

PLIENO PLUOŠTU ARMUOTŲ GELŽBETONINIŲ ELEMENTŲ PLEIŠĖTUMO ANALIZĖ

Darius Ulbinas¹, Gintaris Kaklauskas²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹darius.ulbinas@st.vgtu.lt; ²gintaris.kaklauskas@st.vgtu.lt

Anotacija. Straipsnyje aptariamas gelžbetoninių elementų armavimo plieno pluoštu efektyvumas, lyginant juos su paprastąja armatūra armuotais elementais. Apžvelgiamos dispersiniam armavimui naudotinos plieno pluošto formos, nusakomi jų privalumai ir trūkumai. Pateikiamas gelžbetoninių elementų betone atsiveriančių plyšių pločių skaičiavimo algoritmas, remiantis EC2 bei (Rilem) metodikomis. Atliekamas skaitinis eksperimentas, analizuojant plieno pluoštu armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų pleišėtumą ir lyginant skaičiuotines plyšių pločių reikšmes su eksperimentinėmis reikšmėmis. Nustatomos santykinės skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių paklaidos.

Reikšminiai žodžiai: plieno pluoštas, plyšio plotis, gelžbetonis, lenkiamasis elementas, santykinės paklaidos.

Įvadas

Betoną galima apibūdinti kaip trapią medžiagą, atlaikančią gana didelius gniuždymo įtempimus, tačiau turinčią nedidelį stiprį tempiant. Šios medžiagos mechanines savybes, tokias kaip plastiškumą ir kietumą, galima gerinti betoną armuojant plieno pluoštu. Viena iš svarbiausių plieno pluoštu armuotų gelžbetoninių elementų savybių yra didesnis atsparumas pleišėjimui (Van Chanh 2004). Armuojant gelžbetoninius elementus armavimas plieno pluoštu mažiau atsiranda plyšių, mažėja tempimo įtempimai betone ir didesnių plyšių atsivėrimo tikimybė (Tan 1995). Dėl gebėjimo suvaržyti atsiveriančius plyšius dispersiškai armuotas betonas turi didesnę stiprį tempiant tiek pirmojo plyšio atsivėrimo zonoje, tiek paskutiniojo plyšio atsivėrimo sluoksniuose.

Betono plastiškumo didėjimas labai gerina mišinio energijos sugerties savybes. Betono mišinio sustiprinimo plieno pluoštu ypatybės labai priklauso nuo pluošto formos, pluošto pasiskirstymo ir jo orientacijos betono mišinyje (Van Chanh 2004).

Straipsnyje aptariamas gelžbetoninių elementų armavimo plieno pluoštu efektyvumas. Jie lyginami su paprastąja armatūra armuotais elementais. Apžvelgiamos dispersiniam armavimui naudotinos plieno pluošto formos, nusakomi jų privalumai ir trūkumai. Pateikiamas betone atsiveriančių plyšių pločių skaičiavimo algoritmas, remiantis EC2 (Eurocode 2 2004) bei Rilem TC 162-TDF 2000: 75-81 metodikomis. Atliekamas skaitinis eksperimentas, analizuojama plieno pluoštu armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų pleišėtumas, lyginamos skaičiuotinės plyšių pločių reikšmės su

eksperimentinėmis. Nustatomos skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių santykinės paklaidos.

Gelžbetoninių elementų armavimas plieno pluoštu ir armavimui naudotinos plieno pluošto rūšys

Pagrindinis parametras, kuriuo apibūdinamas plieno pluoštas, yra nusakomas pluošto ilgio ir skersmens santykiu. Šis santykis gali būti nuo 20 iki 100. Kuo didesnės plieno pluošto proporcijos, tuo efektyvesnis betoninių elementų dispersinis armavimas tokiu pluoštu.

Gelžbetoninių elementų armavimas plieno pluoštu neturi didesnės įtakos gniuždomųjų elementų stipriui, nes taip armuotų elementų gniuždomasis stipris padidėja tik 0–15 % (Al-shannag 2007). Tačiau dispersinis armavimas turi didelę įtaką tempiamųjų gelžbetoninių elementų stipriui, nes plieno pluoštas suvaržo tempimo deformacijas ir didina betono stiprį tempiamojame zonoje.

Plieno pluoštas gaminamas skirtingų formų ir dydžių taikant įvairius gamybos būdus. Tokia formų ir gamybos metodų įvairovė pluoštui suteikia skirtingų charakteristikų ir turi įtaką betono dispersinio armavimo efektyvumui.

Dispersiškai armuojant lenkiamus gelžbetoninius elementus, pasiekama didesnio elementų standumo, tempiamojame elemento zonoje susidaro mažesni plyšiai. Tačiau, kaip ir gniuždomųjų gelžbetoninių elementų, lenkiamųjų elementų armavimo plieno pluoštu efektyvumas padidėja ne tiek daug, 0–20 %, kad strypinę armatūrą būtų galima pakeisti plieno pluoštu. Racionalus lenkiamųjų elementų armavimas gali būti pasiektas tada, kai

gelžbetoninis elementas armuojamas ir strypine armatūra ir plieno pluoštu (Al-shannag 2007).

Mokslinių tyrimų ir projektavimo srityse dispersiškai armuotas gelžbetonis tapo svarbus 1970 m., ir nuo to laiko buvo sukurta įvairių plieno pluošto rūšių. Jie skiriasi medžiaga, dydžiu, forma, paviršiaus struktūra.

Dėl taikomų skirtingų gamybos technologijų ir gamybai naudojamų skirtingų medžiagų skiriasi plieno pluoštų mechaninės savybės, tokios kaip stipris tempiant, įtempimų pasiskirstymas pluošto skerspjūvyje.

Nors žinoma įvairiausių dispersiniam armavimui naudojamų plieno pluošto formų (Naaman 2003), visos jos turi ne tik privalumų, bet ir trūkumų (1 lentelė) (Рабинович 2004).

ASTM A 820 (ASTM A820/A820M-06) pagal gamybą plieno pluoštą skirsto į keturis tipus:

1. Plieno pluoštas gaminamas iš vielos. Toks pluoštas labiausiai paplitęs.
2. Plieno pluoštas išpjaunamas iš plieninių lakštų.
3. Plieno pluoštas gaminamas lydant plieną. Tokiam pluoštui išlieti reikia sudėtingos gamybos technologijos, nes išlydžius plieną suformuojamas pluoštas turi būti staiga atšaldomas.
4. Kiti plieno pluoštai yra gaminami atsižvelgiant į reikiamą jų ilgį, skersmenį, ilgio ir skersmens santykį bei reikalavimus, keliamus gelžbetoninių elementų dispersiniam armavimui (Al-shannag 2007).

1 lentelės pabaiga
Table 1 continued

Plieno pluošto forma	Eskizas	Privalumai ir trūkumai
Tiesi, periodiško skerspjūvio		Pluoštas gerai sukimba su betonu. Gaminant tokį pluoštą, yra tikimybė perspausti
Banguota		Geras sukibimas, tačiau didesnės plieno sąnaudos nei kitų formų pluoštų
Banguota iš naudotų lynų		Geras sukibimas ir nedidelės medžiagų sąnaudos. Tokį pluoštą būtina išvalyti nuo tepalinių medžiagų
Pluoštas su lenkimais galuose		Pluoštas gerai susimaišo su mišinio komponentais, tačiau jis efektyvus tik aukštos klasės betonui

1 lentelė. Plieno pluošto formų privalumai ir trūkumai
Table 1. Advantages and disadvantages of steel fiber forms

Plieno pluošto forma	Eskizas	Privalumai ir trūkumai
Tiesi, lygi		Nesudėtinga gamyba, tačiau nepakankamas sukibimas su betono mišiniu
Tiesi, lygi su plotais galais		Pluoštas gerai sukimba su betonu, tačiau sudėtinga gamybos technologija
Tiesi, lygi su lietais galais		Geras sukibimas su betonu, tačiau sudėtinga gamybos technologija

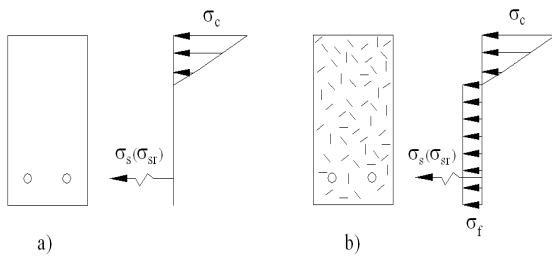
Plieno pluoštu armuoto lenkiamojo gelžbetoninio elemento betone atsiveriančių plyšių pločių skaičiavimas

Betoną armuojant paprastąja strypine armatūra, elementui visiškai supleišėjus, plyšio atsivėrimo zonoje tempimo įtempimus perima tik armatūra (1 pav., a), o dispersiškai armuoto, visiškai supleišėjusio, gelžbetoninio elemento tempiamoje zonoje veikiančius įtempimus perima ir plieno pluoštas, atlaikantis tempiamos zonos tempimo įtempimus atsižvelgiant į pluošto gamybai naudojamo plieno stipris tempiant (1 pav., b) (Vandewalle 2000).

Pagal EC2 (Eurocode 2 2004) gelžbetoninio elemento betone atsiveriančių plyšių plotis yra nustatomas taip:

$$w_k = \beta \cdot s_{rm} \cdot \varepsilon_{sm}, \quad (1)$$

čia s_{rm} – atstumas tarp plyšių; ε_{sm} – vidutinė armatūros deformacija; β – saugos koeficientas.



1 pav. Įtempimų pasiskirstymas supleišėjusiame elemente: a) elementas armuotas tik paprastąja armatūra; b) elementas armuotas paprastąja armatūra ir plieno pluoštu

Fig. 1. Stress distribution in a cracked section: a) member reinforced with ordinary reinforcement; b) member reinforced with ordinary reinforcement and steel fibers

Vidutinė armatūros deformacija apskaičiuojama pagal tokią formulę:

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

čia β_1 – koeficientas, įrodantis armatūros sukibimą; σ_s – plieno įtempimai tempiamoje plyšių atsivėrimo zonoje; E_s – plieno tamprumo modulis; β_2 – koeficientas, rodantis apkrovimo trukmę; σ_{sr} – plieno įtempimai, nustatomi tempiamoje plyšių atsivėrimo zonoje, pirmojo plyšio atsivėrimo metu.

Atstumas tarp plyšių įprastai armuotame gelžbetoniniame elemente pagal EC2 (Eurocode 2 2004) apskaičiuojamas taip:

$$s_{rm} = 50 + 0,25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_r}, \quad (3)$$

čia k_1 – koeficientas, kuriuo įvertinamas strypų sukibimas su betonu; k_2 – koeficientas, pagal kurį įvertinama deformacijų pasiskirstymo forma; ϕ – strypo skersmuo; ρ_r – efektyvusis armavimo koeficientas.

Atstumas tarp plyšių dispersiškai armuotame gelžbetoniniame elemente pagal (Rilem) (Rilem TC 162-TDF 2000: 75–81) apskaičiuojamas taip:

$$s_{rm} = \left(50 + 0,25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_r} \right) \cdot \left(\frac{50}{L_f / d_f} \right), \quad (4)$$

čia L_f – plieno pluošto ilgis; d_f – plieno pluošto skersmuo.

Skaitinis eksperimentas

Skaitinio eksperimento metu buvo analizuojamos šešios plieno pluoštu ir įprastąja armatūra armuotos lenkiamos gelžbetoninės sijos. Sijų skaičiuojamasis ilgis – 2,30 m, aukštis – 0,30 m, plotis – 0,20 m. Sijos buvo laisvai atremtos ir apkrautos dviem koncentruotomis jėgomis, tarp kurių pridėjimo taškų buvo 1 m atstumas. Visos sijos buvo armuojamos strypine armatūra (2 lentelė) paliekant 0,03 m betono apsauginį sluoksnį (Dupont 2003).

Skaitiniame eksperimente analizuotų sijų parametrai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Analizuojamų sijų pagrindiniai duomenys

Table 2. Main characteristics of the test beams

Sijos Nr.	Plieno plaušo kiekis, kg / m ³	Plaušo tipas	Cilindrinis betono stipris, N/mm ²	Strypinės armatūros kiekis
1	20	RC 65/60 BN*	40,0	3Ø20
2	60	RC 65/60 BN	38,7	3Ø20
3	60	RC 65/60 BN	38,7	3Ø16
4	40	RC 65/60 BN	48,0	3Ø16
5	40	RC 80/35 BN	46,0	3Ø16
6	60	RC 80/35 BN	50,6	3Ø16

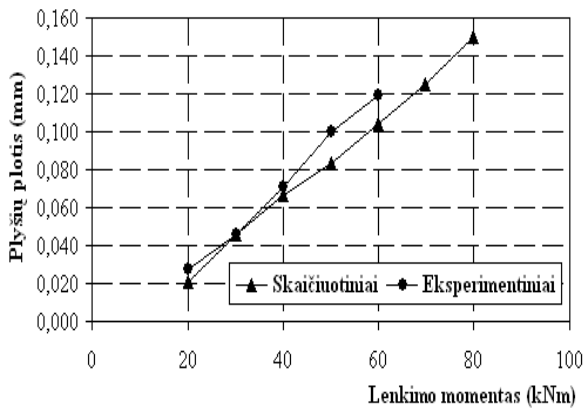
*R – plieno pluoštas lenktais galais; C – analizuojamos sijos armuojamos plieno pluošto paketais; 65 – plieno pluošto ilgio ir pločio santykis; 60 – plieno pluošto ilgis (mm); N – mažas anglies kiekis pluošto pliene.

Kaip matyti iš analizuojamų sijų pagrindinių duomenų lentelės, eksperimentas buvo atliekamas dispersiniam sijų armavimui naudojant plieno pluošto paketus su lenkimais galuose. Eksperimento metu buvo keičiamas plieno pluošto kiekis ir įprastiniam armavimui naudojamos strypinės armatūros skersmuo (2 lentelė).

Atlikus šių šešių sijų skaitinį eksperimentą, 2–7 pav. pateikiama skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių plokčių reikšmių kitimo, atsižvelgiant į sijas veikiantį lenkiamąjį momentą, grafinė lyginamoji analizė.

Iš 2 pav. matyti, kad tarp pirmosios analizuojamos lenkiamosios gelžbetoninės sijos betone atsiveriančių skaičiuotinių plyšių plokčių reikšmių, apskaičiuotų pagal EC2 (Eurocode 2 2004) ir tarp eksperimentiškai nustatytų (Dupont 2003) plyšių plokčių reikšmių, didžiausia paklaida stebima esant vidutiniam sijos apkrovimo lygmeniui.

Kaip matyti iš 2 pav., pirmoji lenkiamoji gelžbetoninė sija eksperimento metu visiškai supleišėjo ją veikiant 60 kNm lenkiamajam momentui. Siekiant nustatyti galimą tolesnį plyšių atsiradimą sijos skerspjūvyje, atsiveriančių skaičiuotinių plyšių pločiai buvo nustatomas iki 80 kNm lenkiamojo momento poveikio sijos pleišėtumei.



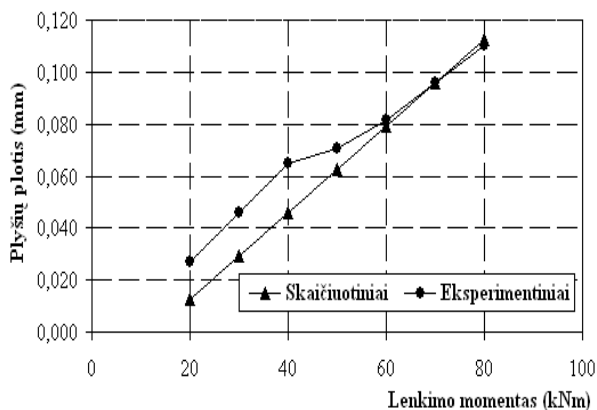
2 pav. Pirmosios lenkiamosios gelžbetoninės sijos skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių kitimas
Fig. 2. Calculated and experimental crack widths of the first reinforced concrete beams

3 pav. matyti, kad, priešingai nei pirmosios sijos, antrosios lenkiamosios gelžbetoninės sijos skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių didžiausias skirtumas pastebimas esant sąlygiškai mažiausiam apkrovimo lygmeniui, sija veikiant 20–40 kNm lenkiamajam momentui.

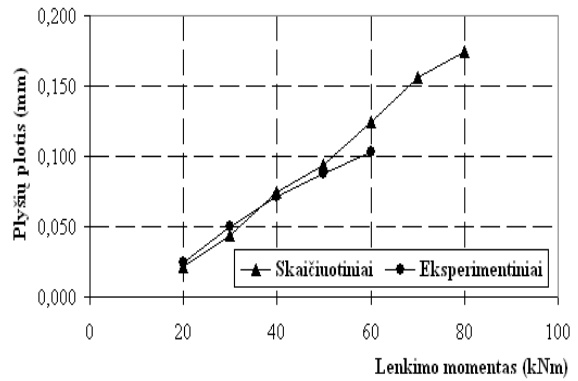
Tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių antrosios sijos plyšių pločių reikšmių didžiausias sutapimas pastebimas 3 pav., esant sąlygiškai didžiausiam sijos apkrovimo lygmeniui.

Iš 4 pav. matyti, kad trečioji analizuojama sija eksperimento metu visiškai supleišėjo apytiksliai esant 60 kNm lenkiamojo momento poveikiui (Dupont 2003).

Šiuo atveju skirtumas tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių yra sąlygiškai nedidelis.



3 pav. Antrosios lenkiamosios gelžbetoninės sijos skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių kitimas
Fig. 3. Calculated and experimental crack widths of the second reinforced concrete beams

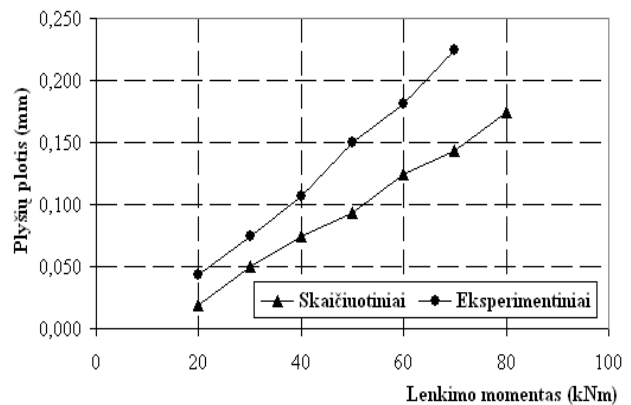


4 pav. Trečiosios lenkiamosios gelžbetoninės sijos skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių kitimas
Fig. 4. Calculated and experimental crack widths of the third reinforced concrete beams

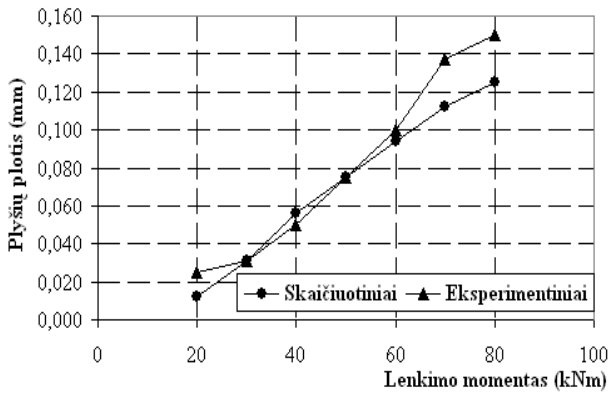
Priešingai nei trečiosios analizuojamos sijos, tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių ketvirtosios sijos plyšių pločių reikšmių (5 pav.) matomas gana didelis skirtumas.

Šiuo atveju didžiausias skirtumas pastebimas gelžbetoninę sija veikiant 40–70 kNm lenkiamajam momentui.

6 pav. matyti, kad tarp penktosios analizuojamos lenkiamosios gelžbetoninės sijos betone atsiveriančių skaičiuotinių plyšių pločių reikšmių, apskaičiuotų pagal EC2 (Eurocode 2 2004), ir tarp eksperimentiškai nustatytų (Dupont 2003) plyšių pločių reikšmių didžiausia paklaida pastebima esant sąlygiškai didžiausiam sijos apkrovimo lygmeniui.



5 pav. Ketvirtosios lenkiamosios gelžbetoninės sijos skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių kitimas
Fig. 5. Calculated and experimental crack widths of the fourth reinforced concrete beams



6 pav. Penktosios lenkiamosios gelžbetoninės sijos skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių kitimas skerspjūvyje

Fig. 6. Calculated and experimental crack widths of the fifth reinforced concrete beams

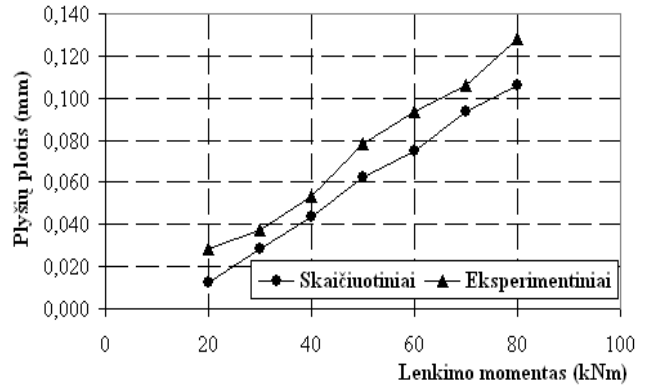
Mažiausią skirtumą tarp skaičiavimų nustatytų ir eksperimentiškai gautų penktosios sijos plyšių pločių reikšmių galima išvengti 6 pav. esant viduriniam apkrovimo lygmeniui, kai sija veikia 40–60 kNm lenkiamasis momentas.

Kaip matyti iš 7 pav., analizuojama šeštoji sija visiškai supleišėjo ją veikiant 80 kNm lenkiamajam momentui. Šiuo atveju viso apkrovimo metu pastebimas skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių nesutapimas.

Iš 7 pav. matyti, kad eksperimentinės plyšių pločių reikšmės (Dupont 2003) esant visiems apkrovimo lygmenims yra didesnės už skaičiuotines, pagal EC2 (Eurocode 2 2004) nustatytas plyšių pločių reikšmes.

Siekiant nustatyti, kada analizės metu buvo pasiektas didžiausias skaičiuotinių ir eksperimentiškai nustatytų (Dupont 2003) plyšių pločių reikšmių tikslumas, apskaičiuojamos santykinės paklaidos, suskirstant sijos apkrovimą nuo apkrovos, kuriai esant poveikio sijos betone atsivėrė pirmasis plyšys, iki apkrovos, kuriai veikiant lenkiamoji gelžbetoninė sija visiškai supleišėjo.

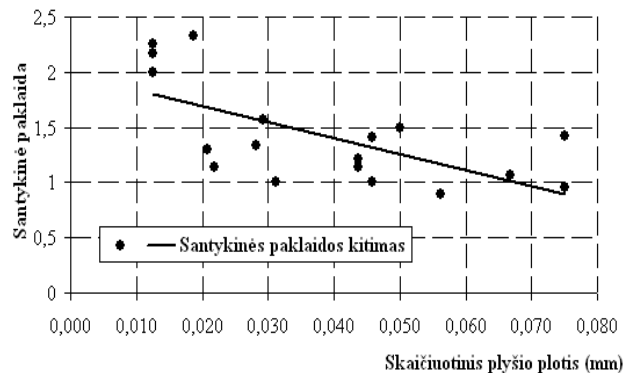
Kaip matyti iš 8 pav., didžiausios santykinės paklaidos tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių, esant sąlygiškai mažiausiam sijos apkrovimo lygmeniui, siekia 2–2,5 karto. Didžiausios paklaidos susidarė atsivėrus pirmiesiems plyšiams, kai pagal EC2 (Eurocode 2 2004) apskaičiuotas plyšio plotis siekė 0–0,020 mm.



7 pav. Šeštosios lenkiamosios gelžbetoninės sijos skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių kitimas

Fig. 7. Calculated and experimental crack widths of the sixth reinforced concrete beams

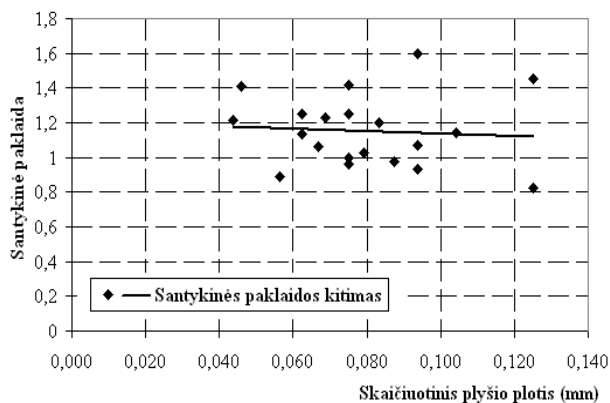
Santykinės paklaidos kitimas tarp visų analizuotų sijų skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių esant mažiausiam, 20–40 kNm, apkrovimo lygmeniui pateiktas 8 pav.



8 pav. Santykinės paklaidos kitimas tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių esant mažiausiam sijos apkrovimo lygmeniui

Fig. 8. Relative errors of crack width predictions at the minimal load level

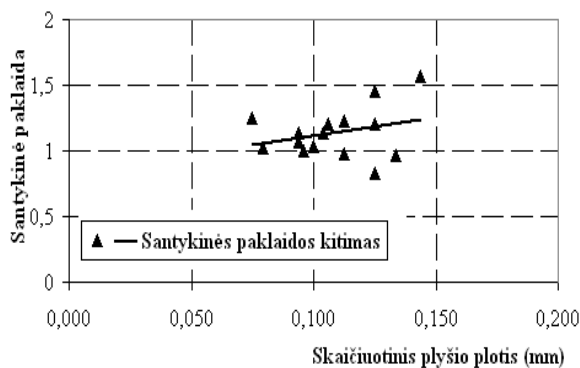
Esant viduriniam sijos apkrovimo lygmeniui, kai sija veikia 40–60 kNm lenkiamasis momentas, pastebimas didesnis santykinų paklaidų išsibarstymas, nei esant sąlygiškai mažiausiam sijos apkrovimo lygmeniui (9 pav.).



9 pav. Santykinės paklaidos kitimas tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių esant vidutiniam sijos apkrovimo lygmeniui

Fig. 9. Relative errors of crack width predictions at the medium load level

Iš santykinų paklaidų pasiskirstymo (9 pav.) prie vidutiniojo sijos apkrovimo lygmens kai kurios eksperimentinių plyšių pločių reikšmės (Dupont 2003) gaunamos mažesnės už skaičiuotines.



10 pav. Santykinės paklaidos kitimas tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių esant didžiausiam sijos apkrovimo lygmeniui

Fig. 10. Relative errors of crack width predictions at the maximal load level

Kaip matyti iš 10 pav., esant sąlygiškai didžiausiam sijos apkrovimo lygmeniui, kai siją veikia 60–80 kNm lenkiamasis momentas, didžiausios santykinės paklaidos tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių pastebimos tuomet, kai plyšio plotis siekia 0,100–0,150 mm.

Kadangi analizės metu esant sąlygiškai didžiausiam apkrovimo lygmeniui, dvi sijos visiškai supleišėjo veikiant 60 kNm lenkiamajam momentui, sumažėjo ir skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių santykinų paklaidų skaičius, palyginti su sąlygiškai mažiausiu ir vidutiniu apkrovimo lygmenimis.

Išvados ir rezultatai

1. Aptartas gelžbetoninių elementų armavimo plieno pluoštu efektyvumas lyginant juos su paprastąja armatūra armuotais gelžbetoniniais elementais ir apžvelgtos betono dispersiniam armavimui naudotinos plieno pluošto formos, nusakyti jų privalumai ir trūkumai.

2. Atliktas šešių dispersiškai armuotų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų skaitinis eksperimentas analizuojant jų pleišetumą ir lyginant skaičiuotines plyšių pločių reikšmes su eksperimentinėmis reikšmėmis. Nustatytos skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių santykinės paklaidos, pateiktas santykinų paklaidų kitimas, atsižvelgiant į elementus veikiančią apkrovą.

3. Atlikus pirmosios plieno plaušu ir įprastąja armatūra armuotos gelžbetoninės sijos pleišetumo analizę, nustatyta, kad didžiausia skaičiuotinių pagal EC2 nustatytų ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių paklaida pastebima esant vidutiniam sijos apkrovimo lygmeniui, kai siją veikia 40–60 kNm lenkiamasis momentas.

4. Antrosios lenkiamos gelžbetoninės sijos skaičiuotines plyšių pločių reikšmes lyginant su eksperimentinėmis reikšmėmis, nustatyta, jog, priešingai nei pirmosios analizuojamos sijos, didžiausias sijos plyšių pločių reikšmių skirtumas išvelgiamas esant sąlygiškai mažiausiam apkrovimo lygmeniui veikiant 20–40 kNm lenkiamajam momentui.

5. Eksperimento metu analizuojama trečioji gelžbetoninė sija visiškai supleišėjo siją veikiant 60 kNm lenkiamajam momentui. Nagrinėjant šios sijos pleišetumą, nustatyta, kad skirtumas tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių yra sąlygiškai nedidelis.

6. Atlikus ketvirtosios gelžbetoninės sijos skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių lyginamąją analizę, gauta, kad didžiausias šių reikšmių skirtumas pastebimas siją veikiant 40–70 kNm lenkiamajam momentui.

7. Analizuojant penktąją plieno plaušu ir įprasta armatūra armuotą lenkiamąją gelžbetoninę siją, nustatyta, kad mažiausias skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių skirtumas susidaro esant vidutiniajam sijos apkrovimo lygmeniui, kai siją veikia 40–60 kNm lenkiamasis momentas.

8. Analizuojama šeštoji dispersiškai armuota sija visiškai supleišėjo siją veikiant 80 kNm lenkiamajam momentui. Analizės metu pastebėta, kad eksperimentinės plyšių pločių reikšmės esant visiems apkrovimo lygmenims yra didesnės už skaičiuotines plyšių pločių reikšmes.

9. Atlikus visų analizuojamų sijų santykinų paklaidų tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių kitimo analizę, nustatyta, kad skaičiavimų ir eksperimentų rezultatai labiausiai skiriasi esant sąlygiškai mažiausiam apkrovimo lygmeniui. Tada jie skiriasi 2–2,5 karto. Mažiausias skirtumas tarp skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių pastebimas esant sąlygiškai didžiausiam apkrovimo lygmeniui, tuomet skaičiavimų ir eksperimentų rezultatai skiriasi ne daugiau kaip 1,4–1,6 karto.

10. Atlikus skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių lyginamąją analizę, galima teigti, kad didžiausias skaičiuotinių ir eksperimentinių plyšių pločių reikšmių atitikmuo buvo pasiektas esant sąlygiškai didžiausiam sijų apkrovimo lygmeniui.

Literatūra

- ASTM A820/A820M-06. *Standard Specification for Steel Fibers for Fiber – Reinforced Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006. DOI: 10.1520/A0820-A0820M-06.
- Al-shannag, M. J. 2007. *Durability of Steel Fiber Reinforced Concrete in Sulfate Environment*, Final Research report, No. 38/426: 60.
- Dupont, D. 2003. *Modelling and Experimental Validation of The constitutive Law ($\sigma - \epsilon$) and Cracking Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete*, Doctoral Dissertation, Catholic University, Belgium.
- Eurocode 2: Design of Concrete Structures–Part 1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. Pr.-EN 1992-1, 2004, 230.
- Naaman, A. E. 2003. Engineered steel fibers with optimal properties for Reinforcement of cement composites, *Journal of Advanced Concrete Technology* 1(3): 241–252.
- Rilem TC 162-TDF. 2000. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Recommendations, *Journal of Materials and structures* 33: 75–81.
- Tan, K. H.; Paramasivam, P.; Tan, K. C. 1995. Cracking characteristics of reinforced steel fiber concrete beams under short and long-term loadings, *Journal of Advanced Cement Based Materials* 2: 127–137.
- Vandewalle, L. 2000. Cracking behaviour of concrete beams reinforced with a combination of ordinary reinforcement and steel fibers, *Journal of Materials and Structures* 33: 164–170.
- Van Chanh, N. 2004. *Steel Fiber Reinforced Concrete*. Faculty of Civil Engineering Ho chi minh City university of Technology. Seminar Material, 108–116.
- Рабинович, Ф. Н. 2004. *Композиты на основе дисперсно армированных бетонов*. Москва. 234.

CRACK WIDTH ANALYSIS OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

D. Ulbinas, G. Kaklauskas

Summary

The article investigates the effectiveness of steel fiber reinforcement in RC concrete members in regard to ordinary reinforcement. The advantages and disadvantages of different shapes of steel fibers are discussed. The algorithm for calculating crack width based on EC2 and Rilem methodologies is presented. A comparison of theoretical and experimental crack widths has been performed. The relative errors of crack width predictions at different load levels were defined.

Keywords: steel fiber, crack width, concrete, flexural element, relative error.