

Primljen / Received: 26.11.2018.

Ispravljen / Corrected: 15.5.2019.

Prihvaćen / Accepted: 1.7.2019.

Dostupno online / Available online: 10.3.2020.

Laboratorijska usporedba valjanog i običnog vibriranog betona kolničkih konstrukcija

Autori:



Doc.dr.sc. **Payam Shafigh**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Malaji, Kuala Lumpur, Malezija
Fakultet izgrađenog okoliša, Odjel geodetske izmjene
pshafigh@gmail.com



Dr.sc. **Mohammad Hashemi**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Malaji, Kuala Lumpur, Malezija
Tehnički fakultet, Odjel građevinarstva
hashemimohammad23@yahoo.com

Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Boo Hyun Nam**, dipl.ing.građ.
Sveučilište na središnjoj Floridi, SAD
Odsjek za civilno, okolišno i građevinsko inženjerstvo
BooHyun.Nam@ucf.edu



Dr.sc. **Iman Asadi**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Malaji, Kuala Lumpur, Malezija
Fakultet izgrađenog okoliša, Odjel geodetske izmjene
asadi8564@gmail.com

Prethodno priopćenje

Payam Shafigh, Mohammad Hashemi, Boo Hyun Nam, Iman Asadi

Laboratorijska usporedba valjanog i običnog vibriranog betona kolničkih konstrukcija

Kolnik od valjanog betona (RCCP) sastoji se od istih komponenata kao i kolnik od običnog vibriranog betona (NVC). U radu se analiziraju razlike između RCCP-a i NVC-a. Prikazi mikrostrukture pokazuju da RCCP ima veću gustoću pakiranja u usporedbi s uzorcima NVC. Vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 28 dana, vlačne čvrstoće pri cijepanju i vlačna čvrstoća savijanjem RCCP-a veće su za 9 %, 4 % i 25 % od odgovarajućih čvrstoća NVC-a. Konačne vrijednosti kapilarnog upijanja i poroznosti RCCP-a otprilike su za 8 % tj. 10,6 % niže od odgovarajućih vrijednosti NVC-a.

Ključne riječi:

betonski kolnik, valjani beton, vibrirani beton, tlačna i vlačna čvrstoća, modul elastičnosti, kapilarno upijanje, poroznost

Research Paper

Payam Shafigh, Mohammad Hashemi, Boo Hyun Nam, Iman Asadi

Laboratory comparison of roller-compacted concrete and ordinary vibrated concrete for pavement structures

The roller-compacted concrete pavement (RCCP) has the same ingredients as the pavement made of normal vibrated concrete (NVC). Microstructure images show that RCCP has higher pack density compared to NVC specimens. The 28-day compressive, splitting tensile, and flexural strengths of RCCP are by 9%, 4%, and 25% higher than those of NVC. The final water absorption and porosity values are by about 8% and 10.6% lower for RCCP in comparison with NVC.

Key words:

concrete pavement, roller-compacted concrete, vibrated concrete, compressive and tensile strength, elastic modulus, water absorption, porosity

Vorherige Mitteilung

Payam Shafigh, Mohammad Hashemi, Boo Hyun Nam, Iman Asadi

Laborvergleich von walzenverdichtetem und normalem vibriertem Fahrbahnbeton

Eine Fahrbahn aus walzenverdichtetem Beton (RCCP) besteht aus den gleichen Komponenten wie auch eine Fahrbahn aus normalem Vibrationsbeton (NVC). Die Abhandlung analysiert die Unterschiede zwischen RCCP und NVC. Die Ansichten der Mikrostrukturen zeigen, dass RCCP im Vergleich zu den NVC-Proben eine höhere Packungsdichte aufweist. Die Druckfestigkeitswerte nach 28 Tagen, die Zugfestigkeit bei Spaltung und die Zugfestigkeit durch Biegen des RCCP sind um 9%, 4% und 25% höher als die entsprechenden Festigkeiten des NVC. Die endgültigen Kapillarabsorptions- und Porositätswerte des RCCP sind um etwa 8%, d. h. 10,6% niedriger als die entsprechenden NVC-Werte.

Schlüsselwörter:

Betonfahrbahn, walzenverdichteter Beton, Vibrationsbeton, Druck- und Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Kapillarabsorption, Porosität

1. Uvod

Valjani beton (eng. *Roller-compacted concrete pavement* - RCCP) je beton koji se zbija pomoću vibracijskih valjaka [1]. Zbog svoje ekonomičnosti, niske topline hidratacije te brze i jednostavne primjene, taj se beton često koristi u brojnim područjima građevinarstva, kao na primjer u izvođenju brana, zračnih luka te autocesta [1, 2]. Osnovna razlika između RCCP-a i običnog vibriranog betona (eng. *normal vibrated concrete* - NVC) sastoji se u vrijednostima zadane konzistencije [2]. Svježi valjani beton krući je od običnog vibriranog betona koji se koristi u izvođenju kolničkih konstrukcija [2, 3]. Upravo zbog te razlike u svojstvima svježeg valjanog i običnog vibriranog betona, mnogi postupci koji se primjenjuju za projektiranje mješavine vibriranog betona ne mogu se izravno koristiti u projektiranju mješavina valjanog betona [3]. Iako se u izradi valjanog betona koriste isti osnovni materijali kao i u proizvodnji NVC-a, valjani beton odlikuje se većim obujmom agregata te nižim udjelom veziva i vode, pa stoga i manjim obujmom cementne paste [4-7]. Udio agregata u ukupnom obujmu RCCP-a obično varira od 75 do 85 %, a u NVC-u od 60 do 75 % [8, 9]. Agregat korišten u valjanom betonu razlikuje se od agregata u NVC-u po granulometrijskom sastavu [3]. U NVC-u se obično koriste kemijski dodaci [7]. S druge strane, Delatte [10] navodi da se u RCCP-u dodaci, s izuzetkom usporivača, dosta rijetko koriste. Hidratacija cementa znatno utječe na mehanička svojstva NVC-a. Slično je i kod RCCP-a, samo što na njega bitno utječe i razina zbijanja [11]. U studiji [12] navodi se da 3 postotno smanjenje zbijenosti RCCP-a dovodi do smanjenja tlačne čvrstoće od gotovo 30 %, što dovodi do smanjenja trajnosti betona. Raspoređenost cementne paste kod RCCP nije tako homogena kao kod NVC-a. Ipak, tlačna čvrstoća RCCP-a usporediva je s tlačnom čvrstoćom NVC-a [2, 3, 12]. Modul elastičnosti RCCP-a sličan je ili je nešto viši od modula elastičnosti NVC-a kada mješavine sadrže otprilike iste količine cementa [13]. Rezultati ispitivanja pokazuju da su vrijednosti tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i čvrstoće na zamor RCCP-a vrlo slične odgovarajućim vrijednostima običnog vibriranog betona [14]. Pregledom literature utvrđeno je da postojeći podaci o razlikama između NVC-a i RCCP-a nisu dostatni za izvođenje valjanih zaključaka. U većini prethodnih studija istraživači su se

uglavnom bavili kvalitativnim usporednim analizama RCCP-a i NVC-a. Zbog takvog stanja, u ovom se radu daje opsežna numerička usporedba NVC-a i RCCP-a. U tom se smislu istražuju razlike između NVC-a i RCCP-a s naglaskom na svojstva svježeg betona, mehanička svojstva, trajnost i toplinska svojstva. Osim toga, za ocjenu mikrostrukture uzoraka primjenjuje se i analiza pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa s emisijom polja.

2. Eksperimentalni program

2.1. Materijali

2.1.1. Cement

Kao cement korišten je obični portlandski cement (OPC) koji udovoljava zahtjevima prema MS522, prvi dio iz 2003. godine, a tlačna čvrstoća mu iznosi 48 MPa. Specifična težina korištenog cementa iznosi 3,14, a specifična površina je 3510 cm²/g. Kemijska svojstva OPC-a prikazana su u tablici 1.

2.1.2. Leteći pepeo i mljevena granulirana zgura iz visokih peći

Svake se godine diljem svijeta generiraju milijuni tona letećeg pepela (eng. *Fly Ash* - FA). U Indiji se na primjer tijekom proizvodnje dobiva 80 milijuna tona letećeg pepela godišnje, a u praksi se iskoristi jedva 10 % od te količine. Drugim riječima, većina letećeg pepela završava na odlagalištima [15, 16]. Primjena letećeg pepela u betonu ekonomski je prihvatljiva, a ujedno se tako i poboljšavaju svojstva betona, i onoga u svježem i onoga u očvrnulom stanju [6]. Zbog svojih se pucolanskih svojstava leteći pepeo upotrebljava kao dodatak cementu i betonu [17]. Mljevena granulirana zgura iz visokih peći (eng. *Ground Granulated Blast-Furnace Slag* - GGBFS) mineralni je dodatak koji se dobiva kao nusproizvod u proizvodnji sirovog željeza u visokim pećima, a derivat je minerala sadržanih u željeznoj rudači, modificiranom pepelu i koksu iz ljevaonica. Uglavnom se sastoji od kalcijevog aluminata – silikata, a vrlo je važan sastojak u proizvodnji hidrauličnih veziva [18]. Kemijska svojstva FA i GGBFS-a, koji su korišteni u ovom istraživanju prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav i gubitak žarenjem (LOI) za OPC, FA i GGBFS [%]

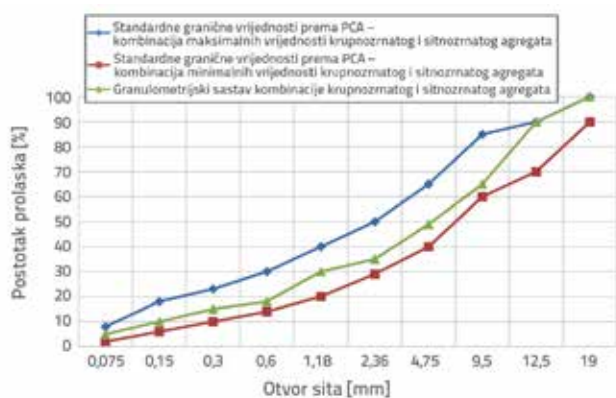
Kemijski sastav	OPC	FA	GGBFS
CaO	63,40	1,00	49,76
SiO ₂	19,80	64,60	29,35
Al ₂ O ₃	5,10	20,9	11,72
Fe ₂ O ₃	3,10	4,00	0,52
MgO	2,50	0,66	4,20
SO ₃	2,40	0,30	2,09
K ₂ O	1,00	1,20	0,46
Na ₂ O	0,19	0,32	-
LOI	1,80	5,10	-

2.1.3. Superplastifikator

Korišten je superplastifikator koji udovoljava zahtjevima iz normi EN 934-2 i BS EN 934-2. Radi se o izuzetno djelotvornom tekućem superplastifikatoru za proizvodnju tekućeg betona kojim se povećavaju vrijednosti granične i rane čvrstoće betona. U ovom se istraživanju upotrebljava superplastifikator modificiran polikarboksilatom i to u količini od 1,5 % od ukupne mase cementa.

2.1.4. Agregat

U betonskoj je mješavini korišten lokalni pijesak iz rudnika. Modul finoće pijeska iznosio je 2,9, a gustoća u zasićenom površinski suhom stanju iznosila je 2,55. Apsorpcija pijeska nakon 24 sata iznosila je 1,5 %. Što se tiče krupnozrnatog agregata, maksimalna nominalna veličina zrna iznosila je 12,5 mm, gustoća u zasićenom površinski suhom stanju iznosila je 2,62, a apsorpcija tog agregata iznosila je 0,67 %. Granulometrijske krivulje kombinacije krupnozrnatog i sitnozrnatog agregata u skladu su sa standardnim rasponima *Saveza za portlandski cement* (eng. *Portland Cement Association - PCA*) kao što je to prikazano na slici 1.



Slika 1. Granulometrijska analiza krupnozrnatog i sitnozrnatog agregata i usporedba sa standardnim graničnim vrijednostima *Saveza za portlandski cement* (PCA)

Tablica 2. Prikaz udjela u mješavinama

Vrsta mješavine	Cement [kg/m ³]	FA* [kg/m ³]	GGBFS* [kg/m ³]	Vodovezivni omjer	Agregat [kg/m ³]		Voda [kg/m ³]	Superplastifikator [kg/m ³]
					Krupnozrnati agregat	Sitnozrnati agregat		
NVC1	329	50	0	0,42	917	873	159	4,94**
NVC2		0	50					4,94**
RCCP1	50	0	0					
RCCP2	0	50	0					

* Udio letećeg pepela i mljevene granulirane zgure iz visokih peći u mješavinama RCCP računa se u odnosu na ukupnu masu cementa
 ** Udio superplastifikatora u mješavinama RCCP računa se u odnosu na ukupnu masu cementa

2.2. Udjeli u mješavini i postupak miješanja

U ovom se istraživanju za obje mješavine (RCCP i NVC) upotrebljava 15 % portlandskog cementa (329 kg/m³) na masu suhih komponenti u mješavinama.

Raspon udjela cementnih materijala u RCCP-u obično varira od 250 do 350 kg/m³ [2, 3]. Izrađene su dvije mješavine RCCP-a s istim udjelom cementa, jedna s dodatkom letećeg pepela (FA) a druga s dodatkom mljevene granulirane zgure iz visokih peći (GGBFS). Nakon toga je mješavini RCCP dodano 1,5 % superplastifikatora kako bi se dobile mješavine NVC-a odgovarajuće konzistencije (vrijednosti slijeganja). FA i GGBFS često se koriste kao alternativni materijali (SCM) za postizanje pucolanske reakcije u betonu. Korištenje FA u RCCP-u djelotvorno je rješenje za dobivanje sitnih čestica potrebnih za postizanje veće gustoće pakiranja [19]. FA i GGBFS obično sudjeluju s 25 % tj. 30 % u ukupnom volumenu cementnog materijala [2]. Također je utvrđeno da se dodavanjem GGBFS-a mješavini RCCP postiže manja poroznost te niža vrijednost upijanja i propusnosti [20]. Sažeti prikaz udjela sastojaka u svim mješavinama daje se u tablici 2. U toj tablici oznakama NVC1 i NVC2 obilježen je običan vibrirani beton s dodatkom FA tj. GGBFS-a, a oznakama RCCP1 i RCCP2 obilježen je valjani beton s dodatkom FA tj. GGBFS-a. Vodovezivni (w/b) omjer iznosi 0,42 za sve mješavine. Kao primjer se daju dva izvedena projekta na kojima je korišten RCCP: "Luke Tacoma – intermodalno postrojenje" i "Atlanta: Bankina od RCCP-a". Na prvom je projektu korišteno 270 kg/m³ cementa i 60 kg/m³ FA uz vodovezivni omjer od 0,47, dok je na drugom korišteno 300 kg/m³ cementa uz vodovezivni omjer od 0,53 [2]. Autori Atis i dr. [21] spominju RCCP koji sadrži 340 kg/m³ cementa te 60 kg/m³ FA, uz vodovezivni omjer od 0,41, dok je tlačna čvrstoća nakon 28 dana iznosila 63 MPa.

Svježa mješavina RCCP ugrađena je u cilindrične kalupe gdje je provedeno zbijanje pomoću električnog vibracijskog čekića prema normi ASTM C 1435 [22]. Osim toga, za ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje korišteni su kalupi oblika prizme. Uzorci ugrađeni u kalupe oblika prizme pripremljeni su pomoću električnog vibracijskog čekića s osovinom i četvrtastom pločom. Uzorci ugrađeni u kalupe oblika prizme ugrađeni su u tri

sloja pri čemu je svaki sloj zbijan sve do pojave morta na gornjoj površini. Mješavine RCCP u ovom istraživanju projektirane su prema konceptu zbijanja u skladu s normom ASTM D1557.

2.3. Metode ispitivanja

U okviru programa laboratorijskih ispitivanja definirana je obradivost, čvrstoća, krutost, trajnost i mikrostruktura mješavina RCCP. Konzistencija mješavina RCCP ispitana je pomoću modificiranog Vebe postupka, a obradivost uzoraka NVC ispitana je pomoću metode slijeganja. Svojstva očvrslulog betona izmjerena su određivanjem tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće pri cijepanju te vlačne čvrstoće pri savijanju nakon 7 i 28 dana njegovanja. Krutost betona izmjerena je ispitivanjem statičkog modula elastičnosti te ispitivanjem brzine ultrazvučnih valova (UPV). Vrijednosti upijanja (početne i konačne) i poroznosti betona ispitane su u svrhu određivanja trajnosti. Mikrostruktura je analizirana pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa s emisijom polja (FESEM).

2.3.1. Konzistencija i obradivost

Konzistencija običnog betona određena je ispitujući slijeganje prema normi ASTM C143. Za mjerenje konzistencije RCCP-a korišten je Vebe postupak prema ASTM C1170 [23], jer je RCCP beton kod kojeg nema slijeganja. Značajna svojstva betona s nultim slijeganjem su stišljivost, kohezija i sklonost prema segregaciji [24].

2.3.2. Kapilarno upijanje

Ispitivanje kapilarnog upijanja prema normi ASTM C642 [25] provedeno je na cilindričnim uzorcima dimenzija 100 x 200 mm. Zasićeni površinski suhi (SSD) uzorci sušeni su 24 sata u sušnici pri temperaturi od 105 ± 5 . Zatim je zabilježena vrijednost težine u suhom stanju (A). Nakon toga su uzorci njegovani u vodi pri temperaturi od 20°C sve do postizanja konstantne težine (B). Za određivanje upijanja nakon 30 min (početno upijanje) te nakon 72 sata (konačno upijanje), kada je razlika između dva uzastopna mjerenja bila gotovo zanemariva, korištena je izraz (1):

$$\text{Apsorpcija vode [\%]} = \left[\frac{B - A}{A} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

2.3.3. Svojstva čvrstoće

Ispitivanja tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće pri cijepanju provedena su prema normama ASTM C39 i ASTM C496 [26]. Cilindrični uzorci promjera 100 mm i visine 200 mm ispitani su nakon 7 i 28 dana njegovanja. Vlačna čvrstoća pri savijanju ispitana je na uzorcima oblika prizme, promjera 100 mm, visine 100 mm i dužine 500 mm, u skladu s normom ASTM C78 [27].

2.3.4. Poroznost

RILEM (1984) [28] preporučuje metodu ispitivanja koja uključuje isparavanje zraka iz uzoraka koji se suše u sušnici. Prema toj metodi, nakon isparavanja zraka, pod vakuumom se popunjavaju pore kako bi se postigla potpuna zasićenost. Ovu metodu predlažu i mnogi drugi istraživači [29, 30].

2.3.5. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa

Ispitivanje brzine prolaska ultrazvučnih valova (UPV) nerazorna je metoda ispitivanja kojom se provjerava kvaliteta, homogenost i tlačna čvrstoća betona [31, 32]. Ultrazvučna se mjerenja provode na dva načina, prema [33]: a) izravnim prijenosom i b) prostiranjem po površini.

U ovom je radu usvojen postupak izravnog prijenosa. Ispitivanje UPV provedeno je na kockama dimenzija 100 mm prema normi BIS 13,311 (Prvi dio)-1992. U ovom je ispitivanju frekvencija pretvornika iznosila 54 kHz. Zabilježeno je vrijeme prolaza impulsa kroz betonski uzorak, nakon čega je pomoću izraza (2) izmjerena brzina:

$$V = \frac{L}{T} \quad (2)$$

gdje je:

V - brzina impulsa [m/s]

L - dužina puta [m]

T - efektivno vrijeme [s].

2.3.6. Ispitivanje modula elastičnosti

Ispitivanje statičkog modula elastičnosti provedeno je u skladu s normom ASTM C469 [34]. Cilindrični uzorci promjera 150 mm i visine 300 mm stavljeni su u uređaj za tlačna ispitivanja gdje su opterećivani do sloma. U izračunu deformacija, očitavanja su podijeljena po dužini očitavanja, dok je kod mjerenja naprezanja nanoseno opterećenje podijeljeno s površina poprečnog presjeka uzoraka. Za izračunavanje modula elastičnosti, deformacije pri raznim opterećenjima grafički su prikazane zajedno s naprezanima. U krivuljama naprezanja i deformacija, modul elastičnosti određen je na temelju kosine početnog tangentnog modula. Za svako su ispitivanje pripremljena tri uzorka oblika cilindra. Završne površine uzoraka izbrušene su kako bi se osigurala jednolika raspoređenost opterećenja po površini uzorka.

2.3.7. Ispitivanje pretražnim elektronskim mikroskopom s emisijom polja (FESEM)

Elektronski se mikroskop može koristiti kao sredstvo za dijagnozu nanopukotina i mikropukotina betona [35]. FESEM je napredan mikroskop koji omogućuje veća povećanja i promatranje detaljnih obilježja pri nižoj voltaži nego što je to slučaj kod tipičnog pretražnog elektronskog mikroskopa

(SEM) [36]. U ovom je radu ispitivanje FESEM primijenjeno za otkrivanje zahvaćenih pora i "gnijezda" u uzorcima RCCP-a i NVC-a.

2.3.8. Ispitivanje toplinske provodljivosti

Ispitivanje toplinske provodljivosti provedeno je na cilindričnim uzorcima (100 mm x 200 mm) nakon 28 dana. Uzorci su sušeni 24 sata u sušnici pri temperaturi od $100 \pm 5^\circ\text{C}$ kako bi se uklonila unutarnja vlaga. U ispitivanju je korišten analizator KD2-PRO s igličastim senzorom tipa TR1. Senzor TR1 (promjera 2,4 mm i dužine 100 mm) može mjeriti toplinsku provodljivost u rasponu od 0,1 W/mK do 4 W/mK. U njegovane uzorke umetnuta je probna iglica kako bi se pripremio otvor koji odgovara veličini senzora TR1. Relativno duga vremena očitavanja senzora (10-minutno očitavanje i 15-minutni interval) doprinose smanjenju pogreške uzrokovane velikim promjerom iglice. Kontakt između iglice i uzorka osiguran je unošenjem toplinske masti u otvor (slika 2.). Analizator KD2-PRO koristi se tako da se iglica grije neko određeno vrijeme te se prati temperatura u postupku grijanja i hlađenja. Za vrijeme ispitivanja, okolna temperatura treba biti konstantna kako bi mjerenje bilo što preciznije. Osim toga, površina uzoraka umata se u plastičnu vrećicu kako bi se još više smanjio utjecaj okolne temperature. Toplinska provodljivost može se izračunati pomoću izraza (3):

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

gdje je Q protok topline (W), K je toplinska provodljivost (W/mK), A je površina do smjera x (m^2), ∂T je razlika u temperaturi ($^\circ\text{K}$), a ∂x je udaljenost (m).

3. Rezultati i rasprava

3.1. Svojstva svježeg betona

Rezultati ispitivanja svojstava u svježem stanju prikazana su u tablici 1. Vebe vrijeme za RCCP variralo je od 26 do 29 sekundi. Prema normi ACI 325, Vebe vrijeme ograničeno je na 30-40 sekundi za betonsku mješavinu RCCP. Površinska tekstura RCCP-a u vrijeme provođenja Vebe postupka prikazana je na slici 3. Mješavine RCCP odlikuju se dostatnom obradivošću, što je ključno za lagano zbijanje RCCP-a, za



Slika 2. a) Pripremanje otvora za postavljanje senzora TR1; b) Mjerenje toplinske provodljivosti pomoću uređaja KD2-PRO



Slika 3. a) Površinska tekstura RCCP1 tijekom Vebe postupka; b) Površinska tekstura RCCP2 tijekom Vebe postupka

postizanje ravnomjerne debljine slojeva, za povezivanje s prethodno zbijenim slojem te za podupiranje opreme za zbijanje [15].

Tablica 3. Rezultati ispitivanja svojstava u svježem stanju NVC i RCCP

Mješavina	Vebe vrijeme [s]	Slijeganje [mm]	Gustoća u osušenom stanju [kg/m^3]
NVC1	N/A	239	2287
NVC2	N/A	223	2308
RCCP1	26	0	2339
RCCP2	29	0	2374

Za mješavinu NVC postiže se visoka razina obradivosti uz slijeganje od 200 do 240 mm. Vizualnim pregledom utvrđeno je da niti u jednoj smjesi ne dolazi do segregacije niti do izdvajanja vode tijekom miješanja, ugrađivanja i zbijanja. Pokus slijeganja mješavina NVC prikazan je na slici 4. Vrijednosti gustoće u osušenom stanju uzoraka mješavina RCCP i NVC varirale su od 2339 do 2374 kg/m^3 tj. od 2287 do 2308 kg/m^3 . Općenito uzevši, gustoća mješavina RCCP varirala je od 2340 do 2510 kg/m^3 [10]. Može se zaključiti da se zbijanjem pomoću vibracijskog čekića dobiva viša gustoća mješavine RCCP nego što je to slučaj



Slika 4. a) Pokus slijeganja za NVC1; b) Pokus slijeganja za NVC2

na običnom vibracijskom stolu koji se koristi za NVC. Teško zbijanje koje se provodi u slučaju smjese RCCP rezultira gušćom strukturom u usporedbi sa strukturom betona koji se izrađuje tradicionalnim postupkom vibriranja [3]. Kada se mješavini doda GGBFS, smanjuje se slijeganje mješavine NVC, a povećava Vebe vrijeme kod RCCP-a. To znači da se dodavanjem GGBFS-a smanjuje obradivost i RCCP-a i NVC-a.

3.2. Tlačna čvrstoća

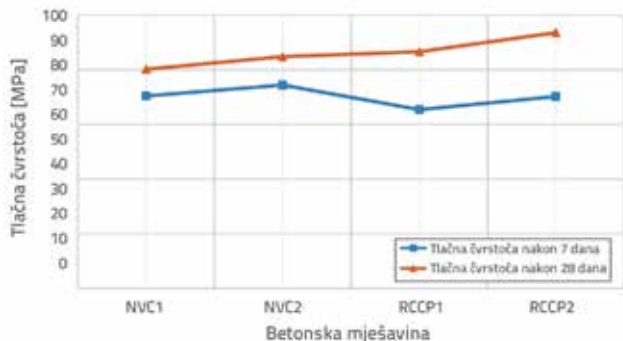
Rezultati tlačne čvrstoće ispitnih mješavina prikazani su na slici 5. Standardna devijacija rezultata čvrstoće izmjerene nakon 7 i 28 dana varira od 2 do 6 %. Tlačna čvrstoća mješavine NVC1 nakon 7 i 28 dana iznosi 35,2 tj. 40,1 MPa, a ista čvrstoća za mješavinu NVC2 iznosi 37,2 MPa tj. 42,4 MPa. Međutim, u odnosu na uzorke NVC1 i NVC2, tlačna čvrstoća mješavina RCCP1 i RCCP2 nakon 7 dana manja je za 7 tj. 6 %, dok je nakon 28 dana veća za 8 tj. 10 %. Tlačna čvrstoća RCCP-a usporediva je s tlačnom čvrstoćom NVC-a pa tako uglavnom varira od 28 do 41 MPa. Na nekim je projektima ipak zabilježena tlačna čvrstoća veća od 48 MPa [2].

Početno povećanje tlačne čvrstoće uzoraka NVC-a može se pripisati bržem vremenu vezivanja. Rana čvrstoća može se

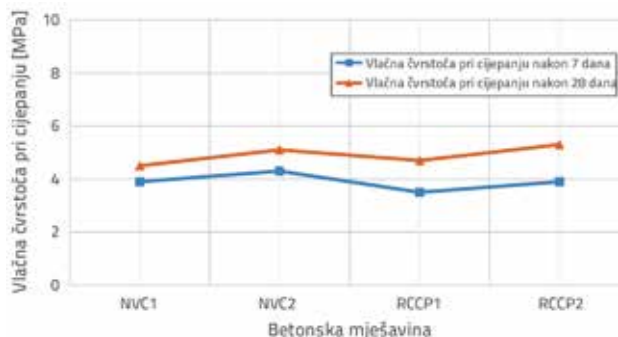
donekle ubrzati zbog boljeg raspoređivanja čestica cementa u vodi uslijed korištenja superplastifikatora [37]. U usporedbi s NVC-om, jasno se može uočiti da je tlačna čvrstoća RCCP-a veća za otprilike 8-10 % nakon 28 dana. Treba napomenuti da je razlika između tlačne čvrstoće NVC-a i RCCP-a gotovo konstantna kada se mješavinama dodaju FA i GGBFS. Može se stoga zaključiti da je tlačna čvrstoća RCCP-a u prosjeku veća za 9 % od tlačne čvrstoće NVC-a.

3.3. Vlačna čvrstoća pri cijepanju

Rezultati vlačne čvrstoće pri cijepanju nakon 7 i 28 dana prikazani su na slici 6. Standardna devijacija rezultata vlačne čvrstoće pri cijepanju varira od 3 do 7 %. Kod vlačne čvrstoće pri cijepanju uočavamo isti trend kao i kod tlačne čvrstoće, s najvišim vrijednostima uzoraka NVC nakon 7 dana. Sličan rast vlačne čvrstoće pri cijepanju bilježi se kod uzoraka RCCP nakon 28 dana. Vlačna čvrstoća pri cijepanju uzoraka RCCP1 i RCCP2 smanjuje se za otprilike 10,2 % i 9,3 % nakon 7 dana a povećava za otprilike 4,4 % i 3,9 % nakon 28 dana, u usporedbi s uzorcima NVC1 i NVC2. Ti rezultati pokazuju da je vlačna čvrstoća pri cijepanju nakon 28 dana veća kod RCCP-a za približno 4 % u usporedbi s mješavinom NVC. Osim toga, može se zaključiti



Slika 5. Tlačna čvrstoća mješavina NVC i RCCP

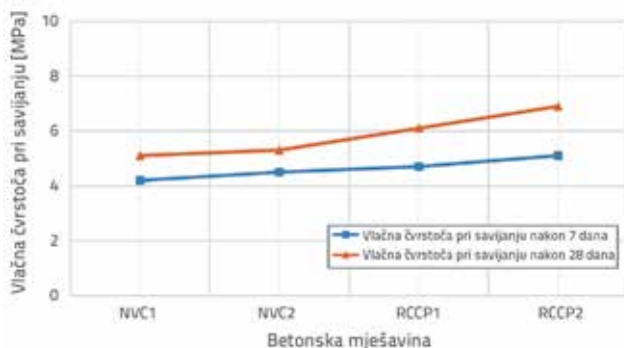


Slika 6. Vlačna čvrstoća pri cijepanju za mješavine NVC i RCCP

da je kod uzoraka RCCP-a povećanje tlačne čvrstoće veće od povećanja vlačne čvrstoće pri cijepanju, u odnosu na NVC. Općenito uzevši, vlačna čvrstoća pri cijepanju običnog betona iznosi otprilike 10 % tlačne čvrstoće [38]. Kod RCCP-a taj postotak varira od 7 do 13 % [37]. U ovom istraživanju isti je postotak iznosio otprilike 11,65 % za NVC, tj. 11,4 % za RCCP.

3.4. Vlačna čvrstoća pri savijanju

Rezultati dobiveni ispitivanjem vlačne čvrstoće pri savijanju prikazani su na slici 7. Standardna devijacija rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće pri savijanju varirala je od 3 do 9 %. Bez obzira na rezultate tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće pri cijepanju, vlačna čvrstoća pri savijanju mješavina RCCP povećala se za otprilike 11,9 % i 13,3 % nakon 7 dana, tj. za otprilike 19,6 % i 30,1 % nakon 28 dana u odnosu na rezultate dobivene za NVC1 i NVC2. Vlačna čvrstoća pri savijanju izravno je povezana s tlačnom čvrstoćom i gustoćom betonskih mješavina [3]. U dobro izrađenim mješavinama RCCP, agregat je gusto raspoređen te je stoga potrebno više energije za pojavu i širenje pukotina [3]. Vlačna čvrstoća pri savijanju konvencionalnog betona najčešće iznosi otprilike 15 % tlačne čvrstoće [38]. Isto tako, prema objavljenim radovima, odnos između vlačne čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće u RCCP-u iznosi otprilike 0,15, dok kod običnog betona taj odnos iznosi 0,10 tj. 0,12 [3]. U ovom istraživanju, vlačna čvrstoća pri savijanju iznosila je za NVC 12,6 % tj. za RCCP 14,4 % tlačne čvrstoće.



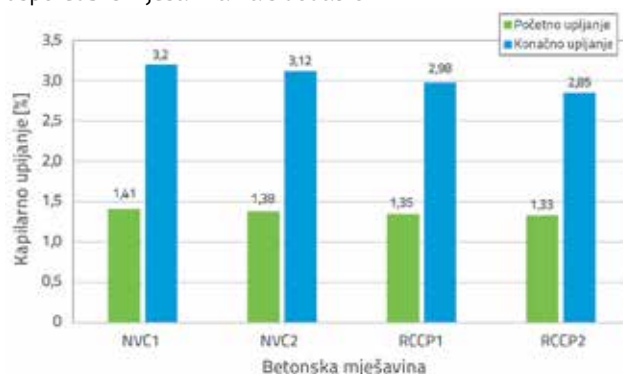
Slika 7. Vlačna čvrstoća pri savijanju za mješavine NVC i RCCP

3.5. Kapilarno upijanje

Općenito uzevši, smatra se da je kapilarno upijanje značajan faktor za kvantificiranje trajnosti cementnih kompozita [39]. U prethodnim se studijama navodi da smanjenje vodocementnog faktora i povećanje stupnja konsolidacije mogu dovesti do smanjenja upijanja [37]. Euro-međunarodni odbor za beton (Comité Euro-International du Béton, CEB) [40] podijelio je beton u dobar beton kod kojeg upijanje iznosi < 3 %, srednje dobar beton s upijanjem od 3-5 %, te loš beton kod kojeg upijanje iznosi > 5 %.

Rezultati početnog upijanja nakon 30 minuta te konačnog upijanja nakon 72 sata prikazani su na Slici 8. Kao što se na

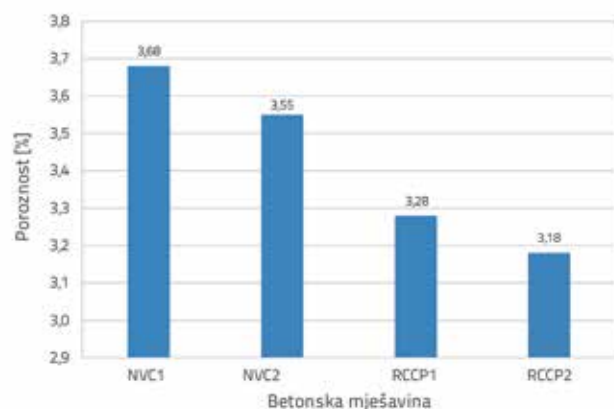
toj slici vidi, početno površinsko upijanje svih mješavina RCCP i NVC niža je od 3 %. Osim toga, kod mješavina RCCP1 i RCCP2 konačno upijanje također je niža od 3 %. S druge strane, ta vrijednost iznosi 3,2 % tj. 3,12 % za mješavinu NVC1 tj. NVC2. Ti rezultati pokazuju da je početno i konačno upijanje mješavina RCCP nešto niže od vrijednosti zabilježenih za mješavine NVC. Khayat i Libre (2014) [3] usporedili su upijanje mješavina RCCP s upijanjem mješavina konvencionalnog betona. Zaključili su da je upijanje mješavina RCCP niže od vrijednosti konvencionalnih betonskih mješavina. Konačno upijanje mješavina RCCP koje sadrže FA i GGBFS smanjena je za otprilike 7 % tj. 9 %. Potrebno je napomenuti da su početne i konačne vrijednosti upijanja mješavina NVC i RCCP s dodatkom GGBFS-a bile nešto niže u usporedbi s mješavinama s dodatkom FA.



Slika 8. Početno i konačno upijanje mješavina NVC i RCCP nakon 28 dana

3.6. Poroznost

Poroznost se može definirati kao ukupan obujam kapilarnih pora u pasti portlandskog cementa [37]. Istraživači [41] navode da između poroznosti i čvrstoće krutih tvari postoji uzajamno suprotan odnos. Poroznost i raspodjela veličina pora u materijalima na bazi cementa znatno utječu na njihova mehanička svojstva i trajnost [42]. Rezultati ispitivanja poroznosti za RCCP i NVC prikazani su na slici 9.

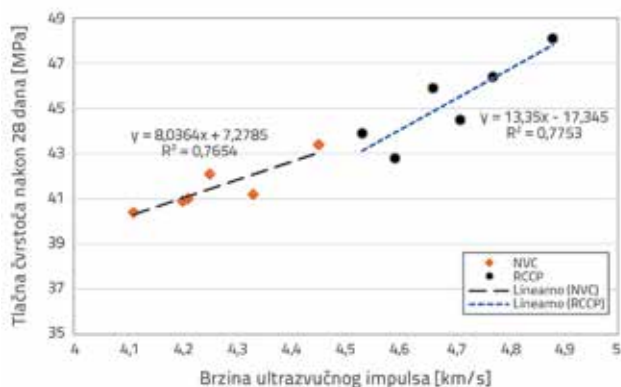


Slika 9. Rezultati ispitivanja poroznosti za mješavine NVC i RCCP nakon 28 dana

Tu se može vidjeti da su rezultati poroznosti u skladu s rezultatima kapilarnog upijanja. Postotak poroznosti za RCCP1 i RCCP2 smanjio se za otprilike 10,8 % tj. 10,4 % u usporedbi s vrijednostima NVC1 i NVC2. Uočeno je da zbijanje RCCP mješavine pod visokim pritiskom može dovesti do manje poroznosti cementne matrice.

3.7. Brzina ultrazvučnog impulsa

Prema kvalitativnoj klasifikaciji, raspon brzina ultrazvučnog impulsa (UPV) varira od 3 do 4,5 km/s. Za beton izvrsne kvalitete UPV treba iznositi više od 4,5 km/s, a za beton dobre kvalitete UPV treba biti između 3,5 do 4,5 km/s, tj. između 3,0 do 3,5 km/s za beton osrednje kvalitete. U ovom je istraživanju UPV iznosio otprilike 4,21 i 4,33 km/s za mješavinu NVC1 tj. NVC2. Stoga se može reći da mješavine NVC ulaze u kategoriju betona dobre kvalitete. S druge strane, za betone RCCP1 i RCCP2 UPV iznosi 4,61 tj. 4,77 pa se stoga oni mogu svrstati među betone izvrsne kvalitete. Izrazita veza između UPV-a i tlačne čvrstoće nakon 28 dana prikazana je na slici 10.



Slika 10. Veza između UPV-a i tlačne čvrstoće nakon 28 dana

3.8. Modul elastičnosti

Vrijednosti modula elastičnosti (eng. *modulus of elasticity* – E) za uzorke mješavina NVC i RCCP prikazane su u tablici 4. Kao što se vidi, modul elastičnosti varira između 27 i 29 GPa za mješavine NVC, tj. između 32 i 35 GPa za mješavine RCCP. Prosječna vrijednost modula elastičnosti za razne mješavine RCCP iznosi otprilike 30 GPa nakon 28 dana [12]. Vrijednost modula elastičnosti mješavina RCCP1 i RCCP2 veća je za 16,2 % tj. 19 % od vrijednosti modula elastičnosti za mješavine NVC1 i NVC2. Ti rezultati također pokazuju da trend modula elastičnosti odgovara trendu koji je uočen za tlačnu čvrstoću.

Na MOE betona utječe cementna pasta, vrsta agregata i interfacijalna prijelazna zona. Prema europskoj normi [44], vrijednost modula elastičnosti betona posebno ovisi o agregatu. Ovaj je rezultat u skladu s ranijim nalazima koje su objavili Yildirim i Sengul [45]. Ouellet [46] pokazuje da na elastični modul mješavine RCCP utječu svojstva dviju faza mješavine a to su hidratizirana cementna pasta i agregat. Stoga se može zaključiti da su veća

poroznost mješavina NVC i jako zbijanje mješavina RCCP vrlo vjerojatno razlog zbog kojeg NVC ima niži modul elastičnosti. Za ocjenu vrijednosti modula elastičnosti mješavina RCCP trebaju se koristiti moduli inicijalno razvijeni za konvencionalnog beton. U normi ACI 318 prikazan je izraz (4) za ocjenu modula elastičnosti konvencionalnog betona:

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c} \quad (4)$$

gdje je E_c modul elastičnosti [MPa], dok je f_c tlačna čvrstoća betona [MPa]

Izmjerene i procijenjene vrijednosti modula elastičnosti za uzorke NVC i RCCP usporedno su prikazane u tablici 4. Usporedba procjena iskazanih u normi ACI 318 i podataka dobivenih u ovom istraživanju pokazuje da su izmjerene vrijednosti NVC1 i NVC2 otprilike za 7,2 % i 6,9 % niže od procijenjenih vrijednosti, dok su izmjerene vrijednosti RCCP1 i RCCP2 otprilike za 3,8 % i 5,6 % više od procijenjenih vrijednosti.

Tablica 4. Izmjerene i procijenjene vrijednosti MOE za betone NVC i RCCP

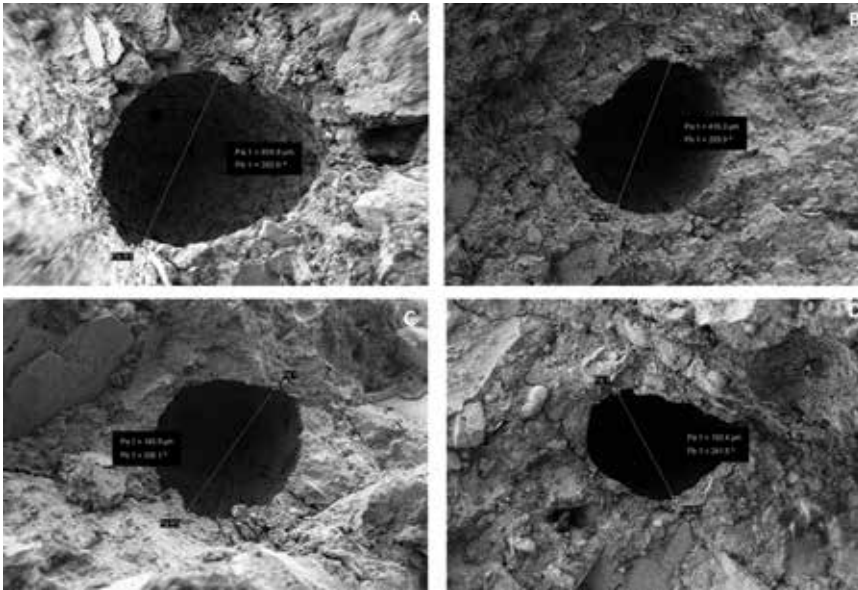
Mješavina	Izmjerena vrijednost modula elastičnosti [GPa]	Procjena vrijednosti E prema ACI 318 [GPa]
NVC1	27,9	29,9
NVC2	28,8	30,8
RCCP1	32,4	31,14
RCCP2	34,3	32,37

Iz tih se rezultata može zaključiti da uzorci NVC dosežu točku loma pri nižem naprežanju, bez znatnijeg omekšavanja pri deformaciji, u odnosu na uzorke RCCP.

3.9. Ispitivanje pretražnim elektronskim mikroskopom s emisijom polja

Mikrostrukture raznih uzoraka NVC i RCCP ispitane su pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa s emisijom polja (eng. *Field Emission Scanning Electron Microscope* – FESEM), kako je to prikazano na slici 11. Ispitivanje FESEM-om primijenjeno je za otkrivanje zahvaćene pore i "gnijezda" u uzorcima NVC i RCCP. Trajnost betona ovisi o njegovoj strukturi pora [47] a ostvaruje se kada struktura pora postane kompaktna i vrlo nepropusna [48]. Ispitivanjem FESEM-om utvrđeno je sljedeće:

- U uzorcima NVC i RCCP nisu uočena "gnijezda". Kod pojave velikog broja "gnijezda" može se formirati povezana mreža šupljina koje ozbiljno ugrožavaju trajnost betona i mogu nepovoljno utjecati na njegovu otpornost na smrzavanje i odmrzavanje [3]. Općenito uzevši, "gnijezda" su nepravilna i krupna. Ona se formiraju zbog neodgovarajućeg zbijanja betona u trenutku ugradnje.
- Maksimalna veličina pora uočenih u mješavini RCCP iznosila je oko 192 μm . Međutim, ta je veličina iznosila



Slika 11. Maksimalna veličina pora u pasti uzoraka NVC i RCCP. a) NVC1; b) NVC2; c) RCCP1; d) RCCP2

858 μm u mješavini NVC, što znači da je mikrostruktura paste poroznija a to dovodi do smanjenja čvrstoće. Manja količina zraka obično ostaje u cementnoj pasti tijekom miješanja betona. Takve zahvaćene pore obično su okruglog oblika, a veličina im može doseći i do 3 mm [37]. Zahvaćene pore negativno utječu na čvrstoću betona [49].

3.10. Ispitivanje toplinske provodljivosti

Toplinska svojstva kolničkog materijala imaju značajnu ulogu na formiranje urbanih toplinskih otoka (UHI) [50]. Pri uobičajenim temperaturama uporabe kolnika, prijenos topline u betonu uglavnom se odvija kondukcijom tj. provođenjem. Toplinska provodljivost je svojstvo materijala kojim se iskazuje njegova sposobnost provođenja topline [51, 52]. Prosječna toplinska provodljivost i gustoća uzoraka u osušenom stanju prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Prosječna toplinska provodljivost i gustoća uzoraka nakon 28 dana

Mješavina	Gustoća [kg/m ³]	Toplinska provodljivost [W/mK]
NVC1	2287	2,44
NVC2	2308	2,47
RCCP1	2339	2,52
RCCP2	2374	2,69

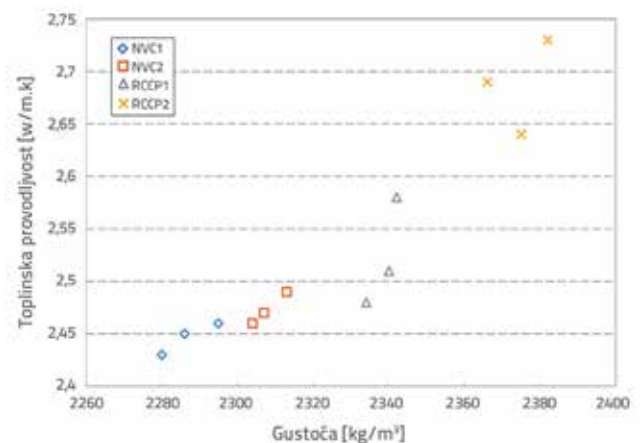
Sengul i dr. [53] izvješćuju o postojanju značajnog odnosa između gustoće betona i toplinske provodljivosti. Odnos između toplinske provodljivosti i gustoće uzoraka u osušenom stanju prikazan je na slici 12.

Prosječna toplinska provodljivost uzoraka NVC i RCCP iznosi otprilike 2,45 W/mK tj. 2,60 W/mK. Prema podacima iz literature, toplinska provodljivost lakog betona varira od 0,2 do 1,9 W/mK, dok kod betona normalne težine ista vrijednost doseže do 3,3 W/mK [54-57]. Rezultati pokazuju da vrijednost k za betone NVC i RCCP udovoljava uvjetima za beton normalne težine. RCCP ima veću sposobnost pronosa topline od NVC-a pa je stoga i temperatura na površini niža. Tome je razlog gušća struktura u odnosu na NVC. Vrijednost toplinske provodljivosti betona NVC i RCCP može se predvidjeti pomoću izraza (5) i (6):

$$K = 0,0015\rho - 0,9125 \quad (R^2 = 0,88) \quad (5)$$

$$K = 0,0045\rho - 8,0712 \quad (R^2 = 0,86) \quad (6)$$

gdje je K toplinska provodljivosti (W/mK) dok je ρ gustoća (kg/m³).



Slika 12. Odnos između toplinske provodljivosti i gustoće

4. Primjena RCCP-a

Rezultati pokazuju da je RCCP privlačna alternativa tradicionalnim cestovnim konstrukcijama i to zbog svojih povoljnijih mehaničkih svojstava, dugotrajnosti te gušće strukture. Zato bi idealni kandidati za primjenu RCCP-a mogle biti luke i teška industrijska postrojenja u kojima se zahtijeva dugotrajan kolnik visoke čvrstoće koji može podnositi teška opterećenja te u kojima izgled površine nije od primarne važnosti.

5. Zaključak

Sljedeći se zaključci mogu izvesti na temelju rezultata ovog eksperimentalnoga istraživanja:

- Gustoća betona RCCP u osušenom stanju veća je nakon 28 dana u odnosu na odgovarajuću vrijednost betona NVC. Razlog tome može biti jako zbijanje uzoraka RCCP. Može se stoga zaključiti da se zbijanjem pomoću vibracijskog čekića može postići viša vrijednost gustoće u odnosu na zbijanje na vibracijskom stolu.
- Vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 28 dana, vlačne čvrstoće pri cijepanju te vlačne čvrstoće pri savijanju veće su kod betona RCCP za 9 %, 4 % i 25 % od odgovarajućih vrijednosti uzoraka NVC.
- Konačno upijanje i poroznost uzoraka RCCP smanjila se za približno 8 % i 10,6 % u odnosu na NVC. To upućuje na povoljnija svojstva trajnosti RCCP-a u odnosu na NVC.
- Na usporednoj krivulji tlačne čvrstoća i UPV može se uočiti linearno uzlazni trend. Isto tako ustanovljen je i linearan odnos između UPV i gustoće betona. Više vrijednosti UPV zabilježene su za RCCP (4,61 i 4,77 km/s za RCCP1 i RCCP2) u odnosu na NVC (4,21 i 4,33 km/s za NVC1 i NVC2).
- Vrijednost MOE u prosjeku je iznosila oko 33,3 GPa za beton RCCP, tj. oko 28,3 GPa za beton NVC. Iz tog se podatka vidi da, u usporedbi s betonom NVC, uzorci betona RCCP mogu podnijeti veće naprezanje, pri čemu je i vrijednost defleksije manja.
- Na prikazima FESEM vidi se da maksimalna veličina šupljina iznosi 858 μm za beton NVC, tj. oko 192 μm za beton RCCP. I iz toga se može zaključiti da se vibracijskim čekićem postiže veća gustoća (beton RCCP) od gustoće određene na tradicionalnom vibracijskom stolu (beton NVC).
- Ispitivanjem toplinske provodljivosti utvrđeno je da beton RCCP brže prenosi toplinu i da se tim betonom, zbog više vrijednosti toplinske provodljivosti, postiže niža temperatura na površini betona.

LITERATURA

- [1] ACI Committee: Roller-Compacted Mass Concrete, ACI Committee 207.5R-99, (1999), pp. 1-47
- [2] Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C.V., Ceylan, H., Bektas, F.: Guide for roller-compacted concrete pavements, 2010.
- [3] Khayat, K.H., Libre, P.N.A.: Roller compacted concrete pavement: Field Evaluation and Mixture Optimization, NUTC R363 (2014).
- [4] Mardani-Aghabaglou, A., Andiç-Çakir, Ö., Ramyar, K.: Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method, *Cement and Concrete Composites*, 37 (2013), pp. 259-266
- [5] Hazaree, C., Ceylan, H., Wang, K.: Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 1, pp. 313-319
- [6] Atiş, C.D.: Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 6, pp. 1112-1121
- [7] Hazaree, C.V., Ceylan, H., Taylor, P., Gopalakrishnan, K., Wang, K., Bektas, F.: Use of Chemical Admixtures in Roller-Compacted Concrete for Pavements, 2013.
- [8] Alexander, M., Mindess, S.: *Aggregates in concrete*, CRC Press, (2010).
- [9] Burwell, B.O., Byers, M., Delatte, N., Edwards, J., Forrestel, S.: *Roller-Compacted Concrete Pavements as Exposed Wearing Surface*, 2018.
- [10] Delatte, N.J.: *Concrete pavement design, construction, and performance*, CRC Press, (2014).
- [11] Kalantari, B., Mafian, S., Huat, B.B.: *RC concrete versus conventional concrete in pavement*, 2009.
- [12] Gauthier, P., Marchand, J.: *Design and construction of roller compacted concrete pavements in Quebec*, 2005.
- [13] American Concrete Institute: *State-of-the-Art Report on Roller-Compacted Concrete Pavements*, Farmington Hills, MI, USA, pp. 2-31, 2001.
- [14] Naik, T.R., Chun, Y.M., Kraus, R.N., Singh, S.S., Pennock, L.L.C., Ramme, B.W.: *Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements*, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 6 (2001) 4, pp. 154-165
- [15] Yerramala, A., Babu, K.G.: *Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete*, *Cement and Concrete Composites*, 33 (2011) 10, pp. 1057-1062
- [16] Siddique, R.: *Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete*, *Cement and Concrete research*, 33 (2003) 4, pp. 539-547
- [17] Mardani Aghabaglou, A., Ramyar, K.: *Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method*, *Construction and Building Materials*, 38 (2013), pp. 356-364
- [18] Rao, S.K., Sravana, P., Rao, T.C.: *Relationship between ultrasonic pulse velocity and compressive strength for roller compacted concrete containing GGBS*, *International Journal of Applied Engineering Research*, 11 (2016) 3, pp. 2077-2084
- [19] Vahedifard, F., Nili, M., Meehan Christopher, L.: *Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement*, *Construction Building Materials*, 24 (2010), pp. 2528-2535
- [20] Aghaeipour, A., Madhkhan, M.: *Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability*, *Construction and Building Materials*, 141 (2017), pp. 533-541
- [21] Atiş, C.D., Sevim, U.K., Özcan, F., Bilim, C., Karahan, O., Tanrikulu, A.H., Ekşi, A.: *Strength properties of roller compacted concrete containing a non-standard high calcium fly ash*, *Materials Letters*, 58 (2004) 9, pp. 1446-1450

- [22] American Society for Testing and Materials: Standard practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer, Annual book of ASTM Standards, Philadelphia, USA, 2003.
- [23] American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table, ASTM International, USA, 2010.
- [24] Juvas, K.: Very dry precasting concrete, RILEM Proceedings, CHAPMAN & HALL, pp. 153-153, 2014.
- [25] American Society for Testing and Materials: C 642-06 standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, Annual book for ASTM Standards, 2006.
- [26] American Society for Testing and Materials: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, pp. 496, 2004.
- [27] American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for flexural strength of concrete, using simple beam with third-point loading, ASTM International, pp. 78, 2010.
- [28] RILEM-Recommendations: Absorption of water by immersion under vacuum, Materials and structures, in RILEM CPC 11.3, 101 (1984), pp. 393-394
- [29] Hashemi, M., Shafiq, P., Karim, M.R.B., Atis, C.D.: The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement, Construction and Building Materials, 169 (2018), pp. 553-566
- [30] Khan, M.: Novel method for measuring porosity of high strength concrete, in strength concrete, Proceedings of the 7th Saudi engineering conference, Riyadh, Saudi Arabia, 2004.
- [31] Jones, R., Façoaru, I.: Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method, Materials and Structures, 2 (1969) 4, pp. 275-284
- [32] Rao, S.K., Sravana, P., Rao, T.C.: Experimental studies in ultrasonic pulse velocity of roller compacted concrete containing GGBS and M-sand, Journal of Engineering and Applied Sciences, 11 (2016) 3.
- [33] Bureau of Indian Standards: Standard Code of Practice for Non Destructive Testing of Concrete: Part 1 - Ultrasonic Pulse Velocity, IS 13311, New Delhi, 1992.
- [34] American Society for Testing and Materials: C 469 Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, Annual Book of ASTM Standards, (1995), pp. 241-244
- [35] Balendran, R.V., Pang, H.W., Wen, H.X.: Use of scanning electron microscopy in concrete studies, Structural Survey, 16 (1998) 3, pp. 146-153
- [36] FIELD EMISSION SEM (FESEM), <http://www.mee-inc.com/laboratory-expertise/field-emission-sem-fesem/>, 20.10. 2015.
- [37] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.: Concrete: microstructure, properties, and materials, 2006.
- [38] Li, G.: The effect of moisture content on the tensile strength properties of concrete, Doctoral dissertation, University of Florida, 2004.
- [39] Castro, J., Bentz, D., Weiss, J.: Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete, Cement and Concrete Composites, 33 (2011) 8, pp. 805-813
- [40] CEB-FIP: Diagnosis and assessment of concrete structures – state of art report, CEB Bulletins, 192 (1989).
- [41] Tokyay, M.: Cement and Concrete Mineral Admixtures, CRC Press, (2016).
- [42] Khatib, J.M., Wright, L., Mangat, P.S.: Effect of desulphurised waste on long-term porosity and pore structure of blended cement pastes, Sustainable Environment Research, 26 (2016) 5, pp. 230-234
- [43] Neville, A.M.: Properties of Concrete, Longman, London, 1995.
- [44] Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1992-1-1:2008., 2004.
- [45] Yildirim, H., Sengul, O.: Modulus of elasticity of substandard and normal concretes, Construction Building Materials, 25 (2011) 4, pp. 1645-1652
- [46] Ouellet, E.: Formulation and study of the mechanical behaviour of the Roller Compacted Concrete, Master's theses, University of Laval, Canada, pp. 123- 172, 1998.
- [47] De Schutter, G., Audenaert, K.: Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration, Materials and Structures, 37 (2004) 9, pp. 591-596
- [48] Kolyvas, C.: Curing of concrete, Master Thesis, Delft University of Technology, 2007.
- [49] Mehta, P.K.: Concrete - structure, properties and materials, Prentice-hall, USA, 1986.
- [50] Mirzanamadi, R., Johansson, P., Grammatikos, S.A.: Thermal properties of asphalt concrete: A numerical and experimental study, Construction and Building Materials, 158 (2018), pp. 774-785
- [51] Tong, X.C.: Characterization Methodologies of Thermal Management Materials, Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging, (2011), pp. 59-129
- [52] Zhang, W.: Mesoscale model for thermal conductivity of concrete, Construction and Building Materials, 98 (2015), pp. 8-16
- [53] Sengul, O.: Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete, Energy and Buildings, 43 (2011) 2, pp. 671-676
- [54] Newman, J. Owens, P.: Properties of lightweight concrete, 2003.
- [55] Real, S.: Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings, Construction and Building Materials, 121 (2016), pp. 460-470
- [56] Holm, T.A., Bremner, T.W.: State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, 2000.
- [57] Yun, T.S.: Evaluation of thermal conductivity for thermally insulated concretes, Energy and Buildings, 61 (2013), pp.125-132.