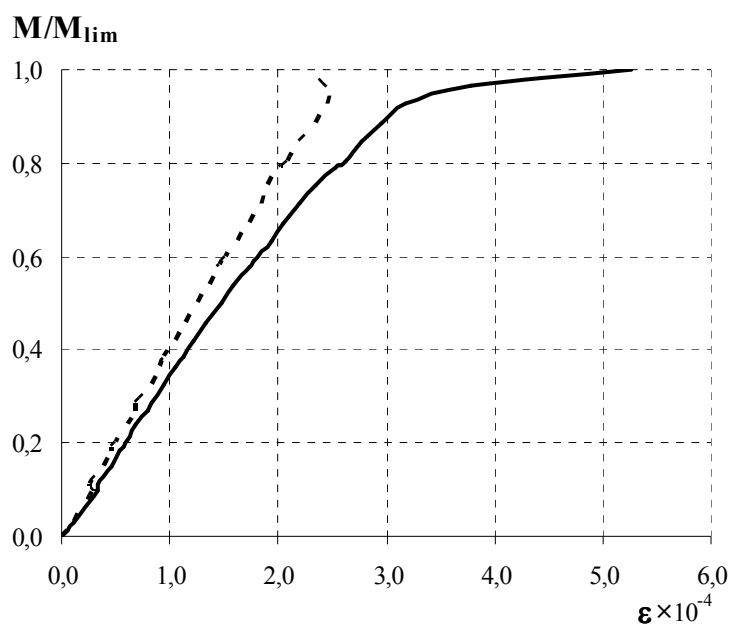
Tačiau 3.7 ir 3.8 paveiksluose pateiktus rezultatus palyginus su lenkiamos prizmės iš paprasto sunkiojo betono rezultatais (3.6 pav.) nustatyta, kad abiejų naudotų tipų (Crackstop ir SuperNet) polietilpropileno pluoštas neturėjo jokios pastebimos įtakos lenkiamųjų prizmių

laikomajai galiai. Eksperimentinių tyrimų metu taip pat nustatyta, kad polipropileno pluošto kiekio padidėjimas taip pat neturi žymios įtakos rezultatams. Kiti autoriai taip pat yra gavę panašius rezultatus [9, 19, 24, 42, 62, 67, 81, 95, 98, 108]. Literatūroje yra duomenų, kad dispersinis armavimas žymiai padidina betono laikomąją galią tik tuo atveju, kai armuojama dispersine plieno armatūra [31, 32, 41, 85, 104]. Tuo tarpu polietilpropileno pluoštas žymesnę įtaką turi ne betono stipriui, o deformacinėms savybėms ir tik tuo atveju, kai betonuojami dideli plotai, pvz. monolitinės perdangos, didelių prekybos centrų grindys, oro uostų nusileidimo takai ir pan. [118].

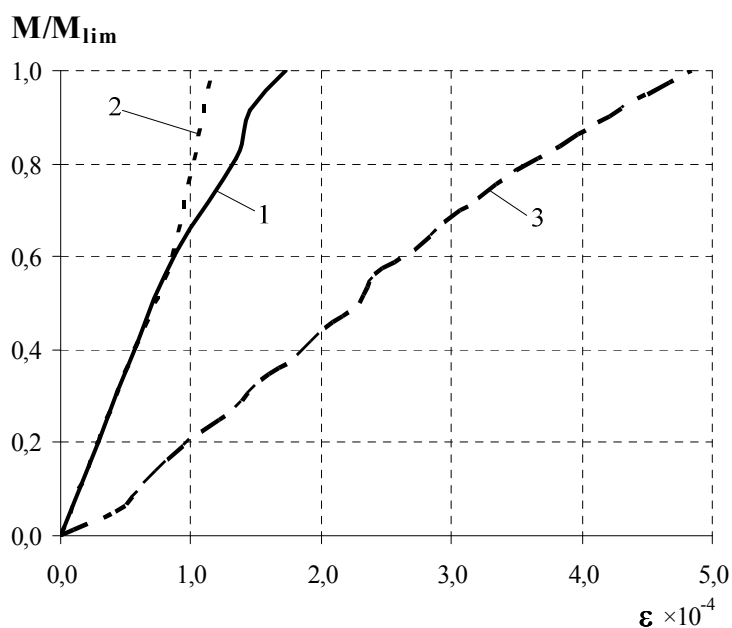


3.8 pav. Lenkiamos prizmės, pagamintos iš sunkiojo betono su polietilpropileno pluoštu Crackstop, tempiamosios zonos deformacijos (dviejų greta priklijuotų tenzodaviklių duomenys)

Lenkiant prizmes, pagamintas iš keramzitbetonio, gauti rezultatai savo pobūdžiu yra panašūs į aukščiau aprašytus atvejus, kai buvo bandomos prizmės, pagamintos iš sunkiojo betono. Tačiau šiuo atveju dėl mažesnio medžiagos deformacijų modulio, bandinys iki suirimo deformavosi daugiau (3.9 pav.). Kaip ir prizmės, pagamintos iš paprasto betono atveju, keramzitbetonio prizmės tempiamojoje zonoje ties vienu tenzodavikliu mikroplyšys atsirado anksčiau nei ties kitu. Todėl deformacijos didinant apkrovą ties pastaruoju didėjo lėčiau, nei ties mikroplyšiu. Prieš pat suirimą (maždaug $0,95 M/M_{lim}$) matomas efektas, kai ties mikroplyšiu žymiai padidėjus deformacijoms, greta esantis deformacijas matuojantis tenzodaviklis užfiksuoja staigų deformacijų sumažėjimą (3.9 pav.).



3.9 pav. Lenkiamos prizmės, pagamintos iš keramzitbetonio, tempiamosios zonos deformacijos (dviejų greta priklijuotų tenzodaviklių duomenys)



3.10 pav. Lenkiamųjų prizmių, pagamintų iš įvairių betono tipo medžiagų, vidutinių tempiamosios zonos deformacijų palyginimas: 1 – sunkusis betonas be priemaišų; 2 – sunkusis betonas su polietilpropileno pluoštu; 3 – dujų silikatbetonis

Palyginus eksperimentinius lenkiamųjų prizmių deformacijų matavimo rezultatus, galima padaryti išvadą, kad betono gamybai panaudotas polietilpropileno pluoštas beveik nelemia medžiagos stiprio charakteristikų, tačiau turi įtakos jų deformacinėms savybėms atsiradus mikroplyšiams (3.10 pav.).

3.10 paveiksle taip pat akivaizdžiai matosi, kad dėl mažesnio deformacijų modulio, lengvos betono tipo medžiagos yra ne tik silpnesnės, bet ir daugiau deformuojasi veikiant apkrovai. Nagrinėjant lenkiamuosius trisluoksnius elementus, kurių vidurinysis sluoksnis pagamintas iš lengvojo betono, o išoriniai sluoksniai – iš sunkiojo, viduriniajame sluoksnyje pavojingiausia naudoti medžiagas, kurių tempiamasis stipris yra mažas, o deformacijų modulis – didelis. Tokiu atveju lenkimo metu elemento viduriniajame sluoksnyje plyšiai gali atsirasti anksčiau negu išoriniame labiau tempiamajame sluoksnyje. Analogiškai galima teigti, kad net ir naudojant labai silpną medžiagą, tačiau turinčią labai mažą deformacijų modulį – plyšių viduriniajame sluoksnyje galima išvengti. Todėl projektuojant lenkiamuosius sluoksniuotuosius elementus iš betono tipo medžiagų, labai svarbu atsižvelgti į parenkamų medžiagų $f_{ct,i} / E_{c,i}$ santykį.

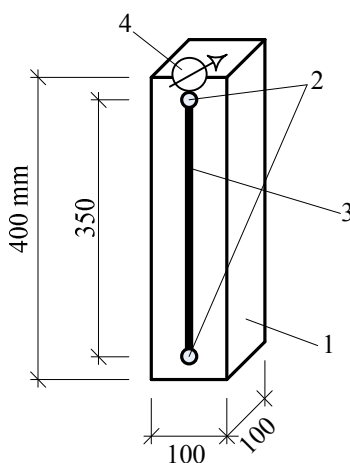
3.2. Mišinio sudėties įtaka betono laisvojo susitraukimo deformacijoms

Sluoksniuotųjų elementų skirtingi sluoksniai gali būti pagaminti iš medžiagų, turinčių skirtingas fizikines ir mechanines charakteristikas. Dėl šios priežasties sluoksniuotajame elemente gali atsirasti sudėtingas įtempių ir deformacijų būvis dar prieš elemento eksploataciją, t.y. prieš atsirandant bet kokiai išorinei apkrovai. Didžiausią įtaką išankstiniais įtempiais sluoksniuose turi betono tipo medžiagų savybė trauktis jų kietėjimo metu. Sluoksniuotųjų elementų sluoksniams naudojamos skirtingos medžiagos pasižymi skirtingomis laisvojo susitraukimo deformacijomis. Dažniausiai viduriniams sluoksniuotųjų elementų sluoksniams naudojamos lengvos betono tipo medžiagos, kurių susitraukimo deformacijos yra kelis kartus didesnės negu išoriniams sluoksniams naudojamo sunkiojo betono laisvojo susitraukimo deformacijos. Susitraukimo deformacijos taip pat priklauso nuo mišinio sudėties bei naudojamų priedų. Todėl buvo atlikti eksperimentiniai skirtingų betono tipo medžiagų laisvojo susitraukimo deformacijų tyrimai.

Ekspirimentinių susitraukimo tyrimų tikslas: betono tipo medžiagų laisvojo susitraukimo deformacijų dydžio priklausomybės nuo mišinio sudėties bei panaudotų priedų nustatymas.

Iš viso dviejų bandymo serijų metu buvo pagamintos ir išbandytos 42 (100×100×400 mm dydžio) prizmės (14 skirtingų mišinių po 3 prizmes). Siekiant nustatyti betono tipo medžiagų susitraukimo deformacijų priklausomybę nuo jų gamybai panaudotų medžiagų – buvo pagaminta įvairių betono tipo medžiagų: paprastas sunkusis betonas, betonas su skirtingais kiekiais polipropileno pluošto (dviejų tipų) ir keramzitbetonis. Naudoti šios medžiagos: sunkaus betono mišinių kodai – B001 ir B021; sunkaus betono su Crackstop polietilpropileno pluoštu mišinių kodai – F004, F005, F006, F021, F022, F023 ir F024; sunkaus betono su SuperNet polietilpropileno pluoštu mišinių kodai – F001, F002 ir F003; ir keramzitbetonio mišinių kodai – K001 ir K021. Tikslios eksperimente naudotų betono tipo medžiagų mišinių sudėtys pateiktos 3.1 lentelėje.

Gamybos metu polipropileno pluoštas pagal gamintojų rekomendacijas buvo įmaišomas į sausą skiedinį. Tik išmaišius sausą skiedinį buvo pridedamas reikiamas kiekis vandens. Gaminant putbetonį pirmiausiai buvo paruošiamos putos (naudojant nustatytas putokšlio ir vandens proporcijas), o po to gautos putos atsargiai maišomos su iš anksto paruoštu skiediniu. Visi bandiniai buvo betonuojami metalinėse formose ir betonavimo metu vibruojami 30 sekundžių (išskyrus putbetonį). Bandiniai iš formų buvo išimti praėjus 3 paroms po betonavimo.



3.11 pav. Prizmių laisvojo susitraukimo deformacijų matavimo schema: 1 – bandinys (prizmė); 2 – metaliniai inkarai; 3 – strypas; 4 – laikrodinio tipo indikatorius

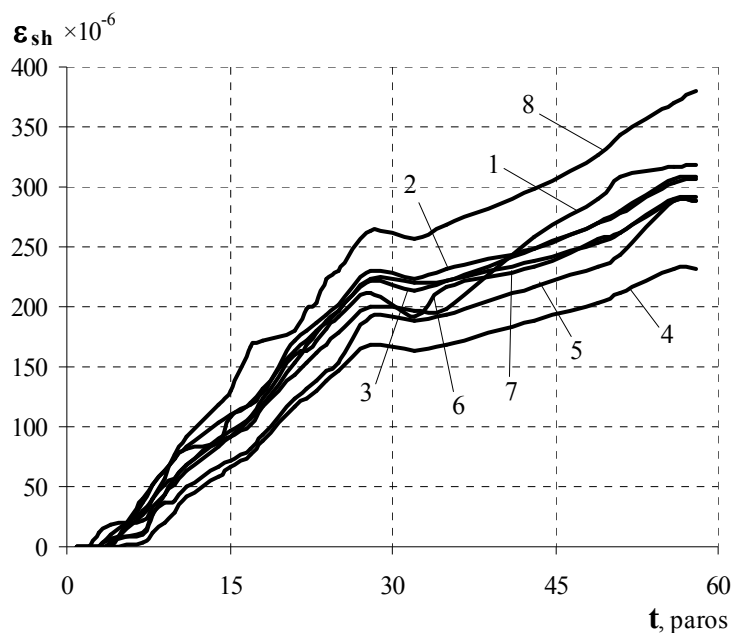


3.12 pav. Prizmių susitraukimo deformacijų matavimo eksperimentas: a – bendras vaizdas; b – prizmė su pritvirtintu laikrodinio tipo deformacijų matavimo prietaisu

Susitraukimo deformacijos buvo matuojamos mechaninių indikatorių pagalba. Indikatoriai prie prizmės buvo pritvirtinti naudojant metalinius inkarus, kurie epoksidiniais klijais buvo priklijuoti prie vieno prizmės šono. Indikatorių matavimo bazė – 350 mm. Bandymo schema ir nuotrauka pateikiamos 3.11 ir 3.12 paveiksluose. Pirmosios bandymų serijos metu susitraukimo deformacijos buvo matuojamos 58 paras, o antrosios serijos metu – 71 parą. Indikatorių rodmenys buvo fiksuojami ne rečiau kaip kas tris dienas. Abiejų bandymų serijų atveju matavimai buvo atliekami vasaros metu, temperatūrai svyruojant nuo plus 19 iki 25 laipsnių Celsijaus. Santykinė oro drėgmė svyravo nuo 30 iki 70 %. Šių eksperimentinių tyrimų metu pagrindinis tikslas buvo ištirti betono tipo medžiagų sudėties ir panaudotų priedų įtaką laisvojo susitraukimo deformacijoms, todėl žymūs temperatūros ir aplinkos drėgnumo svyravimai netrukdė nustatyti skirtumo tarp skirtingų prizmių deformacijų. Šie betono natūralaus kietėjimo aplinkos rodikliai be abejonės turėjo įtaką galutiniams (maksimaliems) susitraukimo deformacijų rezultatams, tačiau jie nebuvo pagrindinis eksperimentų tikslas.

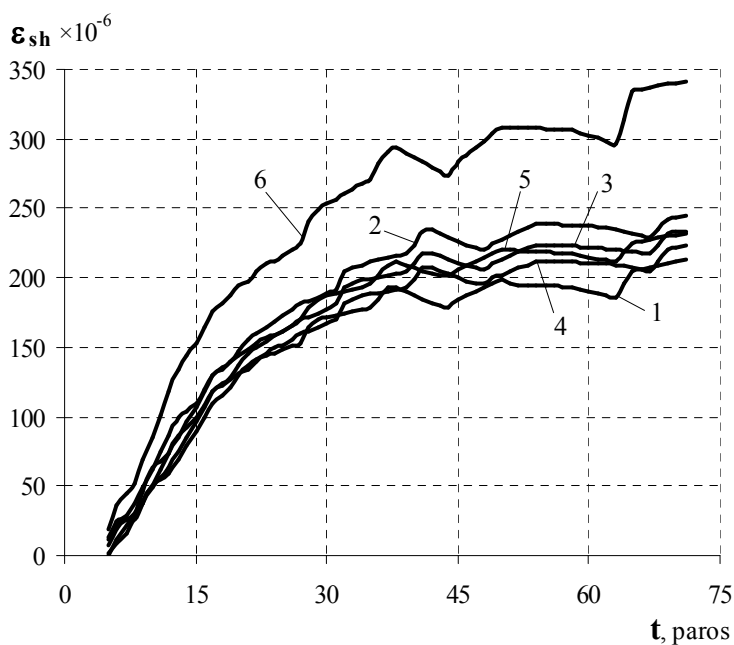
Atlikus dvi bandymų serijas gauti duomenys apie betono tipo medžiagų laisvojo susitraukimo deformacijų priklausomybę nuo jų gamybai panaudotų medžiagų bei priedų sudėties. Abiejų bandymo serijų metu buvo tiriamos tiek paprasto betono, tiek betono su polietilpropileno pluoštu, tiek keramzitbetonio deformacijos. Santykinės deformacijos buvo apskaičiuojamos išmatuotas linijines deformacijas padalijus iš matavimų bazės, t.y. 350 mm. Pirmosios bandymų serijos metu matavimai pradėti praėjus 3 dienoms po betonavimo, o

antrosios bandymų serijos metu – praėjus 4 dienoms po betonavimo. Apibendrinti vidutiniai matavimų rezultatai pateikiami 3.13 ir 3.14 paveiksluose.



3.13 pav. Prizmių santykinės susitraukimo deformacijos per 58 paros (1-a bandymų serija):

1 – B001; 2 – F001; 3 – F002; 4 – F003; 5 – F004; 6 – F005; 7 – F006; 8 – K001



3.14 pav. Prizmių santykinės susitraukimo deformacijos per 71 parą (2-a bandymų serija):

1 – B021; 2 – F021; 3 – F022; 4 – F023; 5 – F024; 6 – K021

Pagal gautus susitraukimo deformacijų matavimo rezultatus galima padaryti išvadą, kad betonas intensyviausiai traukiasi maždaug 30 parų po betonavimo. Vėliau susitraukimo deformacijos stabilizuojasi ir suintensyvėja tik tuo atveju, jei stipriai sumažėja aplinkos santykinis drėgnis. Tuo tarpu drėgniui padidėjus, pvz., lyjant, betonas gali netgi plėstis. Ši betono savybė aiškiai pastebima 3.13 paveiksle ties maždaug 28 eksperimento para ir 3.14 paveiksle ties maždaug 37 eksperimento para, nes tomis dienomis lijo (todėl ir laboratorijoje santykinis oro drėgnis staigiai padidėjo).

Gauti matavimų rezultatai taip pat parodo, kad lengvos betono tipo medžiagos (šiuo atveju – keramzitbetonis) kietėjimo metu traukiasi labiau negu sunkusis betonas. Maksimalių lengvo ir sunkaus betono laisvojo susitraukimo deformacijų skirtumas siekė maždaug 2 kartus. Skirtumas didėjo didėjant kietėjimo parų skaičiui, t.y. betono amžiui. Panašius rezultatus yra gavę ir kiti autoriai [5, 16, 20–22, 36, 38, 45, 46, 49, 53, 54, 61, 63, 64, 70, 75, 80, 86, 91, 92, 103, 110].

Planuotos polietilpropileno pluošto įtakos betono laisvojo susitraukimo deformacijų dydžiui (ir greičiui) nustatyti nepavyko. Abiejų bandymų serijų metu tiek betonas be priemaišų, tiek su polietilpropileno pluoštu traukėsi maždaug vienodai. Tai galima paaiškinti tuo, kad eksperimente naudoti bandiniai buvo maži ir juose susitraukimo metu mikroplyšiai neatsirado. Tačiau kiti autoriai panašių eksperimentinių tyrimų metu nustatė, kad atsiradus mikroplyšiams, dispersinė armatūra perima dalį dėl susitraukimo betone atsiradusių tempimo įtempių ir tuo būdu sumažina maksimalias elemento deformacijas [80, 103].

Bet kokių atveju pasitvirtino žinomas faktas, kad lengvieji betonai traukiasi žymiai daugiau už sunkiuosius betonus. Dėl šios priežasties skaičiuojant sluoksniuotuosius elementus, kurių sluoksniai pagaminti iš skirtingų tipų medžiagų, reikia įvertinti ne tik apkrovos sukeltus įtempius, bet ir pradinius įtempius, kurie atsiranda dėl skirtingų sluoksnių susitraukimo deformacijų betono kietėjimo metu. Tai ypač aktualu elementams, kurie projektuojami su standžiais ryšiais tarp gretimų sluoksnių.

3.3. Eksperimentinis lenkiamųjų trisluoksnių sijų įtempių ir deformacijų būvio tyrimas

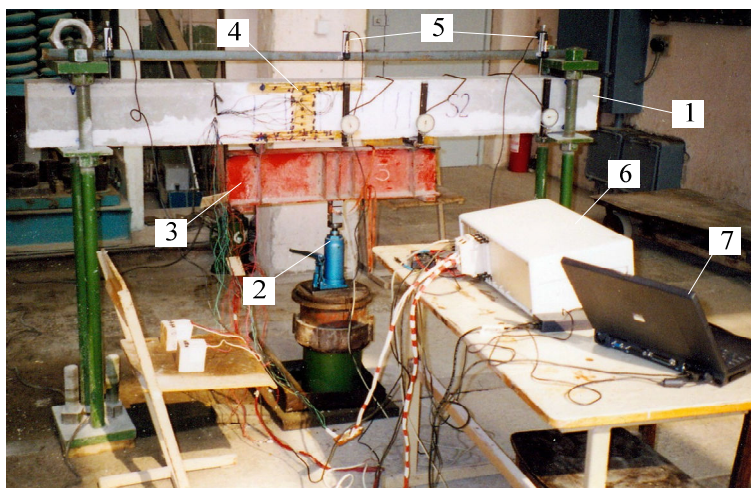
Lenkiant sluoksniuotuosius elementus skerspjuvyje susidaro sudėtingas įtempių ir deformacijų būvis. Taip pat dėl skirtingų sluoksnių susitraukimo deformacijų skerspjuvyje

atsiranda išankstiniai įtempiai, dėl kurių labiau besitraukiantys sluoksniai gali iš dalies arba visiškai supleišėti dar prieš apkraunant elementą. Dažniausiai pleišėja vidurinieji sluoksniuotųjų elementų sluoksniai, kurie paprastai būna pagaminti iš labiau kietėjimo metu besitraukiančių lengvų betono tipo medžiagų. Norint nustatyti plyšių viduriniuosiuose sluoksniuose įtaką bendram lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų darbui – buvo atliktos trys serijos eksperimentinių tyrimų.

Eksperimentinių tyrimų tikslas: nustatyti išankstinio įtempių ir deformacijų būvio bei plyšių viduriniuosiuose sluoksniuose įtaką lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių elementų išorinių sluoksnių deformacijoms bei viso elemento laikomajai galiai ir supleišėjimui.

Iš viso per tris eksperimentinių tyrimų serijas buvo pagaminta ir išbandyta 12 ($100 \times 200 \times 2100$ mm dydžio) trisluoksnių sijų, pagamintų iš betono tipo medžiagų. Visų sijų išoriniai sluoksniai buvo 3–4 cm aukščio ir armuoti išilgine armatūra. Vidurinis sluoksnis visose sijose buvo pagamintas iš lengvos, geras termoizoliacinės savybes turinčios medžiagos, nearmuotas išilgine armatūra.

Eksperimentų metu buvo matuojama apkrovimo (lenkimo) jėga, sijos įlinkis ir deformacijos charakteringuose sijos taškuose: išilgai labiausiai gniuždomojo ir labiausiai tempiamojo kraštų, ties kiekvieno sluoksnio kraštu, ties armatūra ir sijos viduryje per visą skerspjūvio aukštį. Bendras lenkiamųjų trisluoksnių sijų eksperimento vaizdas pateiktas 3.15 paveiksle.



3.15 pav. Lenkiamųjų trisluoksnių sijų eksperimento bendrasis vaizdas: 1 – lenkiama trisluoksniė sija; 2 – hidraulinis domkratas ir elektroninis dinamometras; 3 – apkrovą perduodanti traversa; 4 – deformacijas matuojantys tenzodavikliai; 5 – įlinkiomačiai; 6 – ALMEMO registravimo prietaisas; 7 – prietaisus valdantis kompiuteris

Pirmosios bandymų serijos metu viduriniajam sluoksniui pagaminti buvo naudojamas ypach lengvas putbetonis. Antrosios bandymų serijos metu viduriniajam sluoksniui pagaminti buvo naudojamas keramzitbetonis. Trečiosios bandymų serijos metu viduriniajam sluoksniui pagaminti buvo naudojami išpjauti dujų silikatbetonio blokeliai. Išoriniai trisluoksnių sijų sluoksniai visais atvejais buvo pagaminti iš sunkiojo betono (su priedais arba be jų). Eksperimentinėms sijoms pagaminti naudotos medžiagos pateiktos 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Eksperimentinėms sijoms naudotos medžiagos

Bandymų serija	Sijos kodas	1-as (tempiamas) sluoksnis	2-as (vidurinysis) sluoksnis	3-as (gniuždomas) sluoksnis	Pagrindinės armatūros skersmuo, mm
		Mišinio kodas	Mišinio kodas	Mišinio kodas	
1 serija	S1	B001	P001	B001	2Ø10
	S2	B001	P001	B001	2Ø14
	S3	F002	P002	F002	2Ø10
	S4	F002	P002	F002	2Ø14
2 serija	S5	B021	K041	B021	2Ø14
	S6	B021	K041	B021	2Ø10
	S7	F022	K041	F022	2Ø14
	S8	F022	K041	F022	2Ø10
3 serija	S9	F041	D041	F041	2Ø14
	S10	B041	D041	B041	2Ø14
	S11	F041	D041	F041	2Ø10
	S12	B041	D041	B041	2Ø10

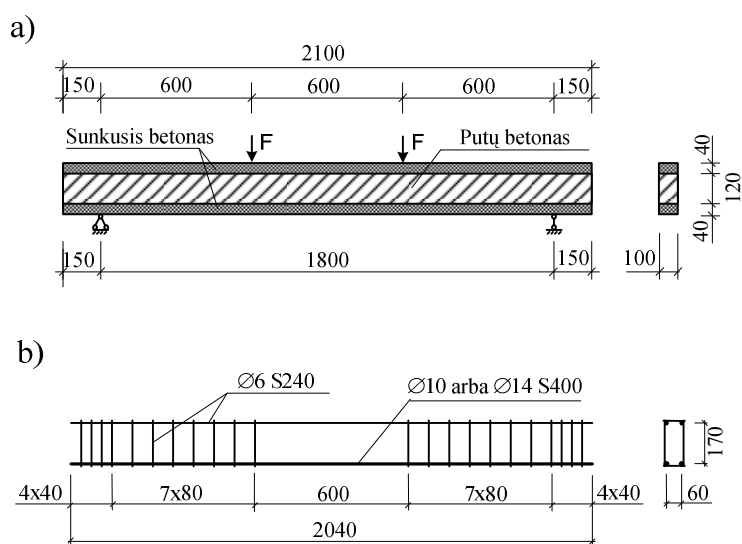
Pirmosios ir antrosios serijos sijų gamybos metu pirmiausiai buvo užbetuojamas apatinis išorinis ir vidurinysis sluoksnis, o po dviejų parų (viduriniajam sluoksniui pakankamai sukietėjus) buvo betonuojamas paskutinis išorinis sluoksnis. Betonuojant pirmą sluoksnį vibruota apie 30 sekundžių. Tam, kad išvengti sluoksnių medžiagų „susimaišymo“ – viduriniojo sluoksnio betonavimo metu vibruota du kartus po maždaug 5 sekundes. Paskutinio išorinio sluoksnio betonavimo metu vibruota nebuvo, nes kiti prieš dvi dienas užbetonuoti sluoksniai dar nebuvo pakankamai sukietėję. Trečiosios serijos sijų gamybos metu

buvo gaunama ir pagal deformacijas matuojančių tenzodaviklių rodmenis. Betone ties priklijuotu tenzodavikliu atsiradus plyšiui – tenzodaviklis nutrūkdamas, o visus rodmenis kas 0,3 sekundės fiksuojantis ALMEMO prietaisas tokiu atveju rodydavo ribinę matavimų diapazono reikšmę. Todėl tam tikros sijos apkrovimo pakopos metu pastebėjus ribinę tenzodaviklio rodmenų reikšmę – buvo laikoma, kad ties juo betone atsirado plyšys.

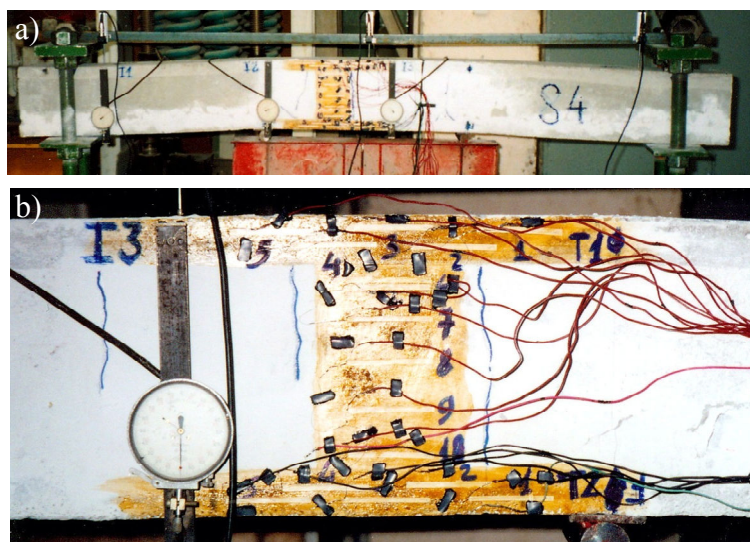
Pagal tenzodaviklių, sijos viduryje priklijuotų per visą elemento skerspjūvio aukštį, rodmenis, taip pat buvo gauta duomenų apie neutraliosios ašies padėtį. Šiuo atveju buvo laikoma, kad lenkiamo elemento gniuždomą ir tempiamą zonas atskirianti neutralioji ašis (plokštuma) yra tarp dviejų skirtingo ženklo deformacijas rodančių tenzodaviklių.

Šių eksperimentų metu didžiausias dėmesys buvo skirtas normaliniam lenkiamųjų elementų pjūviui, tačiau dalis sijų suiro įstrižame pjūvyje. Taip atsitiko dėl viduriniajam sluoksniui pagaminti naudotų ypač silpnų betono tipo medžiagų, todėl paskutinės (trečiosios) bandymų serijos metu sijos skersinė zona buvo gaminama iš sunkiojo betono.

Pirmosios serijos trisluoksnių sijų išilginiai bei skersiniai pjūviai pateikti 3.17 paveiksle, a (kiekvienos sijos gamybai panaudotos medžiagos ir tikslios jų sudėtys pateiktos atitinkamai 3.5 ir 3.1 lentelėse). Šių sijų armavimo schema pateikta 3.17 paveiksle, b (tikslus pagrindinės armatūros skersmuo pateiktas 3.5 lentelėje). Bendras pirmosios serijos sijų vaizdas ir deformacijų matavimo prietaisų išdėstymas grynojo lenkimo zonoje parodytas 3.18 paveiksle.

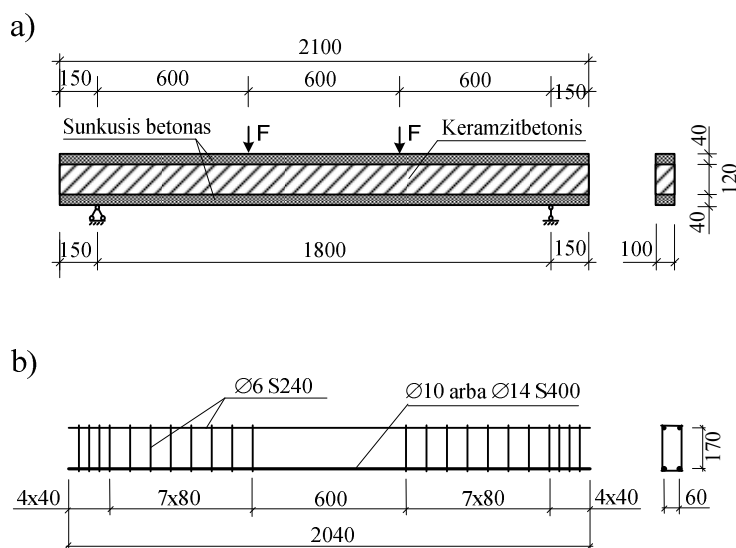


3.17 pav. Pirmos serijos eksperimentinės sijos: a – pjūviai; b – armavimas

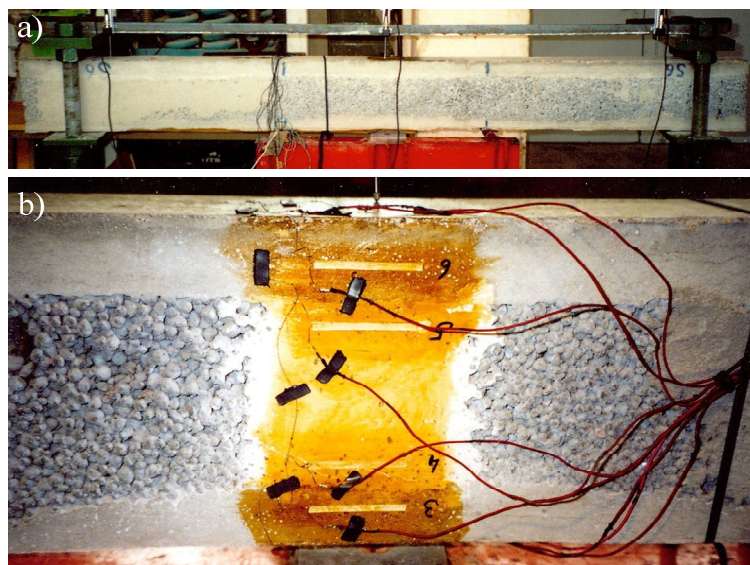


3.18 pav. Pirmos serijos eksperimentinės sijos nuotraukos: a – bendras vaizdas; b – sijos grynojo lenkimo zona su matavimo prietaisais

Antrosios serijos trisluoksnių sijų išilginiai bei skersiniai pjūviai pateikti 3.19 paveiksle, a (kiekvienos sijos gamybai panaudotos medžiagos ir tikslios jų sudėtys pateiktos atitinkamai 3.5 ir 3.1 lentelėse). Šių sijų armavimo schema pateikta 3.19 paveiksle, b (tikslus pagrindinės armatūros skersmuo pateiktas 3.5 lentelėje). Bendras antrosios serijos sijų vaizdas ir deformacijų matavimo prietaisų išdėstymas grynojo lenkimo zonoje parodytas 3.20 paveiksle.

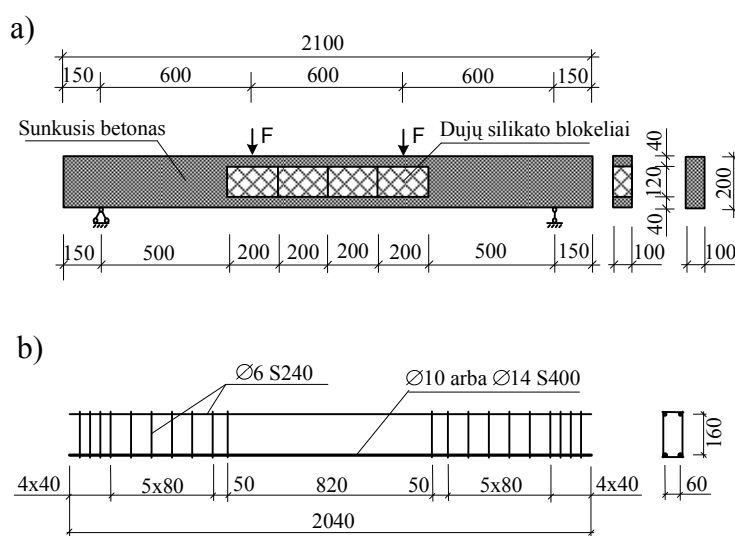


3.19 pav. Antros serijos eksperimentinės sijos: a – pjūviai; b – armavimas

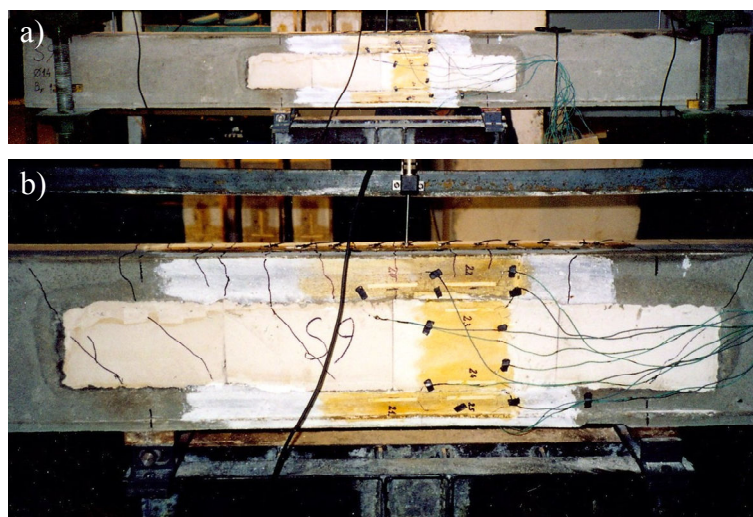


3.20 pav. Antros serijos eksperimentinės sijos nuotraukos: a – bendras vaizdas; b – sijos grynojo lenkimo zona su matavimo prietaisais

Trečiosios serijos trisluoksnių sijų išilginiai bei skersiniai pjūviai pateikti 3.21 paveiksle, a (kiekvienos sijos gamybai panaudotos medžiagos ir tikslios jų sudėtys pateiktos atitinkamai 3.5 ir 3.1 lentelėse). Šių sijų armavimo schema pateikta 3.21 paveiksle, b (tikslus pagrindinės armatūros skersmuo pateiktas 3.5 lentelėje). Bendras trečiosios serijos sijų vaizdas ir deformacijų matavimo prietaisų išdėstymas grynojo lenkimo zonoje parodytas 3.22 paveiksle.



3.21 pav. Trečios serijos eksperimentinės sijos: a – pjūviai; b – armavimas



3.22 pav. Trečios serijos eksperimentinės sijos nuotraukos: a – bendras vaizdas; b – sijos grynojo lenkimo zona su matavimo prietaisais

3.17, 3.19 ir 3.21 paveiksluose pateikti eksperimentinių sijų projektiniai matmenys. Tikslūs (išmatuoti) visų dvylikos eksperimentinių sijų matmenys pateikti 3.6 lentelėje.

3.6 lentelė. Geometrinės eksperimentinių sijų charakteristikos

Sijos kodas	Sijos plotis	Sluoksnių storiai, m			Armatūros padėtis, m	
		t_1	t_2	t_3	a_1	a_2
S1	0,100	0,033	0,136	0,031	0,015	0,015
S2	0,100	0,036	0,129	0,035	0,015	0,015
S3	0,100	0,031	0,138	0,031	0,015	0,015
S4	0,100	0,035	0,130	0,035	0,015	0,015
S5	0,100	0,031	0,138	0,031	0,015	0,015
S6	0,100	0,034	0,134	0,032	0,015	0,015
S7	0,100	0,032	0,135	0,033	0,015	0,015
S8	0,100	0,038	0,137	0,039	0,015	0,015
S9	0,100	0,041	0,118	0,041	0,019	0,019
S10	0,100	0,040	0,117	0,043	0,019	0,019
S11	0,100	0,041	0,120	0,039	0,019	0,019
S12	0,100	0,044	0,117	0,039	0,019	0,019

3.7 lentelėje pateiktos fizikinės ir mechaninės eksperimentinės sijos panaudotų medžiagų charakteristikos buvo nustatytos eksperimentiniu būdu (gniuždant kubelius, gniuždant ir lenkiant prizmes, matuojant prizmių susitraukimą).

3.7 lentelė. Fizikinės ir mechaninės eksperimentinės sijos naudotų medžiagų charakteristikos

Sijos kodas	Pradinis tamprumo modulis, GPa ¹			Gniuždomasis stipris, MPa ¹			Tempiamasis stipris, MPa ¹			Betono laisvojo susitraukimo deformacijos, $\times 10^{-6}$		
	$E_{c,1}$	$E_{c,2}$	$E_{c,3}$	$f_{c,1}$	$f_{c,2}$	$f_{c,3}$	$f_{ct,1}$	$f_{ct,2}$	$f_{ct,3}$	$\varepsilon_{sh,0,1}$	$\varepsilon_{sh,0,2}$	$\varepsilon_{sh,0,3}$
S1	31	0,35	31	31	2,1	31	3,16	0,38	3,16	200	300	200
S2	31	0,35	31	31	2,1	31	3,16	0,38	3,16	200	300	200
S3	29	0,50	29	26	2,8	26	2,81	0,46	2,81	200	300	200
S4	29	0,50	29	26	2,8	26	2,81	0,46	2,81	200	300	200
S5	31	2,14	31	31	2,4	31	3,16	0,41	3,16	200	300	200
S6	31	2,14	31	31	2,4	31	3,16	0,41	3,16	200	300	200
S7	32	2,14	32	33	2,4	33	3,29	0,41	3,29	200	300	200
S8	32	2,14	32	33	2,4	33	3,29	0,41	3,29	200	300	200
S9	30	0,48	30	29	2,5	29	3,02	0,42	3,02	200	0	200
S10	30	0,48	30	29	2,5	29	3,02	0,42	3,02	200	0	200
S11	30	0,48	30	29	2,5	29	3,02	0,42	3,02	200	0	200
S12	30	0,48	30	29	2,5	29	3,02	0,42	3,02	200	0	200

¹ – armatūros fizikinės ir mechaninės charakteristikos eksperimentų metu nustatinėjamas nebuvo.

Reikalingos charakteristikos naudotos atsižvelgiant į armatūros klasę. S400 armatūros gniuždomasis ir tempiamasis stipriai – 365 MPa. S240 armatūros gniuždomasis ir tempiamasis stipriai – 270 MPa.

Atlikus dvylikos eksperimentinių trisluoksnių sijų lenkimo bandymus, gauti tokie pagrindiniai rezultatai:

- sijų suirimo momentas (laikomoji galia);
- sijų tempiamojo išorinio sluoksnio supleišėjimo momentas;
- išilginės deformacijos trisluoksniame skerspjuvyje (sijos grynojo lenkimo zonoje);
- neutraliosios ašies padėtis;
- deformacijų išoriniuose tempiamajame ir gniuždomajame sluoksniuose priklausomybė nuo plyšių viduriniajame sluoksnyje.

Visų eksperimentinių sijų suirimo momentai bei išorinio tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentai pateikti 3.8 lentelėje.

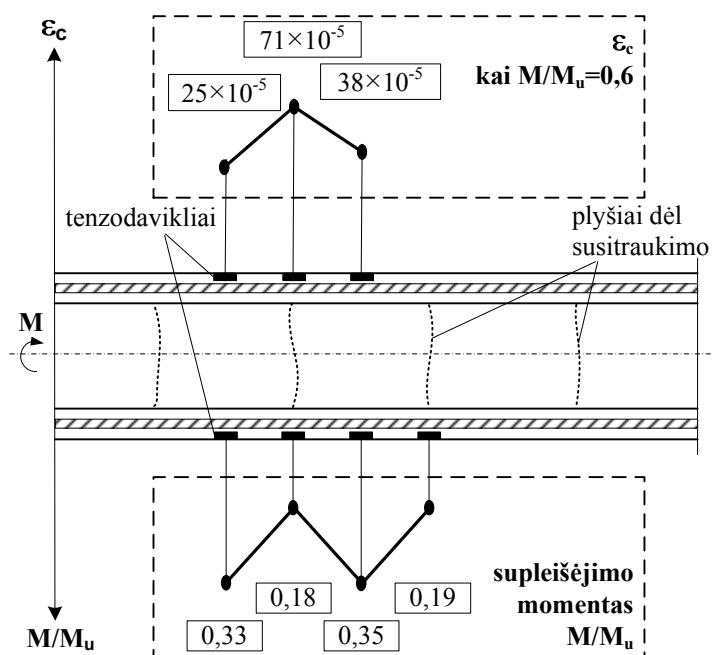
3.8 lentelė. Eksperimentinių sijų laikomoji galia ir supleišėjimo momentas

Bandymų serija	Sijos kodas	$M_{exp,u}$, kNm	$M_{exp,cr}$, kNm
1 serija	S1	4,98 ¹	3,32
	S2	5,12 ¹	5,07
	S3	6,73 ¹	2,96
	S4	6,06 ¹	5,16
2 serija	S5	6,01 ¹	4,92
	S6	6,11 ¹	3,50
	S7	6,82 ¹	4,81
	S8	6,75 ¹	3,47
3 serija	S9	18,28 ²	4,95
	S10	18,80 ²	4,65
	S11	11,70 ²	3,39
	S12	11,34 ²	3,41

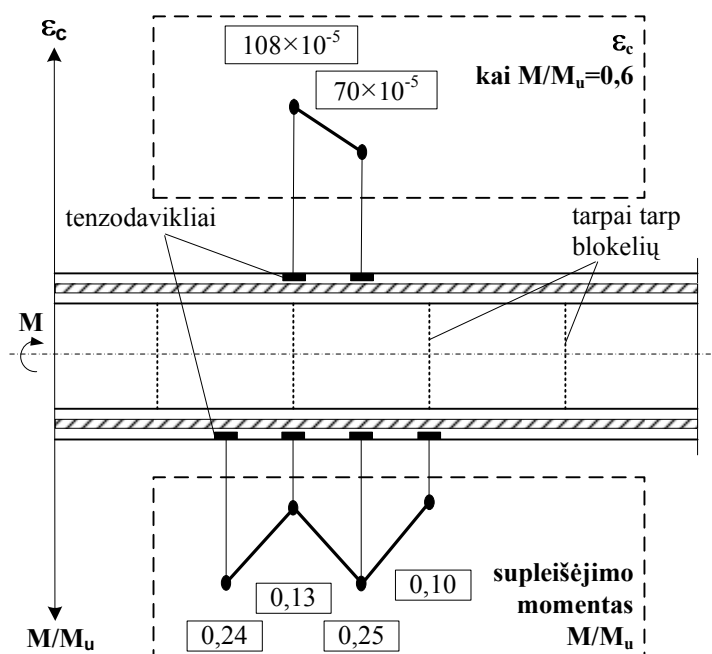
¹ – sija suiro įstrižame pjūvyje dėl tangentinių įtempių;

² – sija suiro normaliniame pjūvyje dėl lenkimo momento;

Ypatingas dėmesys šių eksperimentinių tyrimų metu buvo skirtas išorinių tempiamų ir gniuždomų sluoksnių deformacijų matavimui charakteringuose pjūviuose: ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje ir tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje. Plyšiai viduriniajame sluoksnyje buvo atsiradę dėl skirtingų priežasčių. Pirmos ir antros serijos sijose (atitinkamai su putbetonio ir keramzitbetonio viduriniais sluoksniais) plyšiai viduriniajame sluoksnyje atsirado dėl betono susitraukimo deformacijų. Trečios serijos sijose (su surenkamu iš dujų silikatbetonio blokelių viduriniu sluoksniu) plyšiai viduriniajame sluoksnyje buvo atsiradę dėl sijų gamybos technologijos, t.y. tarpas tarp surenkamų elementų buvo laikomas plyšiu, kurio gylis lygus viso sluoksnio aukščiui. Tačiau eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad nepaisant skirtingų viduriniojo sluoksnio supleišėjimo priežasčių, plyšių viduriniajame sluoksnyje įtaka lenkiamo elemento darbui buvo to paties pobūdžio (3.23 ir 3.24 pav.).



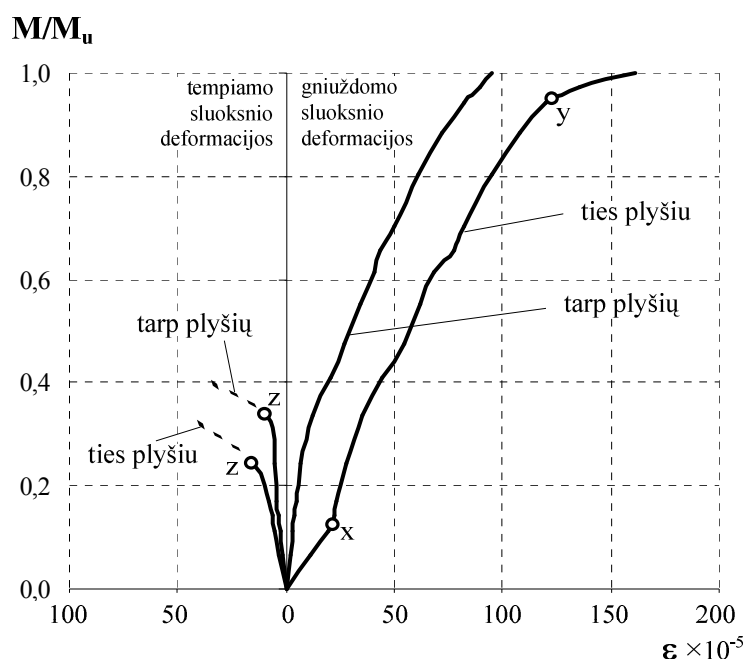
3.23 pav. Lenkiamos trisluoksnės sijos (su supleišėjusiu viduriniu putbetonio sluoksniu) išorinių sluoksnių deformacijų priklausomybė nuo viduriniojo sluoksnio pleišėtumo: a – deformacijų pasiskirstymas išoriniame gniuždomajame sluoksnyje; b – išorinio tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentas viduriniajame



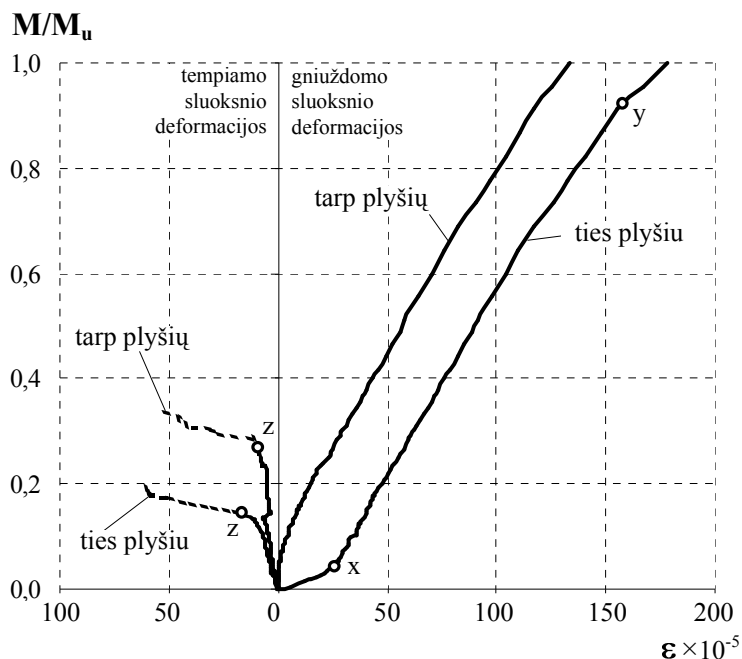
3.24 pav. Lenkiamos trisluoksnės sijos (su viduriniu sluoksniu, surenkamu iš dujų silikatbetonio blokelių) išorinių sluoksnių deformacijų priklausomybė nuo viduriniojo sluoksnio pleišėtumo: a – deformacijų pasiskirstymas išoriniame gniuždomajame sluoksnyje; b – išorinio tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentas

Pasitvirtino teorinių skaičiavimų metu padarytos prielaidos, kad plyšys viduriniajame sluoksnyje ne tik keičia įtempių deformacijų būvį visame lenkiamo elemento skerspjuvyje, bet ir turi įtakos lenkiamo elemento laikomajai galiai. Be to plyšiai išoriniame tempiamajame sluoksnyje visada greičiau atsirasdavo pjūviuose ties plyšiais viduriniajame sluoksnyje (3.23 ir 3.24 pav.). Tiek tempiami, tiek gniuždomi išoriniai lenkiamo trisluoksnių elemento sluoksniai labiau deformuodavosi pjūviuose ties plyšiais viduriniajame sluoksnyje. Pjūviuose tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje, išoriniuose sluoksniuose deformacijos būdavo mažesnės ir keliant apkrovą vystydavosi beveik dvigubai lėčiau, palyginus su zona ties plyšiais viduriniajame sluoksnyje. Išoriniai tempiami sluoksniai zonoje ties plyšiais viduriniajame sluoksnyje supleišėdavo esant maždaug dvigubai mažesnei apkrovai palyginus su zona tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje (3.23 ir 3.24 pav.).

Abejais atvejais 3.25 ir 3.26 paveiksluose pateiktuose išorinių sluoksnių deformacijų pasiskirstymo kreivėse galima išskirti kelis charakteringus taškus („x“, „y“ ir „z“). Išorinis gniuždomas sluoksnis zonoje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje kylant apkrovai deformuojasi tolygiai.



3.25 pav. Deformacijų pasiskirstymas lenkiamos trisluoksnės sijos (su supleišėjusiu putbetonio viduriniu sluoksniu) tempiamajame ir gniuždomajame sluoksniuose (pjūviuose ties plyšiu ir tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje): x, y, z – charakteringi apkrovimo taškai



3.26 pav. Deformacijų pasiskirstymas lenkiamos trisluoksnės sijos (su surenkamu viduriniu dujų silikatbetonio blokelių sluoksniu) tempiamajame ir gniuždomajame sluoksniuose (pjūviuose ties plyšiu ir tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje): x, y, z – charakteringi apkrovimo taškai

Tačiau zonoje ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje išorinis gniuždomas sluoksnis keliant apkrovą deformuojasi netolygiai. Iki apkrovos taško „x“ pjūvyje ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje išoriniame sluoksnyje deformacijos didėja žymiai sparčiau palyginus su pjūviu tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje. Taškas „x“ reiškia maždaug 10–20 % nuo lenkiamo trisluoksnio elemento suirimo apkrovos. Toks pats charakteringas taškas gali būti išskirtas tiek 3.25, tiek 3.26 paveiksluose, tačiau jis „ryškesnis“ tuo atveju, kai vidurinis sluoksnis yra pagamintas iš surenkamų elementų (3.26 pav.).

Toliau keliant apkrovą, nuo taško „x“ iki taško „y“, abejais atvejais išoriniame sluoksnyje deformacijos didėjo maždaug vienodai tiek pjūvyje ties plyšiu, tiek pjūvyje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje (3.25 ir 3.26 pav.). Taškas „y“ reiškia maždaug 80–90 % nuo lenkiamo trisluoksnio elemento suirimo apkrovos. Toliau keliant apkrovą, nuo taško „y“ iki suirimo, pjūvyje ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje deformacijos išoriniame gniuždomajame sluoksnyje ir vėl didėja greičiau, negu pjūvyje tarp plyšių. Toks išorinio gniuždomojo sluoksnio deformacijų pobūdis (pjūvyje ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje) gali būti paaiškintas tuo, kad lenkiant trisluoksnį elementą, plyšiai viduriniojo sluoksnio gniuždomojoje zonoje gali užsiverti. Tokiu atveju gniuždoma viduriniojo sluoksnio dalis

pradedama dirbti kaip nesupleišėjusi. Dėl šios priežasties nuo taško „x“ iki taško „y“ deformacijos išoriniame gniuždomajame sluoksnyje didėja vienodai tiek pjūvyje ties plyšiu, tiek pjūvyje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje. Plyšių užsivėrimo viduriniajame sluoksnyje tikimybė taip pat yra įvertinta ir skaičiavimo metode, pateiktame šios disertacijos 2-ame skyriuje. Ties tašku „y“ išoriniame sluoksnyje įtempiai beveik pasiekia ribines reikšmes, todėl išorinio gniuždomojo sluoksnio betonas pradeda pleišėti. Plyšiai pirmiausia atsiranda pjūviuose ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje, todėl nuo taško „y“ šiame pjūvyje deformacijos ir vėl didėja sparčiau, palyginus su pjūviu tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje (3.25 ir 3.26 pav.).

Skirtingai nuo gniuždomojo išorinio sluoksnio, plyšių viduriniajame sluoksnyje įtaka tempiamojo išorinio sluoksnio deformacijoms visą apkrovimo laikotarpį išlieka vienoda. Tokį išorinio tempiamojo sluoksnio deformacijų pasiskirstymo pobūdį galima paaiškinti tuo, kad plyšys viduriniojo sluoksnio tempiamojoje dalyje niekada neužsiveria. Todėl išoriniame tempiamajame sluoksnyje deformacijos pjūvyje ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje keliant apkrovą visą laiką iki pat lenkiamo elemento suirimo didėja greičiau, negu pjūvyje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje. Tempiamojo išorinio sluoksnio deformacijų pasiskirstymo diagramose galima išskirti tik vieną charakteringą tašką „z“, kuris reiškia apkrovą, kuriai veikiant išorinio sluoksnio betone atsirado plyšiai (3.25 ir 3.26 pav.). Todėl taškas „z“ šiuo atveju reiškia išorinio tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentą.

Čia buvo nagrinėtos tik pirmosios ir trečiosios bandymų serijos eksperimentinės sijos, nes antrosios bandymų serijos metu eksperimentinės sijos (su viduriniu sluoksniu, pagamintu iš keramzitbetonio) neturėjo išankstinių plyšių viduriniajame sluoksnyje.

Visų dvylikos eksperimentinių sijų lenkimo bandymų rezultatai parodė, kad nepaisant plyšių viduriniajame sluoksnyje atsiradimo priežasčių, trisluoksnių sijų įtempių deformacijų būvis lenkimo metu buvo panašus. Eksperimentinių tyrimų rezultatai taip pat patvirtino prielaidą, kad plyšiai viduriniajame sluoksnyje turi įtakos sijos išorinių sluoksnių deformacijoms bei pleišėtumui. Plyšiai viduriniajame sluoksnyje taip pat turi įtakos lenkiamųjų trisluoksnių elementų laikomajai galiai.

3.4. Išvados

1. Eksperimento rezultatų analizė parodė, kad trisluoksniuose gelžbetoniniuose sijose, kurių vidurinis sluoksnis pagamintas iš lengvų, mažo stiprumo bei trapių medžiagų, dėl skirtingų sluoksnių betonų susitraukimo deformacijų plyšiai viduriniajame sluoksnyje gali atsirasti dar prieš apkraunant elementą (iki eksploatacinėje stadijoje).
2. Plyšio viduriniajame sluoksnyje atsiradimo tikimybė priklauso nuo gretimų sluoksnių aukščio, armavimo, stiprio ir sluoksnių medžiagų tamprumo modulių tarpusavio skirtumo.
3. Tyrimai parodė, kad veikiant išorinei apkrovai, lenkiamųjų gelžbetoninių trisluoksnių sijų išoriniuose sluoksniuose įtempiai ir deformacijos yra didesnės zonoje ties plyšiais viduriniajame sluoksnyje. Gniuždomajame išoriniame sluoksnyje deformacijos ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje didesnės iki 25–35 % (kai $M / M_u = 0,6$), lyginant su deformacijomis zonoje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje. Išorinio gniuždomojo sluoksnio deformacijų ties plyšiu padidėjimas priklauso nuo plyšio viduriniajame sluoksnyje aukščio bei pločio.
4. Tempiamajame išoriniame sluoksnyje deformacijos ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje didesnės iki 10–20 % (kai $M / M_u = 0,2$), lyginant su deformacijomis zonoje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje.
5. Eksperimentiniu būdu nustatyta, kad išorinis tempiamasis sluoksnis greičiau supleišėja zonoje ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje. Zonoje ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje išorinis sluoksnis supleišėdavo, kai $M / M_u = 0,10 \div 0,19$, o zonoje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje – kai $M / M_u = 0,24 \div 0,35$.
6. Nustatyta, kad lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių elementų viduriniam sluoksniui naudojant lengvas ir trapias medžiagas, konstrukcijos laikomąją galią lemia ne tik normalinio bei horizontaliojo (kontakto tarp sluoksnių zonoje) pjūvio stiprumai, bet ir viduriniojo sluoksnio atsparumas svarbiausiems gniuždymo įtempiams įstrižajame pjūvyje. Todėl projektuojant tokius lenkiamuosius elementus – būtina atlikti skaičiavimus ir numatyti įstrižojo pjūvio sustiprinimo būdus. Tam tikslui įstrižasis pjūvis gali būti armuojamas svarbiausių įtempių veikimo kryptimis. Įstrižojo pjūvio zonoje vidurinį sluoksnį taip pat galima gaminti iš stipresnių medžiagų, pvz., sunkiojo betono.

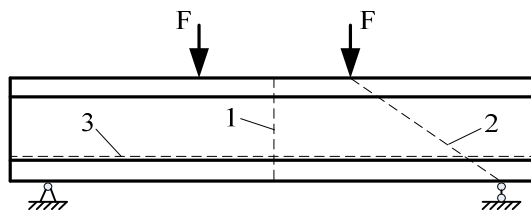
7. Atlikti įvairių sudėčių betono susitraukimo bei lenkimo eksperimentai patvirtino kitų autorių gautus rezultatus. Keramzitbetonio laisvojo susitraukimo deformacijos buvo iki 2 kartų didesnės, palyginus su sunkiojo betono susitraukimo deformacijomis. Polietilpropileno pluoštas praktiškai neturėjo įtakos betono susitraukimo deformacijų dydžiui bei gniuždomajam stipriui, tačiau betono su polietilpropileno pluoštu suirimo pobūdis buvo nežymiai plastiškesnis.

4. Eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė ir palyginimas su teorinių skaičiavimų rezultatais

Trečiame šios disertacijos skyriuje aprašytų dvylikos lenkiamųjų trisluoksnių sijų eksperimentinių tyrimų rezultatai buvo palyginti su teoriniais rezultatais, gautais atlikus skaičiavimus pagal antrame šios disertacijos skyriuje pateiktą laikomosios galios ir supleišėjimo momento skaičiavimo metodą.

4.1. Pasiūlyto skaičiavimo metodo rezultatų palyginimas su eksperimentiškai gautais rezultatais

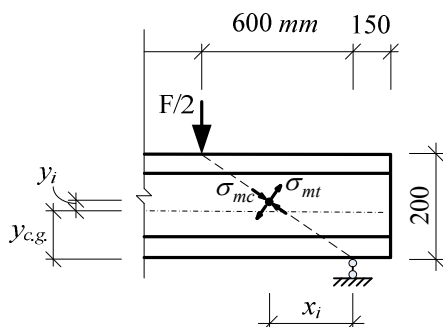
Lenkiamieji sluoksniuotieji elementai gali suirti viename iš trijų charakteringų pjūvių: normaliniame (nuo lenkimo momento), įstrižame (dėl tangentinių arba svarbiausiųjų įtempių) arba kontakto tarp sluoksnių zonoje (dėl šlyties jėgų) (4.1 pav.).



4.1 pav. Eksperimentinės lenkiamos trisluoksnių sijos: 1, 2, 3 – charakteringi trisluoksnių lenkiamųjų elementų suirimo pjūviai – atitinkamai normalinis, įstrižasis ir išilginis kontakto zonoje

Aukščiau minėtas antrame šios disertacijos skyriuje pateiktas skaičiavimo metodas leidžia įvertinti lenkiamųjų trisluoksnių armuotų sijų normalinio pjūvio stiprumą ir pleišetumą. Tačiau eksperimentinių tyrimų metu dalis sijų suiro ne normaliniame, o įstrižame pjūvyje. Todėl norint palyginti teorinius ir eksperimentinius rezultatus, įstrižame pjūvyje suirusių eksperimentinių sijų laikomoji galia buvo apskaičiuota ne tik normaliniame, bet ir įstrižame pjūvyje. Nei viena iš dvylikos eksperimentinių sijų nesuiro kontakto tarp sluoksnių zonoje, todėl šis charakteringas lenkiamųjų sluoksniuotųjų elementų pjūvis čia nebus nagrinėjamas.

Skaičiuojant lenkiamųjų trisluoksnių elementų stiprumą įstrižame pjūvyje buvo įvertinta galimybė, kad silpnesnis vidurinis sluoksnis suirs arba nuo svarbiausių gniuždymo įtempių (viršijančių medžiagos gniuždomąjį stiprį), arba nuo tangentinių įtempių (viršijančių medžiagos kirpimo stiprį).



4.2 pav. Skaičiuojamoji schema eksperimentinių lenkiamųjų trisluoksnių sijų stiprumo įstrižame pjūvyje skaičiavimui

Tangentiniai ir svarbiausieji gniuždymo įtempiai buvo skaičiuojami tik viduriniajame sluoksnyje, o jėgos pridėjimo taško atstumas nuo atramos (t.y. lenkimo momento petys) skaičiavimuose buvo imamas pagal eksperimentinę sijų lenkimo schemą (4.2 pav.). Maksimalūs tangentiniai įtempiai buvo skaičiuojami taške, kur $y_i = y_{i,\max} = t_1 + t_2 - y_{c.g.}$. Svarbiausieji gniuždymo įtempiai priklauso ne tik nuo atstumo nuo elemento svorio centro iki skaičiuojamojo taško (y_i), bet ir nuo skaičiuojamojo taško atstumo iki atramos x kryptimi (x_i). Šiuo atveju skaičiuojamojo taško koordinatės yra apibrėžtos tokiomis ribomis:

$$y_i = -(y_{c.g.} - t_1) \dots + (t_1 + t_2 - y_{c.g.}); \quad (4.1)$$

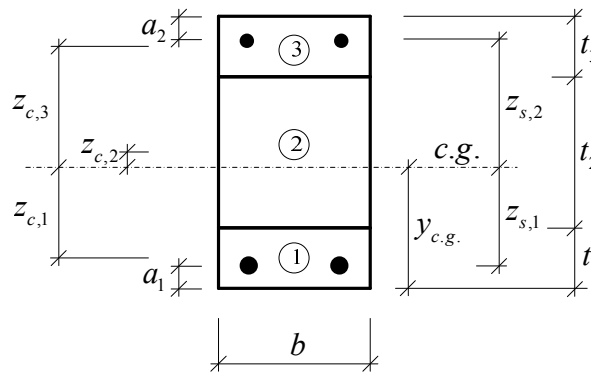
$$x_i = 0 \dots 600 \text{ mm} . \quad (4.2)$$

Buvo atlikti iteraciniai skaičiavimai keičiant taško koordinatės (y_i ir x_i) ir nustatytas taškas įstrižame pjūvyje, kuriame svarbiausieji gniuždymo įtempiai σ_{mc}^i yra didžiausi. Skaičiuojamajame taške veikiantis lenkimo momentas ir skersinė jėga gali būti apskaičiuoti pagal žinomas medžiagų mechanikos formules ir 4.2 paveikslą:

$$M_i = \frac{F_{\text{exp}} \cdot x_i}{2}; \quad (4.3)$$

$$V_i = \frac{F_{\text{exp}}}{2}. \quad (4.4)$$

Trisluoksnio elemento su nesimetriškai armuotais išoriniais sluoksniais svorio centro padėtis gali būti nustatoma pagal žinomas medžiagų mechanikos formules. Tam tikslui sudaryta skaičiuojamoji schema pavaizduota 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Eksperimentinių lenkiamųjų trisluoksnių sijų standumų bei svorio centrų skaičiavimo schema

Visų skerspjūvį sudarančių elementų (pagal tamprumo modulį redukuotų į viduriniojo sluoksnio medžiagą) statiniai momentai apie apatinį trisluoksnio elemento kraštą:

$$S_{c,1} = A_{c,1} \cdot \frac{E_{c,1}}{E_{c,2}} \cdot \frac{t_1}{2}; \quad (4.5)$$

$$S_{c,2} = A_{c,2} \cdot \left(t_1 + \frac{t_2}{2} \right); \quad (4.6)$$

$$S_{c,3} = A_{c,3} \cdot \frac{E_{c,3}}{E_{c,2}} \cdot \left(t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2} \right); \quad (4.7)$$

$$S_{s,1} = A_{s,1} \cdot \frac{E_{s,1}}{E_{c,2}} \cdot a_1; \quad (4.8)$$

$$S_{s,2} = A_{s,2} \cdot \frac{E_{s,2}}{E_{c,2}} \cdot (t_1 + t_2 + t_3 - a_2). \quad (4.9)$$

Tada atstumas nuo trisluoksnio elemento apatinio krašto iki svorio centro bus lygus visų statinių momentų sumos ir redukuotų skerspjūvio plotų sumos santykiui:

$$y_{c.g.} = \frac{\sum S_i}{\sum A_i} = \frac{S_{c,1} + S_{c,2} + S_{c,3} + S_{s,1} + S_{s,2}}{A_{c,1} \cdot \frac{E_{c,1}}{E_{c,2}} + A_{c,2} + A_{c,3} \cdot \frac{E_{c,3}}{E_{c,2}} + A_{s,1} \cdot \frac{E_{s,1}}{E_{c,2}} + A_{s,2} \cdot \frac{E_{s,2}}{E_{c,2}}} \quad (4.10)$$

Atstumai nuo elemento svorio centro iki atskirų sluoksnių betono ir armatūros svorio centrų (4.3 pav.):

$$z_{c,1} = y_{c.g.} - \frac{t_1}{2}; \quad (4.11)$$

$$z_{c,2} = t_1 + \frac{t_2}{2} - y_{c.g.}; \quad (4.12)$$

$$z_{c,3} = t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2} - y_{c.g.}; \quad (4.13)$$

$$z_{s,1} = y_{c.g.} - a_1; \quad (4.14)$$

$$z_{s,2} = t_1 + t_2 + t_3 - y_{c.g.} - a_2. \quad (4.15)$$

Trisluoksnio elemento bendras standis gali būti apskaičiuotas pagal tokią formulę:

$$D = E_{c,1} \cdot b_1 \cdot t_1 \cdot z_{c,1}^2 + E_{c,1} \cdot \frac{b_1 \cdot t_1^3}{12} + E_{c,2} \cdot b_2 \cdot t_2 \cdot z_{c,2}^2 + E_{c,2} \cdot \frac{b_2 \cdot t_2^3}{12} + E_{c,3} \cdot b_3 \cdot t_3 \cdot z_{c,3}^2 + E_{c,3} \cdot \frac{b_3 \cdot t_3^3}{12} + E_{s,1} \cdot A_{s,1} \cdot z_{s,1}^2 + E_{s,1} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{s,1}^4}{64} \cdot n_1 + E_{s,2} \cdot A_{s,2} \cdot z_{s,2}^2 + E_{s,2} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{s,2}^4}{64} \cdot n_2. \quad (4.16)$$

Trisluoksnio elemento bendras statinis momentas:

$$SE = E_{c,1} \cdot b_1 \cdot t_1 \cdot z_{c,1} + E_{c,2} \cdot b_2 \cdot t_2 \cdot z_{c,2} + E_{c,3} \cdot b_3 \cdot t_3 \cdot z_{c,3} + E_{s,1} \cdot A_{s,1} \cdot z_{s,1} + E_{s,2} \cdot A_{s,2} \cdot z_{s,2}. \quad (4.17)$$

Svarbiausiuosius gniuždymo įtempius šiuo atveju sudaro ne tik įtempiai nuo lenkimo momento, bet ir įtempiai, atsiradę dėl betono susitraukimo deformacijų. Dėl betono

susitraukimo deformacijų atsiradusių įtempių abiejuose viduriniojo sluoksnio kraštuose apskaičiavimo metodika ir formulės pateiktos antrame šios disertacijos skyriuje. Dėl betono susitraukimo atsiradę įtempiai viduriniajame sluoksnyje ties apatiniu sluoksniu, kuriame yra pagrindinė armatūra, visada bus didesni už įtempius ties viršutiniu sluoksniu. Tikslus įtempių dydis skaičiuojamajame skerspjūvio taške priklauso nuo taško padėties y kryptimi ir gali būti skaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$\sigma_{sh,c,2}^i = \sigma_{sh,c,2}^{top} + \frac{(y_{c.g.} - t_1 + y_i) \cdot (\sigma_{sh,c,2}^{bot} - \sigma_{sh,c,2}^{top})}{t_2}. \quad (4.18)$$

Dėl lenkimo momento skaičiuojamame skerspjūvio taške atsiradę įtempiai x kryptimi gali būti apskaičiuojami taip:

$$\sigma_x^i = \frac{M_i \cdot y_i \cdot E_{c,2}}{D}. \quad (4.19)$$

Tada suminiai įtempiai skaičiuojamame skerspjūvio taške (4.2 pav.):

$$\sigma_{x,tot}^i = \sigma_x^i + \sigma_{sh,c,2}^i. \quad (4.20)$$

Trisluoksnio lenkiamo elemento suirimo įstrižame pjūvyje dėl tangentinių įtempių sąlyga:

$$\tau_{xy}^i = \frac{V_i}{D \cdot b_2} \cdot SE \leq f_{sh,c,2}. \quad (4.21)$$

Trisluoksnio lenkiamo elemento suirimo įstrižame pjūvyje dėl svarbiausių gniuždymo įtempių sąlyga:

$$\sigma_{mc}^i = \frac{\sigma_{x,tot}^i}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,tot}^i}{2}\right)^2 + (\tau_{xy}^i)^2} \leq f_{c,2}. \quad (4.22)$$

Pagal (4.1–4.22) formules kiekvienai eksperimentinei sijai buvo apskaičiuota jėga, kuriai veikiant sija suyra įstrižame pjūvyje nuo tangentinių arba svarbiausių gniuždymo įtempių. T.y. kai netenkinamos (4.21) arba (4.22) sąlygos. Eksperimentinėms sijoms, kurios suiro normaliniame pjūvyje, laikomoji galia buvo skaičiuojama pagal antrame šios disertacijos skyriuje pateiktas formules.

3.6–3.7 lentelėse pateikti duomenys apie eksperimentinių sijų fizikines ir mechanines bei geometrines charakteristikas buvo panaudoti skaičiuojant teorinius dydžius – apatinio sluoksnio supleišėjimo momentą bei viso trisluoksnio lenkiamo elemento laikomąją galią. Skaičiavimai buvo atlikti pagal šios disertacijos 2-ame bei 4-ame skyriuje pateiktą skaičiavimo metodiką. Atlikus skaičiavimus, buvo sudarytos eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimo lentelės (4.1 ir 4.2 lentelės).

4.1 lentelė. Lenkiamųjų trisluoksnių sijų laikomosios galios eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas

Bandymų serija	Sijos kodas	$M_{exp,u}$, kNm	$M_{cal,u}$, kNm	$\frac{M_{cal,u}}{M_{exp,u}}$
1 serija	S1	4,98 ¹	5,04 ³	1,01
	S2	5,12 ¹	4,68 ³	0,91
	S3	6,73 ¹	6,60 ³	0,98
	S4	6,06 ¹	6,00 ³	0,99
2 serija	S5	6,01 ¹	5,64 ³	0,94
	S6	6,11 ¹	5,88 ³	0,96
	S7	6,82 ¹	5,64 ³	0,83
	S8	6,75 ¹	5,76 ³	0,85
3 serija	S9	18,28 ²	18,10 ⁴	0,99
	S10	18,80 ²	18,13 ⁴	0,96
	S11	11,70 ²	11,27 ⁴	0,96
	S12	11,34 ²	11,28 ⁴	0,99

¹ – sija suiro įstrižame pjūvyje dėl tangentinių įtempių;

² – sija suiro normaliniame pjūvyje dėl lenkimo momento;

³ – skaičiuotas sijos stipris įstrižame pjūvyje ((4.21) sąlyga);

⁴ – skaičiuotas sijos stipris normaliniame pjūvyje tuo atveju, kai viduriniajame sluoksnyje yra plyšiai per visą sluoksnio aukštį ((2.139) sąlyga).

Pagal 4.1 lentelėje pateikiamus rezultatus galima daryti išvadą, kad pasiūlytas skaičiavimo metodas leidžia pakankamai tiksliai nustatyti lenkiamųjų trisluoksnių armuotų sijų apatinio sluoksnio supleišėjimo momentą bei viso lenkiamo elemento laikomąją galią. Tačiau nors šioje disertacijoje (taip pat ir eksperimentų metu) didesnis dėmesys buvo skiriamas normaliniam lenkiamųjų elementų pjūviui – 8 iš 12 eksperimentinių sijų suiro įstrižame pjūvyje. Todėl projektuojant tokio tipo konstrukcinius elementus svarbu patikrinti stiprumą ne tik normaliniame, bet ir įstrižame pjūvyje. Taip pat galima paminėti, kad eksperimentinės sijos įstrižame pjūvyje suiro ne nuo svarbiausiųjų gniuždymo įtempių (4.22), o nuo tangentinių kirpimo įtempių (4.21). Nei viena iš sijų nesuiro išilgimame pjūvyje (kontakto tarp sluoksnių zonoje).

4.2 lentelė. Lenkiamųjų trisluoksnių sijų apatinio sluoksnio supleišėjimo momentų eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas pjūviuose ties plyšiu ir tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje

Bandymų serija	Sijos kodas	$M_{exp,cr}$ ties plyšiu, kNm	$M_{exp,cr}$ tarp plyšių, kNm	$M_{cal,cr}$ ties plyšiu, kNm	$M_{cal,cr}$ tarp plyšių, kNm	$\frac{M_{cal,cr}}{M_{exp,cr}}$ ties plyšiu	$\frac{M_{cal,cr}}{M_{exp,cr}}$ tarp plyšių
1 serija	S1	3,32	4,98 ³	3,09 ¹	5,08 ²	0,93	1,02
	S2	5,07	6,73 ³	4,92 ¹	6,72 ²	0,97	1,00
	S3	2,96	4,50	2,70 ¹	4,31 ²	0,91	0,96
	S4	5,16	6,05	4,44 ¹	5,93 ²	0,86	0,98
2 serija	S5	4,92	6,01 ³	4,82 ¹	6,45 ²	0,98	1,07
	S6	3,50	5,30	3,13 ¹	5,26 ²	0,89	0,99
	S7	4,81	6,82 ³	4,97 ¹	6,74 ²	1,03	0,99
	S8	3,47	5,97	3,35 ¹	5,73 ²	0,96	0,96
3 serija	S9	4,95	6,95	4,75 ¹	6,42 ²	0,96	0,92
	S10	4,65	6,55	4,67 ¹	6,27 ²	1,00	0,96
	S11	3,39	5,39	3,17 ¹	5,30 ²	0,93	0,98
	S12	3,41	5,91	3,30 ¹	5,63 ²	0,97	0,95

¹ – supleišėjimo momentas skaičiuotas tuo atveju, kai viduriniajame sluoksnyje yra plyšys per visą sluoksnio aukštį ((2.124) sąlyga);

² – supleišėjimo momentas skaičiuotas tuo atveju, kai viduriniajame sluoksnyje plyšių nėra ((2.115) sąlyga);

³ – sija suiro nuo įstrižame pjūvyje dar prieš atsirandant aiškiems plyšiams normaliniame pjūvyje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje.

Tai parodo, kad projektuojant lenkiamuosius sluoksniuotuosius elementus iš to paties tipo medžiagų (betono) – tarp sluoksnių gaunamas pakankamai tvirtas ryšys, užtikrinantis bendrą elemento darbą. Dėl šios priežasties skaičiavimuose padaryta prielaida apie standų kontaktą tarp sluoksnių neturėjo neigiamos įtakos skaičiavimo rezultatų tikslumui ir pakankamai tiksliai atspindėjo realų eksperimentinių sąlygų įtempių ir deformacijų būvį.

Norint patikrinti 2-ame šios disertacijos skyriuje daromas prielaidas apie skirtingus įtempių ir deformacijų būvius normaliniuose pjūviuose ties plyšiu ir tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje, apatinio sluoksnio supleišėjimas buvo fiksuojamas abiejuose charakteringuose pjūviuose. Teorinis apatinio sluoksnio supleišėjimo momentas taip pat buvo apskaičiuotas abiejuose charakteringuose pjūviuose (atitinkamai pirmasis ir trečiasis skaičiavimo atvejai, pateikti 2-ame šios disertacijos skyriuje). Atlikus skaičiavimus ir eksperimentus sudaryta teorinių ir eksperimentinių supleišėjimo momentų palyginimo lentelė. 4.1 ir 4.2 lentelėse pateikti duomenys leidžia daryti išvadą, kad skaičiavimo metode pasiūlytos prielaidos ir naudojamos kelios charakteringos skaičiavimo schemos pakankamai tiksliai atspindi realią lenkiamųjų trisluoksnių armuotų elementų elgseną bei supleišėjusio viduriniojo sluoksnio įtaką tiek bendrai elementų laikomajai galiai, tiek apatinio labiausiai tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentui.

4.2. Tinkamo skaičiuojamojo modelio parinkimas pasiūlytam skaičiavimo metodui

Pasiūlyto trisluoksnių elementų stiprumo ir pleišetumo skaičiavimo metodo tikslumas žymia dalimi priklauso nuo pasirinktos skaičiuojamosios schemos atitikimo realiam įtempių ir deformacijų būviui skerspjūvyje. Šioje disertacijoje pateikti keturi labiausiai tikėtini įtempių ir deformacijų būvio atvejai. Tačiau skaičiuojant realias konstrukcijas ne visada galima tiksliai nustatyti, kuris iš keturių pateiktų atvejų bus artimiausias realiam įtempių ir deformacijų būviui. Bet koku atveju, pasirinktas skaičiuojamasis modelis turi maksimaliai atitikti realias lenkiamo sluoksniuotojo elemento geometrines charakteristikas bei naudojamų medžiagų deformacines savybes.

Tuo atveju, kai elemento vidurinis sluoksnis pagamintas iš surenkamų elementų arba yra supleišėjęs per visą sluoksnio aukštį – turi būti pasirinkta arba skaičiuojamoji schema su visiškai supleišėjusiu viduriniu sluoksniu, arba su dalinai (gniuždomojoje zonoje) užsivėrusiu plyšiu. Plyšio gniuždomojoje zonoje užsivėrimo sąlyga pateikta 2-ame šios disertacijos

skyriuje (2.83). Jei (2.83) sąlyga netenkinama – elemento viduriniojo sluoksnio darbas normaliniame pjūvyje tiek pleišėtumo, tiek stiprumo skaičiavimuose gali būti nevertinamas.

Tuo atveju, kai elemento vidurinis sluoksnis prieš apkraunant nėra supleišėjęs, tačiau pagamintas iš ženkiai silpnesnės medžiagos, palyginus su išoriniais sluoksniais – turi būti nagrinėjami du galimi skaičiavimo atvejai. Pirmuoju atveju lenkiant elementą pirmiausiai supleišėja labiau tempiamas išorinis sluoksnis. Antruoju atveju – plyšys pirmiausiai atsiranda tempiamojoje viduriniojo sluoksnio dalyje, todėl turi būti įvertintas skaičiuojant tiek normalinio pjūvio stiprumą, tiek pleišėtumą. Norint nustatyti, ar lenkiant trisluoksnį elementą plyšys viduriniajame sluoksnyje gali atsirasti anksčiau negu labiau tempiamajame išoriniame sluoksnyje, galima pasinaudoti prielaida, kad deformacijos skerspjūvyje pasiskirsto tiesialinijiniu būdu. Betonas tempiamojoje viduriniojo sluoksnio zonoje supleišės tuo atveju, jei jo deformacijos viršys ribines tempiamojo betono deformacijas, t.y. galios sąlyga (2.9 pav., b):

$$\varepsilon_{c,2}^{bot} > \varepsilon_{c,2,u} \quad (4.23)$$

Ribines tiek viduriniojo, tiek išorinio sluoksnio tempiamojo betono deformacijas galima apskaičiuoti pasinaudojus Huko dėsnio ir įvertinus medžiagos tamprumo koeficientą (2.78). Tada pagal (2.71) formulę nustačius neutraliosios ašies padėtį (tariant, kad plyšių viduriniajame sluoksnyje nėra) ir viduriniojo sluoksnio tempiamojo krašto deformacijas $\varepsilon_{c,2}^{bot}$ paskaičiavus pagal ribines išorinio sluoksnio tempiamojo betono deformacijas (2.65) bei atlikus matematinius pertvarkymus – galima sudaryti sąlygą, parodančią ar gali lenkiamame trisluoksniame elemente plyšys viduriniajame sluoksnyje atsirasti anksčiau, negu išoriniame:

$$\frac{f_{ct,2} \cdot (y_{n.a.} - t_1)}{E_{c,1} \cdot \nu_1 \cdot y_{n.a.}} > \frac{f_{ct,2}}{E_{c,2} \cdot \nu_2} \quad (4.24)$$

Jei (4.24) sąlyga netenkinama, tai reiškia, kad lenkiant elementą plyšys pirmiausiai atsiras labiau tempiamajame išoriniame sluoksnyje. Todėl tokiu atveju, jei vidurinis sluoksnis nėra supleišėjęs prieš apkraunant elementą, tolesnius normalinio pjūvio stiprumo bei pleišėtumo skaičiavimus galima vykdyti atmetant tikimybę, kad viduriniajame sluoksnyje atsiras plyšys ir pakeis įtempių ir deformacijų būvį skerspjūvyje.

Jei abi (4.24) sąlygoje pateiktos nelygybės pusės yra lygios, tai lenkiant trisluoksnį elementą vidurinysis ir tempiamas išorinis sluoksniai supleišės vienu metu. Skaičiuojant lenkiamas sluoksniuotas konstrukcijas, svarbiau nustatyti išorinio sluoksnio pleišetumą. Šiuo atveju vidurinysis sluoksnis supleišėja tuo pačiu metu kaip ir išorinis sluoksnis, todėl plyšys viduriniajame sluoksnyje jokios įtakos išorinio sluoksnio supleišėjimo momento reikšmei neturi ir gali būti ignoruojamas skaičiavimų metu.

Jei (4.24) sąlyga tenkinama, tai reiškia, kad plyšys viduriniajame sluoksnyje atsiras anksčiau, negu išoriniame labiau tempiamajame sluoksnyje ir tuo būdu pakeis įtempių ir deformacijų būvį visame skerspjuvyje. Šiuo atveju dėl plyšio viduriniajame sluoksnyje taip pat šiek tiek pasikeis lenkiamo trisluoksnio elemento neutraliosios ašies padėtis. Priklausomai nuo plyšio viduriniajame sluoksnyje gylio – daugiau ar mažiau sumažėja lenkiamo elemento laikomoji galia bei išorinio sluoksnio supleišėjimo momentas.

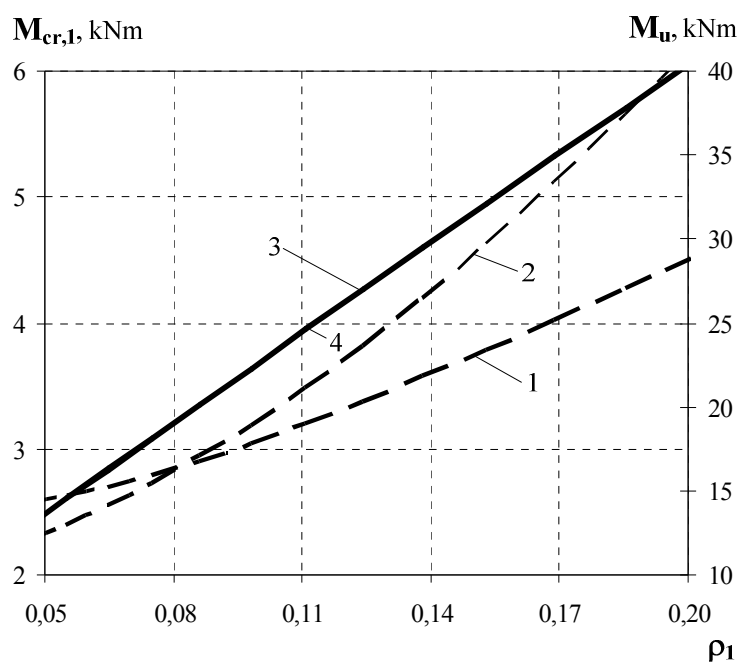
Atlikus (4.24) sąlygos analizę, galima padaryti išvadą, kad plyšio atsiradimo viduriniajame trisluoksnio lenkiamo elemento sluoksnyje tikimybė daugiausiai priklauso nuo viduriniojo bei išorinio tempiamojo sluoksnio medžiagų fizikinių savybių tarpusavio priklausomybės. Išoriniai trisluoksnių lenkiamųjų elementų sluoksniai dažniausiai gaminami iš paprasto sunkiojo betono, todėl (4.24) sąlygos galiojimas daugiausiai priklauso nuo viduriniojo sluoksnio medžiagos tempiamojo stiprio ir pradinio tamprumo modulio santykio. Atlikus tyrimus nustatyta, kad jei išorinis sluoksnis pagamintas iš paprasto betono, kurio tempiamasis stipris $f_{ct,1} \approx 2 \text{ MPa}$, o pradinis tamprumo modulis $E_{c,1} \approx 30 \text{ GPa}$, tai (4.24) sąlyga galioja, kai $\frac{f_{ct,2}}{E_{c,2}} > 4 \times 10^{-5}$.

4.3. Trisluoksnio elemento geometrinių bei fizikinių ir mechaninių charakteristikų įtaka pasiūlyto skaičiavimo metodo rezultatams

Trisluoksnių lenkiamųjų armuotų elementų laikomoji galia bei supleišėjimo momentas priklauso tiek nuo fizikinių ir mechaninių (stiprių tempiant ir gniuždant, tamprumo modulio, tamprumo koeficiento), tiek nuo geometrinių charakteristikų (sluoksnių aukščio ir pločio, armatūros skersmens, strypų skaičiaus ir padėties). Norint nustatyti kiekybinę svarbiausių charakteristikų įtaką pasiūlyto skaičiavimo metodo rezultatams, buvo atlikta parametrinė

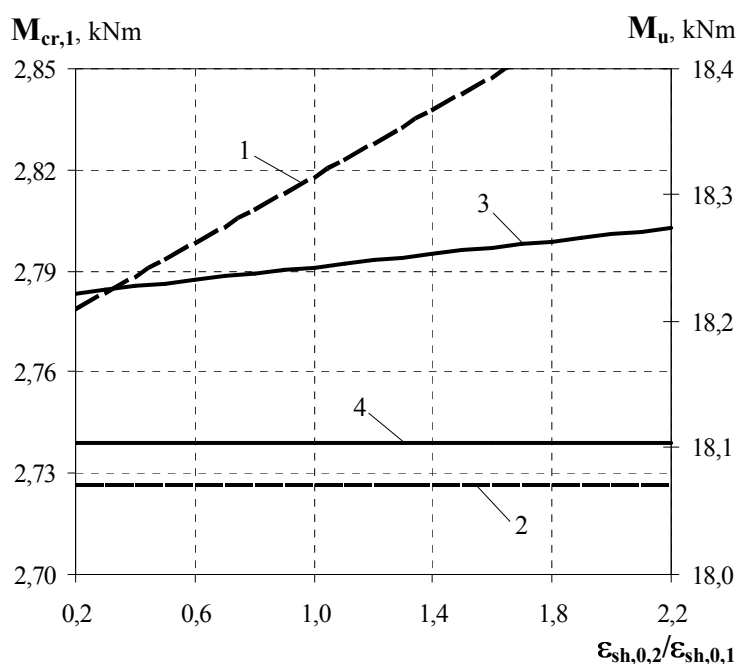
analizė. Pradinių duomenų masyvo pagrindu buvo pasirinkti eksperimentinės sijos S9 duomenys. Skaičiavimų metu visi duomenys, išskyrus nagrinėjamą charakteristiką, buvo nekintami. Išimtis buvo padaryta tik skaičiuojant tempiamojo stiprio įtaką – šiuo atveju kartu su stipriu tempiant buvo keičiamos tos pačios medžiagos gniuždomojo stiprio ir tamprumo modulio charakteristikos (taip atspindint realias betono tipo medžiagų savybes).

Skaičiavimai buvo atlikti pagal du charakteringus skaičiavimo atvejus – normaliniame pjūvyje ties plyšiu (3-asis atvejis, aprašytas 2-ame šios disertacijos skyriuje) ir normaliniame pjūvyje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje (1-asis atvejis, aprašytas 2-ame šios disertacijos skyriuje). Pateikiamuose parametrinės analizės grafikuose parodyta nagrinėjamos kintamos charakteristikos įtaka tiek apatinio sluoksnio supleišėjimo momentui ($M_{cr,1}$, kairė Y ašis), tiek bendrai elemento laikomajai galiai (M_u , dešinė Y ašis). Visuose grafikuose supleišėjimo momentas žymimas punktyrine linija, o laikomoji galia – ištisine linija.



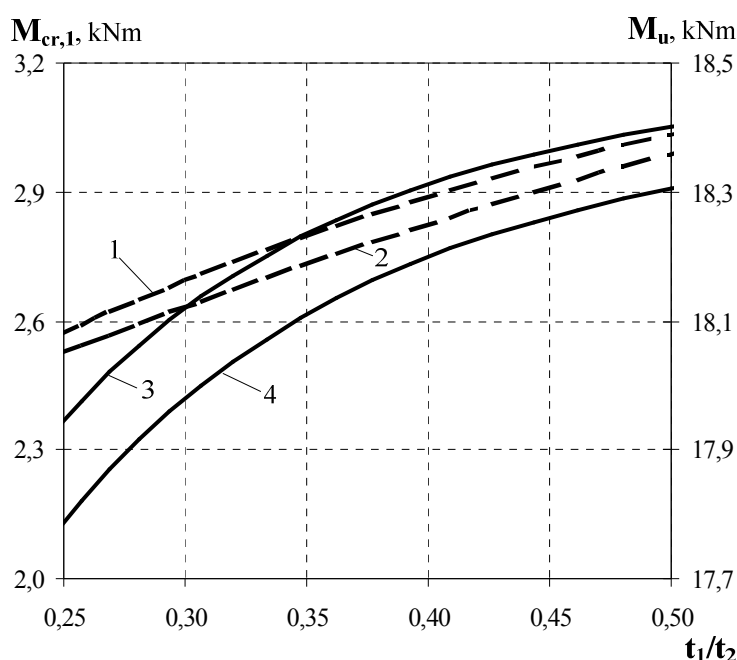
4.4 pav. Trisluksnių sijų apatinio sluoksnio supleišėjimo momento ir laikomosios galios priklausomybė nuo apatinio sluoksnio armavimo koeficiento: 1, 2 – supleišėjimo momentas (y ašis kairėje) atitinkamai tuo atveju, kai visi sluoksniai nesupleišėję ir kai vidurinysis sluoksnis visiškai supleišėjęs; 3, 4 – laikomoji galia (y ašis dešinėje) atitinkamai tuo atveju, kai visi sluoksniai nesupleišėję ir kai vidurinysis sluoksnis visiškai supleišėjęs

4.4 paveiksle matosi, kad didėjant pagrindinės armatūros kiekiui didėja ir apatinio sluoksnio supleišėjimo momentas ir viso lenkiamo elemento laikomoji galia. Laikomoji galia pjūviuose ties plyšiu ir tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje beveik vienoda (4.4 pav., atitinkamai 4 ir 3), nes armavimo koeficiento įtaka yra žymiai didesnė palyginus su viduriniojo sluoksnio pleišetumo įtaka. Tuo tarpu apatinio sluoksnio supleišėjimo momentas nuo armavimo koeficiento labiau priklauso pjūvyje su supleišėjusiu viduriniu sluoksniu (4.4 pav., 2). 4.4 paveiksle taip pat matosi, kad yra tam tikras armavimo procentas, kuriam esant supleišėjimo momentas abiejuose charakteringuose pjūviuose (su supleišėjusiu ir su nesupleišėjusiu viduriniu sluoksniu) yra lygus. Tai galima paaiškinti pradinių betono susitraukimo sukeltų įtempių įtaka galutiniams skaičiavimo rezultatams. Tačiau 4.4 paveiksle pateikta supleišėjimo momento priklausomybė nuo armavimo koeficiento galioja tik tuo atveju, jei besitraukiantis sluoksnio betonas dėl armatūros pasipriešinimo nesupleišėja dar prieš apkraunant elementą. Tokiu atveju armavimo koeficiento didėjimas turi neigiamą įtaką.



4.5 pav. Trisluoksnių sijų apatinio sluoksnio supleišėjimo momento ir laikomosios galios priklausomybė nuo viduriniojo ir apatinio sluoksnių laisvojo betono susitraukimo deformacijų tarpusavio santykio:
 1, 2 – supleišėjimo momentas (y ašis kairėje) atitinkamai tuo atveju, kai visi sluoksniai nesupleišėję ir kai vidurinis sluoksnis visiškai supleišėjęs; 3, 4 – laikomoji galia (y ašis dešinėje) atitinkamai tuo atveju, kai visi sluoksniai nesupleišėję ir kai vidurinis sluoksnis visiškai supleišėjęs

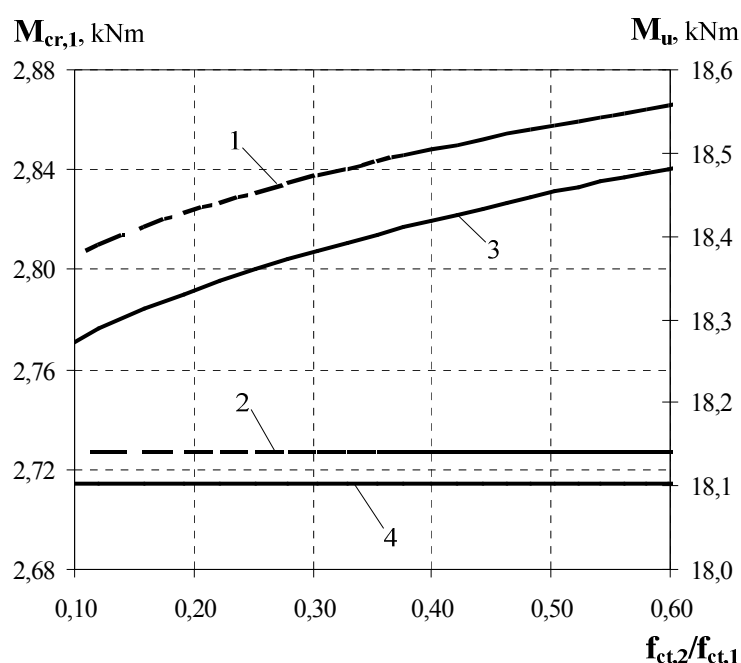
Trisluoksnių lenkiamųjų elementų pradinis įtempių ir deformacijų būvis bei supleišėjimo momento ir laikomosios galios dydžiai priklauso ne tik nuo absoliučių sluoksnių susitraukimo deformacijų dydžių, bet ir jų tarpusavio santykio (tarp gretimų sluoksnių arba tarp sluoksnio betono ir armatūros). Labiau besitraukiančiame sluoksnyje visada atsiranda tempimo įtempiai, o mažiau besitraukiančiame – gniuždymo įtempiai. Eksperimentinių sijų atveju susitraukimo deformacijos visada buvo didesnės lengvojo betono viduriniajame sluoksnyje, kuris apspausdavo išorinius sluoksnius. Išorinių sluoksnių armatūra savaime nesitraukdavo, todėl ją gniuždėdavo besitraukiantis betonas. Tokiu būdu dėl susitraukimo deformacijų trisluoksniis armuotas elementas dirba panašiai, kaip vienasluoksniis betoninis elementas su iš anksto įtempta išorine armatūra. 4.5 paveiksle pateikta supleišėjimo momento ir laikomosios galios priklausomybė nuo viduriniojo ir apatinio sluoksnio betonų susitraukimo deformacijų tarpusavio santykio. Skaičiuojant pjūvį su supleišėjusiu viduriniu sluoksniu aukščiau minėtas susitraukimo deformacijų santykis rezultatams jokios įtakos neturi, nes skaičiavimuose viduriniojo supleišėjusio sluoksnio darbas nėra vertinamas. Taip pat logiška, kad supleišėjimo momentui susitraukimo deformacijos turi didesnę įtaką negu laikomajai galiai.



4.6 pav. Trisluoksnių sijų apatinio sluoksnio supleišėjimo momento ir laikomosios galios priklausomybė nuo viduriniojo ir apatinio sluoksnių storių tarpusavio santykio: 1, 2 – supleišėjimo momentas (y ašis kairėje) atitinkamai tuo atveju, kai visi sluoksniai nesupleišėję ir kai vidurinis sluoksniis visiškai supleišėjęs; 3, 4 – laikomoji galia (y ašis dešinėje) atitinkamai tuo atveju, kai visi sluoksniai nesupleišėję ir kai vidurinis sluoksniis visiškai supleišėjęs

Tiek supleišėjimo momentas, tiek laikomoji galia 4.5 paveiksle didėja didėjant $\varepsilon_{sh,0,2} / \varepsilon_{sh,0,1}$ santykiui, nes susitraukimo deformacijų santykis sukelia priešingo ženklo (palyginus su lenkimo momentu) įtempius apatiniame sluoksnyje ir taip padidina sluoksnio laikomąją galią.

4.6 paveiksle pavaizduota diagrama rodo logišką laikomosios galios ir supleišėjimo momento didėjimą didėjant t_1 / t_2 santykiui, nes nekeičiant bendro trisluoksnio elemento aukščio didėja stipresnės medžiagos dalis, kuri ir sudaro pagrindinę lenkiamo elemento laikomosios galios dalį. Tačiau šiuo atveju apatinio sluoksnio supleišėjimo momentas didėja ne taip žymiai kaip bendra laikomoji galia.



4.7 pav. Trisluoksnių sijų apatinio sluoksnio supleišėjimo momento ir laikomosios galios priklausomybė nuo viduriniojo ir apatinio sluoksnių betono stiprių tempiant tarpusavio santykio: 1, 2 – supleišėjimo momentas (y ašis kairėje) atitinkamai tuo atveju, kai visi sluoksniai nesupleišėję ir kai vidurinysis sluoksnis visiškai supleišėjęs; 3, 4 – laikomoji galia (y ašis dešinėje) atitinkamai tuo atveju, kai visi sluoksniai nesupleišėję ir kai vidurinysis sluoksnis visiškai supleišėjęs

Tai galima paaiškinti tuo, kad laikomajai galiai žymiai didesnę įtaką turi pagrindinė armatūra, nes skaičiavimo metu tempiamojo sluoksnio betono dalis nevertinama, t.y. laikoma, kad betonas supleišėja anksčiau, negu armatūra pasiekia ribinį būvį. Supleišėjimo momento

skaičiavimuose apatinio tempiamojo sluoksnio betono darbas yra įvertinamas, todėl sluoksnio storis turi žymią įtaką galutiniam supleišėjimo momento dydžiui.

Tempiamojoje zonoje dirbančių sluoksnių medžiagų stipriai tempiant bei jų tarpusavio santykis taip pat turi ženkliai įtaką tiek supleišėjimo momentui, tiek bendrai lenkiamo elemento laikomajai galiai (4.7 pav.). Tačiau šiuo atveju, panašiai kaip 4.5 paveiksle, stiprių tempiant tarpusavio santykis svarbus tik tuo atveju, kai vidurinysis sluoksnis yra nesupleišėjęs. Kai vidurinysis sluoksnis yra nesupleišėjęs ir jo darbas įvertinamas – didėjantis viduriniojo sluoksnio tempiamasis stipris turi teigiamą įtaką tiek apatinio sluoksnio supleišėjimo momentui, tiek ir bendrai lenkiamo trisluoksnio elemento laikomajai galiai.

Parametrinė analizė parodė, kad padidėjęs trisluoksnio elemento medžiagų stipris turi teigiamą įtaką galutiniams rezultatams. Tačiau įvertinus išankstinius betono susitraukimo deformacijų sukeltus įtempius, kai kuriais atvejais stipresnių medžiagų panaudojimas gali turėti ir neigiamos įtakos galutiniams rezultatams (ypač – pleišetumui). Todėl projektuojant tokio tipo lenkiamuosius sluoksniuotuosius elementus svarbu parinkti ne pačias stipriausias (ir brangiausias) medžiagas, o optimalų jų derinį.

4.4. Išvados

1. Pagal pasiūlytą skaičiavimo metodą apskaičiuoti lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių sijų teoriniai laikomosios galios ir supleišėjimo momento rezultatai pakankamai gerai sutapo su eksperimentiniais rezultatais.
2. Skaičiuojant sijų laikomąją galią M_u , vidutinis santykis tarp teorinių ir eksperimentinių rezultatų $\mu_{cal/exp} = 0,95$, vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma_{cal/exp} = 0,06$.
3. Skaičiuojant apatiniojo tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentą $M_{cr,1}$ zonoje ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje: $\mu_{cal/exp} = 0,95$, $\sigma_{cal/exp} = 0,05$.
4. Skaičiuojant apatiniojo tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentą $M_{cr,1}$ zonoje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje: $\mu_{cal/exp} = 0,98$, $\sigma_{cal/exp} = 0,04$.
5. Sijų, kurių vidurinysis sluoksnis buvo pagamintas iš keramzitbetonio, mažesnę laikomąją galią galima paaiškinti tuo, kad jame anksčiau negu kitose sijose įstrižajame pjūvyje atsirado plyšiai, kurie ir tapo tolesnio irimo vystimosi pagrindu.

6. Atlikus pasiūlyto metodo skaičiavimo ir eksperimentinių rezultatų analizę nustatyta, kad didžiausią įtaką trisluoksnių gelžbetoninių sijų laikomajai galiai bei pleišetumui turi sluoksnių medžiagų tamprumo modulių ir betono tempiamojo stiprio tarpusavio santykiai bei išorinių sluoksnių armavimo koeficientas.

5. Pagrindinės darbo išvados, rezultatai ir rekomendacijos

1. Mokslinėje literatūroje yra pateikta įvairių sluoksniuotųjų lenkiamų elementų laikomosios galios ir supleišėjimo skaičiavimo metodų, kurių dauguma paremti sluoksnių redukavimo metodu. Tačiau taikant šį metodą negalima tiksliai įvertinti visų medžiagų deformacinių savybių ir tuo pačiu neįmanoma įvertinti galimybės, kad vidurinieji sluoksniai supleišėja anksčiau negu išorinis labiausiai tempiamas sluoksnis. Tamprumo teorija paremti skaičiavimo metodai yra sunkiai pritaikomi gelžbetoniniams sluoksniuotiesiems elementams.
2. Nėra lenkiamųjų sluoksniuotųjų gelžbetoninių elementų supleišėjimo ir laikomosios galios skaičiavimo metodo, įvertinančio galimą vidurinio sluoksnio supleišėjimą ir pradinį įtempių ir deformacijų būvį, atsiradusį sluoksniuotajame gelžbetoniniame elemente dėl skirtingų sluoksnių medžiagų savybių ir betonų susitraukimo deformacijų.
3. Pasiūlytas lenkiamųjų trislauksnių gelžbetoninių elementų pleišetumo ir laikomosios galios skaičiavimo metodas, leidžiantis įvertinti galimus plyšius viduriniajame sluoksnyje, nesimetrinį išorinių sluoksnių armavimą bei pradinį įtempių ir deformacijų būvį, atsiradusį dėl skirtingų sluoksnių betonų savybių ir susitraukimo deformacijų.
4. Nagrinėjamiems lenkiamiesiems trislauksniams gelžbetoniniams elementams, kurių išoriniai sluoksniai armuoti nesimetriškai, o vidurinis sluoksnis pagamintas iš lengvų betono tipo medžiagų, nustatyti 4 labiausiai tikėtini įtempių ir deformacijų būvio atvejai. Šie 4 įtempių ir deformacijų būvio atvejai iš esmės atspindi visus viduriniojo sluoksnio supleišėjimo atvejus: visiškai nesupleišęs, visiškai supleišęs, dalinai supleišęs ir kai plyšys apkrovimo metu gniuždomoje zonoje užsiveria.
5. Pateiktos lygtys visiems tiriamiems įtempių ir deformacijų būvio atvejams leidžia nustatyti pradinius įtempius, neutraliosios ašies padėtį, apatinio sluoksnio supleišėjimo momentą ir viso trislauksnio lenkiamo elemento laikomąją galią, įvertinant viduriniojo sluoksnio supleišėjimą ir skirtingas sluoksnių betonų susitraukimo deformacijas.
6. Eksperimentiniai trislauksnių gelžbetoninių elementų, kurių vidurinis sluoksnis pagamintas iš lengvų, mažo stiprumo bei trapių medžiagų, tyrimai parodė, kad priklausomai nuo susitraukimo deformacijų ir gretimų sluoksnių aukščio, armavimo, stiprio ir tamprumo modulių tarpusavio skirtumo, plyšiai viduriniajame sluoksnyje gali atsirasti dar prieš apkraunant elementą.

7. Nustatyta, kad veikiant apkrovai, lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių elementų išoriniuose sluoksniuose deformacijos yra didesnės zonose ties plyšiais viduriniajame sluoksnyje, palyginus su zonomis, kuriose vidurinis sluoksnis nesupleišėjęs. Gniuždomajame išoriniame sluoksnyje deformacijos ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje didesnės 25–35 % (kai $M / M_u = 0,6$), o tempiamajame išoriniame sluoksnyje – 10–20 % (kai $M / M_u = 0,2$).
8. Išorinis tempiamasis sluoksnis ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje supleišėja esant 10–20 % mažesnei apkrovai, palygus su zona tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje.
9. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad projektuojant ir gaminant lenkiamuosius trisluoksnius gelžbetoninius elementus, kurių viduriniajam sluoksniui naudojamos lengvos ir trapios medžiagos, būtina atlikti skaičiavimus ir numatyti įstrižojo pjūvio sustiprinimo būdus (papildomai armuojant svarbiausių ir tangentinių įtempių veikimo kryptimis ar kitu būdu).
10. Pagal pasiūlytą skaičiavimo metodą apskaičiuoti lenkiamųjų trisluoksnių gelžbetoninių sijų teoriniai laikomosios galios ir supleišėjimo momento rezultatai pakankamai gerai sutapo su eksperimentiniais rezultatais. Skaičiuojant sijų laikomąją galią M_u , vidutinis santykis tarp teorinių ir eksperimentinių rezultatų $\mu_{cal/exp} = 0,95$, vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma_{cal/exp} = 0,06$. Skaičiuojant apatiniojo tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentą $M_{cr,1}$ zonoje ties plyšiu viduriniajame sluoksnyje: $\mu_{cal/exp} = 0,95$, $\sigma_{cal/exp} = 0,05$. Skaičiuojant apatiniojo tempiamojo sluoksnio supleišėjimo momentą $M_{cr,1}$ zonoje tarp plyšių viduriniajame sluoksnyje: $\mu_{cal/exp} = 0,98$, $\sigma_{cal/exp} = 0,04$.
11. Atlikus teorinius ir eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad didžiausią įtaką lenkiamų trisluoksnių gelžbetoninių elementų laikomajai galiai ir pleišetumui turi sluoksnių medžiagų tamprumo modulių ir betono tempiamojo stiprio tarpusavio santykiai bei išorinių sluoksnių armavimo koeficientas.

Literatūros sąrašas

1. Abdel-Fattah H.; El-Hawary M. M. Flexural behaviour of polymer concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 13, No. 5, 1999, p. 253–262.
2. Abdul-Ahad R. B.; Aziz O. Q. Flexural strength of reinforced concrete T-beams with steel fibers. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, No. 4, 1999, p. 263–268.
3. Ahmad S. H.; Xie Y.; Yu T. Shear ductility of reinforced lightweight concrete beams of normal strength and high strength concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 17, No. 2, 1995, p. 147–159.
4. Alhozaimy A. M.; Soroushian P.; Mirza F. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 18, No. 2, 1996, p. 85–92.
5. Almusallam A. A.; Maslehuddin M.; Abdul-Waris M.; Khan M. M. Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments. *Construction and Building Materials*, Vol. 12, No. 6–7, 1998, p. 353–358.
6. Alsayed S. H. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 20, No. 1, 1998, p. 1–11.
7. Arya C.; Clarke J. L.; Kay E. A.; O'Regan P. D. TR 55: Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials: a review. *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 7, 2002, p. 889–900.
8. Ashour S. A. Effect of compressive strength and tensile reinforcement ratio on flexural behaviour of high-strength concrete beams. *Engineering Structures*, Vol. 22, No. 5, 2000, p. 413–423.
9. Ashour S. A. Wafa F. F.; Kamal M. I. Effect of concrete compressive strength and tensile reinforcement ratio on flexural behaviour of fibrous concrete beams. *Engineering Structures*, Vol. 22, No. 9, 2000, p. 1145–1158.
10. Bayasi Z.; Kaiser H.; Gonzales M. Composite slabs with corrugated SIMCON deck as alternative for corrugated metal sheets. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 10, October 2001, p. 1198–1205.
11. Banthia N.; Yan C.; Mindess S. Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced concrete: a novel test technique. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 1, 1996, p. 9–14.

12. Bantia N.; Nandakumar N. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, No. 1, 2003, p. 3–9.
13. Bareišis J. Konstrukcinis kompozitų statinis ir ciklinis stiprumas. Habilitacinis darbas, Kaunas, 1995, 110 p.
14. Bareišis J. Stiffness and strength of multilayer beams. *Journal of Composite Materials*, Vol 40, No 6, London (UK), 2006, p. 515–531.
15. Barr B.; Gettu R.; Al-Oraimi S. K. A.; Bryars L. S. Toughness measurement – the need to think again. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 18, No. 4, 1996, p. 281–297.
16. Barr B.; Hoseinian S. B.; Beygi M. A. Shrinkage of concrete stored in natural environments. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, No. 1, 2003, p. 19–29.
17. Barros M. H. F. M. Elasto-plastic modelling of confined concrete elements following MC90 equations. *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 4, 2001, p. 311–318.
18. Bazant Z. P. and Baweja S. Creep and Shrinkage Prediction for Analysis and Design of Concrete Structures – Model B3 // *Materials and Structures*, RILEM, Paris, Vol. 28., 1995, p. 357–365, 415–430, 488–495.
19. Beaudoin J. J.; Gu P.; Lin W. Flexural behavior of cement systems reinforced with high aspect ratio aragonite micro-fibers. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 12, 1996, p. 1775–1777.
20. Bissonnette B.; Pierre P.; Pigeon M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 10, 1999, p. 1655–1662.
21. Bissonnette B.; Pigeon M. Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 5, 1995, p. 1075–1085.
22. Bistrickaitė R., Marčiukaitis G., Žilinskas R. Surenkamosios monolitinės gelžbetonio perdangos su liktiniais klojiniais. Monografija. Kaunas, "Technologija", 2004, 229 p.
23. Brooks J. J.; Megat Johari M. A. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 23, No. 6, 2001, p. 495–502.
24. Campione G.; Miraglia N. Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, No. 1, 2003, p. 31–41.

25. Canning L.; Hollaway L.; Thorne A. M. An investigation of the composite action of an FRP/concrete prismatic beam. *Construction and Building Materials*, Vol. 13, No. 8, 1999, p. 417–426.
26. Capozucca R.; Cerri M. N. Static and dynamic behaviour of RC beam model strengthened by CFRP–sheets. *Construction and Building Materials*, Vol. 16, No. 2, 2002, p. 91–99.
27. Chajes M. J.; Thompson Jr. T. A.; Farschman C. A. Durability of concrete beams externally reinforced with composite fabrics. *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 3, 1995, p. 141–148.
28. Colotti V.; Spadea G. Shear strength of RC beams strengthened with bonded steel or FRP plates. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 127, No. 4, April 2001, p. 367–373.
29. Davids W. G. Nonlinear analysis of FRP-glulam-concrete beams with partial composite action. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 127, No. 8, August 2001, p. 967–971.
30. Decter M. H.; Keeley C. Durable concrete repair – importance of compatibility and low shrinkage. *Construction and Building Materials*, Vol. 11, No. 5–6, 1997, p. 267–273.
31. Ding Y.; Kusterle W. Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh–reinforced concrete at early ages in panel tests. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 11, 1999, p. 1827–1834.
32. Ding Y.; Kusterle W. Compressive stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 10, 2000, p. 1573–1579.
33. Dritsos S.; Pilakoutas K.; Kotsira E. Effectiveness of flexural strengthening of RC members. *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 3, 1995, p. 165–171.
34. Ducept F.; Davies P.; Gamby D. Mixed mode failure criteria for a glass/epoxy composite and an adhesively bonded composite/composite joint. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 20, No. 3, 2000, p. 233–244.
35. EC2 (Eurocode No. 2). Design of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Buildings, Brussels, 1992.

36. Echigo Sh.; Tachibana Y.; Kitajima A. New type hybrid structure and practical analysis method of creep and shrinkage. *Construction and Building Materials*, Vol. 12, No. 2–3, 1998, p. 93–103.
37. Ferreira A. J. M.; Camanho P. P.; Marques A. T.; Fernandes A. A. Modelling of concrete beams reinforced with FRP re-bars. *Composite Structures*, Vol. 53, No. 1, 2001, p. 107–116.
38. Folliard K. J.; Berke N. S. Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 9, 1997, p. 1357–1364.
39. Furlan S. Jr.; Bento de Hanai J. Prestressed fiber reinforced concrete beams with reduced ratios of shear reinforcement. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, No. 3, 1999, p. 213–221.
40. Furlan S. Jr.; Bento de Hanai J. Shear behaviour of fiber reinforced concrete beams. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 19, No. 4, 1997, p. 359–366.
41. Gao J.; Sun W.; Morino K. Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 19, No. 4, 1997, p. 307–313.
42. Garden H. N.; Quantrill R. J.; Hollaway L. C.; Thorne A. M.; Parke G. A. R. An experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, Vol. 12, No. 4, 1998, p. 203–2119.
43. Gardner N. J. and Lockman M. J. Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal Concrete // *ACI Material Journal*, Vol. 98, No. 2, Mar.–Apr. 2001, p. 159–167.
44. Gendron G.; Picard A.; Guerin M. -C. A theoretical study on shear strengthening of reinforced concrete beams using composite plates. *Composite Structures*, Vol. 45, No. 5, 1999, p. 303–309.
45. Gilbert R. I. Shrinkage, cracking and deflection – the serviceability of concrete structures. *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 1, No. 1, 2001.
46. Glisic B.; Simon N. Monitoring of concrete at very early age using stiff SOFO sensor. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 22, No. 2, 2000, p. 115–119.

47. Gopalaratnam V. S. On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 17, No. 3, 1995, p. 239–254.
48. Groth P. Fibre reinforced concrete – fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders. Doctoral thesis. Div. of Structural Engineering, Lulea University of Technology, 2001, 237 p.
49. Haque M. N. Strength development and drying shrinkage of high-strength concretes. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 18, No. 5, 1996, p. 333–342.
50. Hild F.; Burr A.; Feillard P. On the mechanical behaviour of fiber-reinforced composites. *Composite Structures*, Vol. 39, No. 3–4, 1997, p. 273–282.
51. Imam M.; Vandewalle F.; Mortelmans F.; Van Gemert D. Shear domain of fibre-reinforced high-strength concrete beams. *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 9, 1997, p. 738–747.
52. Yip W. K. Generic form of stress-strain equations for concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 1, 1998, p. 33–39.
53. Yuan Y.; Wan Z. L. Prediction of cracking within early-age concrete due to thermal, drying and creep behavior. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 7, 2002, p. 1053–1059.
54. Jianyong L.; Yan Y. A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 8, 2001, p. 1203–1206.
55. Kayali O.; Haque M. N.; Zhu B. Drying shrinkage of fiber-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 11, 1999, p. 1835–1840.
56. Kaklauskas G. A method for determination of stress-strain relations for concrete from experimental data of RC bending members. *Civil Engineering (Statyba)*, No. 2 (10). Vilnius: Technika, 1997, p. 60–68.
57. Katz A. Effect of fiber modulus of elasticity on the long term properties of micro-fiber reinforced cementitious composites. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 18, No. 6, 1996, p. 389–399.
58. Kearsley E. P.; Wainwright P. J. Porosity and permeability of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 5, 2001, p. 805–812.
59. Kearsley E. P.; Wainwright P. J. The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 2, 2002, p. 233–239.

60. Kim C.; White S. R. Analysis of thick hollow composite beams under general loadings. *Composite Structures*, Vol. 34, No. 3, 1996, p. 263–277.
61. Kim J. -K.; Lee C. -S. Prediction of differential drying shrinkage in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 7, 1998, p. 985–994.
62. Kim T. -J.; Park C. -K. Flexural and tensile strength developments of various shape carbon fiber-reinforced lightweight cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 7, 1998, p. 955–960.
63. Koenders E. A. B.; van Breugel K. Numerical modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 10, 1997, p. 1489–1499.
64. Kohno K.; Okamoto T.; Isikawa Y.; Sibata T.; Mori H. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 4, 1999, p. 611–614.
65. Korol E. A., Latushkin V. E. Choice of design model for sandwich reinforced concrete structures with tied layers. *Proceedings of 2nd international conference on Concrete and Reinforced Concrete*. September 5–9, 2005. Vol. 6, Moscow: Dipak, 2005, p. 45–51.
66. Kovler K.; Frostig Y. On the problem of cracking in plaster layers. *Construction and Building Materials*, Vol. 12, No. 5, 1998, p. 251–258.
67. Kurtz S.; Balaguru P. Postcrack creep of polymeric fiber-reinforced concrete in flexure. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 2, 2000, p. 183–190.
68. Kwak H. G.; Song J. Y. Cracking analysis of RC members using polynomial strain distribution function. *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 4, 2002, p. 455–468.
69. Lange-Kornbak D.; Karihaloo B. L. Tension softening of fibre reinforced cementitious composites. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 19, No. 4, 1997, p. 315–328.
70. Laukaitis A. Aktyųjų betonų formavimo mišinių ir gaminių savybės. Monografija. Vilnius: Technika, 2000, 232 p.
71. Li A.; Diagana Ch.; Delmas Y. CFRP contribution to shear capacity of strengthened RC beams. *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 10, 2001, p. 1212–1220.
72. Li V. C.; Fischer G. Reinforced ECC – an evolution from materials to structures. *Proceedings of the First fib Congress 2002, Session 5, Composite structures*, Osaka, Japan, 2002, p. 105–122.

73. Li V. C.; Maalej M. Toughening in cement based composites. Part II: fiber reinforced cementitious composites. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 18, No. 4, 1996, p. 239–249.
74. Lim D. H.; Oh B. H. Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, Vol. 21, No. 10, 1999, p. 937–944.
75. Lura P.; Van Breugel K.; Maruyama I. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 12, 2001, p. 1867–1872.
76. Marčiukaitis G. Susitraukimo deformacijų įtaka kompleksinių mūrinių elementų įtempių ir deformacijų būviui. *Statyba – Civil Engineering*, Vol VII, Nr 3, 2001, p. 177–183.
77. Marčiukaitis G. ir kt. Vienbučių namų iš mažagabaričių ir lengvų dirbinių konstrukciniai-technologiniai sprendimai ir konstrukcijų iš šių dirbinių skaičiavimas. Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas, Reg.Nr. 95–070/7J, Vilnius, 1995, 110–115 p.
78. Marčiukaitis G., Valivonis J. Mūro susitraukimo deformacijų įvertinimas, analizuojant pastatų vidinių sienų supleišėjimą. *Civil Engineering*, Vol VI, Nr 1, 2000, p. 11–16.
79. Marčiukaitis, G.; Bistrickaitė, R. Perdangų su liktiniais gelžbetoniniais klojiniais efektyvumo konstrukciniai ir technologiniai veiksniai. *Ūkio technologinis ir ekonominis vystymas*, Tomas XI, Nr. 2, 2005, p. 87–94.
80. Mesbah H. A.; Buyle–Bodin F. Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. *Construction and Building Materials*, Vol. 13, No. 8, 1999, p. 439–447.
81. Mirza F. A.; Soroushian P. Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 24, No. 2, 2002, p. 223–227.
82. Mouritz A. P.; Thompson R. S. Compression, flexure and shear properties of a sandwich composite containing defects. *Composite Structures*, Vol. 44, No. 4, 1999, p. 263–278.

83. Nad L.; Bajzecer A.; Spernoga B. Glass-FRP prestressing units in concrete beams. Proceedings of the First fib Congress 2002, Session 5, Composite structures, Osaka, Japan, 2002, p. 123–130.
84. Narayanan N.; Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 22, No. 5, 2000, p. 321–329.
85. Nataraja M. C.; Dhang N.; Gupta A. P. Stress–strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, No. 5, 1999, p. 383–390.
86. Neville A. M. Properties of concrete. 4th ed. Longman Scientific & Technical, England, 1997, 844 p.
87. Ostertag C. P.; Yi C. K.; Vondran G. Tensile strength enhancement in interground fiber cement composites. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 23, No. 5, 2001, p. 419–425.
88. Padmarajaiah S. K.; Ramaswamy A. A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 24, No. 2, 2002, p. 229–241.
89. Padmarajaiah S. K.; Ramaswamy A. Crack width prediction for high-strength concrete fully and partially prestressed beam specimens containing steel fibers. *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 6, November–December 2001, p. 852–861.
90. Park S. B.; Yoon E. S.; Lee B. I. Effects of processing and materials variations on mechanical properties of lightweight cement composites. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 2, 1999, p. 193–200.
91. Persson B. Eight-year exploration of shrinkage in high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 8, 2002, p. 1229–1237.
92. Persson B. Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 7, 1998, p. 1023–1036.
93. Persson B. Poisson's ratio of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 10, 1999, p. 1647–1653.
94. Picard A.; Massicotte B.; Boucher E. Strengthening of reinforced concrete beams with composite materials: theoretical study. *Composite Structures*, Vol. 33, No. 2, 1995, p. 63–75.

95. Qian C. X.; Stroeven P. Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 1, 2000, p. 63–69.
96. Qian Ch.; Stroeven P. Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 22, No. 5, 2000, p. 343–351.
97. Qian X.; Li Z. The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 11, 2001, p. 1607–1611.
98. Realfonzo R.; Prota A.; Manfredi G.; Pecce M. Flexural strength of FRP-confined RC columns. *Proceedings of the First fib Congress 2002, Session 5, Composite structures*, Osaka, Japan, 2002, p. 41–50.
99. Sakata K., Tsubaki T, Inoue Sh. and Ayano T. Prediction Equations of Creep and Drying Shrinkage for Wide-Ranged Strength Concrete // *Proceedings of 6th International Symposium on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials (CONCREEP-6&MIT)*, Cambridge, USA, 20–22 Aug. 2001, p. 753–758
100. Smadi M. M.; Slate F. O.; Nilson A. H. High-, medium- and low-strength concrete subject to sustained overloads – strains, strengths and failure mechanisms. *ACI Journal*, Vol. 82, No. 5, May 1985, p. 657–664.
101. Smith S. T.; Teng J. G. FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models. *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 4, 2002, p. 385–395.
102. Soroushian P.; Elyamany H.; Tlilli A.; Ostowari K. Mixed-mode fracture properties of concrete reinforced with low volume fractions of steel and polypropylene fibers. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 20, No. 1, 1998, p. 67–78.
103. Sun W.; Chen H.; Luo X.; Qian H. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 4, 2001, p. 595–601.
104. Taylor M.; Lydon F. D.; Bar B. I. G. Toughness measurements on steel fibre-reinforced high strength concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 19, No. 4, 1997, p. 329–340.
105. Theodorakopoulos D. D. Creep characteristics of glass reinforced cement under flexural loading. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 17, No. 4, 1995, p. 267–279.

106. Theodorakopoulos D. D. Shrinkage behaviour of GRC thin sheets. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 17, No. 3, 1995, p. 229–236.
107. Torrenti J. M.; Djerbi B. Behaviour of steel-fibre-reinforced concretes under biaxial compression loads. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 17, No. 4, 1995, p. 261–266.
108. Toutanji H. A. Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 13, No. 4, 1999, p. 171–177.
109. Valivonis J. Deflection of flexural reinforced concrete structures with external non-metallic reinforcement (Experimental and theoretical investigation). *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol VIII, No 3, 2002, p. 164–168.
110. Vandewalle L. Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 22, No. 3, 2000, p. 201–208.
111. Wang Y. C.; Chen C. H. Analytical study on reinforced concrete beams strengthened for flexure and shear with composite plates. *Composite Structures*, Vol. 59, No. 1, 2003, p. 137–148.
112. Wang J.; Karihaloo B. L. Fracture mechanics and optimization – a useful tool for fibre-reinforced composite design. *Composite Structures*, Vol. 32, No. 1–4, 1995, p. 453–466.
113. Xu F. Q.; Tao X. K.; Guan J. G. Chen Y. Experimental study on the reinforced concrete beams strengthened by using carbon fibers sheets. *Proceedings of the First fib Congress 2002, Session 5, Composite structures, Osaka, Japan, 2002*, p. 173–180.
114. Zahn F. A.; Francke W. Externally reinforced concrete beams – an innovative form of composite construction. *Proceedings of the First fib Congress 2002, Session 5, Composite structures, Osaka, Japan, 2002*, p. 51–58.
115. Zhang A.; Jin W.; Li G. Behaviour of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates. *Journal of Zhejiang University - Science A*, Vol. 7, No. 3, 2006, p. 436–444.
116. Zhang J.; Li V. C. Monotonic and fatigue performance in bending of fiber-reinforced engineered cementitious composite in overlay system. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 3, 2002, p. 415–423.

117. Zhang J.; Stang H. Applications of stress crack width relationship in prediction the flexural behavior of fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 3, 1998, p. 439–452.
118. Zollo R. F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 19, No. 2, 1997, p. 107–122.
119. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. Москва, 1988, 456 с.
120. Гениев Г. А., Колчунов В. И., Ключев Н. В., Никулин А. И., Пятикрестовский К. П. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. Научное издание. М. Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004, 216 с.
121. Король, Е. А. Трехслойные ограждающие железобетонные конструкции из легких бетонов и особенности их расчета: Монография. М: АСВ, 2001. 256 с.
122. Марчюкайтис Г. О начальном напряженном и деформированном состоянии и его влиянии на работу предварительно напряженных железобетонных балок при действии статических и пульсирующих нагрузок. Автореф. дис. канд. технических наук. Каунас, 1963, 32 с.
123. Марчюкайтис Г. О расчете прочности и трещиностойкости многослойных изгибаемых элементов со слоями из различных бетонов. *Vilniaus technikos universiteto mokslo darbai. Statybinės konstrukcijos*, Nr. 20, Vilnius: Technika, 1995, p. 85–94.
124. Мешкаускас, И. Керамзитожелезобетонные конструкции. Москва, 1984, 194 с.
125. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. Москва: Стройиздат, 1986, 314 с.
126. Розенблюмас А. М. О точном расчете трещиностойкости железобетонных сечений. Научные труды высших учебных заведений Литвы. Строительство и архитектура. Том №1, 1961, 59–70 с.

Autoriaus paskelbti straipsniai disertacijos tema

127. Juknevičius L., Marčiukaitis G., Valivonis J. Influence of technological factors on the state of stress and strain in three-layer reinforced concrete structures. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol XII, No 3. Vilnius: Technika, 2006, p. 195–204.

128. Marčiukaitis G., Juknevičius L. Influence of the internal layer cracks on the cracking of flexural three-layer concrete members. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol VIII, No 3. Vilnius: Technika, 2002, p. 153–158.
129. Juknevičius L., Marčiukaitis G. Influence of the internal layer cracks on the stress–strain relationship in the external layers of flexural three-layer reinforced concrete members. *Proceeding of the 8th international conference “Modern building materials, structures and techniques”*. Selected papers, May 19–21, Vilnius: Technika, 2004, p. 487–492.
130. Juknevičius L. Lenkiamųjų sluoksniuotųjų konstrukcijų neutraliosios ašies nustatymas, skaičiuojant jas supleišėjimui. 3-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“. Konferencijos, įvykusios Vilniuje 2000 m. kovo 31 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 2000, p. 31–35.
131. Juknevičius L. Polipropileno pluošto įtaka betono deformacinėms savybėms. 6-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“. Konferencijos, įvykusios Vilniuje 2003 m. kovo 27 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 2003, p. 114–119.