



LENGVOJO BETONO, PAGAMINTO NAUDOJANT STIKLO GRANULIŲ UŽPILDĄ, MECHANINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

Deividas RUMŠYS¹, Darius BAČINSKAS², Edmundas SPUDULIS³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lithuania

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

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamos lengvojo betono mišinių, kurių gamybai panaudotos pūsto stiklo granulės, mechaninių savybių eksperimentiniai tyrimai. Iš viso suformuota 12 skirtingų mišinių nuo įprasto svorio iki ypač lengvo konstrukcinio betono, pakopomis tūriškai smėlį keičiant lengvomis stiklo granulėmis. Gauti bandiniai išbandyti po 7 ir 28 parų kietėjimo lenkiamajam ir gniuždomajam stipriui nustatyti. Betono tankis svyravo nuo 1458 iki 2347 kg/m³, o gniuždomasis 40×40×40 mm kubelių stipris – nuo 40 iki 103 MPa. Gautas lengvojo betono stiprio ir tankio priklausomybės grafikas, analizuotas lengvųjų dalelių pasiskirstymas bandinyje, atlikti kraštutinių bandinių atsparumo šalčiui ir šarminėi korozijai tyrimai.

Reikšminiai žodžiai: lengvasis betonas, lengvasis užpildas, stiklo granulės, mechaninės savybės, gniuždomasis stipris, lenkiamasis stipris, atsparumas šalčiui, šarminė korozija.

Įvadas

Armuotasis betonas per beveik 150 metų vystymosi laikotarpį tapo pasaulyje plačiausiai naudojama konstrukcinė medžiaga. Platų įprastojo gelžbetonio konstrukcijų naudojimo mastą transporto tinklų infrastruktūroje lėmė mažos eksploatacinės išlaidos, prieinamumas, palyginti ilga eksploataavimo trukmė ir nedidelė kaina. Tačiau vienas iš pagrindinių gelžbetoninių konstrukcijų trūkumų – didelis savasis svoris, dėl kurio išauga statinio nuolatinė apkrova, o tai padidina ir reikalingos armatūros kiekį. Dėl didelio konstrukcijų svorio išauga gaminių transportavimo išlaidos ir pačių gaminių matmenys. Vystantis statybos pramonei, konstrukcijos ir jų sprendiniai, o kartu ir jų praktinė realizacija tapo vis sudėtingesnė. Ši tendencija visame pasaulyje paskatino inovatyvių armuotojo betono konstrukcinių sprendinių paiešką. Viena iš krypčių, kuria gali būti tobulinamos gelžbetoninės konstrukcijos, yra armuotojo konstrukcinio lengvojo betono naudojimas. Lengvojo betono kaina, fizinės ir mechaninės savybės yra labai panašios į įprasto svorio betono, o tūrinis svoris gali būti net iki 45 % mažesnis. Šio betono mišiniui pagaminti greta sunkiojo užpildo (smėlio, žvyro, skaldos) naudojami lengvieji užpildai, nuo kurių individualių savybių bei kiekio mišinyje priklauso ir pačio lengvojo betono fizinės ir mechaninės savybės. Todėl, kuriant lengvojo betono mišinį, labai svarbu pasirinkti tinkamą lengvąjį

užpildą. Pagal žaliavos šaltinį lengvieji užpildai gali būti suskirstyti į keturias grupes:

- 1) natūralieji užpildai (pemza ir vulkaninės kilmės šlako nuolaužos);
- 2) natūralios medžiagos (perlitas, vermikulitas, molis, metamorfinės kilmės skalūnas, nuosėdinės kilmės skalūnas ir t. t.);
- 3) pramoniniai produktai arba šalutiniai produktai (stiklas, plastikai arba pelenai);
- 4) pramoniniai šalutiniai produktai (sutrinti kuro pelenai, uolienų šlakas arba metalo šlakas).

Kadangi natūralūs užpildai randami tik kai kuriose pasaulio vietose, jie nėra plačiai naudojami lengvojo betono gamybai. Tačiau, juos panaudojus, galima pagaminti gerą, vidutinio stiprumo betoną (Mehta, Monteiro 2006). Šiuolaikinių statinių konstrukcijoms (pvz., tiltams, daugiaaukščiams pastatams ir kt.) vidutinio stiprumo betono nepakanka, todėl naudojami dirbtiniai lengvieji užpildai (keramzitas, išplėstas skalūnas, aukštakrosnių šlakas ir pan.), su kuriais galima pagaminti ne mažesnio kaip 17 MPa gniuždomojo stiprio (Mehta, Monteiro 2006) ir ne didesnio kaip 2000 kg/m³ tankio (LST EN 1992-1-1:2007) konstrukcinį lengvąjį betoną. Pastaraisiais metais daug dėmesio skiriama užpildams, pagamintiems iš perdirtų atliekų, plėtojant beatliekės gamybos koncepciją (angl. *zero waste*). Vienas iš tokių užpildų – stiklo granulės, kurios

gaunamos pagal specialią technologiją, aukštoje temperatūroje išpučiant stiklo duženas ir suformuojant porėtos struktūros užpildą. Šio užpildo naudojimą betonams, mechanines savybes ir ilgaamžiškumą tyrė Yu, Q. L. *et al.* (2013), Spiesz *et al.* (2013), Yu, R. *et al.* (2016). Tyrimais nustatyta, kad naudojant šį užpildą galima gauti ypač lengvą, gerų termoizoliacinių ir stiprumo savybių betoną. Vis dėlto tiek Lietuvoje, tiek pasaulyje tyrimų atlikta nepakankamai. Straipsnyje atliktas betono mišinių su mažos frakcijos (0/5mm) stiklo granulių užpildais mechaninių savybių ir ilgaamžiškumo eksperimentiniai tyrimai. Gautas lengvojo betono stiprio ir tankio priklausomybės grafikas, analizuotas lengvųjų dalelių pasiskirstymas bandinyje, atlikti bandinių atsparumo šalčiui ir šarminiai korozijai tyrimai.

Medžiagos

Eksperimentiniai tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos fakulteto Termoizoliacijos institute (dabar Statybinių medžiagų institute). Toliau pateikiama detali informacija apie tyrimuose panaudotas medžiagas.

Cementas: naudotas UAB „Akmenės cemento“ įmonės tiekiamas cementas, kurio klasė CEM I 52.5 R. Pagrindinės savybės: 7 ir 28 dienų gniuždomasis stipris, atitinkamai 48,7 MPa ir 61,0 MPa, smulkumas (pagal Bleino bandymą) – 490 m²/kg, tankis – 3,135 g/cm³.

Smulkusis užpildas: naudotas plautas 0/4 mm frakcijos smėlis iš Gariūnų karjero, kurio tankis yra 2,621 g/cm³, piltinis tankis – 1,624 g/cm³.

Mikroužpildas: maltas kvarcinis smėlis iš Anykščių karjero, kurio didžiausių dalelių dydis mažesnis nei 100 μm ir įmonės „RW silicium GmbH“ silicio dulkės, kurių prekinis pavadinimas „RW-Füller“.

Superplastiklis: siekiant gauti mažesnę vandens ir kietųjų dalelių santykį, buvo naudojami du superplastikliai – miltelinis superplastiklis „Castament FS-40“, kurio pagrindą sudaro polikarboksilato esteris ir skystas plastiklis

„MC PoweFlow 1124“, kurio pagrindą sudaro polietilenglikolis.

Lengvasis užpildas: tyrimuose naudotos 0,5–1 mm frakcijos stiklo granulės, kurias gamina UAB „Stikloporas“. Šios granulės – tai lengvasis užpildas, gaminamas iš pramoninių atliekų – stiklo duženų. Duženos sumalamos iki reikiamos granulometrijos ir, naudojant specialią technologiją, aukštoje temperatūroje išpučiamos. Pagrindinės stiklo granulių savybės: atsparumas trūpinimui – 2,38 MPa (LST EN 13055-1:2003), vandens įmirkis po 28 val. – 25,0 % (LST EN 1097-6:2013), piltinis tankis – 0,291 g/cm³,

Sudedamųjų dalelių granulometrija pateikta 1 pav. Gariūnų smėlio granulometrijai nustatyti buvo naudojamas vibracinis sietas „Haver EML 200 digital T“, o cementui ir mikroužpildams nustatyti – dalelių analizavimo mašina „Cilas 1090“.

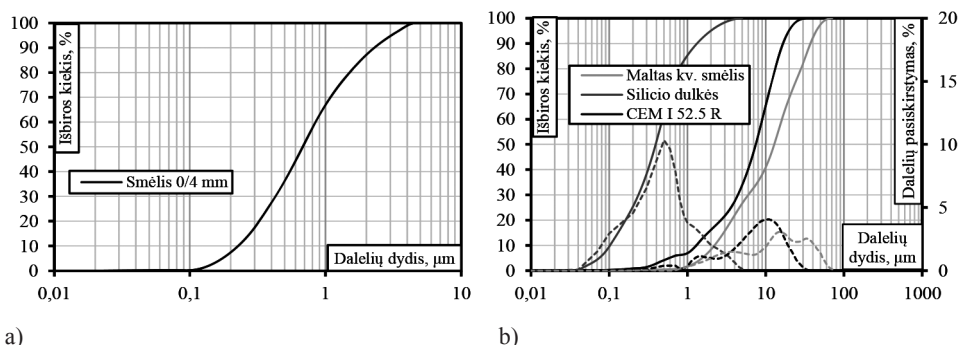
Mišinio sudėty

Lengvųjų betonų sudėty su stiklo granulių užpildu pateiktos 1 lentelėje (kodai DS1–DS12). Visi mišiniai išlaikė vienodas cementinio skiedinio proporcijas, tačiau skyrėsi mikroužpildais – vieniems mišiniams naudotas maltas kvarcinis smėlis, kitiems – silicio dulkės. DS1 ir DS2 mišiniuose nenaudotas stiklo granulių užpildas, o mišiniuose DS11 ir DS12 visas smėlis tūriškai pakeistas stiklo granulėmis.

Eksperimentinė programa

Maišymo metodika ir kietėjimo sąlygos

Visos mišinio sudėty buvo maišomos pagal standarte LST EN 196-1:2016 pateiktą metodiką mechanizuota maišykle „Matest“. Pradiniame etape pasveriamos visos reikiamos medžiagos. Tuomet į maišymo indą supilamos visos kietosios medžiagos ir miltelių pavidalo superplastiklis. Supylus medžiagas įjungiami maišyklė mažuoju greičiu (2 lentelė) ir pradedamos skaičiuoti maišymo stadijų trukmės. Pamašius



1 pav. Naudotų medžiagų granulometrija: a) gauta naudojant vibracinį sietą „Have EML 200 digital T“; b) gauta naudojant dalelių analizavimo mašiną „Cilas 1090“

Fig. 1. Granulometry of used materials obtained using a vibrating sieve „Have EML 200 digital T“ (a) and the particle analysis machine „Cilas 1090“ (b)

1 lentelė. Betono mišinių sudėtys

Table 1. Mix proportions

Eil. Nr.	Kodas	Sudėtis, kg/m ³					(Plast/CEM) ·100 %	V/C
		cementas CEM I 52.5R	silicio dulkės SiO ₂	malta kvarcinis smėlis	smėlis 0/4 mm	stiklo granulės 0,5–1,0 mm		
1	DS1	845	–	95	1410	–	0,5+3,0	0,25
2	DS2		95	–				
3	DS3		–	95	1290	23		
4	DS4		95	–				
5	DS5		–	95	1175	45		
6	DS6		95	–				
7	DS7		–	95	940	90		
8	DS8		95	–				
9	DS9		–	95	470	180		
10	DS10		95	–				
11	DS11		–	95	–	270		
12	DS12		95	–				

30 s, per kitas 30 s tolygiai supilamas vanduo su superplastikliu (skystas). Supylus vandenį su superplastikliu maišyklė nustatoma didžiuoju greičiu (2 lentelė) ir toliau maišoma 30 s. Po 90 s maišymo maišyklė sustabdoma ir per kitas 30 s grandikliu nuo maišyklės indo sienelių ir dugno nugramdoma prilipusi mišinio tešla ir sukrečiama į indo vidurį. Paskui mišinys maišomas dar 60 s didžiuoju greičiu. Sumaišytas mišinys klojamas į standartinės 40×40×160 mm prizmių formas, jo netankinant, apdengiamas plėvele ir paliekamas kietėti vieną parą. Po paros bandiniai išformuoti, stebėtas sukietėjusio bandinio išsiskuoksniamas. Paskui bandiniai buvo sudėti į polietileno maišelius ir iki bandymo dienos kietinti kameroje, palaikančioje pastovią 20±1,0 °C temperatūrą.

2 lentelė. Maišyklės maišymo greičiai

Table 2. Mixing speeds of the mixer

Greitis	Sukimo dažnis, min ⁻¹	Planetarinio judėjimo dažnis, min ⁻¹
Mažasis greitis	140±5	62±5
Didysis greitis	285±10	125±5

Mechaninės ir fizikinės savybės

Praėjus 7 ir 28 paroms po užbetonavimo, prizmės buvo ištrauktos iš kameros, išmatuoti jų matmenys ir nustatytas svoris. Lenkiamasis stipris nustatytas veikiant bandinį (prizmę) viena koncentruota jėga, o po lenkimo bandymo papildomai apdorotos prizmių puselės, išbandytos gniuždymo apkrova. Lenkiamasis ir gniuždomasis stipris gautas bandant bandinius „Tinius Olsen H200KU“ presu. Lenkiamajam stipriui nustatyti imtas 50 N/s apkrovimo greitis, o gniuždomojo stiprio bandymuose – 2400 N/s greitis. Gautas dviejų bandinių lenkiamojo stiprio reikšmių

vidurkis pateiktas 3 lentelėje ir 2 pav., a. Keturių bandinių gniuždomojo stiprio vidurkiai pateikti 3 lentelėje ir 2 pav., b.

Bandinių tankiai (nedžiovinti) nustatyti, gautą svorį padalijant iš tūrio, apskaičiuoto pagal išmatuotus bandinių matmenis, ir pateikti kaip dviejų bandinių vidurkiai 3 lentelėje ir 2 pav., c.

Šalčio atsparumo ir šarminės korozijos tyrimai

Bandymai atlikti lyginant dviejų skirtingų mišinių bandinius: įprastojo betono su smėlio užpildu (DS1 ir DS2) bei lengvojo betono smėlį visiškai pakeičiant stiklo poromis (DS11 ir DS12). Betono atsparumas šalčiui nustatytas vadovaujantis LST L 1428-17:2016 standarto reikalavimais. Betono bandinių šarminės korozijos tyrimai atlikti pagal Sims, Nixon (2003) rekomendacijas. Betono bandiniai (prizmės – 40×40×160 mm) formuoti specialiose formose, bandinių galuose įtvirtinus atsparius šarmų poveikiui metalinius reperius. Po paros išformavus bandinius, išmatuoti pradiniai atstumai tarp reperių. Matavimai atlikti su ilgio komparatoriumi, kurio matavimo tikslumas – 1 μm. Išmatavus atstumus, bandiniai įdėti į vonią, pripildytą 1 M natrio hidroksido (NaOH) tirpalo ir palaikančią 80±2 °C temperatūrą. Po vienos paros išmatuota, kiek bandiniai išsiplėtė, t. y. atstumas tarp reperių. Bandiniai vėl sudedami į vonią ir laikomi anksčiau minėtomis sąlygomis. Bandymas tęsiasi 28 paras. Matavimai atliekami periodiškai po 2, 5, 7, 14, 21 ir 28 parų.

Rezultatai ir diskusija

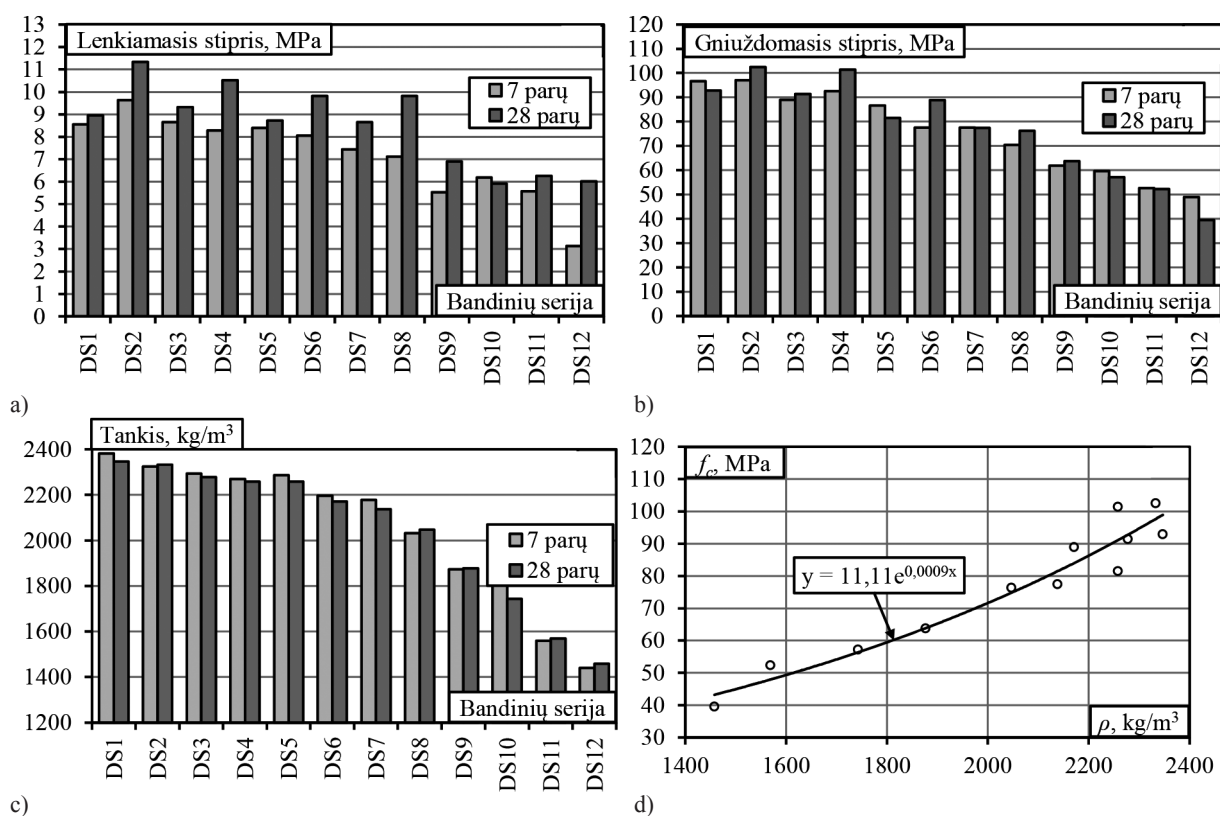
Lenkimo ir gniuždymo bandymų rezultatai pateikti 3 lentelėje ir 2 pav. Iš duomenų matyti, kad betono mišinių

lenkiamasis stipris po 28 kietėjimo parų svyravo nuo 5,91 iki 11,33 MPa. Gniuždomasis stipris svyravo nuo 39,5 iki 102,5 MPa, o tankis – nuo 1458 iki 2347 kg/m³. Iš pateiktų grafikų galime matyti, kaip lenkiamasis ir gniuždomasis stipriai kito po 7 ir 28 parų kietėjimo. Būtina atkreipti dėmesį, kad daugumos bandinių (pvz., DS3, DS7, DS11) gniuždomasis stipris po 7 parų ir 28 parų buvo beveik vienodas, o kai kuriais atvejais netgi didesnis (pvz., DS5, DS10,

DS12). Tai reiškia, kad betonas su stiklo granuliu užpildu labai greitai pasiekia savo projektinį stiprį. Tokį patį efektą savo tyrimuose pastebėjo ir Yu, Q. L. *et al.* (2013). Stiprio sumažėjimą galima paaiškinti didesnėmis betono susitraukimo deformacijos iki apkrovimo (lyginant su įprastojo betono bandiniais). Dėl didelių susitraukimo deformacijų kai kuriuose bandiniuose galimai atsirado vidiniai mirkoplyšiai, dėl kurių ir sumažėjo gniuždomojo stiprio reikšmės.

3 lentelė. Eksperimentinių bandinių lenkiamasis ir gniuždomasis stipriai
Table 3. Flexural and compressive strength of experimental specimens

Eil. Nr.	Kodas	Lenkiamasis stipris, MPa		Gniuždomasis stipris, MPa		Tankis, kg/m ³	
		7 parų	28 parų	7 parų	28 parų	7 parų	28 parų
1	DS1	8,56	8,95	96,7	92,81	2382	2347
2	DS2	9,63	11,33	97,1	102,5	2325	2333
3	DS3	8,65	9,33	89,0	91,4	2294	2278
4	DS4	8,28	10,52	92,5	101,4	2269	2258
5	DS5	8,40	8,73	86,7	81,5	2287	2258
6	DS6	8,05	9,82	77,6	88,9	2196	2171
7	DS7	7,44	8,65	77,6	77,4	2178	2138
8	DS8	7,12	9,82	70,4	76,3	2032	2047
9	DS9	5,53	6,90	61,9	63,7	1873	1877
10	DS10	6,19	5,91	59,6	57,2	1824	1743
11	DS11	5,58	6,26	52,7	52,3	1560	1569
12	DS12	3,14	6,02	49,0	39,5	1440	1458



2 pav. Eksperimentinių bandinių lenkiamasis stipris (a); gniuždomasis stipris (b); tankis (c); tankio ir gniuždomojo stiprio po 28 parų priklausomybė (d)

Fig. 2. Flexural strength (a); compressive strength (b); density (c); relationship of density and compressive strength after 28 days (d) of experimental specimens

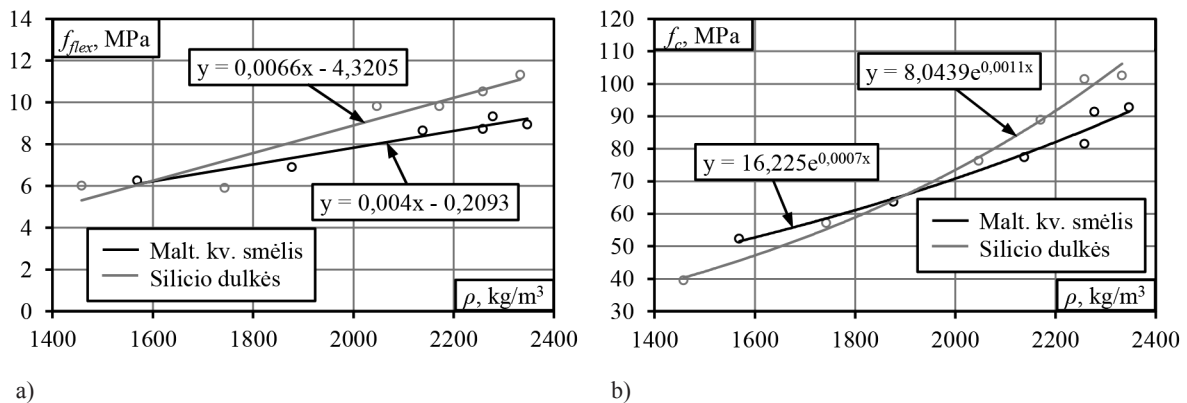
2 pav., d, pavaizduota gauta tankio ir gniuždomojo stiprio priklausomybė pagal eksponentinę kreivę.

Kaip ir minėta, bandiniai buvo suskaidyti į dvi grupes pagal mikroužpildą: vieni su maltu kvarciniu smėliu (nelyginiai bandinių kodai: DS1, DS3, DS5, DS7, DS9 ir DS11), kiti su silicio dulkėmis (lyginiai bandinių kodai: DS2, DS4, DS6, DS8, DS10, DS12). Jų lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio palyginimas pateiktas 3 pav. Lygindami 3 pav., a, pateiktą lenkiamojo stiprio ir tankio priklausomybę, pastebime, kad beveik visais atvejais gautas didesnis lenkiamasis stipris naudojant silicio dulkių mikroužpildą. Tačiau, tankiui mažėjant, lenkiamojo stiprio skirtumas taip pat mažėja. Lygindami gniuždomojo stiprio ir tankio priklausomybes su skirtingais užpildais pastebime šiek tiek kitokią tendenciją: betono su silicio dulkėmis gniuždomasis stipris didesnis esant didesniam tankiui, tačiau, pasiekus 1900 kg/m³ tankį, betonas su malto kvarcinio smėlio mikroužpildu turi didesnes gniuždomojo stiprio reikšmes. Galima daryti išvadą,

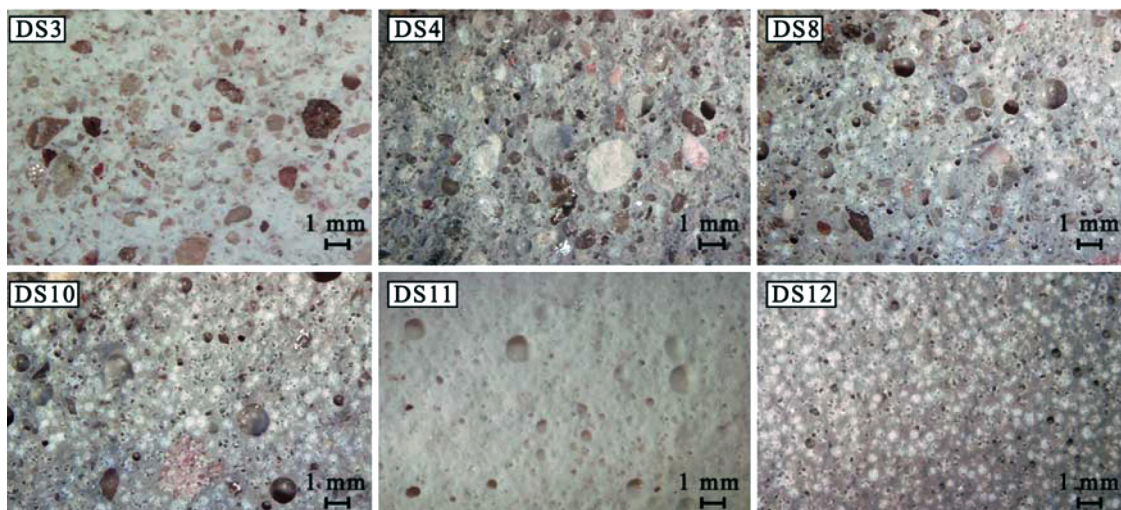
kad betono su silicio dulkėmis aproksimuojančios kreivės kampas didesnis, o tai reiškia, kad, mažėjant betono tankiui, gniuždomojo stiprio reikšmės mažėja greičiau nei betono su malto kvarcinio smėlio užpildu.

Po gniuždymo bandymo bandiniai nufotografuoti ir pateikti 4 paveiksle. Iš nuotraukų matyti, kaip lengvasis užpildas pasiskirsto bandinyje ir kaip kinta betono struktūrą smėlį pakeičiant stiklo poromis. Taip pat po gniuždymo bandinių dalelės buvo nufotografuotos elektroniniu mikroskopu JEOL ISM 7600F, siekiant stebėti užpildo ir matricos mišinio sąlyčio zoną (5 pav.). Iš šių nuotraukų matyti, kad stiklo granulės (porėtos struktūros dalelės) pasiskirsto tolygiai, o matricos mišinio ir lengvojo užpildo sąlyčio zona yra tanki, kuri užtikina lengvojo užpildo ir matricos mišinio bendrą darbą.

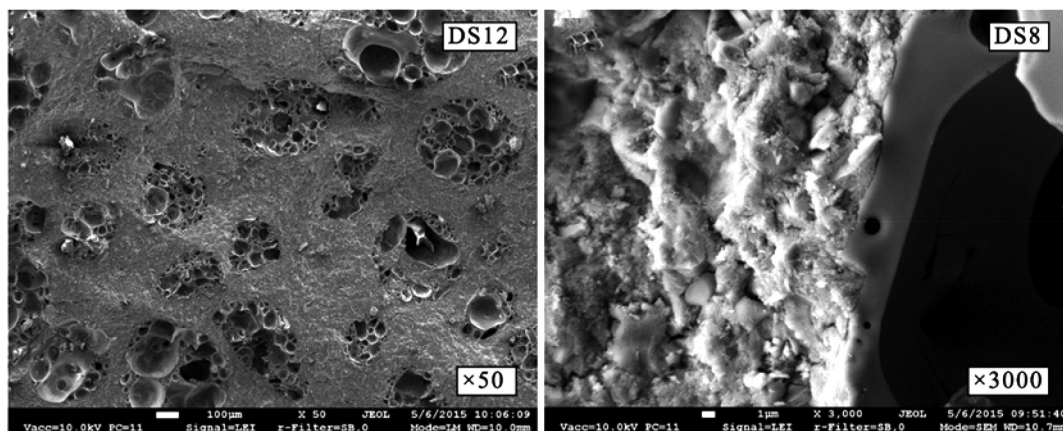
Duomenys po atsparumo šalčiui bandymo pateikti 4 lentelėje. Atlikus betono atsparumo šalčiui bandymą nustatyta, kad visi bandiniai atsparumo šalčiui bandymą



3 pav. Lenkiamojo stiprio ir tankio priklausomybė (a); gniuždomojo stiprio ir tankio priklausomybė (b)
Fig. 3. Relationship of flexural strength and density (a); Relationship of compressive strength and density (b)



4 pav. Lengvojo užpildo pasiskirstymas bandinyje
Fig. 4. Distribution of lightweight aggregate particles in specimen



a)

b)

5 pav. Elektroniniu mikroskopu gauti vaizdai: a) 50 kartų priartintas DS12 bandinys; b) 3000 kartų priartintas DS8 bandinys

Fig. 5. Images obtained by an electronic microscope:

a) DS12 specimen 50 times magnified; b) DS8 specimen 3000 times magnified

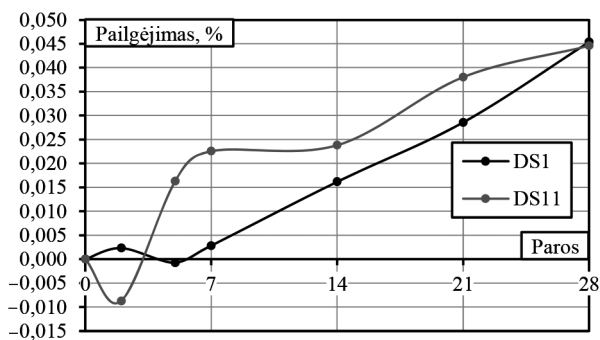
4 lentelė. Betono atsparumo šalčiui bandymų rezultatai

Table 4. Results of freeze-thaw resistance tests

Eil. Nr.	Kodas	Vidutinis gniuždomasis stipris, MPa			Gniuždomojo stiprio praradimas, %	
		prieš bandymą	po 50 ciklų	po 100 ciklų	po 50 ciklų	po 100 ciklų
1	DS1	107,95	115,75	125,14	+7,23	+15,93
2	DS2	136,00	139,16	142,06	+2,32	+4,45
3	DS11	30,06	35,56	32,70	+18,28	+8,77
4	DS12	34,04	34,47	36,74	+1,25	+7,92

išlaikė. Gniuždomasis stipris ne tik nesumažėjo, bet padidėjo. Vidutinis stiprio prieaugis betonui be lengvojo užpildo po 50 ir 100 šaldymo ciklų atitinkamai yra 4,8 % ir 10,2 %, o su lengvuju užpildu atitinkamai 9,8 % ir 8,3 %. Iš šių rezultatų matyti, kad smėlio pakeitimas į lengvąjį stiklo granulių užpildą nepablogino šalčio atsparumo savybių. Tai galima paaiškinti tuo, kad lengvųjų užpildų struktūra yra porėta, todėl, esant šiam užpildui betoniniame elemente, įsigėręs vanduo užšalimo metu turi kur plėstis, todėl neardo betono struktūros ir neatsiranda vidinis mikropleišėjimas.

Šarminės korozijos bandymų rezultatai pavaizduoti 6 pav. Galutinai patvirtintų šarminės korozijos bandymų rezultatų vertinimo kriterijų kol kas nėra. Siūloma taikyti kriterijus, kurie nustatyti remiantis žinomų eksploatacinių savybių užpildų iš skirtingų pasaulio vietų bandymų rezultatais. Ribinės prizmių plėtros reikšmės yra 0,1–0,2 % (Nixon *et al.* 2000). Šarminės korozijos bandymo metu visi bandiniai neviršijo ribinės reikšmės, todėl galima teigti, jog bandiniai atsparūs šarminiai korozijai. Lyginant rezultatus tarpusavyje, matyti, kad bandinių serijos DS11 pailgėjimas po 7 parų gerokai didesnis už DS1 bandinių seriją. Tačiau, didėjant laikui, DS11 bandinių pailgėjimo reikšmės palaipsniui artėjo prie DS1 reikšmių ir galutinis santykinis pailgėjimas nebuvo didesnis.



6 pav. Bandinių procentinis pailgėjimas

Fig. 6. Percentage elongation of specimens

Išvados

Iš viso išbandyta 12 skirtingų mišinių, tūriškai keičiant mišiniuose esantį smėlį lengvuju stiklo granulių užpildu. Gautas platus lenkiamojo stiprio (nuo 5,91 iki 11,33 MPa), gniuždomojo stiprio (nuo 39,5 iki 102,5 MPa) ir tankio (nuo 1458 iki 2347 kg/m³) kitimo spektras. Gauta aproksimuojanti gniuždomojo stiprio ir tankio priklausomybė, kuri parodė, kad, mažėjant betono tankiui, mažėja ir betono gniuždomasis stipris. Šį mažėjimą geriausiai aprašė eksponentinė kreivė.

Mišiniams kurti naudoti du skirtingi mikroužpildai: maltas kvarcinis smėlis ir silicio dulkės. Lyginant bandinius pagal šias grupes, gautos gniuždomojo stiprio ir tankio priklausomybės. Šių priklausomybių palyginimas parodė, kad lengvajam betonui, kurio tankis didesnis nei 1900 kg/m³, didesnės gniuždomojo stiprio reikšmės gaunamos betonams su silicio dulkių mikroužpildu, o betonams, kurių tankis mažesnis nei 1900 kg/m³, – su malto kvarcinio smėlio užpildu.

Atlikus kraštutinių bandinių (DS1, DS2, DS11 ir DS12) šalčio atsparumo bandymus, nustatyta, kad po 100 šaldymo ciklų bandinių gniuždomasis stipris be lengvojo užpildo ir su lengvuju užpildu padidėjo, todėl bandiniai išlaikė 100 šaldymo ciklų bandymą. Bandinių be lengvojo užpildo gniuždomojo stiprio prieaugis siekė 10,2 %, o bandinių su lengvuju užpildu 8,3 %.

Atlikus šarminės korozijos bandymus, nustatyta, kad bandinių (DS1 ir DS11) santykinis pailgėjimas neviršijo rekomenduojamų reikšmių ir yra atsparūs šarminės korozijos poveikiui.

Atlikti tyrimai yra pirminiai. Ateityje dėmesys turi būti atkreiptas į cemento kiekio mažinimą mišinyje. Taip pat turėtų būti naudojamas didesnės frakcijos lengvasis užpildas ir stebimas savaiminis susitraukimas.

Padėka

Straipsnio autoriai reiškia didelę padėką Lietuvos mokslo tarybai už finansinę paramą vykdant mokslininkų grupių projektą (sutarties Nr. MIP-093/2015).

Literatūra

- Yu, Q. L.; Spiesz, P.; Brouwers, H. J. H. 2013. Development of cement-based lightweight composites – Part 1: mix design methodology and hardened properties, *Cement and Concrete Composites* 44: 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.030>
- Yu, R.; Van Onna, D.; Spiesz, P.; Yu, Q.; Brouwers, H. 2016. Development of ultra-lightweight fibre reinforced concrete applying expanded waste glass, *Journal of Cleaner Production* 112: 690–701. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.082>
- LST EN 1097-6:2013. *Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 6 dalis. Dalelių tankio ir įmirkio nustatymas*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2013. 49 p.
- LST EN 13055-1:2003. *Lengvieji užpildai. 1 dalis. Lengvieji betono, skiedinio ir injekcinio skiedinio užpildai*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2004. 36 p.

LST EN 196-1:2016. *Cemento bandymų metodai. 1 dalis. Stiprio nustatymas*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2016. 33 p.

LST EN 1992-1-1:2007. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2007. 232 p.

LST L 1428-17:2016. *Betonas. Bandymo metodai. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2016. 6 p.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. 2006. *Concrete: microstructure, properties, and materials (Vol. 3)*. New York: McGraw-Hill.

Nixon, P. J.; Sims, I.; Heijnen, W. M. M. 2000. RILEM TC 106-AAR: Alkali-aggregate reaction. Recommendations. A-TC 106-2: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates-The ultra-accelerated mortar-bar test; B-TC 106-3: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates-Method for aggregate combinations using concrete prisms, *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, June, 229(33): 283–293.

Sims, I.; Nixon, P. 2003. RILEM recommended test method AAR-0: detection of alkali-reactivity potential in concrete – outline guide to the use of RILEM methods in assessments of aggregates for potential alkali-reactivity, *Materials and Structures* 36(7): 472–479. <https://doi.org/10.1007/BF02481527>

Spiesz, P.; Yu, Q. L.; Brouwers, H. J. H. 2013. Development of cement-based lightweight composites – Part 2: Durability-related properties, *Cement and Concrete Composites* 44: 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.029>

MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE PRODUCED WITH EXPANDED GLASS AGGREGATE

D. Rumšys, D. Bačinskas, E. Spudulis

Abstract

The present paper investigates experimental mechanical properties of lightweight concrete mixes produced with expanded glass aggregate. Different concrete mixtures (totally 12) from normal weight to extremely lightweight structural concrete have been made. The sand by its volume was replaced with the expanded glass. All specimens were tested after 7 and 28 days of hardening to identify flexural and compressive strength. Density of concrete mixes ranged from 1458 to 2347 kg/m³, and the compressive strength of 40×40×40 mm cubes ranged from 40 to 103 MPa. As a result, strength and density relationship of lightweight concrete was obtained. The performed experimental investigations on freeze-thaw resistance and alkaline corrosion have shown good durability of the designed mixes.

Keywords: lightweight concrete, lightweight aggregate, expanded glass, mechanical properties, compressive strength, flexural strength, freeze-thaw resistance, alkaline corrosion.