

Svojstva samozbijajućeg betona s velikim udjelom letećeg pepela

Marijan Skazlić, Ružica Rosković, Ivana Banjad Pečur

Ključne riječi

samozbijajući beton, leteći pepeo, mehanička svojstva, ispitivanje, projektiranje sastava, trajnost, tlačna čvrstoća

Key words

self-compacting concrete, fly ash, mechanical properties, testing, composition design, durability, compressive strength

Mots clés

béton auto-compactant, cendre volante, propriétés mécaniques, essai, étude de la composition, durabilité, résistance à la compression

Ключевые слова

самосбивной бетон, летучая зола, механические свойства, испытание, проектирование состава, долговечность, прочность на сжатие

Schlüsselworte

selbstverdichtender Beton, Flugasche, mechanische Eigenschaften, Untersuchungen, Entwurf der Zusammensetzung, Dauerhaftigkeit, Druckfestigkeit

M. Skazlić, R. Rosković, I. Banjad Pečur

Izvorni znanstveni rad

Svojstva samozbijajućeg betona s velikim udjelom letećeg pepela

Opisuje se samozbijajući beton kao nova vrsta betona koja ne zahtijeva zbijanje pri ugradnji. U radu su prikazana eksperimentalna ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona s dodatkom letećeg pepela (30-50 % mase cementa). Utvrđeno je da povećanje količine letećeg pepela utječe na poboljšanje svojstava trajnosti i na smanjenje tlačne čvrstoće. Analizom rezultata pokazano je da, u slučaju istog vodovezivnog omjera, samozbijajući beton ima bolja svojstva trajnosti od običnog betona.

M. Skazlić, R. Rosković, I. Banjad Pečur

Original scientific paper

Properties of self-compacting concrete with high fly-ash content

The new self-compacting concrete, which requires no compaction during placement, is described. The experimental study of properties of the self-compacting concrete to which the fly ash is added (30-50 percent of the cement mass) is presented. It was determined that the increase in the fly-ash content improves durability and reduces compressive strength. The analysis of results revealed that, in case of similar water/cement ratios, the self-compacting concrete has better durability properties when compared to ordinary concrete.

M. Skazlić, R. Rosković, I. Banjad Pečur

Ouvrage scientifique original

Propriétés du béton auto-compactant à dosage élevé de cendre volante

Le nouveau ciment auto-compactant, ne nécessitant aucun compactage au cours de la mise en œuvre, est décrit. L'étude expérimentale des propriétés du ciment auto-compactant auquel des cendres volantes ont été ajoutées (30 à 50 pour cent de la masse de ciment) est présentée. Il a été déterminé que l'augmentation de la quantité de cendre volante améliore la durabilité et réduit la résistance à la compression. L'analyse des résultats montre que, pour le rapport eau/ciment similaire, la durabilité du béton auto-compactant est meilleure que celle du béton ordinaire.

M. Skazlić, R. Rosković, I. Banjad Pečur

Оригинальная научная работа

Свойства самосбивного бетона с большой долей летучей золы

В работе описывается самосбивной бетон как новый тип бетона, не требующий сбивку при укладке. В работе показаны экспериментальные испытания свойств самосбивного бетона с добавкой летучей золы (30-50 % массы цемента). Установлено, что увеличение количества летучей золы влияет на улучшение свойств долговечности и на снижение прочности на сжатие. Анализом результатов показано, что в случае одинакового водосвязующего отношения, самосбивной бетон имеет лучшие свойства в отношении долговечности по сравнению с обычным бетоном.

M. Skazlić, R. Rosković, I. Banjad Pečur

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons mit hohem Anteil von Flugasche

Man beschreibt den selbstverdichtenden Beton als neue Betonart die beim Einbau keine Verdichtung beansprucht. Im Artikel sind experimentale Untersuchungen der Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons mit Zuschlag von Flugasche (30 - 50 % der Zementmasse) dargestellt. Es wurde festgestellt dass die Steigerung der Menge der Flugasche die Besserung der Dauerhaftigkeit und die Minderung der Druckfestigkeit beeinflusst. Die Analyse der Ergebnisse zeigte, dass im Fall des gleichen Wasser-Bindemittelfaktors, der selbstverdichtende Beton höhere die Dauerhaftigkeit betreffende Eigenschaften hat als der gewöhnliche Beton.

Autori: Doc. dr. sc. **Marijan Skazlić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Ivana Banjad Pečur**, dipl. ing. građ., Sveučilišta u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za materijale; dr. sc. **Ružica Rosković**, dipl. ing. kem., Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Zavod za betonske i zidane konstrukcije, Zagreb

1 Uvod

Samozbijajući je beton (eng. *self compacting concrete*, SCC) otkriven krajem prošlog stoljeća u Japanu. Glavni razlog istraživanja, čiji je krajnji rezultat bio i dobivanje samozbijajućeg betona, jest pomanjkanje kvalitetne radne snage potrebne za ugradnju betona. Radna snaga, osim što je u rastućoj građevinskoj industriji sve deficitarnija, nerijetko pri ugradnji betona čini pogreške koje štetno utječu na kvalitetu betona, a osobito na trajnost.

Glavna karakteristika samozbijajućeg betona jest sposobnost njegove ugradnje bez potrebe za vibriranjem betona. Na taj se način smanjuje udio radne snage na gradilištu, omogućeno je brže građenje, olakšava se ugradnja betona te se eliminira buka koja se javlja zbog vibriranja. Dodatne su prednosti ovog betona omogućavanje ugradnje u složene geometrijske presjeka i konstrukcijske elemente s gustim rasporedom armature te mogućnost postizanja kvalitetne završne obrade površine betona (npr. za potrebe arhitektonskih betona). Zbog toga pojedini stručnjaci i znanstvenici u svojim radovima ističu samozbijajući beton kao jedno od najbitnijih otkrića u tehnologiji betona u posljednjih nekoliko desetljeća. Međutim, europske norme za proizvodnju betona i izvedbu betonskih konstrukcija (EN 206-1 i ENV 13670-1) još uvijek nisu specificirale ovaj beton [1-7].

Leteći je pepeo pucolanski dodatak cementu koji se dobiva kao sporedni proizvod u termoelektranama. Jedna od glavnih prednosti betona s letećim pepelom jest ekološka prihvatljivost zbog smanjenja emisije CO₂ [8]. Prethodnim istraživanjima utvrđeno je da je samozbijajući beton moguće dobiti uporabom veće količine letećeg pepela [9, 10]. Tlačna čvrstoća im se smanjuje s dodatkom veće količine letećeg pepela, a svojstva trajnosti i obradivost uglavnom se poboljšavaju [11-15]. Provedene analize mikrostrukture pokazuju da samozbijajući beton posjeduje manje defekata u strukturi od običnog betona [16]. Dodatak letećeg pepela pozitivno utječe na obradivost, pa se čak njegovim dodavanjem mogu dobiti i samozbijajući mikroarmirani betoni [17].

Glavni principi projektiranja sastava samozbijajućeg betona podrazumijevaju smanjivanje količine krupnog agregata i maksimalnog zrna agregata, optimizaciju količine pijeska i praškastih komponenata, manji vodo cementni omjer te primjenu kemijskih dodataka (najčešće superplastifikator i stabilizator mješavine). Do sada su razvijene brojne metode projektiranja sastava samozbijajućeg betona [18-21], a za sve je značajno da se dijele prema načinu postizanja samozbijajućih svojstava u tri osnovne kategorije:

- dodatkom punila
- dodatkom stabilizatora mješavine ili
- dodatkom i punila i stabilizatora mješavine.

Na temelju provedenih istraživanja, a u nedostatku europskih norma za samozbijajući beton, napravljene su europske preporuke za proizvodnju i uporabu ovog materijala [22, 23].

U tablici 1. su preporuke za projektiranje sastava samozbijajućeg betona.

Tablica 1. Preporuke za projektiranje sastava samozbijajućeg betona [1]

Pravilo projektiranja sastava	Kriterij
Udio krupnog agregata	< 50 %
Omjer vode i praškaste komponente	0,8 – 1,0
Ukupna količina praškaste komponente	400 – 600 kg/m ³
Omjer volumena pijeska i morta	> 40 %
Omjer volumena pijeska i paste	< 50 %
Omjer mase pijeska i krupnog agregata	> 50 %
Udio slobodne vode	< 200 l
Udio paste	> 40 % volumena

U radu je opisano eksperimentalno istraživanje mehaničkih i trajnosnih svojstava samozbijajućih betona s dodatkom letećeg pepela. Za pripremanje samozbijajućeg betona upotrijebljene su komponente sastava dostupne na hrvatskom tržištu. Na temelju dobivenih rezultata analizirana je primjenjivost postojećih metoda projektiranja sastava na samozbijajući beton s letećim pepelom. Analiziran je utjecaj letećeg pepela na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslulom stanju. Uspoređena su svojstva trajnosti između samozbijajućeg betona i običnog betona, u slučaju istog vodovezivnog omjera. Dobiveni rezultati pokazuju opravdanost uporabe letećeg pepela u samozbijajućem betonu te daju preporuke o najpovoljnijoj količini letećeg pepela u samozbijajućem betonu.

2 Eksperimentalni rad

2.1 Cilj i program istraživanja

Ciljevi su istraživanja sljedeći:

- eksperimentalnim istraživanjem dobiti samozbijajući beton s velikim udjelom letećeg pepela ($\geq 30\%$) koristeći se komponentama sastava dostupnih na hrvatskom tržištu
- analizirati primjenjivost postojećih preporuka za projektiranje sastava na samozbijajući beton s letećim pepelom
- utvrditi utjecaj letećeg pepela na obradivost samozbijajućeg betona

- odrediti utjecaj količine letećeg pepela na mehanička i trajnosna svojstva samozbijajućeg betona
- usporediti svojstva između običnog betona i samozbijajućeg betona, u slučaju istog vodovezivnog omjera i količine cementa.

2.2 Metode istraživanja

Na mješavinama su ispitana sljedeća svojstva u svježem stanju:

- gustoća (prema HRN EN 12350-6)
- sadržaj zraka (prema HRN EN 12350-7)
- metoda slump rasprostiranja (slika 1.)
- metoda L kutije (slika 1.)
- metoda V lijevka (slika 1.).



Slika 2. Metode ispitivanja plinopropusnosti, koeficijenta difuzije klorida i početnog površinskog upijanja



Slika 1. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju (L kutija, slump rasprostiranje i V lijevka)

Metodom *slump* rasprostiranja ponajprije se ocjenjuje svojstvo punjenja samozbijajućeg betona. Postupak se provodi tako da se na vlažnu površinu ploče postavi krnji stožac koji inače služi za mjerenje konzistencije betona slijeganjem.

Stožac se napuni samozbijajućim betonom, odigne se te se mjeri ukupni promjer koji beton zauzme rasprostiranjem i vrijeme potrebno da beton dostigne horizontalni promjer od 50 cm.

Metoda L kutije služi za definiranje svojstva prolaznosti samozbijajućeg betona. L kutija se sastoji od horizontalnog i vertikalnog dijela koji su odijeljeni pregradom i s 3 armaturne šipke.

Nakon što se samozbijajući beton ugradi u vertikalni dio kalupa, dignu se pregrada te beton prolazi između armaturnih šipki. Mjeri se razlika visina na početku i kraju horizontalnog dijela kalupa.

Metodom V lijevka sposobnost punjenja određuje se tako da se mjeri vrijeme potrebno da samozbijajući beton istječe iz V lijevka.

Za ispitivanje svojstava u očvrslom stanju upotrijebljene su sljedeće metode ispitivanja:

- tlačna čvrstoća (prema HRN EN 12390-3)
- plinopropusnost (prema EN 933-4, slika 2.)
- početno površinsko upijanje tzv. ISAT (prema BS 1881, 5. dio, slika 2.)
- koeficijent difuzije klorida (prema NT Build 492, slika 2.).

Eksperimentalni rad proveden je u laboratoriju Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

2.3 Sastavi betonskih mješavina

Istraživanje je provedeno na 5 betonskih mješavina. Sastavi betonskih mješavina prikazani su u tablici 2. Sve su mješavine imale isti vodovezivni omjer (0,50), količinu cementa i obradivost u svježem stanju (razred konzistencije slijeganjem S 5). Postizanje iste obradivosti u svježem stanju omogućeno je uporabom različitih količina superplastifikatora. Mješavine su se međusobno razlikovale po količini letećeg pepela (SCC 0, SCC 30, SCC 40, SCC 50), a komparativno je napravljena i mješavina običnog betona (oznaka B).

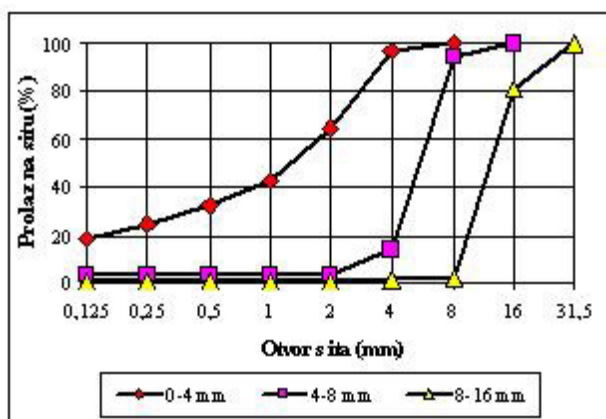
Za pripremanje samozbijajućeg betona uporabljene su komponente sastava dostupne na hrvatskom tržištu, a za koje je prethodnim ispitivanjima dokazana kompatibilnost komponenata i pogodnost za izradu samozbijajućeg betona [24, 25].

Upotrijebljen je cement CEM I 42,5 R. Granulometrijski sastav trofrakcijskog agregata od drobljenog vapnenca i filera prikazani su na slici 3. i u tablici 3.

Sastav i svojstva letećeg pepela dana su u tablici 4. Od kemijskih dodataka uporabljene su superplastifikator na bazi polikarboksilatnih etera i stabilizator mješavine. Stabilizator mješavine rabi se kod samozbijajućih betona za povećanje kohezivnosti te sprječavanje segregacije i izdvajanja vode.

Tablica 2. Sastav betonskih mješavina

Sastavne komponente (kg/m ³)	Oznaka betona				
	B	SCC 0	SCC 30	SCC 40	SCC 50
Cement	400	400	280	240	200
Leteći pepeo	-	-	120	160	200
Voda	200	200	200	200	200
Superplastifikator	0,8	4,0	4,0	3,4	5,2
Stabilizator mješavine	-	1,0	0,4	1,0	0,3
Filer	-	200	200	200	200
Agregat 0-4 mm	930	970	970	974	971
Agregat 4-8 mm	267	310	310	311	310
Agregat 8-16 mm	644	320	320	321	320
Vodocementni omjer	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Udio paste	712	920	920	920	922
Udio praškastih komponenata	512	716	716	717	719



Slika 3. Granulometrijski sastav frakcija agregata

Tablica 3. Granulometrijski sastav punila

Sito (mm)	0,063	0,09	0,125	0,25	0,5
Prolaz (%)	64	81	91	99	100

2.4 Način pripreme i njege uzoraka

Sve su mješavine pripravljene u laboratorijskoj miješalici obujma 50 litara. Kod mješavina samozbijajućeg betona nije upotrijebljen postupak vibriranja uzoraka, dok je komparativni obični beton (oznaka mješavine B) zbijan na vibrostolu frekvencije 150 Hz približno 20 sekundi.

Nakon ugradnje uzorci su raskalupljeni pri starosti od jednoga dana i njegovani do dana ispitivanja u vodi temperature od 20 ± 2 °C. Nakon toga su raskalupljeni i držani u vodi do starosti od 28 dana, kada su provedena ispitivanja mehaničkih i trajnosnih svojstava.

Tablica 4. Sastav i svojstva letećeg pepela

Svojstvo	Mjerna jedinica	Rezultat
Gubitak žarenjem	% mase	0,54
CaO	% mase	4,21
SiO ₂	% mase	51,87
Al ₂ O ₃	% mase	26,46
Fe ₂ O ₃	% mase	9,22
MgO	% mase	1,83
SO ₃	% mase	0,56
Na ₂ O	% mase	0,23
K ₂ O	% mase	1,14
Slobodni CaO	% mase	0,08
Reaktivni SiO ₂	% mase	31,07
Reaktivni CaO	% mase	3,72
Finoća mliva (Blaine)	cm ² /g	2850
Gustoća	kg/dm ³	2,30

3 Analiza rezultata ispitivanja

3.1 Primjenjivost preporučenih metoda za projektiranje sastava na samozbijajući beton s velikim udjelom letećeg pepela

Tablica 5. pokazuje usporedbu preporučenih parametara za projektiranje sastava samozbijajućeg betona s istim parametrima uporabljenim pri izradi samozbijajućeg betona s velikim udjelom letećeg pepela. Svi parametri sastava uveliko ovise i o sastavnim komponentama betona.

U radu je primijenjena metoda projektiranja sastava samozbijajućeg betona uporabom i punila i stabilizatora mješavine.

U ovom je slučaju u eksperimentalnom radu upotrijebljen agregat s frakcijama koje su imale veliku količinu nadzrna i podzrna agregata (> 10 %). Pokazalo se da volumen paste ima velik utjecaj na svojstvo tečenja i svojstvo punjenja betona. Zbog toga se i kod samozbijajućih betona s većim udjelom letećeg pepela preporučuje količina paste veća od 40 %, a što prvenstveno ovisi o agregatu. Omjer vode i praškastih komponenata je bitan parametar sastava, jer ukoliko samozbijajući beton ima dostatnu količinu praškastih komponenti i paste on ipak neće imati zahtijevano svojstvo tečenja ako nema i dostatnu količinu vode. Navedena količina vode osigurava svojstvo punjenja samozbijajućeg betona. Od drugih parametara sastava pokazalo se da je vrlo bitno da agregat ima veću količinu sitnog nego krupnog agregata.

Tablica 5. Usporedba parametara sastava samozbijajućeg betona s velikim udjelom letećeg pepela u odnosu na preporučene vrijednosti (crvena boja - ne zadovoljava, zelena boja - zadovoljava)

Parametar sastava	Preporuka	Oznaka samozbijajućeg betona			
		SCC 0	SCC 30	SCC 40	SCC 50
Praškaste komponente	400-600 kg	716	716	717	716
Krupni agregat	< 50 %	40	40	40	40
Voda/prašak	0.8 – 1.0	0,82	0,82	0,82	0,82
Pijesak/mort	> 40 %	43	43	43	43
Pijesak/pasta	< 50 %	71	71	71	71
Pijesak/agregat	> 50 %	60	60	60	60
Slobodna voda	< 200 l	200	200	200	200
Pasta	> 40 %	47,7	47,7	47,7	47,7

Može se zaključiti da u slučaju uporabe veće količine letećeg pepela kod samozbijajućeg betona ne vrijede nužno preporuke za ukupnu količinu praškastih komponenata i slobodne vode te omjer masa pijeska i paste. Parametri sastava koji se obvezatno moraju poštivati kod samozbijajućih betona s većim udjelom letećeg pepela su omjer mase vode i praškaste komponente, omjeri masa sitnog i krupnog agregata, omjer mase pijeska i morta te ukupna količina paste.

3.2 Utjecaj letećeg pepela na svojstvo obradivosti samozbijajućeg betona

U tablici 6. prikazani su rezultati ispitivanja svojstava betona u svježem stanju. Samozbijajući beton u svježem stanju mora imati sljedeća svojstva:

Tablica 6. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju

Metoda ispitivanja	Preporuka	Svojstvo	B	SCC 0	SCC 30	SCC 40	SCC 50
Slump rasprostiranje Abramsova stošca	650-800 mm	punjenje	220	650	655	660	700
Slump rasprostiranje $T_{50\text{ cm}}$	0,8-3,8 s	punjenje	-	1,6	2,5	2,4	2,3
L kutija	$h_2/h_1 = 0,8 - 1,0$	prolaz	-	0,8	0,8	0,8	0,81
V lijevak	5-14 s	punjenje	-	6,0	10,7	8,8	18,5
Sadržaj zraka	%	-	2,2	1,5	3,6	3,2	3,5
Gustoća	kg/dm ³	-	2,48	2,44	2,33	2,29	2,30

- svojstvo punjenja
- svojstvo prolaza
- otpornost na segregaciju [1, 6, 7].

Na temelju provedenoga eksperimentalnog rada može se reći da je moguće postići svojstva u svježem stanju kod samozbijajućeg betona s većim udjelom letećeg pepela.

Slika 4. prikazuje izgled samozbijajućeg betona nakon ispitivanja slump rasprostiranja. Na slici se vidi da su i zrna krupnog agregata pravilno raspoređena po uzorku, a posebno da su prisutna i na krajevima uzorka nakon obavljenog ispitivanja.

Na taj se način vidi da nije došlo do segregacije i izdvajanja vode.



Slika 4. Prikaz rasprostiranja samozbijajućeg betona (lijevo) i izgled krajeva uzorka prilikom ispitivanja rasprostiranja (desno)

Samozbijajući beton ima manju gustoću u svježem stanju od običnog betona. Dodatkom letećeg pepela u samozbijajući beton

gustoća se još više smanjuje zbog manje gustoće letećeg pepela u odnosu na cement.

Povećanje količine letećeg pepela u sastavu djeluje na poboljšavanje kohezivnosti među česticama samozbijajućeg betona, pa je potrebno dodavati manju količinu stabilizatora mješavine.

Zbog navedenog svojstva leteći pepeo može zamijeniti i udio punila u sastavu.

Sveukupno gledajući može se reći da dodatak letećeg pepela ima pozitivan utjecaj na svojstvo obradivosti samozbijajućeg betona. Međutim, tijekom pripremanja uzoraka uočene su određene poteškoće kod mješavine SCC 50, što se vidi i u rezultatu ispitivanja V lijevkom

koji nije u preporučenim granicama. Zbog toga se može reći da su sa stajališta svojstava u svježem stanju najpovoljnije 30 % i 40 % količine letećeg pepela u odnosu na masu cementa.

3.3 Utjecaj količine letećeg pepela na mehanička i trajnosna svojstva samozbijajućeg betona

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava u očvrslom stanju prikazani su u tablici 7. Dodatak letećeg pepela u samozbijajući beton utječe na smanjivanje tlačne čvrstoće betona pri starosti betona od 1, 7 i 28 dana. Samozbijajući beton s 30 % letećeg pepela ima nakon 28 dana 15 % manju tlačnu čvrstoću od samozbijajućega betona bez letećeg pepela. Betoni s 40 % i 50 % letećeg pepela imaju 27 % manju tlačnu čvrstoću nakon 28 dana. Slika 5. prikazuje razvoj tlačne čvrstoće tijekom vremena. Može se vidjeti da samozbijajući betoni bez obzira na količinu letećeg pepela imaju isti razvoj čvrstoće tijekom vremena. Razlog smanjenju tlačne čvrstoće samozbijajućih betona s letećim pepelom jest manja reaktivnost letećeg pepela u odnosu na zamijenjenu količinu cementa, a što rezultira sporijom hidratacijom i manjom tlačnom čvrstoćom. S obzirom da je tlačna čvrstoća jedino osnovno svojstvo betona, nameće se i potreba da se definiira najpovoljnija količina letećeg pepela. Pritom treba uzeti u obzir i namjenu samozbijajućeg betona. Npr. ako se samozbijajući beton rabi za predgotovljene nosače koji se prednapinju ili za očvršćivanja i saniranje dotrajalih armiranobetonskih konstrukcija, tada se ne preporučuje upotrebljavati samozbijajući beton s većim udjelom letećeg pepela. S druge strane, poželjna je veća količina letećeg pepela radi smanjenja topline hidratacije pri betoniranju masivnih betonskih elemenata.

Tablica 7. Rezultati mehaničkih svojstava u očvrslom stanju

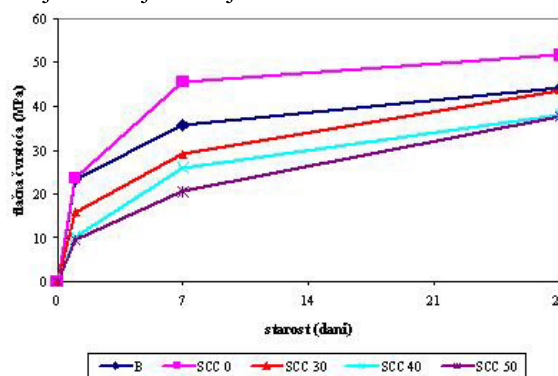
Ispitivano svojstvo	Mjerna jedinica	B	SCC 0	SCC 30	SCC 40	SCC 50
Tlačna čvrstoća nakon 1 dana	MPa	23,1	23,6	15,7	10,1	9,4
Tlačna čvrstoća nakon 7 dana	MPa	35,6	45,6	29,0	25,9	20,6
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana	MPa	44,1	51,7	43,8	38,0	37,6
Gustoća	kg/dm ³	2,41	2,29	2,21	2,15	2,13

Rezultati ispitivanja u očvrslom stanju pokazali su da dodatak letećeg pepela u samozbijajući beton djeluje na smanjivanje gustoće u očvrslom stanju.

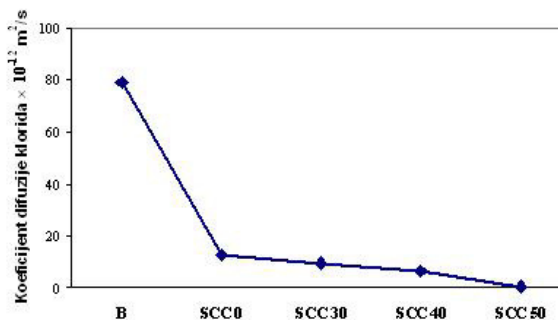
Rezultati ispitivanja trajnosnih svojstava prikazani su u tablici 8. i na slici 6. Vidljivo je da dodatak letećeg pepela u beton djeluje na poboljšanje koeficijenta plinopropusnosti i koeficijenta difuzije klorida. Promatrajući navedene rezultate, može se reći da dodatak letećeg pepela povoljno djeluje na progušćenje strukture cementnog kamena i na poboljšanje sučeljka cementnog kamena i agregata, a posljedica toga je i smanjena propusnost takvog betona.

Za razliku od toga, koeficijenti početnoga površinskog upijanja ne mijenjaju se znatnije kod samozbijajućeg betona s dodatkom letećeg pepela. Ovaj se rezultat ne podudara u potpunosti s prethodno navedenim tvrdnjama. U tijeku je nastavak istraživačkog rada u kojem se utvrđuje i udio pora različite veličine kod samozbijajućeg betona s letećim pepelom.

Razmatrajući utjecaj količine letećeg pepela na tlačnu čvrstoću i svojstva trajnosti samozbijajućeg betona može se reći da je najpovoljnija količina letećeg pepela u betonu 30 % u odnosu prema masi cementa. Pri ovoj količini letećeg pepela samozbijajući beton još uvijek nema znatno smanjenje tlačne čvrstoće, a uz istodobno poboljšana svojstva trajnosti.



Slika 5. Razvoj tlačne čvrstoće



Slika 6. Usporedba koeficijenata difuzije klorida

3.4 Usporedba svojstava između običnog betona i samozbijajućeg betona

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće prikazani u tablici 7. i na slici 5. pokazuju da obični beton ima manju tlačnu čvrstoću od samozbijajućeg betona, i to za 2 % na-

kon 1 dana, 28 % nakon 7 dana i 17 % nakon 28 dana. Bez obzira što su samozbijajući i obični beton imali isti vodovezivni omjer i količinu cementa, takvi su rezultati posljedica razlika u sastavu. Naime, samozbijajući beton ima veću količinu sitnih, praškastih čestica, a poznato je da tlačna čvrstoća raste s brojem kontakata među česticama. Kod samozbijajućeg se betona postiže i bolje pakiranje čestica što utječe na veću tlačnu čvrstoću. U odnosu na samozbijajući beton s letećim pepelom obični beton ima veće vrijednosti tlačne čvrstoće.

Rezultati ispitivanja svojstava trajnosti prikazani u tablici 8. i na slici 6. pokazuju da samozbijajući betoni imaju znatno manju propusnost od običnog betona. Posebno je interesantan dijagram na slici 7. iz koje se vidi da samozbijajući beton ima šest puta bolji koeficijent difuzije klorida od običnog betona. Dodatkom letećeg pepela u samozbijajući beton u količini od 30 %, 40 % i 50 % koeficijenti difuzije klorida u odnosu na obični beton poboljšavaju se za 8, 12 i 198 puta.

Tablica 8. Rezultati ispitivanja trajnosnih svojstava u očvrnulom stanju

Ispitivano svojstvo	Mjerna jedinica	B	SCC 0	SCC 30	SCC 40	SCC 50
Koeficijent plinopropusnosti	m ²	1,1·10 ⁻¹⁵	4,4·10 ⁻¹⁶	3,4·10 ⁻¹⁶	1,5·10 ⁻¹⁶	1,7·10 ⁻¹⁶
Koeficijent difuzije klorida	m ² /s	7,9·10 ⁻¹¹	1,3·10 ⁻¹¹	9,6·10 ⁻¹²	6,6·10 ⁻¹²	0,4·10 ⁻¹²
Koeficijent početnog površinskog upijanja (nakon 10 minuta)	ml/m ² /s	0,55	0,62	0,54	0,72	0,50
Koeficijent početnog površinskog upijanja (nakon 30 minuta)	ml/m ² /s	0,38	0,42	0,36	0,49	0,35

Rezultati ispitivanja trajnosnih svojstava pokazuju da pravilno projektiran, ugrađen i njegovan samozbijajući beton ima prednost pred običnim vibriranim betonom u agresivnim uvjetima okoline (npr. morski okoliš). Na taj je način pokazano da je samozbijajući beton bitno nepropusniji od običnoga vibriranog betona koji ima isti vodovezivni omjer i količinu cementa.

Razlog je takvim rezultatima kvalitetniji sučeljak cementnog kamena i agregata kod samozbijajućeg betona nego

kod običnog betona. Uporabom veće količine praškastih čestica kod samozbijajućeg betona dobiva se gušća struktura s bolje pakiranim česticama, što vjerojatno djeluje i na smanjenje poroznosti. Može se pretpostaviti i da je samozbijajući beton homogeniji od običnog jer vibriranje betona pridonosi heterogenosti njegove strukture, a na taj način i svojstava.

4 Zaključak

Analizom dobivenih rezultata eksperimentalnim istraživanjem betona s dodatkom letećeg pepela i komparativnoga običnog betona može se zaključiti:

- Projektiranje sastava samozbijajućih betona s većim udjelom letećeg pepela donekle se razlikuje od projektiranja sastava običnih samozbijajućih betona. Potrebno je poštovati postojeće preporuke za omjer mase vode i praškaste komponente, omjer masa sitnog i krupnog agregata, omjer mase pijeska i morta te ukupnu količinu paste.

- Leteći pepeo pozitivno djeluje na obradivost samozbijajućeg betona.

- Dodatak letećeg pepela utječe na smanjivanje tlačnih čvrstoća samozbijajućeg betona, ali i na poboljšanje svojstava trajnosti. Za razmatrani vodovezivni omjer od 0,50 najpovoljnija je koli-

čina letećeg pepela u odnosu prema masi cementa u samozbijajućem betonu 30 %.

- Samozbijajući beton ima veće tlačne čvrstoće i manju propusnost od običnog betona, u slučaju istog vodovezivnog omjera i količine cementa. Ovaj je rezultat posljedica poboljšanja mikrostrukture uporabom veće količine praškastih, gusto pakiranih čestica.

Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenih projekata:

- Suvremene metode ispitivanja građevinskih materijala, broj projekta 082-0822161-2996, voditelj projekta doc. dr. sc. **Marijan Skazlić**,
- Razvoj novih materijala i sustava zaštite betonskih konstrukcija, broj projekta 082-0822161-2159, voditelj projekta prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**.

Projekti su rađeni uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa RH na čemu se autori zahvaljuju.

LITERATURA

- [1] Beslać, J., Skazlić, M.: *Posebni betoni*, Betonske konstrukcije-građenje, Secon, Andris, HDGK, Hrvatska sveučilišna naklada, Građevinski fakultet Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2007, 262-268
- [2] Beslać, J.: *Beton u novom stoljeću*, Građevinar, 54 (2002) 1, 15-22
- [3] Skazlić, M.: *Hibridni mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2003
- [4] Beslać, J., Bjegović, D., Rosković, R.: *Inovativni materijali i tehnologije u građenju i održavanju betonskih konstrukcija*, Građevinar 57 (2005) 4, 247-255
- [5] Skarendahl, A.: *Changing concrete construction through use of self-compacting concrete*, Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Changsha, Hunan, Kina, 2005, 17-24
- [6] Bartos, P. J. M.: *Testing-SCC: Towards new European standards for fresh SCC*, Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Changsha, Hunan, Kina, 2005, 25-46
- [7] Brouwers, H. J. H., Radix, H. J.: *Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study*, Cement and Concrete Research 35 (2005) 11, 2116-2136
- [8] Rosković, R., Bjegović, D.: *Role of mineral additions in reducing CO₂ emission*, Cement and Concrete Research 35 (2005) 5, 974-978
- [9] Khatib, J. M.: *Performance of self-compacting concrete containing fly ash*, Construction and Building Materials 22 (2008) 9, 1963-1971
- [10] Xie, Y., Liu, B., Yin, J., Zhou, S.: *Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash*, Cement and Concrete Research 32 (2002) 3, 477-480
- [11] Zhu, W., Bartos, P. J. M.: *Permeation properties of self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research 33 (2003) 6, 921-926
- [12] Sonebi, M.: *Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans*, Cement and Concrete Research 34 (2004) 7, 1199-1208
- [13] Sukumar, B., Nagamani, K., Srinivasa, R.: *Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash*, Construction and Building Materials 22 (2008) 7, 1394-1401
- [14] Assiea, S., Escadeillas, G., Waller, V.: *Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability*, Construction and Building Materials 21 (2007) 10, 1909-1917
- [15] Yazici, H.: *The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete*, Construction and Building Materials 22 (2008) 4, 456-462
- [16] Zhu, W., Bartos, P. J. M.: *Microstructure and properties of interfacial transition zone in SCC*, Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Changsha, Hunan, Kina, 2005, 319-328
- [17] Sahmaran, M., Yaman, I. O.: *Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash*, Construction and Building Materials 21 (2007) 1, 150-156
- [18] Okamura, H., Maekawa, K., Ozawa, K.: *High Performance Concrete*, Gihoudou Pub, Tokyo, Japan, 1993
- [19] Grunewald, S.: *Performance based design of self-compacting fibre reinforced concrete*, disertacija, University of Delft, Nizozemska, 2004, ISBN: 90-407-2487-3
- [20] Billberg P.: *Self-compacting concrete for civil engineering structures-the Swedish experience*, CBI Report, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1999
- [21] De Larrard, F.: *Concrete Mixture Proportioning: a Scientific Approach*, Modern Concrete Technology Series, E & FN Spon, London and New York, 1999
- [22] EFNARC: *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, www.efnarc.org, 2002
- [23] Association Française de Génie Civil: *Bétons Auto-Plaçants-Recommandations provisoires*, Documents scientifiques et techniques, 2000
- [24] Čale, I.: *Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju*, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2008
- [25] Relić, D.: *Primjena samozbijajućeg betona u agresivnoj okolini*, studentski rad za rektorovu nagradu, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2008.