

KOMPOZITINIAIS STRYPAIS ARMUOTŲ SIJŲ PLEIŠĖJIMO
IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖEdgaras Timinskas¹, Ronaldas Jakubovskis², Adas Meškėnas³, Eugenijus Gudonis⁴

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹edgaras.timinskas@vgtu.lt; ²ronaldas.jakubovskis@vgtu.lt; ³adas.meskenas@vgtu.lt;⁴eugenijus.gudonis@vgtu.lt

Santrauka. Kompozitinės armatūros taikymas betono konstrukcijoms dažnai sukelia šias problemas: neleistinai didelius įlinkius ir atsiveriančius plyšio pločius, trapų konstrukcijų irimą. Straipsnyje pateikiami dviejų vienodos geometrijos kompozitinių stiklo pluošto strypais armuotų sijų eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai. Vienoje iš sijų į betono mišinį papildomai įdėta plieno plaušo fibrų. Bandymo metu matuoti vidutiniai sijų kreiviai, įlinkiai ir atsiveriantys plyšio pločiai. Atlikus lyginamąją analizę pastebėta, kad plieno plaušo naudojimas padidina stiklo pluoštu armuotų sijų standumą, atsparumą pleišėjimui, sijų suirimo pobūdis tampa plastiškesnis. Sijas sumodeliavus netiesine baigtinių elementų programa ATENA gautas geras eksperimentinių ir skaitinių rezultatų sutapimas įprasto betono stiklo pluošto armatūra armuotai sijai.

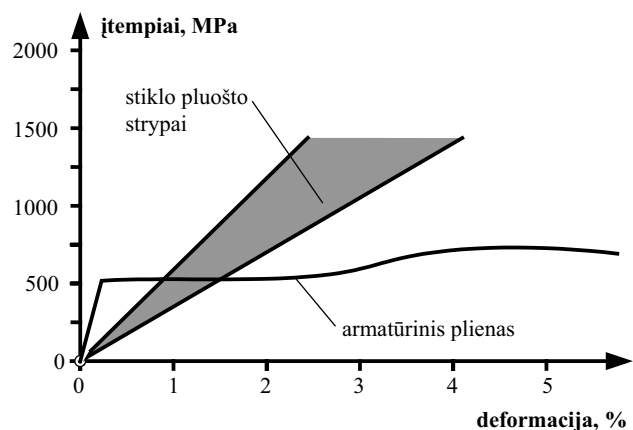
Reikšminiai žodžiai: armuotas betonas, stiklo pluošto armatūra, GFRP, pleišėjimas, eksperimentiniai tyrimai, skaitinis modeliavimas

Įvadas

Kompozitinių medžiagų taikymas betoninėms konstrukcijoms armuoti yra palyginti nauja sritis. Jos tyrimai prasidėjo 1970 metais, atliekant konstrukcinių elementų bandymus su nedidelio skersmens įvairiai apdirbto paviršiaus tipo stiklo pluošto armatūra (Nawy *et al.* 1971; Nawy, Neuwerth 1977). Daug dėmesio kompozitinės armatūros tyrimams buvo skirta 1980 m. JAV (suformuota ACI 440 darbo grupė) dėl ypač didelių išlaidų stiprinant ir rekonstruojant korozijos paveiktus tiltus ir viadukus. Pirmieji demonstraciniai tiltai iš kompozitinės armatūros buvo pastatyti Olandijoje, Vokietijoje ir Japonijoje 1980-ųjų pabaigoje, tačiau netinkamai įvertinus armatūros ir betono sąveiką bei susidarius neleistinai dideliems tiltų įlinkiams, po kelių eksploatacijos metų teko imtis stiprinimo priemonių.

Standumo ir įlinkių problema (tinkamumo ribinis būvis) yra viena iš didžiausių kliūčių, stabdanti platesnį kompozitinės armatūros taikymą armuoto betono konstrukcijoms. Plačiausiai taikomų stiklo pluošto kompozitinių strypų (angl. *glass fiber reinforced polymer, GFRP*) tamprumo modulis yra nuo 3 iki 5 kartų mažesnis negu plieno (Barris *et al.* 2009). Konstrukcijoms pleišėjant ir tempimo įtempius perimant armatūrai, dėl nedidelio tamprumo modulio staiga padidėja jos ašinės deformacijos ir konstrukcijos įlinkis (Ghali *et al.* 2002; Issa *et al.* 2011).

Stiklo pluošto strypų ir įprasto armatūrinio plieno įtempimų ir deformacijų diagramos palygintos 1 pav.



1 pav. Stiklo pluošto strypų ir armatūrinio plieno įtempimų ir deformacijų diagramos

Fig. 1. Stress-strain relationships of GFRP bars and steel reinforcement

Skirtingai nuo armatūrai naudojamo plieno, turinčio takumo aikštelę, kompozitinė armatūra iki suirimo deformuojasi tiesiškai tampriai, o jos suirimo pobūdis yra trapus. Tai yra problema, todėl užtikrinant saugos ribinį būvį, tokiu atveju paprastai konstrukcijos būna perarmuojamos siekiant, kad suirimas prasidėtų dėl gniuždomojo betono. (ACI 440.1R-06 2006).

Armuoto betono konstrukcijų irimas dėl gniuždomojo betono dažnai vadinamas pseudoplastiniu, nes tokio iri-

mo metu pasireiškia riboto dydžio plastinės deformacijos. Vienas iš būdų padidinti betono plastiškumą yra dispersinio armavimo naudojimas. Dispersiškai plieno plaušu armuotas betonas įgyja geresnes mechanines savybes: padidėja gniuždomasis stipris, ribinės suirimo deformacijos ir atsparumas pleišėjimui, gniuždomojo betono irimas tampa daug plastiškesnis (Banthia, Dubey 2000). Saugos ribinio būvio požiūriu, svarbiausia yra tai, kad plieno plaušu armuoto betono irimas nėra trapus, todėl tai gali būti efektyvus sprendimas, užtikrinant patikimą kompozitinius strypais armuotų konstrukcijų naudojimą.

Užtikrinant tinkamumo ribinį būvį, t. y. ribojant konstrukcijos įlinkius ir maksimalų plyšio plotį, kompozitinės armatūros stipris paprastai yra neišnaudojamas. Kadangi ši armatūra atspari korozijai, leistinas maksimalus plyšio plotis gali būti padidintas apie 40 % (Ghali *et al.* 2002), tačiau šios sąlygos nepakanka, norint visiškai išnaudoti polimerinės armatūros stiprį. Dispersinio armavimo naudojimas betono mišinyje šiuo atveju taip pat yra efektyvus sprendimas: trumpi plieno plaušeliai visomis kryptimis kerta atsivėrusį plyšį, taip suvaržydami plyšio atsivėrimą. Dėl bendros betono ir plieno plaušo sąveikos konstrukcija tampa standesnė. Ankstesni eksperimentiniai tyrimai (Swamy, Al-Noor 1975) parodė, kad betono mišinys, armuotas plieno plaušu, leidžia naudoti iki 700 MPa stiprumo armatūrą, neviršijant leistinų įlinkių ir plyšio pločio. Taip pat buvo pastebėta, kad plieno plaušas efektyviai suvaržo deformacijas per visas apkrovimo stadijas, sumažėja atstumai tarp plyšių ir plyšių pločiai, suirimo pobūdis tampa plastiškesnis, padidėja laikomoji galia skersiniame pjūvyje (Swamy, Al-Ta'an 1981).

Šiame straipsnyje pateikiami dviejų sijų, apkrautų dviem koncentruotomis jėgomis, bandymo rezultatai. Viena sija buvo armuota polimerine stiklo pluošto armatūra, kitoje į betono mišinį papildomai įdėta plieno plaušo. Eksperimentinių tyrimų tikslas yra ištirti plieno plaušo įtaką stiklo pluošto armatūra armuotų elementų pleišėjimui, deformacijoms ir laikomajai galiai.

Eksperimentiniai tyrimai

Tyrimams paruoštos dvi tos pačios geometrijos ir armavimo procento sijos. Pagrindiniai sijų duomenys pateikti 1 lentelėje ir 2 paveiksle.

Sijos armuotos *Schock ComBAR* stiklo pluošto strypais. Nustatytos mechaninės armatūros savybės pateiktos 2 lentelėje. Sijoje S-2-4-F08nm į betono mišinį papildomai įdėta 0,7 % (nuo betono tūrio) plieno plaušo, kurio ilgis $l = 50$ mm, skersmuo $d = 0,8$ mm. Gniuždomoje zonoje ir skersiniame armavimui naudota plieninė armatūra atitinkamai $2 \times \text{Ø}6$ ir $\text{Ø}6$ kas 100 mm.

1 lentelė. Sijų geometriniai rodikliai

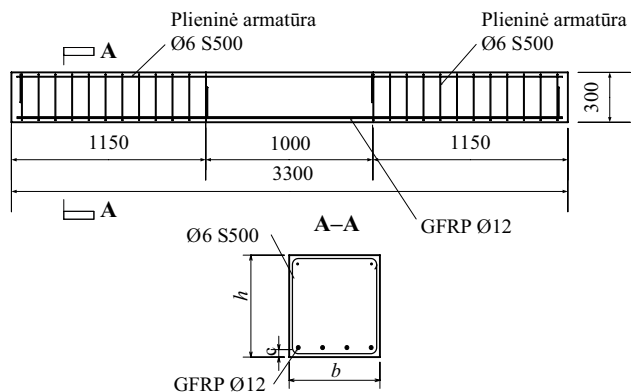
Table 1. Characteristics of beams

Sijos žymuo	h , m	b , m	c , m	Armavimo procentas p , %
S2-4-1nm	0,304	0,273	0,028	0,604
S2-4-F08nm	0,301	0,270	0,027	0,620

2 lentelė. Mechaninės stiklo pluošto armatūros savybės

Table 2. Mechanical properties of GFRP rebar

Skersmuo, mm	Tempiamasis stipris f_{fu} , MPa	Tamprumo modulis E , MPa
12	1299	54461



2 pav. Sijų armavimas ir geometrija

Fig. 2. Geometrical and reinforcement details of beams

Sijos, betonuotos plieniniuose klojiniuose, po betonavimo 3 paras laikytos po plėvele. Po to, kai buvo išmontuoti klojiniai, sijos kietėjo natūraliomis sąlygomis, apie 20 °C temperatūroje. Betonuoti naudotas gamykloje paruoštas betonas, kurio nominalioji klasė C 35 / 45. Nustatytos betono mechaninės savybės pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Betono mechaninės savybės

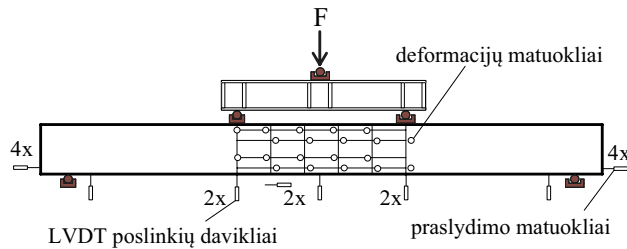
Table 3. Mechanical properties of concrete

Sijos žymuo	Gniuždomasis stipris $f_{cm,28}$, MPa	Tamprumo modulis E , MPa
S2-4-1nm	47,21	35046
S2-4-F08nm	36,85	32864

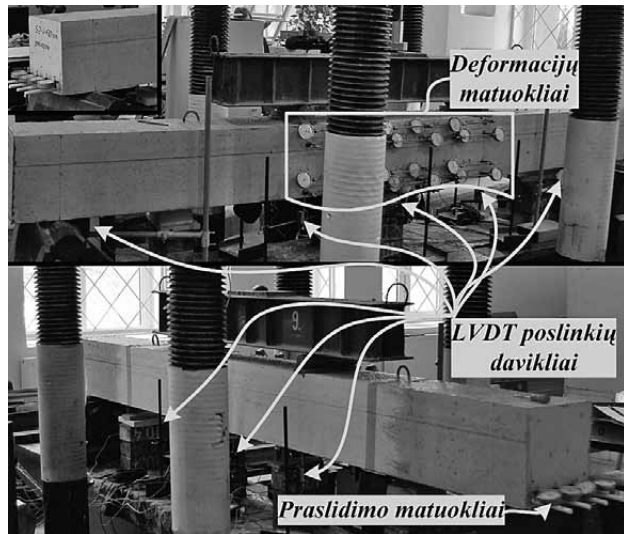
Sijos išbandytos VGTU gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedros laboratorijoje, taikant keturių taškų lenkimo schemą esant 1000 mm grynojo lenkimo zoni. Tarpatramio ilgis sudarė 3000 mm. Apkrova keliami pakopomis po 2 kN, darant apie 2 min pauzes rodmenims užrašyti. Apkrovos dydis fiksuotas skaitmeniniu 500 kN dinamometru. Įlinkiai matuoti 8 indukciniiais tiesinių poslinkių davikliais (angl. *Linear variable differential trans-*

former, LVDT), išdėstytais tokia tvarka: po vieną prie kiekvienos atramos, po du ties koncentruotų jėgų pridėjimo vieta ir tarpatriamo viduryje. Indukciniai davikliai ir dinamometras buvo sujungti su asmeniniu kompiuteriu, jų rodmenis nuskaitant kas 1 s.

Sijų deformacijoms matuoti grynojo lenkimo zonoje 4 lygmenimis buvo išdėstyta 20 mechaninių mikrometrų su apskritimine skale, kurių tikslumas $\pm 0,003$ mm. Matavimų bazė – 200 mm. Armatūros slinkčiai betono atžvilgiu matuoti ties kiekvieno strypo galu buvo pritvirtinti mechaniniai mikrometrai. Plyšių pločiai matuoti optiniu mikroskopu. Sijų bandymų schema parodyta 3 pav. Įrangos išdėstymas bandymo metu parodytas 4 pav.



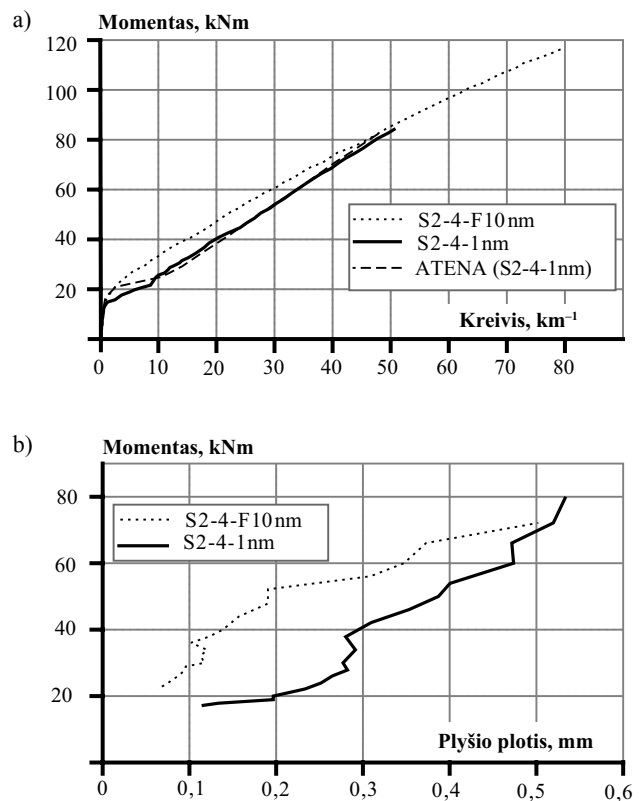
3 pav. Sijos bandymo schema
Fig. 3. Test setup



4 pav. Sijos bandymas, taikant keturių taškų lenkimo schemą
Fig. 4. Four point bending test of the beam

Bandymų rezultatai

Sijos išbandytos praėjus 32 (S2-4-1nm) ir 46 (S2-4-F08nm) paroms po betonavimo. Momentų ir kreivių diagramos, gautos iš eksperimentinių įlinkių ir deformacijų duomenų, parodytos 5 pav., a. Iš pateiktos diagramos matyti, kad iki pleišėjimo apkrovos M_{cr} , kuri abiem atvejais sudarė apie 15 kNm, sijų deformavimasis yra tiesinis. Tempiamajam

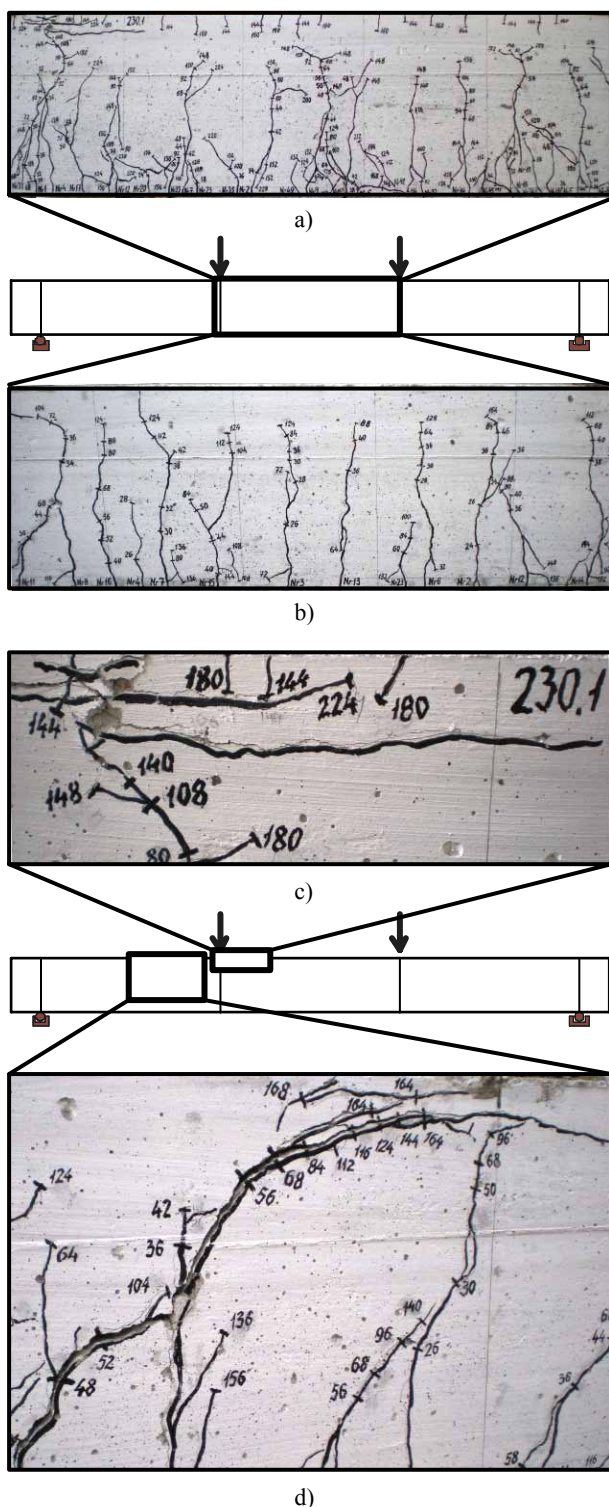


5 pav. Eksperimentiniai rezultatai: momentų ir kreivių diagrama (a); momentų ir vidutinių plyšių pločio diagrama (b)

Fig. 5. Diagrams of experimental results: moment – curvature (a); moment – average crack width (b)

betonui pasiekus stiprumo ribą ir atsiradus pirmiesiems plyšiams, sijų elgsena išsiskyrė: sijoje be plieno plaušo (S2-4-1nm) pastebimas staigus standumo sumažėjimas, o dispersiškai armuotoje sijoje (S2-4-F08nm) standumas po pleišėjimo mažėja laipsniškai. Šį efektą galima paaiškinti tuo, kad įvairiomis kryptimis išsidėstęs plieno plaušas kerta atsiveriančius plyšius ir efektyviai suvaržo jų atsiverimą. Didžiausios įtakos dispersinis armavimas turi po pleišėjimo apkrovos, o didėjant apkrovai jo įtaka standumui mažėja (žr. 5 pav., a) dėl vis plačiau atsiveriančių plyšių. Esant eksploatacinei apkrovai ($M = 0,6 M_u$, čia M_u – irimo apkrova), plieno plaušu armuotos sijos kreivis buvo 20 % mažesnis nei elemento be plaušo.

Bandymų metu buvo fiksuojami atsiveriantys plyšiai ir matuojami jų pločiai. Galutinės sijų supleišėjimo schemas pateiktos 6 paveiksle, a ir b. Kaip tikėtasi, dispersiškai armuotos sijos plyšių išsidėstymo schema yra tankesnė. Šį reiškinį paaiškina liekamieji įtempiai plyšyje: fibros per plyšį perduoda įtempius betonui, tuo būdu sumažėja įtempių perdavimo ilgis ir atstumas tarp plyšių (Tan *et al.* 1995). Dėl sumažėjusio atstumo tarp plyšių pastebimai sumažėja vidutiniai plyšių pločiai (žr. 5 pav., b). Vidutinio plyšio pločio suvaržymas taip pat



6 pav. Sijų pleišėjimas ir irimas: (a) ir (b) plyšių išsidėstymas grynojo lenkimo zonoje atitinkamai sijose S2-4-F08nm ir S2-4-1nm; (c) ir (d) sijų irimo pobūdis atitinkamai sijose S2-4-F08nm ir S2-4-1nm

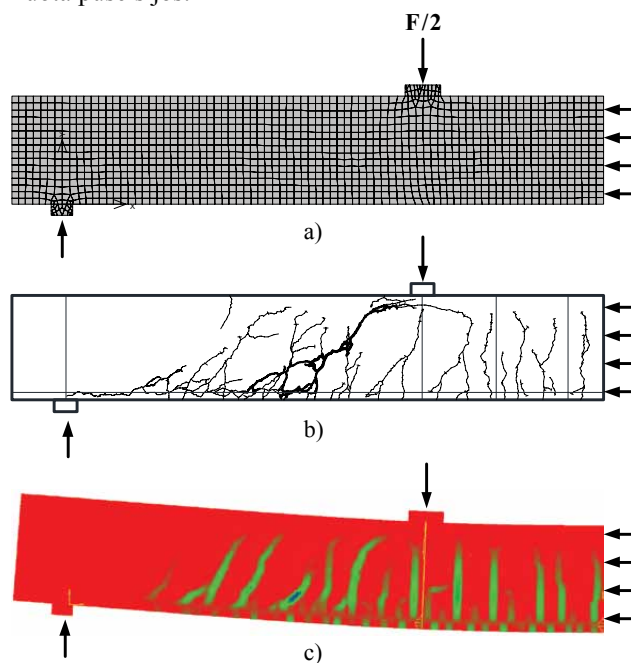
Fig. 6. Cracking and failure of beams: crack pattern in the pure bending zone of beams S2-4-F08nm and S2-4-1nm, (a) and (b) respectively; failure mode of beams S2-4-F08nm and S2-4-1nm, (c) and (d) respectively

efektyviausias yra pleišėjimo pradžioje, kai fibrų įtaka yra didžiausia. Esant eksploataicinei apkrovai vidutinis plyšio plotis dėl plieno plaušo įtakos buvo 53 % mažesnis.

Sijų suirimo pobūdis buvo skirtingas. Sija be plieno plaušo (S2-4-1nm) suiro skersiniame pjūvyje, apkrovai pasiekus $M = 84$ kNm reikšmę (žr. 6 pav., d). Į betoną įmaišytas plieno plaušas gerokai padidino skersinio pjūvio atsparį ir antrosios sijos (S2-4-F08nm) suirimas prasidėjo dėl gniuždomojo betono, apkrovai pasiekus $M = 117$ kNm reikšmę. Šiuo atveju buvo įvykdyta perarmavimo rekomendacija sijoms, armuotoms kompozitine armatūra. Be to, dėl plieno plaušo įtakos gniuždomojo betono suirimas nebuvo trapus, o pastebėti laipsniškai plintantys išilginiai plyšiai gniuždomojoje zonoje (žr. 6 pav., c).

Skaitinis modeliavimas

Išbandytos sijos buvo sumodeliuotos baigtinių elementų programa ATENA. Ši programa yra specializuota betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų analizei. Baigtinių elementų schema parodyta 7 pav., a. Naudojant simetriją, sumodeliuota pusė sijos.



7 pav. Skaitinis sijos modeliavimas: baigtinių elementų programos ATENA modelis (a); eksperimentinė ir apskaičiuota plyšių išsidėstymo schema (b), (c)

Fig. 7. Numerical modeling of the beam: the model of finite element program ATENA (a); experimental and calculated crack pattern, (b) and (c) respectively

Vidutinis kreivis apskaičiuotas grynojo lenkimo zonoje, remiantis integraline įlinkio ir kreivio priklausomybe (žr. 5 pav., a). Rezultatuose parodyta sija be plieno plaušo (S2-4-1nm), taikant programos siūlomą įprastą betono įtempių ir deformacijų modelį. Eksperimentinis ir apskaičiuotas supleišėjimo pobūdis parodytas atitinkamai 7 paveiksle, b ir c. Gauti skaitiniai sijos S2-4-1nm kreivio ir pleišėjimo modeliavimo rezultatai yra artimi eksperimentiniams.

Plieno plaušo įtakai įvertinti reikalingi papildomi medžiagų įtempių ir deformacijų modeliai, kurie gali būti įtraukti į baigtinių elementų programą. Dėl sudėtingos plieno plaušu armuoto betono elgsenos ir daugelio modeliavimo neapibrėžtumų šiame straipsnyje apsiribojama tik įprasto betono sijos skaitiniu modeliavimu.

Išvados

1. Mechaninės stiklo pluošto armatūros savybės (didelis stipris ir mažas tamprumo modulis) sukelia sunkumų, užtikrinant reikiamą konstrukcijos standumą ir atsparumą pleišėjimui. Šias problemas gerai sprendžia dispersinio armavimo naudojimas betono mišinyje. Dėl plieno plaušo įtakos sijos S2-4-F08nm kreivis sumažėjo 20 %, o vidutinis plyšio plotis – 53 %, esant eksploatacinei apkrovai.
2. Plieno plaušo naudojimas betono mišinyje pakeitė sijos suirimo pobūdį. Sija S2-4-1nm, kurioje kartu su stiklo pluošto armatūra naudotas įprastas betonas, suiro skersiniame pjūvyje, apkrovai pasiekus $M = 84$ kNm reikšmę. Į betono mišinį įdėjus plieno plaušo, sija suiro dėl gniuždomojo betono, apkrovai pasiekus $M = 117$ kNm reikšmę. Gniuždomojo betono suirimas nebuvo trapus, buvo pastebėti laipsniškai plintantys išilginiai plyšiai gniuždomoje zonoje.
3. Atlikus skaičiavimus netiesine baigtinių elementų programa ATENA, gauta artima bandymams sijos S2-4-1nm momento kreivio priklausomybė ir supleišėjimo pobūdis. Plieno plaušo įtakai įvertinti reikalingi papildomi medžiagų modeliai, kuriems gauti reikia išsamesnių eksperimentinių tyrimų.

Literatūra

- ACI 440.1R-06: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. Michigan: American Concrete Institute. 2006. 44 p. ISBN 9780870312106.
- Banthia, N.; Dubey, A. 2000. Measurement of flexural toughness of fiber-reinforced concrete using a novel technique – part 2: performance of various composites, *ACI Materials Journal* 97(1): 3-11.

- Barris, C.; Torres, L.; Turon, A.; Baena, M.; Catalan, A. 2009. An experimental study of the flexural behavior of GFRP RC beams and comparison with prediction models, *Composite Structures* 91(3): 286–295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.05.005>
- Ghali, A.; Favre, R.; Elbadry, M. 2002. *Concrete Structures: Stresses and Deformations*. Taylor & Francis.
- Issa, M. S.; Metwally, I. M.; Elzeiny, S. M. 2011. Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars, *Engineering Structures* 33(5): 1754-1763. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.014>
- Nawy, E. G.; Neunerth, G. E. 1977. Fiberglass reinforced concrete slabs and beams, *Journal of the Structural Division* 103(2): 421–440.
- Nawy, E. G.; Neunerth, G. E.; Phillips, C. J. 1971. Behavior of fiber glass reinforced concrete beams, *Journal of the Structural Division* 97(9): 2203–2215.
- Swamy, R. N.; Al-Ta'an, A. 1981. Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete, *ACI Journal Proceedings* 78(5): 395-405.
- Swamy, R. N.; Al-Noor, K. A. 1975. Flexural behavior of fiber concrete with conventional steel reinforcement, in *Proceedings RILEM Symposium on Fiber Reinforced Cement and Concrete*. London, 186–187.
- Tan, K. H.; Paramasivam, P.; Tan, K. C. 1995. Cracking characteristics of reinforced steel fiber concrete beams under short- and long-term loadings, *Advanced Cement Based Materials* 2(4): 127–137.

CRACKING AND STRAIN ANALYSIS OF BEAMS REINFORCED WITH COMPOSITE BARS

E. Timinskas, R. Jakubovskis, A. Meškėnas, E. Gudonis

Abstract

The paper discusses the results of experimental and numerical modelling using two beams reinforced with GFRP bars. One beam was made of plain concrete while the other contained short steel fibres. The influence of steel fibres on deflection and cracking behaviour was studied. A comparative analysis of experimental results has shown that steel fibres significantly reduce deflections and average crack width of the beam. Moreover, an addition of steel fibres to the concrete mix led to a more ductile failure mode of the beam. Numerical analysis employing non-linear finite element software ATENA has revealed that a good agreement between calculated and experimental results regarding an ordinary concrete GFRP reinforced beam can be obtained.

Keywords: reinforced concrete, glass fiber reinforced polymer, GFRP, cracking, experimental research, finite element model.