



ARMUOTOJO LENGVOJO BETONO LENKIAMŪJŲ ELEMENTŲ EKSPERIMENTINIAI IR TEORINIAI TYRIMAI

Deividas RUMŠYS¹, Darius BAČINSKAS², Edmundas SPUDULIS³, Eugenijus GUDONIS⁴,
Aleksandr SOKOLOV⁵

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹deividas.rumsys@vgtu.lt; ²darius.bacinskas@vgtu.lt; ³edmundas.spudulis@vgtu.lt;

⁴eugenijus.gudonis@vgtu.lt; ⁵aleksandr.sokolov@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje aprašytas naujai sukurtas konstrukcinis lengvasis betonas ir jo panaudojimas eksperimentinių armuotojo lengvojo betono sijų gamybai. Atlikti trumpalaikė apkrova veikiamų plieniniais strypais armuotų lengvojo betono sijų eksperimentiniai tyrimai, kuriuose nagrinėtas sijų įtempimų ir deformacijų būvis. Laboratorijoje išbandyti 8 lenkiamieji elementai, kurių armavimo procentai: 0,309 %, 0,557 %, 0,895 % ir 1,255 %. Tyrimų metu matuotos vidutinės elemento deformacijos gryojo lenkimo zonoje 4 skirtinguose lygmenyse bei sijų poslinkiai ties atramomis, jėgos pridėjimo vietose ir viduriniame pjūvyje (iš viso 12 matavimo taškų). Bandymo metu gryojo lenkimo zonos deformacijos bei pleišėjimas papildomai stebėti greitaigė vaizdo kamera. Gauti rezultatai panaudoti sudarant eksperimentines lenkimo momentų ir kreivių diagramas, kurios palygintos su teoriškai apskaičiuotomis taikant Lietuvoje galiojančių LST EN ir STR projektavimo normų metodikas. Taikant VGTU sukurtą atvirkštinio uždavinio algoritmą, gautos tempiamo armuotojo lengvojo betono įtempimų ir deformacijų diagramos, kurios pritaikytos atliekant skaitinį modeliavimą baigtinių elementų programa ATENA. Gautos momentų ir kreivių diagramos baigtinių elementų programa palygintos su eksperimentų metu gautomis momentų ir kreivių diagramomis. Gautas geras šių diagramų sutapimas.

Reikšminiai žodžiai: lengvasis betonas, armuotojo betono sijos, skaitinis modeliavimas, įtempiai ir deformacijos, kreiviai, eksperimentiniai tyrimai.

Įvadas

Daugelyje pasaulio šalių transporto tinklų infrastruktūroje įprasto gelžbetonio konstrukcijų statiniai sudaro didžiąją dalį visų statinių. Platų šių konstrukcijų panaudojimą lėmė mažos eksploatacinės išlaidos, santykinai ilgas eksploataavimo laikas ir nedidelė kaina. Vis dėlto dėl nemažo gelžbetoninių konstrukcijų savitojo svorio itin išauga transporto statinio nuolatinė apkrova, o tai savo ruožtu lemia didesnes statybos išlaidas. Ši tendencija visame pasaulyje paskatino inovatyvių armuotojo betono konstrukcinių sprendinių paiešką. Šalia įprastų normalaus stiprio betonų naudojami stiprieji ir ypač stiprūs betonai, kurių stipris gali siekti net iki 200 MPa (įprastojo betono stipris yra iki 60 MPa). Vis dėlto šių betonų gamybai reikalingi nemažai kainuojantys priedai, dėl to iš jų pagamintos konstrukcijos dažniausiai nėra konkurencingos įprastoms gelžbetoninėms konstrukcijoms. Kita kryptis, kuria gali būti tobulinamos gelžbetoninės konstrukcijos, – lengvojo armuotojo betono naudojimas. Šio betono mišiniui pagaminti greta sunkiojo užpildo (smėlio, žvyro,

skaldos) taikomi lengvieji užpildai (keramzitas, pemza ir kt.). Šio betono kaina, fizinės ir mechaninės savybės yra labai panašios į įprasto svorio betono, o tūrinis svoris gali būti net iki 40 % mažesnis. Daugelyje šalių lengvasis betonas plačiai taikomas tiltų perdangų konstrukcijoms. Konstrukcinis lengvasis betonas turi efektyvesnę stiprį ir savojo svorio santykį, dėl to mažėja reikiamo betono ir armatūros kiekis, o tai leidžia sumažinti bendrą statinio kainą. Lengvasis betonas ypač svarbus stiprinant ar platinant senų tiltų konstrukcijas, kai papildomas atramų bei pamatų apkrovimas nėra galimas.

Betoninių statinių savasis konstrukcijos svoris sudaro didžiausią dalį bendrosios apkrovos. Lengvesnis betonas leidžia lanksčiau projektuoti statinius ir pagrindinės priežastys yra statinio kainos sumažėjimas dėl mažesnio savitojo svorio, padidėjęs statinio atsparumas seisminėms apkrovoms, galimybės projektuoti didesnio tarpatramio tiltus (lyginant su įprastuoju betonu), didesnis atsparumas ugnies poveikiui, mažesni konstrukcinių elementų matme-

nys, o tai sumažina ir pastato aukšto aukštį bei armatūros kiekį elementuose (Shafigh *et al.* 2011).

Lengvasis betonas yra gaminamas sudarant oro tuštumas betono mišinyje. Statybos pramonės sektoriuje naudojami 3 pagrindiniai lengvojo betono tipai:

- natūralių ir dirbtinų lengvųjų užpildų betonas, kai tuštumos yra pačiuose užpilduose;
- akytasis betonas ir putų betonas, kai tuštumos sudaromos cemento tešloje;
- betonai be smulkiojo užpildo, kai atsisakoma smulkiojo užpildo, o tuštumos susidaro tarp stambųjų užpildų dalelių.

Laikančiosioms konstrukcijoms dažniausiai naudojamas pirmojo tipo lengvasis betonas. Konstrukcinio lengvojo betono tankis dažniausiai yra 1400–2000 kg/m³ (įprastų betonų 2300–2400 kg/m³), o gniuždomasis stipris po 28 kietėjimo parų 10–70 MPa (Wang *et al.* 2013). Eksperimentiniais tyrimais (Shafigh *et al.* 2011; Lim *et al.* 2006) nustatyta, kad didinant lengvojo betono gniuždomąjį stiprį itin išauga pleišėjimo apkrova. Taip pat nežymiai padidėja jau supleišėjusio betono standumas, irimo apkrova ir plastiškumas. Didinant tempiamosios armatūros kiekį, mažėja plyšio pločio reikšmė, padidėja standumas ir irimo apkrova, tačiau labai sumažėja plastiškumas.

Straipsnyje nagrinėjamas kokybiškai naujas konstrukcinio lengvojo betono mišinys, kuris panaudotas eksperimentinėms armuotojo lengvojo betono sijoms gaminti. Trumpalaikė apkrova išbandytoms sijoms gautos lenkimo momentų ir kreivių diagramos, kurios palygintos su teoriškai apskaičiuotomis, taikant Lietuvoje galiojančių projektavimo normų metodikas (LST EN 1992-1-1:2007; STR 2.05.05:2005). Taikant VGTU Tiltų ir specialiųjų statinių katedroje sukurtą atvirkštinio uždavinio algoritmą (Kaklauskas 2001; Gribniak 2009) gauti tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų grafikai, kurie panaudoti atliekant skaitinį modeliavimą kompiuterine baigtinių elementų programa ATENA. Skaitinio modeliavimo rezultatų adekvatumui įvertinti, rezultatai buvo palyginti su eksperimentiškai gautais rezultatais, kurie gerai sutapo, o tai reiškia, kad taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą buvo gautos geros tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos.

Eksperimentiniai tyrimai

Medžiagos

Bendradarbiaujant su VGTU Termoizoliacijos mokslo instituto ekspertais sukurta lengvojo betono sudėtis detaliau pateikta 1 lentelėje. Mišinio mechaninėms savybėms

nustatyti papildomai pagaminti kubai (150×150×150) ir cilindrai (Ø150×300). Pagrindinės mechaninės savybės nustatytos praėjus 28 dienoms po betonavimo (pagal LST EN 12390-3:2009, LST EN 12390-7:2009). Gautos betono charakteristikų reikšmės pateiktos 2 lentelėje. Sukurtas lengvojo betono mišinys panaudotas eksperimentinių armuotojo lengvojo betono sijų gamybai. Bandymai atlikti VGTU Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedros laboratorijoje, panaudojant Saulėtekio slėnio infrastruktūros materialinę bazę.

1 lentelė. Lengvojo betono mišinio sudėtis

Table 1. Mixture composition of the lightweight concrete

El. Nr.	Medžiaga	Kiekis, %
1.	Smėlis 0/4 mm	50,9
2.	Cementas CEM I 42,5R	30,4
3.	Maltas kvarcinis smėlis	4,35
4.	Mikrodulkės SiO ₂	1,3
5.	Keramzitas 2/4 mm	13,05
	Iš viso kietų medžiagų:	100
6.	Superplastiklis Nr. 1	3,0 % nuo cemento
7.	Superplastiklis Nr. 2	0,5 % nuo cemento
8.	Vandens ir kietų medžiagų santykis V/K	0,078
9.	Papildomas vandens kiekis keramzitui drėkinti prieš betonavimą	10 % nuo keramzito

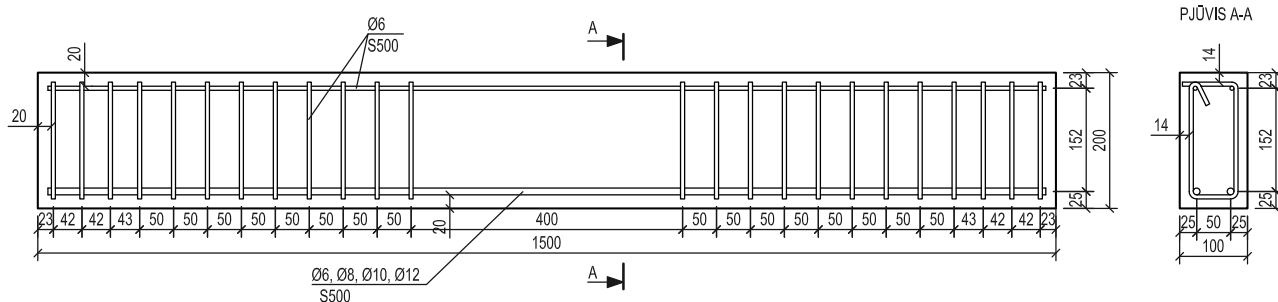
2 lentelė. Lengvojo betono mechaninės savybės

Table 2. Mechanical properties of the lightweight concrete

Eil. Nr.	Savybė	Betono amžius
		$t_0 = 28$ paros
1.	f_c , MPa	46,4
2.	$f_{c,cube}$, MPa	56,1
3.	E_{cm} , GPa	25,5
4.	ρ , kg/m ³	1897

Eksperimentinės sijos ir bandymo metodika

Pagamintos ir trumpalaikė apkrova išbandytos 8 armuotojo lengvojo betono sijos. Projektinis sijų dydis 100×200×1500 mm (plotis×aukštis×ilgis), skaičiuojamas ilgis 1200 mm. Sijos suskirstytos į 4 grupes (po dvi kiekvienoje grupėje). Sijos viena nuo kitos skyrėsi tempiamojoje zonoje esančios strypinės armatūros armavimo procentu: I grupės sijos armuotos 2×Ø6, armavimo procentas $\mu = 0,309$ %, II grupės sijos 2×Ø8, $\mu = 0,557$ %, III grupės sijos 2×Ø10, $\mu = 0,895$ %, IV grupės sijos ir 2×Ø12, $\mu = 1,255$ %. Visos sijos armuotos S500 klasės



1 pav. Sijos armavimo schema
Fig 1. Scheme of beam' reinforcement

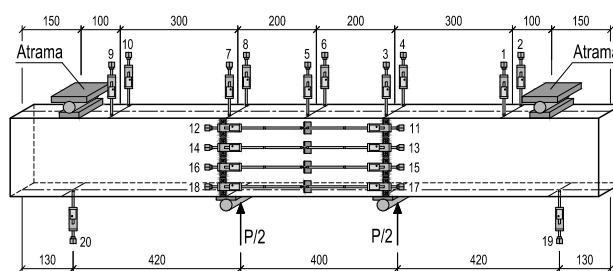
3 lentelė. Armuotojo lengvojo betono sijų charakteristikos
Table 3. Characteristics of reinforced lightweight concrete beams

	Sijos pavadinimas	Bandymo diena	h , mm	b , mm	d , mm	a_1 , mm	a_2 , mm	A_1 , cm ²	A_2 , cm ²	Armavimo procentas, $A_1/(b \cdot d) \cdot 100\%$	$f_{y,s}$ MPa	E_s , GPa
1	S6-1	42	198	104	175,1	22,90	25,05	0,565	0,565	0,310	500,0	205,3
2	S6-2	42	200	102	180,1	19,90	28,55	0,565	0,565	0,308	500,0	205,3
3	S8-1	41	199	102	177,2	21,80	27,50	1,005	0,565	0,556	500,0	210,5
4	S8-2	41	200	102	176,8	23,20	25,70	1,005	0,565	0,557	500,0	210,5
5	S10-1	41	199	102	174,6	24,40	26,65	1,571	0,565	0,882	540,0	207,4
6	S10-2	41	200	99	174,8	25,20	24,30	1,571	0,565	0,908	540,0	207,4
7	S12-1	40	200	105	178,2	21,80	28,05	2,26	0,565	1,208	530,0	211,6
8	S12-2	40	197	102	170,2	26,85	21,2	2,26	0,565	1,302	530,0	211,6

strypais. Sijos atsparumui įstrižajame pjūvyje užtikrinti armuotos Ø6 S500 klasės skersine armatūra. Sijų armavimo schema pateikta 1 pav., o pagrindinės charakteristikos 3 lentelėje. Sijos žymenyje pirmas skaičius atitinka tempiamosios zonos armatūros skersmenį, o paskutinis skaičius – sijos numerį grupėje.

Bandymo metu sijų deformacijoms ir poslinkiams matuoti naudota 20 skaitmeninių poslinkių jutiklių (LVDT – angl. *linear variable differential transformer*), iš jų 10 – sijos įlinkiams matuoti, šie jutikliai buvo pritvirtinti prie metalinio rėmo (žr. 2 pav. 1–10 jutikliai), 8 – deformacijoms grynojo lenkimo zonoje matuoti, šie jutikliai buvo pritvirtinti prie pačios sijos (žr. 2 pav. 11–18 jutikliai), ir 2 – atramų poslinkiams matuoti (žr. 2 pav. 19–20 jutikliai). Prietaisų išdėstymo schema pateikta 2 pav.

Sijų deformacijos grynojo lenkimo zonoje papildomai matuotos taikant inovatyvią bandymo įrangą – skaitmeninę vaizdo kamerą. Bandymo metu skaitmenine vaizdo kamera nustatytame apkrovos lygmenyje fiksuojami grynojo lenkimo zonos skaitmeniniai vaizdai, kurie vėliau apdorojami taikant skaitmeninio vaizdo koreliacijos metodą (angl. *digital image correlation method, DICM*). Skaitmeniniuose



2 pav. Matavimo prietaisų išdėstymo ir apkrovimo schema
Fig 2. Measuring devices' location and loading scheme

vaizduose matomos sijos taškų koordinatės laikui bėgant, o iš šių koordinatėjų pokyčio gaunamos sijų deformacijos esant atitinkamam apkrovos lygmeniui.

Bandinys buvo įstatomas į metalinį stendą. Apkrova suteikta iš apačios hidrauliniu domkratu, perduodant jėgą per transversą. Apkrova rankiniu būdu buvo didinama kas 2 kN stebint plyšių atsiradimą ir jų vystymąsi. Apkrova buvo keliami iki kol pradės tekėti tempiamoji armatūra. Sijų apkrovimo schema pateikta 2 pav.

Tyrimų rezultatai

Atlikus bandymus kiekvienai sijai sudarytos lenkimo momentų ir kreivių eksperimentinės diagramos. Gautos diagramos palygintos su teoriškai apskaičiuotomis, taikant Lietuvoje galiojančių projektavimo normų metodikas (LST EN 1992-1-1:2007; STR 2.05.05:2005). Eksperimentinių ir teorinių rezultatų sugretinimas pateiktas 3 pav., kuriame „*Th*“ žymi teorines lenkimo momentų ir kreivių diagramas, o „*Exp*“ – eksperimentines. Eksperimentinės kreivės gautos skirtingais būdais: 1) apskaičiuotos pagal grynojo lenkimo zonoje išmatuotas atitinkamos sijos deformacijas (grafikuose žymima „*Exp* – iš deformacijų“), 2) apskaičiuotos pagal sijos vidurio įlinkių ir atramų poslinkių reikšmes (grafikuose žymima „*Exp* – iš įlinkių 1“), 3) apskaičiuotos pagal sijos grynojo lenkimo zonos įlinkius (zonos tarp bandymo metu veikiančių dviejų koncentruotųjų jėgų) įvertinant atramų poslinkius (grafikuose žymima „*Exp* – iš įlinkių 2“), 4) apskaičiuotos pagal deformacijų matavimus taikant skaitmenines vaizdo kameras (grafikuose žymima „*Exp* – DICM“).

Sugretinus teorinius ir eksperimentinius rezultatus matyti, kad kuo didesnis armavimo procentas, tuo eksperimentinių rezultatų sklaida didesnė. Tai galima paaiškinti tuo, kad esant didesniai armavimo procentui, sijos atlaikomasis momentas ir standumas yra didesni. Didesnio armavimo sijoms didesnę įtaką turi bandymo stendo netobulumai (atraminių dalių poslinkiai bei posūkiai, stendo deformacijos). Kuo didesnė apkrova, tuo šie netobulumai išryškėja labiau ir, tikėtina, lemia matavimo paklaidas.

Kita vertus, veikiant didesniai lenkimo momentui, siją veikia ir didesnė skersinė jėga. Kadangi visų sijų armavimas įstrižajame pjūvyje buvo vienodas, didesnio armavimo procento sijose labiau išsivystė įstrižieji plyšiai, kurie taip pat lėmė eksperimentinių rezultatų sklaidą. Pastebime, kad sijų grupių S10 ir S12 eksperimentiniuose grafikuose „*Exp* – iš deformacijų“ reikšmės panašios į „*Exp* – DICM“ reikšmes, o „*Exp* – iš įlinkių 1“ reikšmės panašios į „*Exp* – iš įlinkių 2“, tačiau tarpusavyje jos skiriasi, ir šis skirtumas didėja, didėjant lenkimo momento reikšmei. Tai gali būti paaiškinama įstrižųjų plyšių įtaka rezultatams. Grynojo lenkimo zonoje matuojamoms deformacijoms įstrižieji plyšiai turi mažesnę įtaką nei matuojant poslinkius, kuriems pleišėjimas daro įtaką per visą sijos ilgį. Šios tendencijos gali būti priskirtos jau minėtų įstrižųjų plyšių poveikiui, o detalesnei šio efekto analizei reikalingi papildomi tyrimai.

Visų sijų teoriniai ir eksperimentiniai rezultatai lyginami, esant tam pačiam apkrovimo lygmeniui, kuris pasirinktas $0,6M_{Rm}$, čia M_{Rm} – sijos vidutinis atlaikomasis momentas, apskaičiuotas pagal STR 2.05.05 (2005), pa-

sirinkus vidutines medžiagų (betono ir armatūros) stiprių reikšmes. S6-1 ir S6-2 sijoms ši riba padidinta iki $0,8M_{Rm}$, nes lygmuo $0,6M_{Rm}$ atitinka nesupleišėjusio elemento elgsenos stadiją.

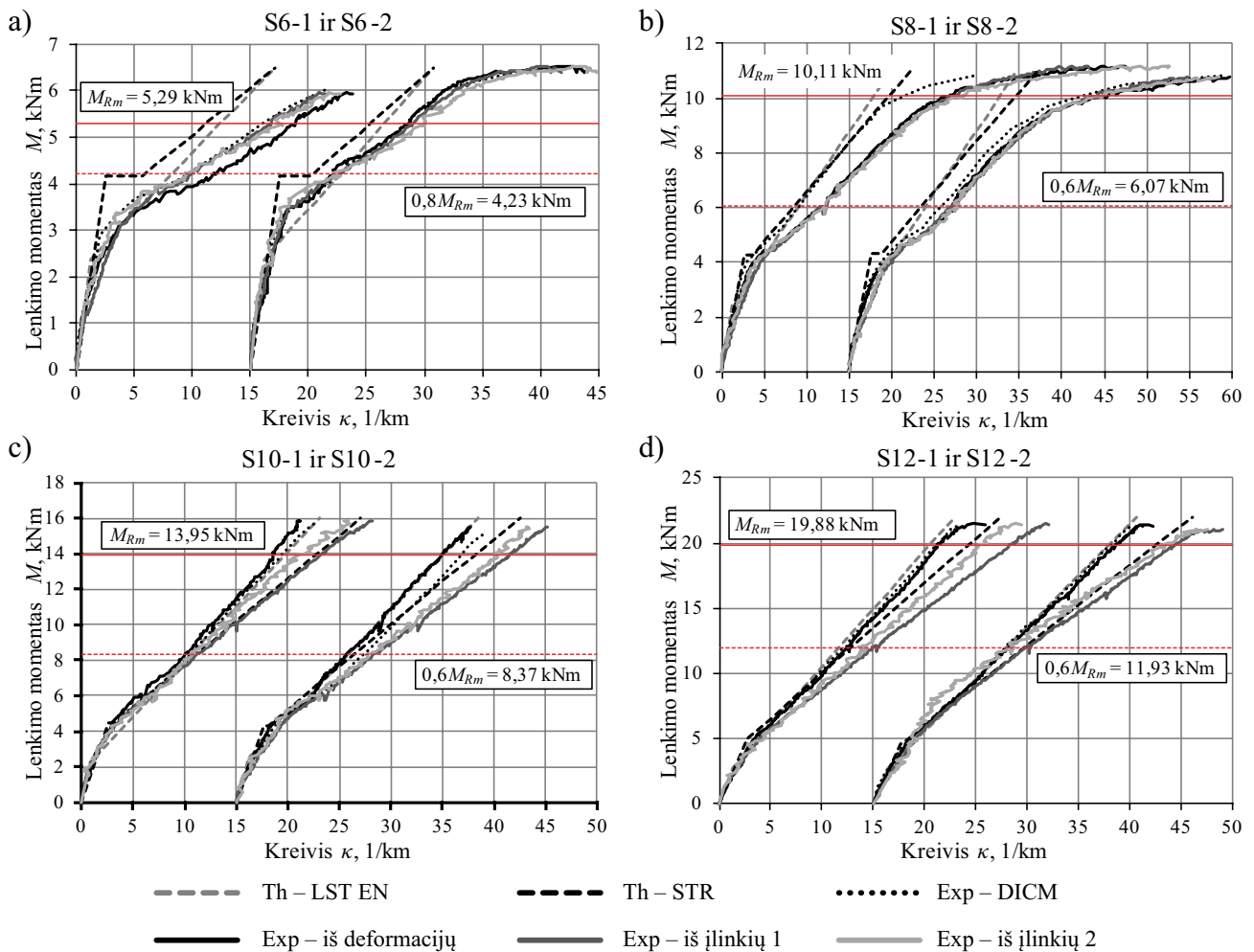
S6-1 ir S6-2 sijų lenkimo momentų ir kreivių priklausomybių grafikai pavaizduoti 3 pav., a. Šių sijų atlaikomasis momentas $M_{Rm} = 5,29$ kNm. Teorinių ir eksperimentinių kreivių santykiai lyginami esant $M = 4,23$ kNm reikšmei. LST EN ir eksperimentinių reikšmių nesutapimas S6-1 ir S6-2 sijoms atitinkamai siekia 19 % ir 4 %, o pagal STR – 42 % ir 32 %. Iš 3 pav., a, galima matyti, kad LST EN diagramos pobūdis neatitinka eksperimentinių bei STR kreivių – didėjant lenkimo momento reikšmei, didėja ir eksperimentinių rezultatų nesutapimas. Lyginant STR diagramas, rezultatų nesutapimas visais apkrovimo etapais išlieka panašus, t. y. STR kreivės yra apytiksliai lygiagrečios su eksperimentinėmis.

S8-1 ir S8-2 sijų lenkimo momentų ir kreivių grafikai pavaizduoti 3 pav., b. Šių sijų $M_{Rm} = 10,11$ kNm, o teorinių ir eksperimentinių kreivių santykiai lyginami esant $M = 6,07$ kNm reikšmei. LST EN ir eksperimentinių reikšmių vidurkiu nesutapimas sijoms siekė iki 22 %, o STR ir eksperimentinės reikšmės – iki 27 %.

S10-1 ir S10-2 sijų eksperimentiniuose rezultatuose pastebimas nemažas skirtingais metodais nustatytų eksperimentinių rezultatų nesutapimas (dėl anksčiau minėtų priežasčių). Šių sijų $M_{Rm} = 13,95$ kNm, o teorinių ir eksperimentinių kreivių santykiai lyginami esant $M = 8,37$ kNm reikšmei. Teorinių ir vidutinių eksperimentinių rezultatų sutapimas gana geras. Nesutapimas neviršija 13 %. Pastebima, kad nesutapimai didėja augant lenkimo momento reikšmei.

S12-1 ir S12-2 sijų eksperimentinių rezultatų nesutapimas panašus kaip ir S10 sijų grupės. Šių sijų $M_{Rm} = 19,88$ kNm, o teorinių ir eksperimentinių kreivių santykiai lyginami esant $M = 11,93$ kNm reikšmei. Teorinių ir vidutinių eksperimentinių rezultatų nesutapimas neviršija 13 %.

Analizuojant teorinius ir eksperimentinius rezultatus galima pastebėti bendrą tendenciją, kad teorinė pleišėjimo momento reikšmė, apskaičiuota pagal LST EN, daugeliu atvejų yra mažesnė nei gauta eksperimentiškai, o pagal STR, atvirkščiai, – pleišėjimo momento reikšmė didesnė nei eksperimentinė. Nesutapimas didėja, mažėjant armavimo procentui. Be to, esant mažesniai armavimo procentui, teoriniais metodais gaunama standesnė sijų elgsena nei gauta eksperimentiškai. Šias tendencijas gali lemti skirtingi įprasto bei lengvojo betono ir armatūros kontakto zonos ypatumai.



3 pav. Sijų lenkimo momentų ir kreivių diagramos: a) S6-1 ir S6-2; b) S8-1 ir S8-2; c) S10-1 ir S10-2; d) S12-1 ir S12-2

Fig 3. Moment-curvature relationships of tested beams: a) S6-1 and S6-2; b) S8-1 and S8-2; c) S10-1 and S10-2; d) S12-1 and S12-2

Skaitinis modeliavimas

Atvirkštinis uždavinys

Tiesioginis uždavinys yra toks, kai turint medžiagų, fizikinius modelius (pvz., įtempių ir deformacijų diagramas), gaunamas konstrukcijos atsakas (pvz., apkrovos ir deformacijų, apkrovos ir įlinkių ar pan. diagramos). Tiesioginis uždavinys yra įprastas statybinių konstrukcijų projektavimo praktikoje. Atvirkštinio uždavinio sprendimo tikslas – gauti medžiagų įtempių ir deformacijų diagramas, kurias vėliau galima pritaikyti projektuojant konstrukcijas (Ulbinas 2012), t. y. tiesioginiame uždavinyje. Šiame darbe atvirkštinis uždavinys taikomas siekiant gauti tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramas iš eksperimentinių armuotojo lengvojo betono sijų momentų ir kreivių duomenų.

Atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmas (Kaklauskas 2004; Gribniak 2009) paremtas sluoksnių

modeliu bei įtempių ir deformacijų diagramos nustatymu skerspjuvio kraštiniam tempiamojo betono sluoksniui. Gelžbetoninio elemento skerspjuvis pagal nustatytus parametrus sudalinamas į horizontalius armatūros ir betono sluoksnius. Nustatomos gniuždomojo betono bei armatūros įtempių ir deformacijų diagramos. Skaičiavimai atliekami iteracijomis, didėjant išoriniam lenkimo momentui. Kiekvienam lenkimo momento prieaugiui ieškomos įtempių ir deformacijų diagramos pradinė kirstinio modulio reikšmė yra pasirenkama lygi 0 ($E_{i,0} = 0$) ir, sprendžiant tiesioginį uždavinį, apskaičiuojamas kreivis $\kappa_{calc,i}$. Jeigu skirtumas tarp apskaičiuoto ir eksperimentinio kreivio $\kappa_{obs,i}$ viršija nustatytą paklaidą Δ , skaičiavimai kartojami taikant kompleksinį Niutono ir Rafsono bei bisekcijos metodą (Gribniak 2009) tol, kol paklaida neviršija nustatytos reikšmės. Kiekvienoje iteracijoje apskaičiuojamas kirstinis deformacijų modulis $E_{i,k}$. Kai randamas sprendinys, gautoji $E_{i,k}$ reikšmė fiksuojama ir taikoma kitiems apkrovimo etapams. Pasiekus maksi-

malią momento reikšmę, skaičiavimai baigiami. Tokiu būdu randami visi tempiamojo lengvojo betono suminių vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos taškai. Skaičiavimo metodika detaliau aprašyta Gribniak (2009) darbe.

Tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramos taikymas

Taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą eksperimentinėms armuotoms lengvojo betono sijoms, gautos supleišėjusio tempiamosios zonos betono įtempių ir deformacijų diagramos (4 pav. „Exp“ grafikai). Pateiktose diagramose kylančioji dalis atitinka nesupleišėjusio betono elgseną, o krentančioji dalis atspindi supleišėjusios zonos betono ir armatūros bendrą sąveiką. Supleišėjusio betono įtaka elemento deformacijoms yra tuo didesnė, kuo mažesnis armavimo procentas. Tai apibūdina diagramos krentančiosios dalies ilgis.

Iš eksperimentinių momentų ir kreivių diagramų buvo gautos S6 ir S8 sijų grupės tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramos (įvertinus susitraukimo ir valkšnumo poveikį pagal V. Gribniak pasiūlytą algoritmą (2009)).

Taip pat, taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą, gautos tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramos palyginamos su A. Sokolov (2010) ir G. Kaklauskas (2001) modeliais, skirtais įprastam betonui (žr. 4 pav.).

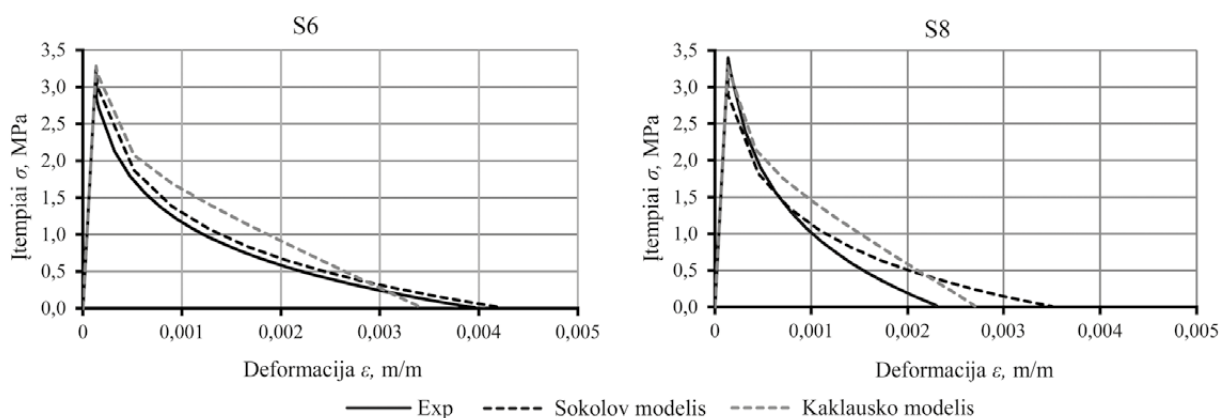
Iš diagramų matyti, kad A. Sokolov pasiūlytas modelis gerai apibūdina S6 sijų grupės tempiamojo betono elgseną, tačiau S8 sijos matomas didelis neatitikimas, kuris auga didėjant deformacijoms (nesutapimas iki 40 %). Sunku spręsti, ar šį pasiūlytą modelį galima taikyti lengvajam betonui, nes eksperimentiškai gautų ir apskaičiuotų taikant at-

virškštinio uždavinio algoritmą tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramų rezultatų imtis per mažą. Norint įsitikinti, ar įprastam betonui pasiūlytas modelis tinka ir lengvajam betonui, būtina atlikti išsamesnius tyrimus su didesnių matmenų elementais.

Lygindami įtempių ir deformacijų diagramas, gautas iš eksperimentinių bandymų, su Kaklauskas (2001) pasiūlytu modeliu, pastebime, kad S6 ir S8 sijų sutapimas panašus. Taip pat pastebime, kad šis modelis aproksimuotas tiesėmis, o ne logaritmine funkcija, kaip Sokolov (2010) modelis, ar diagrama, gauta apdorojant eksperimentinių tyrimų rezultatus.

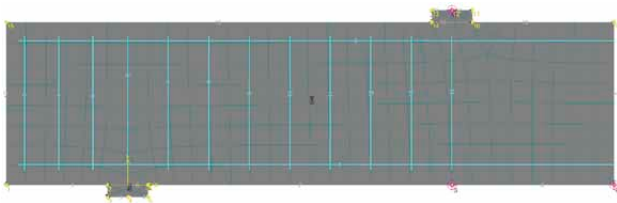
Tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramos taikymas baigtinių elementų analizėje programa ATENA

Gautos tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramos kaip supleišėjusio betono (krintančioji diagramos dalis) medžiagos modelis pritaikytas kompiuterinėje baigtinių elementų programoje ATENA. Taikant medžiagų modelį, teoriškai apskaičiuojama lenkimo momentų ir kreivių priklausomybė bei palyginama su eksperimento metu gautomis momentų ir kreivių diagramomis. Diagramos lyginamos eliminavus susitraukimo ir valkšnumo poveikį (susitraukimas išmatuotas $1,993 \cdot 10^{-4}$, valkšnumo koeficientas $\phi = 1,542$ apskaičiuotas pagal LST EN 1992-1-1: 2007). Baigtinių elementų modelis pateikiamas 5 pav. Kadangi visos sijos simetriškos, buvo modeliuojama tik pusė sijos dvimatėje aplinkoje, pasirenkant viduryje atramą, kuri leidžia pasislinkti y kryptimi (žemyn), o poslinkiai x kryptimi (išilgai sijos) suvaržomi. Atramos ir apkrovos poveikis perduodamas per baigtiniais elementais sumodeliuotą metalinę plokštelę.



4 pav. Tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų palyginimas su Sokolov (2010) ir Kaklauskas (2001) pasiūlytais modeliais įprastam betonui

Fig 4. Lightweight concrete tensile stress-strain diagram comparison with Sokolov (2010) and Kaklauskas (2001) proposed models for normal concrete



5 pav. Sijos baigtinių elementų modelis
Fig 5. The finite element model of the beam

Būtina pažymėti, kad atliekant skaičiavimus kompiuterine baigtinių elementų programa, buvo nustatytas 200×100 mm skerspjūvio sijų elemento charakteringasis dydis (angl. *characteristic size*), kuris turi būti įvedamas programoje nurodant tempiamojo betono savybes. Rekomenduojamas atskaitinis jo dydis yra 0,04 m, o esant baigtinių elementų dydžiui 0,025 m, skaičiavimuose charakteringasis dydis pasirenkamas 0,0447 m.

S6 grupės eksperimentinės momentų kreivių diagramos, apskaičiuotos apdorojant skaitmenine vaizdo kamera išmatuotų deformacijų rezultatus, pateiktos 6 pav. Šie grafikai palyginti su teoriškai apskaičiuotais baigtinių elementų programa ATENA. Iš grafikų matome, kad S6-1 ir S6-2 eksperimentinių sijų momentų ir kreivių diagramos nevysiškai sutampa tarpusavyje. Etape, kai betonas dar nesupleišėjęs, diagramos sutampa gerai, tačiau, atsivėrus pirmiems plyšiams, matomas diagramų atsiskyrimas viena nuo kitos. Taip galėjo nutikti dėl tempiamosios armatūros padėties elemente skirtumo (apsauginis sluoksnis skiriasi 3 mm). Lygindami teoriškai apskaičiuotus momentus ir kreivius su eksperimentiniais, pastebime, kad nesupleišėjęs betonui diagramos sutampa idealiai, tačiau, artėjant prie sijos pleišėjimo momento reikšmės, teoriškai apskaičiuota diagrama šiek tiek išskyla virš eksperimentinių diagramų. Taip galėjo nutikti dėl to, jog gautus tempiamojo

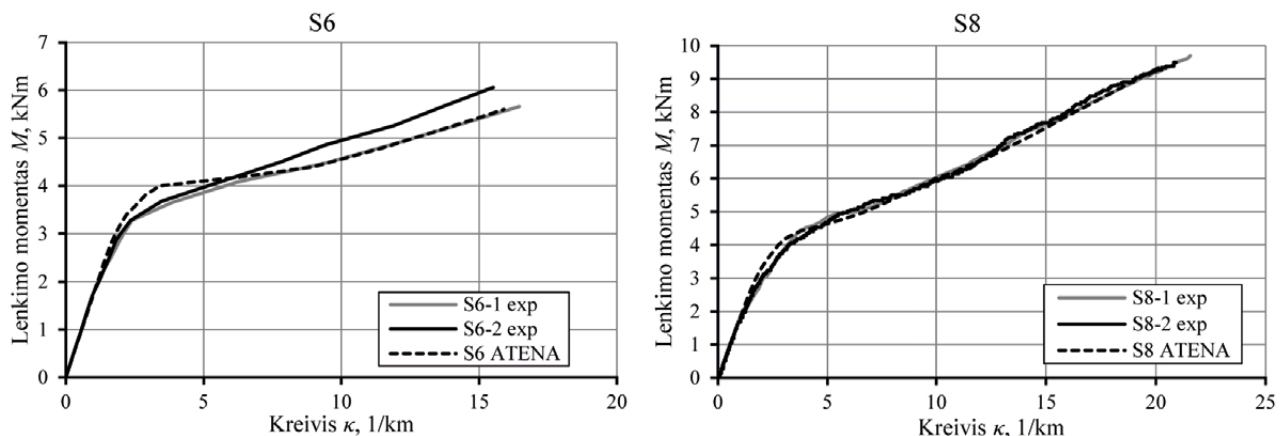
lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramos taškus apksimavome logaritmine funkcija, o tai skaičiavimuose traktuojama kaip paklaida. Didėjant lenkimo momentui ($M \approx 4,3$ kNm), teoriškai apskaičiuota diagrama sutampa su S6-1 sijos eksperimentiniais bandymais gauta diagrama.

S8 grupės eksperimentinės momentų kreivių diagramos, apskaičiuotos įvertinant susitraukimo ir valkšnumo poveikį apdorojant LVDT prietaisų, matuojančių deformacijas, rezultatus, pateiktos 6 pav. Jos palygintos su teoriškai apskaičiuota kompiuterine baigtinių elementų programa ATENA, įvedus tempiamojo betono medžiagos modelį, gautą taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą. Tiek eksperimentinės, tiek teorinės diagramos sutapimas geras. Šiek tiek išsiskiria ruožas, kai artėjama prie pleišėjimo momento reikšmės (kaip ir S6 grupės atveju). Šiame etape eksperimentinė diagrama rodo, kad elementas yra šiek tiek standesnis, negu rodo eksperimentiniai rezultatai. Tolesnis sutapimas išlieka geras.

Palyginę diagramas, matome, kad gautas gana geras eksperimentinių ir teorinių rezultatų, apskaičiuotų baigtinių elementu programa ATENA, sutapimas, o tai byloja apie gautų supleišėjusios tempiamosios zonos betono diagramų atitiktį.

Rezultatų apibendrinimas

Sukurtas kokybiškai naujas lengvojo betono mišinys, kurio tankis po 28 kietėjimo parų siekė ~ 1900 kg/m³. Šis mišinys yra ~ 20 % lengvesnis už įprasto svorio betoną (2350 – 2400 kg/m³). Sukurto lengvojo betono gniuždomasis stipris nenusileidžia įprasto svorio betono stipriui. Vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris siekė 46,4 MPa (po 28 kietėjimo parų).



6 pav. S6 ir S8 eksperimentinių sijų momentų ir kreivių palyginimas su teoriškai apskaičiuotais kompiuterine programa ATENA
Fig 6. Experimental moment-curvature comparison of S6 and S8 beams with theoretically calculated by computer program ATENA

Pasiūlytas mišinys panaudotas armuotojo lengvojo betono sijų gamybai. Šioms sijoms sudarytos lenkimo momentų ir kreivių diagramos. Gautos diagramos palygintos su teoriškai apskaičiuotomis taikant Lietuvoje galiojančių projektavimo normų metodikas (LST EN 1992-1-1:2007; STR 2.05.05:2005). Sugretinus armuotojo lengvojo betono sijų eksperimentinių ir teorinių tyrimų rezultatus esant lenkimo momento reikšmei $M = 0,6M_{Rm}$ (S6 grupės sijoms, esant $M = 0,8M_{Rm}$) nustatyta, kad tradiciniai projektavimo normų metodai ne visais atvejais adekvačiai atspindi nagrinėjamų sijų elgseną. Lietuvoje galiojančių projektavimo normų LST EN ir STR metodais apskaičiuotos kreivių reikšmės kai kuriais atvejais nuo eksperimentinių rezultatų skiriasi iki 38 %. Paklaidos didėja mažėjant armavimo procentui.

Taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą (Kaklauskas 2004; Gribniak 2009), gautos tempiamojo armuotojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės, kurios buvo įvedamos į baigtinių elementų programą ATENA kaip medžiagų modeliai. Atlikus skaičiavimus, gautos teoriškai apskaičiuotos momentų ir kreivių priklausomybės, kurios palygintos su eksperimentų metu gautomis momentų ir kreivių priklausomybėmis. Gautas geras rezultatų sutapimas, o tai reiškia, kad atvirkštinio uždavinio algoritmu buvo gautas geras tempiamosios supleišėjusios medžiagos modelis.

Padėka

Šis darbas atliktas vykdant Europos socialinio fondo projektą „Transporto statinių, transporto priemonių ir jų srautų inovatyvių tyrimo metodų ir sprendimų kūrimas bei taikymas“, projekto kodas VP1-3.1-ŠMM-08-K-01-020.

Literatūra

- Gribniak, V. 2009. *Shrinkage influence on tension-stiffening of concrete structures*: Doctoral dissertation. Vilnius: Technika. 191 p.
- Kaklauskas, G. 2001. *Integral flexural constitutive model for deformational analysis of concrete structures*. Vilnius: Technika. 140 p.
- Kaklauskas, G. 2004. Flexural layered deformational model of reinforced concrete members, *Magazine of Concrete Research* 56(10): 575–584. <http://dx.doi.org/10.1680/macr.2004.56.10.575>
- Lim, H. S.; Wee, T. H.; Mansur, M. A.; Kong, K. H. 2006. Flexural behavior of reinforced lightweight aggregate concrete beams, in *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference (APSEC 2006)*, 5–6 September 2006, Kuala Lumpur, Malaysia, A68–A82.
- LST EN 12390-3:2009. *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2009. 18 p.

- LST EN 12390-7:2009. *Sukietėjusio betono bandymai. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2009. 10 p.
- LST EN 1992-1-1:2007. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius, 2007. 232 p.
- Shafigh, P.; Hassanpour, M. M.; Razavi, S. V.; Kobraei, M. 2011. An investigation of the flexural behaviour of reinforced lightweight concrete beams, *International Journal or the Physical Sciences* 6(10): 2414–2421.
- Sokolov, A. 2010. *Tension stiffening model for reinforced concrete beams*: Doctoral dissertation. Vilnius: Technika. 91 p.
- STR 2.05.05:2005. *Statybos techninis reglamentas. Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. Vilnius, 2005. 123 p.
- Ulbinas, D. 2012. *Plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų pleišėtumo ir standumo analizė*: Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 98 p.
- Wang, J.-Y.; Chia, K.-S.; Liew, J.-Y. R; Zhang, M.-H. 2013. Flexural performance of fiber-reinforced ultra lightweight cement composites with low fiber content, *Cement and Concrete Composites* 43(2013): 39–47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.006>

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH ON REINFORCED LIGHTWEIGHT CONCRETE FLEXURAL ELEMENTS

D. Rumšys, D. Bačinskas, E. Spudulis, E. Gudonis, A. Sokolov

Abstract

The paper deals with analysis of structural lightweight concrete. New lightweight concrete mixture made with expanded clay aggregate has been proposed and applied for experimental reinforced concrete beams. Totally 8 beams with different reinforcement ratios (0.309%, 0.557%, 0.895% and 1.255%) were tested under short-term four point bending loading. Stress-strain behavior of the beams under considerations has been investigated. Average strains at 4 different levels of pure bending zone and vertical displacements at 12 different points of the beam were measured. During the test, deformations and crack-ing of the pure bending zone were additionally observed using high-speed digital video cameras. The data obtained by cameras were analyzed using *digital image correlation technique*. Applying the test data bending moments and curvature diagrams were derived for each beam. The obtained relationships were compared with theoretical results calculated using design code methods LST EN and STR. Using the inverse algorithm developed by VGTU, tension reinforced lightweight concrete stress and strain diagrams were obtained, which were adapted to numerical modeling by software ATENA. Moment and curvature diagrams obtained by finite elements program were compared with experimental moment and curvature diagrams. Good agreement between both diagrams has been obtained.

Keywords: lightweight concrete, reinforced concrete beams, numerical analysis, stress and strain, curvature, experimental research.