



Lietuvos statybininkų asociacija

DRĖGMĖS DESORBCIJOS TYRIMAS BETONO KONSTRUKCIJOSE

Arūnas Aleksandras Navickas¹, Jovita Kaupienė²

¹Kauno technologijos universitetas, Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas, Lietuva

²Kauno technologijos universitetas, Daukanto g. 12, LT-35212 Panevėžys, Lietuva

El. paštas: ¹arunas.navickas@ktu.lt; ²jovita.kaupiene@ktu.lt

Įteikta 2010 05 26; priimta 2010 08 17

Santrauka. Nagrinėjama horizontalių betono konstrukcijų (apie 10 cm storio) drėgmės desorbcija. Tirti trys skirtingi betono mišiniai, kurių sudėtys skiriasi V/C santykiu, viename jų klojumui padidinti naudotas plastikis. Tyrimo metu buvo fiksuojami betono bandinių tūrinio drėgnio ir masės pokyčiai. Betono bandiniai buvo džiovinami natūraliomis sąlygomis po to, kai nusistovėjo pusiausvyros drėgmė – džiovinimo spintoje. Nagrinėjama betono struktūros įtaka desorbcijos procesui, įvertinant tiriamo betono porų ir kapiliarų išsidėstymą bei jų formą.

Reikšminiai žodžiai: betonas, drėgmė, desorbcija, struktūra, tūrinis drėgnis, poros, kapiliarai.

1. Įvadas

Eksplatuojamas horizontalias betono konstrukcijas veikia įvairūs cheminiai ir fizikiniai veiksniai, kurie nėra įvertinti projektuojant laikančiąsias konstrukcijas. Irtis pažeistose konstrukcijų vietose ir įtrūkiuose vyksta greičiau, kai į juos absorbuojama drėgmė iš aplinkos. Vanduo kaip tarpininkas perneša cheminius elementus, tirpdo mineralus, jungiasi su jais į naujus darinius.

Pavyzdžiui, betoninės grindys neretai kontaktuoja su drėgnu gruntu, todėl drėgmės kiekis betoninėse grindyse svyruoja labiau, palyginti su kitomis statinio konstrukcijomis. Pasitaiko įvairių eksploatacinių problemų (pvz., įvykti šarminėi betono korozijai reakcijos zonoje pakanka 90–95 % santykinės drėgmės) dėl drėgmės svyravimų, nors yra įrengiama tinkama hidroizoliacija ir užkertamas kelias tiesioginei vandens migracijai. Tačiau šias problemas gali sukelti ir vandens garų difuzija pačiame betone.

Nuodugnus pažeistų betoninių grindų ištyrimas parodė, kad temperatūros ir drėgmės veikiamas betonas yra labiau pažeidžiamas (Leivo 2008), nei anksčiau manyta. Drėgmės skverbimosi kinetika pastato pirmo aukšto grindyse yra kintamas reiškinys ir labai priklaus-

so nuo aplinkos temperatūros. Pastato betoninių grindų konstrukciją veikia statybinė, gruntinė, higroskopinė, kondensacinė ir eksploatacinė drėgmė.

Dauguma eksploatuojamų betoninių grindų dangų turi kritinius drėgmės lygius. Jei eksploatacinis santykinės drėgmės lygis yra 80–95 %, išlieka tinkamos sąlygos fizikiniam ir cheminiams pokyčiams betone (Leivo 2008).

Fizinės ir mechaninės betono savybės priklauso nuo daugelio veiksnių, vienas iš jų – betono struktūra. Betono struktūra sudėtinga, nes jį sudaro skirtingo dydžio ir sudėties dalelės – nuo kelių mikronų dydžio cemento klinkerio ar kalcio hidrosilikatų dalelių iki kelių centimetrų dydžio užpildų dalelių. Be to, betono struktūra laikui bėgant nuolat kinta vykstant įvairiems fizikiniam ir cheminiams procesams. Kintant struktūrai, keičiasi ir betono savybės. Dažniausiai betone išskiriami trys struktūriniai lygiai: mikrostruktūra, mezostruktūra ir makrostruktūra. Betono makro- ir mezostruktūra turi poveikį jo poringumui. Konkreti porų struktūra betone susidaro vykstant cemento hidratacijai.

Drėgmės kinetika betone priklauso nuo žaliavų sudėties, susiformavusios struktūros (porų tipo, dy-

džio, jų pasiskirstymo bei atsirandančių plyšių pobūdžio) ir nuo eksploatacinės aplinkos. Drėgmė medžiagoje paprastai skirstoma į skirtingas kategorijas arba grupes, priklausomai nuo to, kiek stipriai vandens molekulės surištos su paviršiumi ar medžiagos struktūra. Išskiriamos šios vandens ryšio formos: chemiškai surištas, adsorbciniu būdu surištas, kapiliarinių jėgų surištas, laisvasis.

Kadangi porų struktūra keičiasi vykstant cemento hidratacijai, galima teigti, kad tai daro poveikį ir betono adsorbcijos ir desorbcijos (džiūvimo) procesams. Esant drėgmės adsorbcijai iš aplinkos, skystis patenka į mikroplyšį veikiamas kapiliarinių jėgų slėgio. Gibso teorija apibūdina adsorbciją mezo- ir makroporose (Gibbs 1993). Ši teorija parodo ryšį tarp garų slėgio ir kapiliarų spindulio.

Kai kurie tyrinėtojai (Espinosa, Franke 2006) padarė išvadą, kad vadinamosios butelio formos poros padidina histerizę tarp kapiliarų kondensacijos ir garavimo. Feldman ir Sereda (1968) paaiškina histerizę, esant labai mažai santykinei drėgmei dėl tarpsluoksnio vandens pasisavinimo. Tarpsluoksniais vanduo užpildo vietą tarp CSH fazės ir yra stipriai surištas sąveikos jėgų. Dėl tarpsluoksninio vandens pašalinimo atsiranda dideli negrįžtami susitraukimai, o tai rodo negrįžtamus CSH fazių mikrostruktūros pokyčius.

2. Tyrimo metodika ir priemonės

Norint nustatyti desorbcinės betono savybes buvo pagaminti betono kubeliai, kurių vandens ir cemento santykis yra skirtingas. Jų gamybai naudotos šios medžiagos: cementas (CEM II/AL 42,5 MPa, dalelių

tankis $\rho_c = 3100 \text{ kg/m}^3$); smėlis (dalelių tankis $\rho_{sm} = 2650 \text{ kg/m}^3$, piltinis tankis $\rho_{sm} = 1700 \text{ kg/m}^3$); dolomitinė skalda (dalelių tankis $\rho_{st} = 2600 \text{ kg/m}^3$, piltinis dolomitinės skaldos tankis $\rho_{stp} = 1400 \text{ kg/m}^3$, tuštymėtumas $T_{st} = 39 \%$); vanduo.

Laboratorijoje tirtų betono mišinių sudėtys pateiktos 1 lentelėje. Betono mišinio savybės buvo nustatytos sumaišius mišinį, taip pat praėjus 30 ir 60 min. Mišinio slankumas (nuosėdis) nustatytas pagal LST EN 12350-2:2009. Vebe rodiklis nustatytas pagal LST EN 12350-3:2009 konsistometru „Contros 54 CO195“. Betono bandiniai buvo tankinami ant vibracinio stalelio. Formose bandiniai buvo laikomi 20 val. $t = +(20\pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros aplinkoje. Bandiniai buvo kietinami pagal LST EN 12390-2:2009 reikalavimus, 28 paras laikant bandinius vandenyje režimo kameroje, pastovioje temperatūroje ($t = +(20\pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$). Betono gniuždomasis stipris nustatytas pagal LST EN 12390-3:2009. Po 28 parų vidutinis betono gniuždomasis stipris sudarė:

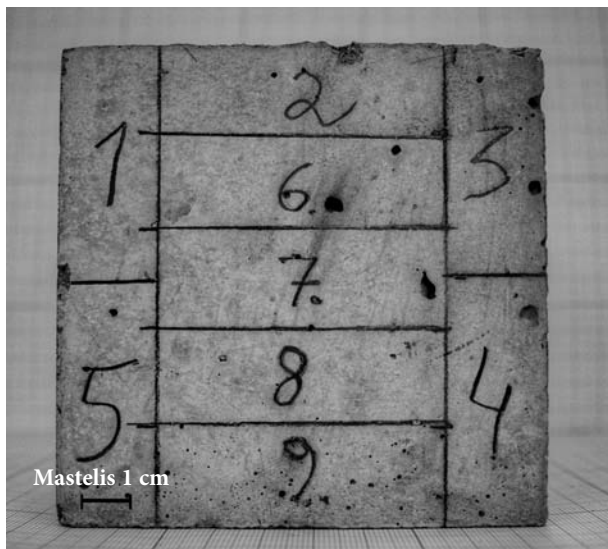
- D1 serija – 32,4 MPa;
- D2 serija – 43,3 MPa;
- D3 serija – 45,6 MPa.

Buvo matuojama penkių kiekvienos serijos betono kubelių drėgmė 9-ioose taškuose (1 pav.). Drėgmei betone nustatyti buvo naudotas drėgmės matuoklis, kurio veikimas pagrįstas dielektrinės skvarbos matavimu. Matuojant nustatomas medžiagos tūrinis drėgnis. Bandymui naudoto T-M-170 matuoklio techninės charakteristikos yra šios: tūrinio drėgnio matavimo ribos – 0–80 %, tikslumas – 0,1 %, darbo aplinkos temperatūra – nuo 0 $^\circ\text{C}$ iki 50 $^\circ\text{C}$.

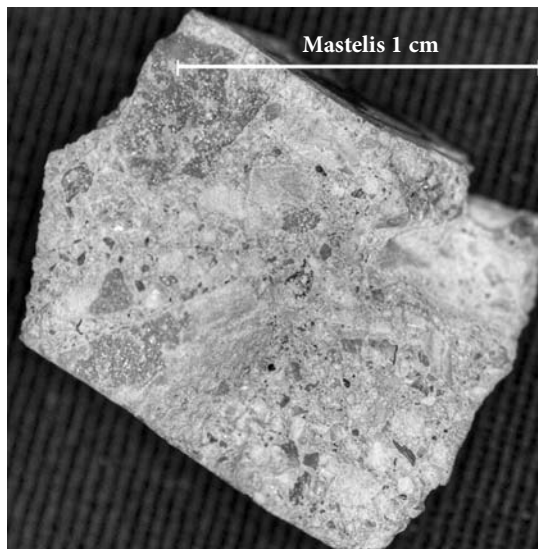
1 lentelė. Tirtų betono mišinių sudėtys

Table 1. The composition of investigated concrete cubes

Medžiagos	Matavimo vienetai	1 m ³ betono mišinio kiekis		
		C25/30 (D1 serija)	C30/37 (D2 serija)	C/35/45 (D3 serija)
Cemento kiekis	kg	366	457	457
Vandens kiekis	l	205	160	160
Dolomito užpildo kiekis	kg	1171	1157	1157
Smėlio kiekis	kg	601	656,14	656,14
V/C	–	0,56	0,35	0,36
„Flormix“ plastiklis	ml	–	–	90
Slankumas	mm	7 (S2)	–	9 (S2)
Vebe rodiklis	s	–	32 (V0)	–



1 pav. Betono kubelio suskirstymas į drėgmės matavimo zonas
Fig. 1. Moisture measurement zones on the concrete cube



2 pav. Betono bandinio ruošinio pavyzdys
Fig. 2. The example of tested concrete

Bandiniams sverti naudotos KERN 572-45 svarstyklės, kurių didžiausioji svėrimo riba – 12 100 g, svėrimo tikslumas yra $\pm 0,05$ g.

Betono bandiniai desorbcijos tyrimo metu buvo laikomi džiovinimo spintoje SNOL 67/350 LN, kurios $T_{\max} = 350$ °C, talpa – 67 l.

Bandiniams paruošti ir tirti elektroniniu skenuojančiu mikroskopu buvo naudojama ši įranga:

- 610 mm skersmens deimantinis pjūklas gabalams pjauti;
- 150 mm skersmens deimantinis pjūklas mažesnėms dalelėms pjauti;
- 405–510 mm skersmens vibruojantis poliravimo diskas;
- 250–460 mm skersmens šlifavimo ratas;
- 250–460 mm skersmens poliravimo ratas.

Perpjauti betono kubelių gabalai buvo šlifuojami ir poliruojami. Po pirminio poliravimo bandiniai buvo supjaustyti apie 1 cm³ dydžio gabalais, paskui betono ruošiniai buvo poliruojami dar kartą (2 pav.).

Sugerti elektronų krūviui nupoliruoti bandiniai buvo padengti laidžia danga, tam naudotas aliuminis.

Betono struktūros tyrimai buvo atlikti skenuojančiu elektroniniu mikroskopu „e-Line“ (SEM). Betoną vertinant mikroskopu, labai svarbus yra mėginio paruošimas. Buvo tiriami poliruoti betono bandiniai. Betono bandinių analizė atlikta naudojant Alfred Raith GmBh „e-Line“ įrangą.

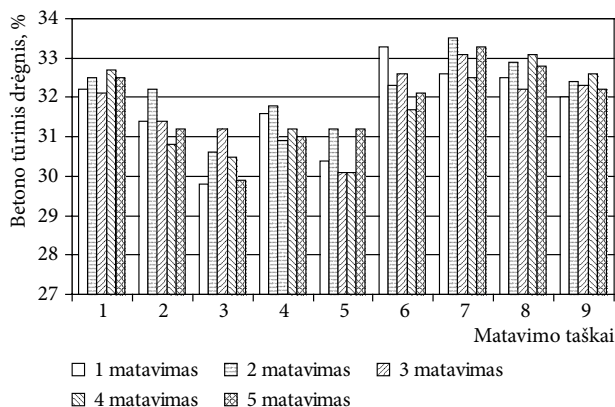
Šią įrangą sudaro skenuojantis elektroninis mikroskopas (SEM), paviršiaus cheminės analizės detek-

torius (EDX), vakuumo sistema, pavyzdžio tvirtinimo ir padėties nustatymo sistema, vaizdų generavimo ir apdorojimo sistema, litografinė sistema. Preciziškai valdomas elektronų pluošto šaltinis – elektroninė optinė kolona *Gemini* („Carl Zeiss“). Visas sistemas jungia ir valdo bendra kompiuterinė sistema, leidžianti atlikti vaizdų analizės procedūras bandinio 100×100 mm plote 10 nm tikslumu. Elektroninio spindulio kreipimo sistemos atlenkimas – nuo 1 iki 1000 μm. Stalelio su bandiniu bazavimas X–Y ašimis valdomas pagal lazerinio interferometro duomenis.

Analizuojamas bandinių paviršiaus buvo padengtas aliuminiu fizinio nusodinimo vakuume būdu, naudojant įrenginį AVAC HVC600 ir kaitinant išgarinamą medžiagą elektroniniu spinduliu. Dengiant bandinius aliuminiu dangos storis – 50–80 nm. Garinant storio kontrolė atlikta kvarcinėmis svarstyklėmis. SEM formuoja vaizdą, sudarydamas fokusuojamų elektrinių spindulių matricą mažame bandinio plote.

3. Drėgmės pokyčiai džiūstant betonui

28 paras natūraliai kietėję vandenyje betono kubeliai buvo laikomi pastovioje temperatūroje ($t = +(20 \pm 2)$ °C). Patalpos oro santykinė drėgmė (SD) svyravo 55–73 %. Po 4 parų buvo pradėti bandinių drėgmės ir masės matavimai. Viename taške betono drėgmė buvo matuojama penkis kartus. Bandymo pradžioje, atliekant tūrinės betono drėgmės matavimus vieno 1 serijos (1 lentelė) betono kubelio devyniuose taškuose, gauti matavimo rezultatai pateikti 3 pav.



3 pav. Vieno betono kubelio tūrinio drėgnio matavimo rezultatai devyniuose skirtinguose taškuose

Fig. 3. The spread of moisture measuring results at nine points of a distinct cube

Viename (D1 serijos sudėties) kubelyje vieno taško tūrinės drėgmės matavimo rezultatai kito 0,6–1,4 %, vidutiniškai 0,98 %.

Kas 7 paros kubeliai buvo sveriami, matuojama jų tūrinė drėgmė, fiksuojama patalpos temperatūra ir santykinė drėgmė. Tūrinės drėgmės pokytis džiūstant betonui natūraliomis sąlygomis pateiktas 4 pav. Matyti, kad visų serijų bandinių tūrinė drėgmė per pirmąsias 25 džiūvimo paras mažėjo sparčiausiai, vidutiniškai 13 %, per likusias 52 paras ji sumažėjo vidutiniškai dar 5 %.

Lyginant visų trijų serijų bandinių drėgmės pokyčio vidurkius pastebima, kad betono kubeliuose su „Flormix“ plastikliu drėgmės pokytis yra mažiausias ir sudaro 15 %, kitų dviejų sudėčių drėgmės pokytis yra panašus (20 %). Iki 78 paros patalpos aplinkos santykinė drėgmė buvo 55–60 %. 79–87 paromis santykinė patalpos aplinkos drėgmė padidėjo iki 65–73 %.

5 pav. matyti, kad tomis paromis matuojant drėgmę betono kubeliuose taip pat fiksuotas jos padidėjimas.

D1 serijos betono sudėties vidutinės tūrinės drėgmės matavimo penkiuose bandiniuose duomenų išsisklaidymas bandymo pradžioje ir pabaigoje pateiktas 5 ir 6 pav. Matavimo pradžioje tūrinis drėgnis svyruoja 2,3 %. Bandymo pabaigoje, nusistovėjus pastoviai masei, drėgmės svyravimai sumažėjo ir sudarė 0,3 %.

Bandymo pradžioje D2 ir D3 serijos sudėčių (1 lentelė) betono tūrinio drėgnio matavimo rezultatų sklaida vidutiniškai buvo 1,3 %, bandymo pabaigoje – 0,2 %. D2 ir D3 serijos bandiniuose betono tūrinio drėgnio matavimo rezultatai buvo mažiau išsisklaidę.

Taikant statistinius metodus galima patikrinti, ar dviejų serijų betono tūrinė drėgmė nėra lygi (H_0 hipotezė (1) prieš alternatyvią hipotezę H_1) (Sheskin 2000):

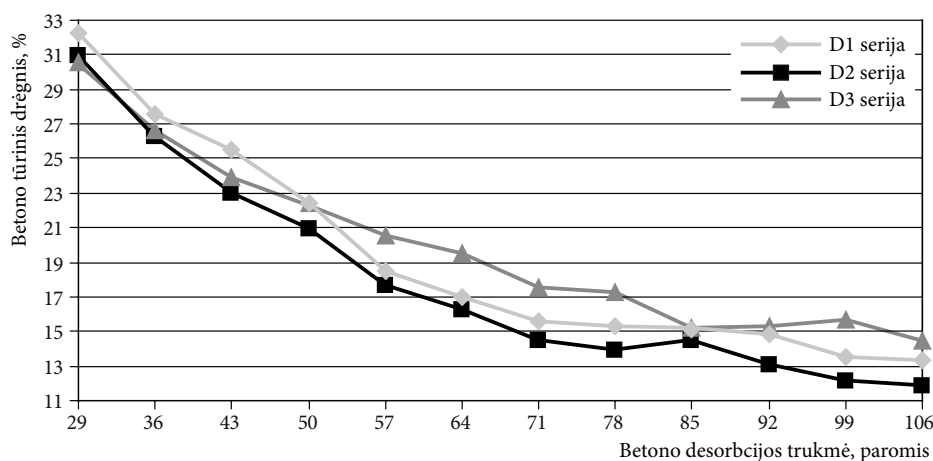
$$\begin{cases} H_0: \mu_i = \mu_j, \\ H_1: \mu_i \neq \mu_j, \quad i, j = 1, \dots, n, i \neq j, \end{cases} \quad (1)$$

čia: $n = 3$ – betono mišinių serijų skaičius; μ_i – vidutinė j serijos imties reikšmė.

Kai duomenys pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį (1) hipotezei tikrinti galima taikyti Stjudento kriterijų nepriklausomoms imtims, kai generalinių aibių dispersijos nelygios (Sheskin 2000). Pirmiausia apskaičiuojama t statistika pagal formulę (Sheskin 2000):

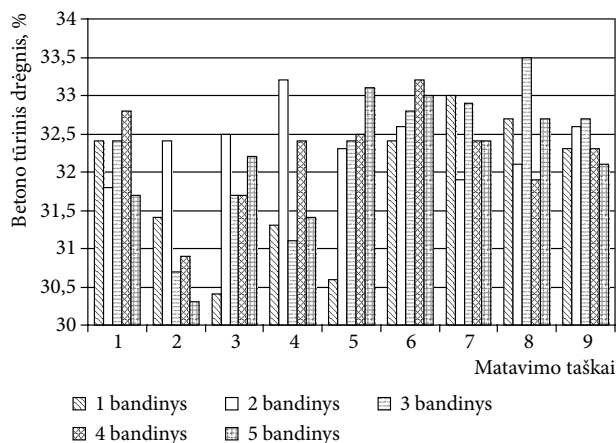
$$t = \frac{\mu_i - \mu_j}{\sqrt{S_i^2/n + S_j^2/n}}, \quad (2)$$

čia: $S_i - j$ imties standartinis nuokrypis (2 lentelė); $n = 3$ – betono mišinių serijų skaičius; μ_i – vidutinė j serijos imties reikšmė.



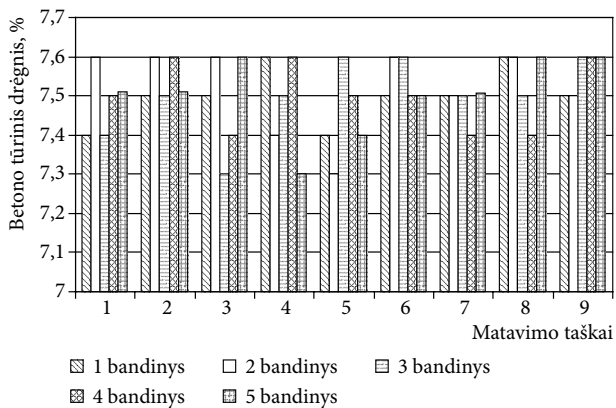
4 pav. Drėgmės pokyčiai džiūstant betonui natūraliomis sąlygomis ($t = +(20 \pm 2)^\circ\text{C}$; SD = 55–73 %)

Fig. 4. Changes in concrete moisture under natural environment conditions ($t = +(20 \pm 2)^\circ\text{C}$; RH = 55–73%)



5 pav. D1 serijos sudėties betono vidutinio tūrinio drėgnio matavimų sklaida penkiuose kubeliuose bandymo pradžioje

Fig. 5. The spread of the measurements of the average moisture content of D1 series concrete in five cubes at an early investigation stage



6 pav. D1 serijos sudėties betono vidutinio tūrinio drėgnio matavimų sklaida penkiuose kubeliuose bandymo metu

Fig. 6. The spread of the measurements of the average moisture content of D1 series concrete in five cubes at the final stage of investigation

Apskaičiuojamas laisvės laipsnių skaičius k , kuris yra mažiausias sveikasis skaičius, tenkinantis sąlygą:

$$k \leq \frac{(S_{\text{exp}}^2/n + S_{\text{calc}}^2/n)^2}{S_{\text{exp}}^4/n^3 + S_{\text{calc}}^4/n^3} \quad (3)$$

Hipotezė H_0 (1) atmetama, jeigu $|t| > t_{\alpha/2}(k)$, čia $t_{\alpha/2}(k)$ – Stjudento skirstinio su k laisvės laipsniais $\alpha/2$ lygmens kritinė reikšmė. Taip pat Hipotezė H_0 (1) atmetama, kai Stjudento kriterijaus p reikšmė gaunama didesnė nei α . Šiame darbe teigiama, kad $\alpha = 0,05$.

Kai duomenys pasiskirstę ne pagal normalųjį dėsnį galima taikyti neparimetrinius kriterijus. (1) hipotezei tikrinti galima taikyti Mano ir Vitnio kriterijų (Sheskin 2000). Mano ir Vitnio kriterijaus statistikos:

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1, \quad (4)$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2,$$

čia: n_1 ir $n_2 - 1$ ir 2 imties dydis; R_1 ir R_2 yra rangų, priskirtų atitinkamai pirmosios ir antrosios imčių nariams, suma.

Yra sukurta daugiau kaip 20 kriterijų duomenų normalumui patikrinti (Кобзарь 2006). Mažoms imtims geriausiai tinka Šapiro ir Vilko (Shapiro & Wilk) kriterijus. Tarptautiniame standarte ISO 5479:1997 duomenų normalumui patikrinti taip pat taikomas Šapiro ir Vilko kriterijus. Jame nurodoma, kad imties dydis turi būti $n \geq 8$. Kai imties dydis mažesnis, normalumo tikrinimas nėra patikimas. Nagrinėjamu atveju kiekvienos serijos imties dydis yra 5 kubeliai, todėl duomenų normalumo patikrinti negalima.

Kadangi imties pasiskirstymo dėsnis nežinomas, tai statistinėje analizėje taikysime kelis kriterijus: Stjudento bei Mano ir Vitnio kriterijus. Statistiniai imčių įverčiai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė Betono kubelių džiūvimo statistiniai įverčiai

Table 2. Statistical criteria for drying concrete cubes

Savaitės	Serijų vidurkiai μ , %			Serijų standartiniai nuokrypiai S , %		
	1	2	3	1	2	3
1	32,04	30,97	30,56	0,33	0,49	0,20
2	28,25	26,27	26,63	0,91	0,24	0,32
3	25,16	22,99	23,96	1,71	0,24	0,89
4	22,45	20,90	22,39	0,45	1,43	1,31
5	18,50	17,61	20,59	1,27	1,42	1,58
6	17,04	16,24	19,51	0,96	0,64	0,75
7	15,61	14,50	17,59	0,49	0,42	0,77
8	15,28	13,92	17,26	0,80	0,20	1,01
9	15,12	14,50	15,22	0,60	0,37	0,81
10	14,80	13,03	15,29	0,52	0,58	0,71
11	13,52	12,12	15,70	0,15	0,34	0,74
12	13,32	11,80	14,42	0,23	0,35	0,64

Kad būtų paprasčiau, hipotezę (1) perrašysime taip:

$$\begin{cases} H_{0,1} : \mu_1 = \mu_2, \\ H_{1,1} : \mu_1 \neq \mu_2, \end{cases} \begin{cases} H_{0,2} : \mu_1 = \mu_3, \\ H_{1,2} : \mu_1 \neq \mu_3, \end{cases} \begin{cases} H_{0,3} : \mu_2 = \mu_3, \\ H_{1,3} : \mu_2 \neq \mu_3. \end{cases} \quad (5)$$

Hipotezių tikrinimo rezultatai surašyti 3 lentelėje. Šioje lentelėje viena žvaigždute pažymėtos imtys, kurių H_0 hipotezė imama pagal Stjudento arba Mano ir Vitnio kriterijus, dviem žvaigždutėmis pažymėtos imtys, kurių H_0 hipotezė imama pagal Stjudento bei Mano ir Vitnio kriterijus kartu. 3 lentelėje Stjudento bei Mano ir Vitnio kriterijaus p reikšmės apskaičiuotos programa „Statistika“.

Kaip rodo 3 lentelė, statistinės išvados pagal Stjudento bei Mano ir Vitnio kriterijus, drėgmės svyravimo hipotezių reikšmingumai skiriasi.

3 lentelė. Hipotezių tikrinimo kriterijų reikšmės

Table 3. Criterion values of hypothesis evaluation

Savaitės	Stjudento kriterijaus p reikšmės			Mano ir Vitnio kriterijaus p reikšmės		
	$H_{0,1}$	$H_{0,2}$	$H_{0,3}$	$H_{0,1}$	$H_{0,2}$	$H_{0,3}$
1	0,005	0,137*	0,000	0,009	0,009	0,117*
2	0,007	0,083*	0,014	0,009	0,009	0,117*
3	0,046	0,070**	0,214*	0,117*	0,251**	0,028
4	0,070*	0,123**	0,927**	0,036	0,249**	0,251**
5	0,327**	0,014	0,052*	0,347**	0,047	0,016
6	0,165**	0,000	0,002	0,251**	0,009	0,009
7	0,005	0,000	0,002	0,012	0,009	0,009
8	0,017	0,001	0,010	0,009	0,028	0,009
9	0,093*	0,123**	0,820**	0,047	0,917**	0,117**
10	0,001	0,001	0,249*	0,009	0,251*	0,009
11	0,000	0,000	0,002	0,009	0,009	0,009
12	0,000	0,000	0,014	0,009	0,016	0,009

Natūraliai išdžiovinti bandiniai vėliau buvo džiovinami $t = +(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ temperatūroje. Kubeliai buvo sveriami ir drėgmė matuojama kas 7 paros. Bandiniai, išimti iš džiovinimo spintos, buvo laikomi eksikatoriuose patalpoje, kurioje temperatūra buvo $t = +(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, kol bandiniai atvėsdavo iki patalpos aplinkos temperatūros. Į eksikatorius, kad betono kubeliai nesudrėktų, buvo įpilta NaCl.

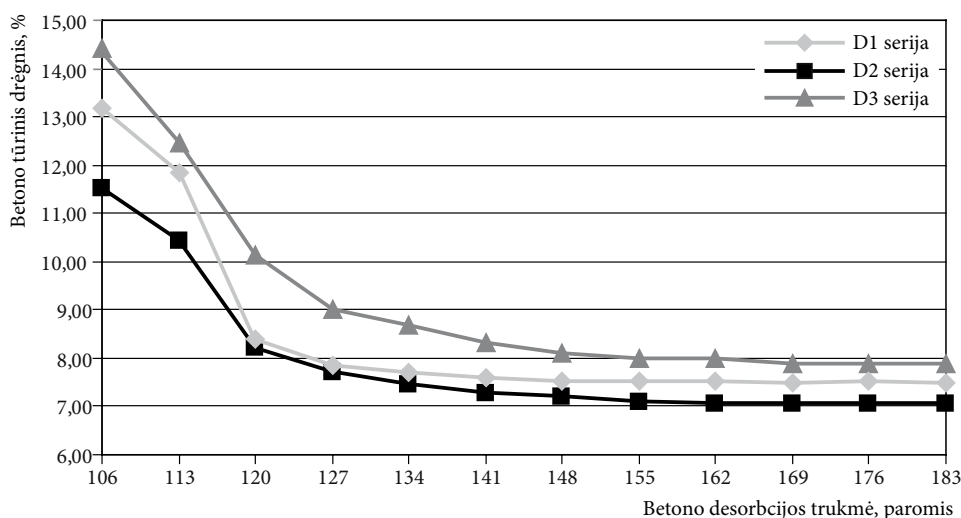
Iš 7 pav. matyti, kad, džiūstant betonui džiovinimo spintoje, visų serijų bandinių tūrinė drėgmė intensyviausiai kinta per pirmąsias 14 desorbcijos parų (vidutiniškai tūrinis drėgnis sumažėjo 5,2 %), o per likusias 42 paras vidutiniškai jis dar sumažėjo tik 1,2 % nuo turėtos drėgmės.

4. Betono bandinių struktūros įvertinimas

Nusistovėjus pastoviai bandinio masei, betono bandinys buvo perpjautas apie 2 cm nuo matavimo plokštumos į dvi atskiras dalis, kuriose buvo matuojama drėgmė. Tolesniems tyrimams buvo naudojama viršutinė nupjauta betono dalis, nes drėgmės matavimo gylis buvo apie 2 cm. Vizualiai apžiūrėjus pjūvį pastebėta, kad mažiausia drėgmė buvo tuose taškuose, kuriuose arti paviršiaus pasitaikė stambaus užpildo.

Palyginus bandinius galima teigti, kad drėgmė mažesnė tuose taškuose, kuriuose buvo masyvesnė betono struktūra, matoma mažiau kapiliarų.

Siekiant nustatyti betono porėtumo įtaką drėgmės svyravimams, buvo atlikti betono struktūros tyrimai. SEM buvo tirta po du kiekvienos betono sudėties (1 lentelė) bandinius.



7 pav. Drėgmės pokyčiai betone, bandinius laikant džiovinimo spintoje ($t = +(105 \pm 5)^\circ\text{C}$)

Fig. 7. Changes in concrete moisture under drying stove conditions ($t = +(105 \pm 5)^\circ\text{C}$)

Tarptautinė organizacija IUPAC numato tokių porų skirstymo pagal dydį principą (4 lentelė).

Kapiliarinės poros sukietėjusiam cemento akmenyje atsiranda išgaravus vandens pertekliui ir likus uždarytam orui. Vandens perteklius pasiskirsto gelio porose ir tarpuose tarp nesureagavusių cemento dalelių ir hidratacijos naujadarų (Kondraivendhan, Bhattacharjee 2010).

4 lentelė. Betono porų pasiskirstymas (IUPAC)

Table 4. The distribution of concrete pores (IUPAC)

Pavadinimas	Porų spindulys, r	Aprašymas
Gelio poros	<1,0 nm	Gelio mikroporos
	1,0–25 nm	Gelio mezoporos
Kapiliarinės poros	25–50 nm	Mikrokapiliarinės poros
	50 nm – 1 μm	Makrokapiliarinės poros
Oro poros	>1 μm	Kavernų, plyšių ir oro porų visuma

Iš jų išgaravus laisvajam vandeniui desorbcijos metu, lieka tuščios kapiliarinės poros. Kapiliarinių porų skaičius cemento akmenyje daugiausia priklauso nuo laisvojo vandens kiekio ir hidratacijos laipsnio. Didėjant V/C santykiui ir laisvojo vandens kiekiui cemento akmenyje, didėja kapiliarinių porų kiekis (Kondraivendhan, Bhattacharjee 2010).

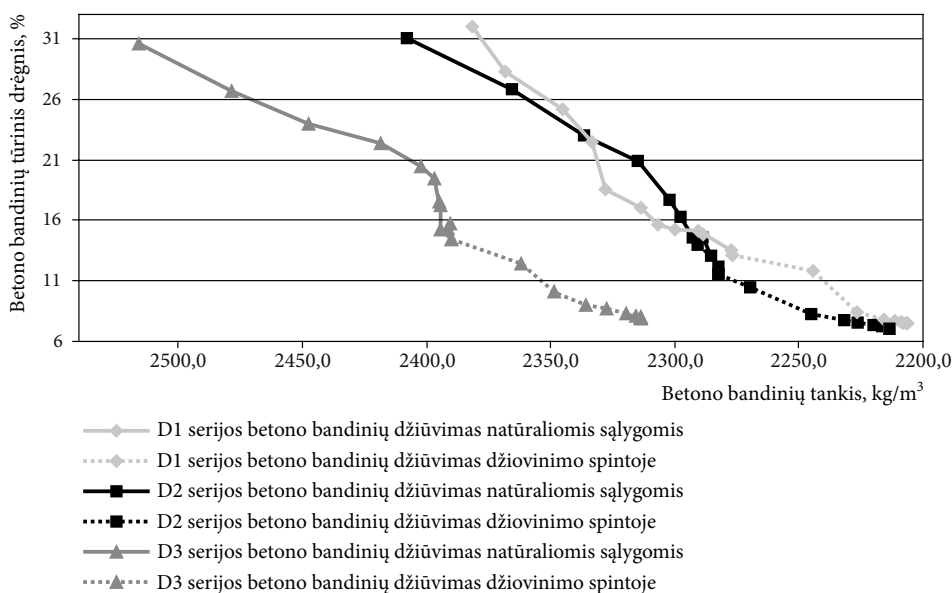
Lyginant gautus rezultatus su kitų tyrėjų duomenimis (Espinosa 2006), esant tai pačiai aplinkos santykinė drėgmei, matavimo rezultatai yra panašūs, t. y. kai $V/C = 0,6$, o aplinkos santykinė drėgmė 60 %, masės drėgnis – 5,2 %, esant 70 % aplinkos santykinė drėgmei – 6,8 %.

Cemento akmens kapiliarinis poringumas, didėjant cemento hidratacijos laipsniui (didėjant cemento akmens kietėjimo laikui), mažėja, nes susidarancio naujadarų gelio tūris apie 2,2 karto didesnis už nehidratavusio cemento tūrį ir cemento hidratacijos produktai užima dalį likusio tūrio (Allena *et al.* 1987).

Atlikus skirtingų sudėčių (1 lentelė) D2 ir D3 serijos betono bandinių, laikomų natūraliomis sąlygomis bei džiovinimo spintoje, betono tūrinio drėgnio priklausomybių palyginimus (8 pav.), tankio ir tūrinio drėgnio sąryšio kreivių pobūdis išliko panašus.

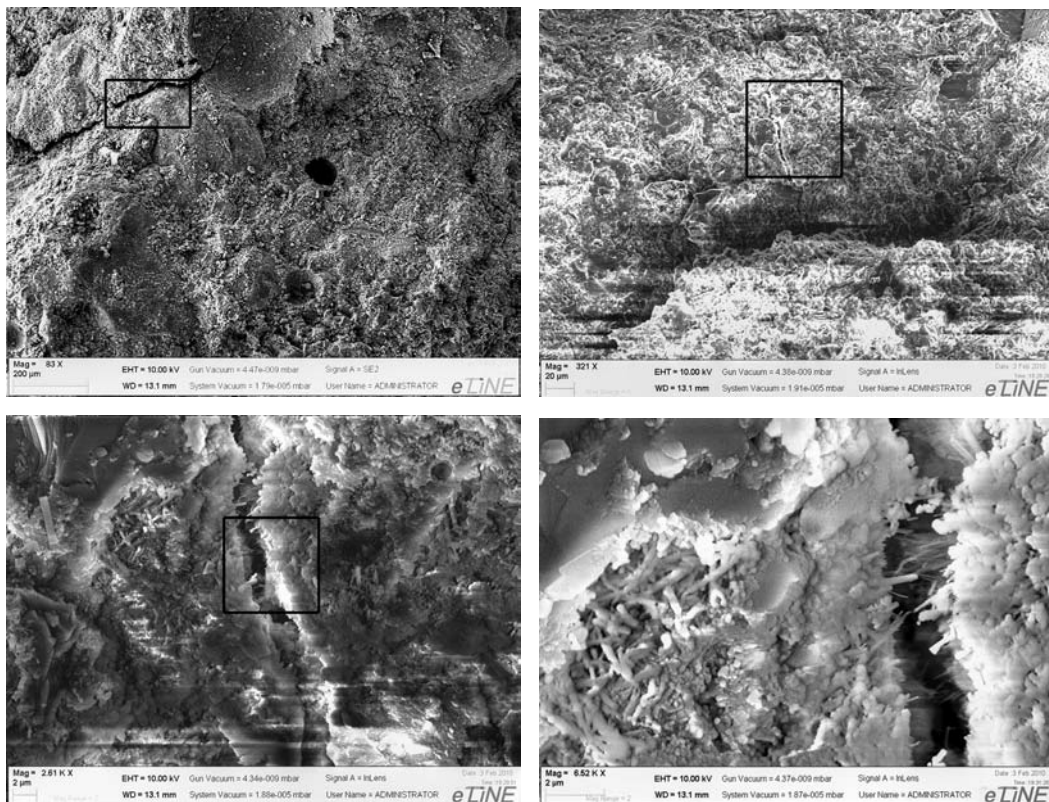
Vertinant D1 serijos (9 pav.) skenuojančiu elektroniniu mikroskopu bandinių ruošinių gautas nuotraukas, matyti, kad šiame betone buvo įvairaus pločio (nuo 1 iki 10 μm) plyšiai betono skiedinio dalies matricoje.

Vertinant D2 serijos skenuojančiu elektroniniu mikroskopu bandinių ruošinių gautas nuotraukas (10 pav.), matyti, kad šios sudėties betono skiedinio dalyje susidarė makrokapiliarinės poros (daugiau nei 1 μm). Tokio betono struktūroje vyravo plokščios formos cemento akmens junginiai.



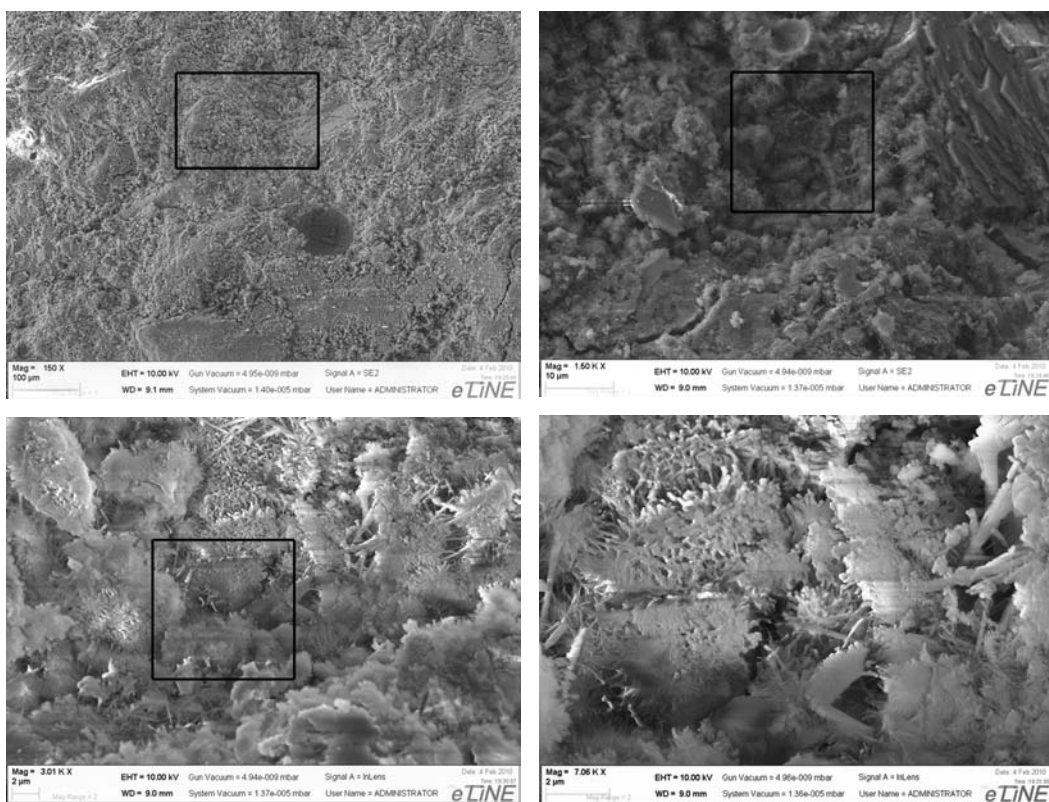
8 pav. Betono kubelių tankio ir tūrinio drėgnio sąryšis

Fig. 8. The relation between bulk moisture and concrete cube density



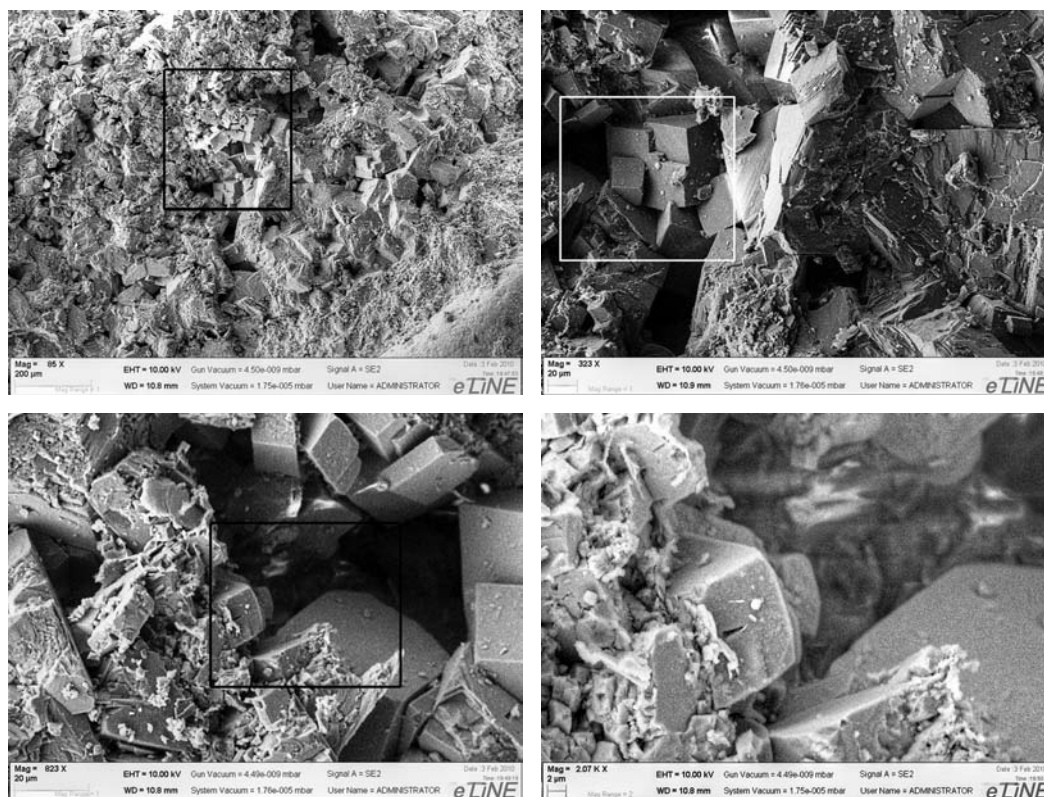
9 pav. D1 serijos mišinio betono bandinių struktūra

Fig. 9. The structure of D1 series concrete cubes



10 pav. D2 serijos mišinio betono bandinių struktūra

Fig. 10. The structure of D2 series concrete cubes



11 pav. D3 serijos mišinio betono bandinių struktūra

Fig. 11. The structure of D3 series concrete cubes

Vertinant D3 serijos skenuojančiu elektroniniu mikroskopu bandinių ruošinių gautas nuotraukas (11 pav.), matyti, kad šio betono cemento akmeniui buvo būdingos ir nemažo skersmens oro poros (3–40 μm), kurių kraštuose išsidėstę prizmės formos junginiai, kurių neturėjo D1 ir D2 serijos bandiniai.

Lyginant visų bandinių ruošinių nuotraukas matyti, kad D3 sudėties betono struktūrą veikė naudotas plastikas, o tai ir lėmė skirtingus drėgmės desorbcijos tempus.

5. Išvados

1. Vykstant betono konstrukcijų (apie 10 cm storio) desorbcijai natūraliomis sąlygomis (užtikrinant konkrečią fiksuotą aplinkos temperatūros ir drėgmės režimą) drėgmės pusiausvyra nusistovi per 55–75 paras, pasiekiant 12–14 % tūrinį drėgnį (arba 5–6 % masės drėgnį).
2. Intensyviai džiovinant natūralios pusiausvyros drėgmės betoną (apie 10 cm storio) 105 °C temperatūroje, jo drėgmė nusistovi per 14 parų, pasiekdama 8–10 % tūrinį drėgnį (arba 3,4–4,2 % masės drėgnį).
3. Betono džiūvimo greitis daugiau priklauso nuo aplinkos sąlygų negu nuo sunkiojo betono tankio.

4. Apdorojus gautus drėgmės svyravimų duomenis statistiniais metodais, galima teigti, kad gauti rezultatai statistiniu požiūriu yra reikšmingi.

Literatūra

- Allena, J.; Oberthur, C. R.; Pearson, D.; Espinosa, R. M.; Franke, L. 2006. Influence of the age and drying process on pore structure and sorption isotherms of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research* 36: 1969–1984. doi:10.1016/j.cemconres.2006.06.010
- Feldman, R. F.; Sereda, P. J. 1968. A model for hydrated portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties, *Materiaux et Construction* 1(6): 509–520. doi:10.1007/BF02473639
- Gibbs, J. W. 1993. *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs. Thermodynamics 1*. 195 p.
- ISO 5479:1997. *Statistical Interpretation of Data – Tests for Departure from the Normal Distribution*. 33 p.
- Kondraivendhan, B.; Bhattacharjee, B. 2010. Effect of age and water-cement ratio on size and dispersion of pores in ordinary portland cement paste, *Materials Journal* 107(2): 147–154.
- Leivo, V.; Rantala, J. 2008. Moisture behaviour of slab-on-ground structures in operating conditions: steady-state analysis, *Construction and Buildings Materials* 22(4): 526–531. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.11.008

- LST EN 12350-2:2009 *Šviežio betono bandymas. 2 dalis. Slankumo bandymas* [Testing fresh concrete. Part 2. Slump-test]. Vilnius, 2009.
- LST EN 12350-3:2009 *Šviežio betono bandymas. 3 dalis. Vebe bandymas* [Testing fresh concrete. Part 3. Vebe test]. Vilnius, 2009.
- LST EN 12390-3:2009 *Betono bandymas. 3 dalis. Bandinių gniuždomasis stipris* [Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens]. Vilnius, 2009.
- Schofield, P.; Wilding, C. R. 1987. Development of the fine porosity and gel structure of hydrating cement systems, *Philosophical Magazine* 56(3): 263–288.
doi:10.1080/13642818708221317
- Sheskin, D. J. 2000. *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC. 982 p.
- Кобзарь, А. И. 2006. *Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников* [Kobzar, A. I. *Mathematical Statistics for Engineers and Scientists*] Москва, Физматлит: 816 с.

INVESTIGATION INTO MOISTURE DESORPTION IN CONCRETE CONSTRUCTIONS

A. A. Navickas, J. Kaupienė

Abstract. The article investigates the moisture desorption of concrete constructions. Three concrete mixtures with different V/C ratio were tested. In one of the mixtures, a plasticizer was used. The test revealed changes in bulk humidity and weight. Specimens were dried in a natural environment after equilibrium moisture in a drying oven was reached. In the beginning of the test, the volume humidity of specimens with D1 composition varied in the range of 2.3 %. At the end of measuring, when constant weight was reached, moisture range decreased up to 0.3 %. When starting the test, the dispersion of the results of bulk humidity of specimens with D2 and D3 composition (Table 1) at an average was 1.3 % and at the end of the test it made 0.2 %. In the specimens of D2 and D3 composition, the results of the measurement of bulk humidity were scattered less. Also, an effect of concrete structure on the desorption process, rating pore and capillary structure in concrete and their shape has been evaluated. When a constant weight of specimens was reached, the specimen were cut into two parts about 2 cm from the plane where moisture had been measured. For subsequent tests, the top cut part was used, because the depth of measuring moisture was about 2 cm. Visual examination displayed that minimum moisture was in the points with large aggregates near the surface. After a comparison of the specimens it can be affirmed that moisture content is less in the points where the structure of concrete is more massive and less capillaries can be seen.

Keywords: concrete, desorption, structure, volume humidity, porosity, capillaries.

Arūnas Aleksandras NAVICKAS. Assoc. Prof. at the Department of Building Materials, Kaunas University of Technology (KTU). PhD (1997) from KTU. Research interests: concrete durability, alkali – aggregate reaction, concrete mixture properties, penetration of humidity in concrete.

Jovita KAUPIENĖ. A PhD student at the Department of Building Materials, Kaunas University of Technology (KTU). Research interests: investigation into concrete desorption characteristics and influence of concrete structure on its moisture alteration.