

Dragica Jevtić¹, Dimitrije Zakić², Aleksandar Savić³

UDK:666.972.5:620.17

Rezime: U radu se prikazuju rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona (Self Compacting Concrete) spravljenog sa superplastifikatorom najnovije generacije, kako u uslovima normalnog očvršćavanja (u vodi temperature $20\pm 2^\circ\text{C}$), tako i u režimu ubrzanog očvršćavanja putem zaparivanja (u klima komori na temperaturi 70°C). Na svežem betonu ispitivane su zapreminska masa i parametri tehnološkičnosti mešavine ("Slump-flow Test" i "L-box Test"), dok su na očvrslom betonu ispitivane zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku (na 8h, 24h, 7 dana i 28 dana). Dobijeni rezultati nedvosmisleno pokazuju da se predmetni samozbijajući beton može veoma uspešno primeniti u procesu prefabrikacije betonskih elemenata.

Ključne reči: Samozbijajući beton, superplastifikator, zaparivanje, prefabrikacija, laboratorijska ispitivanja.

1. UVOD

Proizvodnja betonskih i armiranobetonskih prefabrikata danas se u najvećem obimu odvija u industrijskim ili poluindustrijskim pogonima u okviru kojih se kao obavezna tehnološka operacija javlja zbijanje-kompaktiranje betona ugrađenog u metalne oplatale kalupe. Ova operacija se po pravilu izvodi primenom različitih postupaka vibriranja betona, pri čemu se u opštem slučaju primenjuje vibriranje na vibroplatformama, odnosno vibrostolovima, ali i drugi odgovarajući postupci.

Primena postupka livenja, koji je u načelu veoma podesan, a koji podrazumeva isključivo unošenje-ulivanje svežeg betona u oplatu bez dodatne operacije zbijanja (kompaktiranja), u opštem slučaju ne dolazi u obzir iz istih razloga koji su takav tehnološki tretman isključivali iz primene i na nizu drugih područja betonskih i armiranobetonskih konstrukcija. Naime, u dosadašnjoj praksi neophodan nivo fluidnosti svežeg betona, koji bi omogućio da on na zadovoljavajući način bude ugrađen, odnosno zbijen ("samozbijen") isključivo livenjem, bilo je moguće ostvariti prevashodno upotrebom izuzetno velike količine vode. A to, kao što je poznato, kod svežeg betona

¹ V.prof. dr, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, tel. 011/3370097, dragica@imk.grf.bg.ac.yu

² Asist. mr, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, tel. 011/3370097, dimmy@imk.grf.bg.ac.yu

³ Asist. pripr., Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, tel. 011/3370097, sasha@imk.grf.bg.ac.yu

uslovljava pojavu različitih oblika segregabilnosti, a kod očvrslom osetnu degradaciju praktično svih fizičko-mehaničkih karakteristika i, još više, drastično smanjenje trajnosti betona.

Međutim, istraživanja u oblasti tehnologije betona - naročito u poslednjih desetak godina, dovela su do mogućnosti realizacije od davnina prisutne ideje da se napravi takav beton koji se može zbiti - kompaktirati bez vibriranja, odnosno koji će samo pod uticajem svoje sopstvene težine u potpunosti ispuniti prostor ograničen oplatom i korektno okružiti ("obaviti") svu armaturu prisutnu u okviru konkretnog elementa. Pri tome, u očvrslom stanju predmetni beton ima i dovoljno visoke nivoe svih fizičko-mehaničkih karakteristika, a takođe i potrebnu trajnost u određenim ambijentalnim uslovima.

Realizacija napred navedene ideje *samozbijajućeg betona* (livenog betona) omogućena je razvojem tehnologije proizvodnje hemijskih dodataka tipa superplastifikatora, koji su omogućavali visoku redukciju količine vode u betonu i obezbeđivali dobijanje neophodnog stepena fluidnosti sveže betonske mase, uz istovremeno sprečavanje segregacije krupnog agregata i izdvajanja vode. U vezi sa tim došlo se do zaključka da bi u betonskoj mešavini trebalo ići i na povećanje učešća najsitnijih čestica, uz adekvatno smanjenje udela najkrupnije frakcije i ograničenje njenog maksimalnog zrna, a sve to, između ostalog, i radi ostvarivanja bolje povezanosti (kohezivnosti) betonske mešavine.

Krajnji cilj ideje-vodilje o kojoj je napred bilo reči ostvaren je i kreiranjem jedne nove vrste aditiva superplastifikatora - tzv. modifikatora viskoziteta - kojim se, bez uticaja na fluidnost mešavine, dodatno povećava stepen njene povezanosti. Kao rezultat, dobija se beton koji se nakon punjenja i odizanja tzv. Abramsovog konusa, putem tečenja rasprostire u prečniku preko 60cm, a koji pri tome ima i visoku otpornost na sve vidove segregacije.

Na taj način, dakle, u tehnologiji betona se došlo do tzv. *samozbijajućeg betona* (Self-Compacting Concrete – skraćeno SCC) koji predstavlja kompoziciju na bazi mešavine odabranih agregata, cementa, vode i specijalnih dodataka betonu (aditiva). Predmetni beton je moguće ugraditi u oplatu isključivo postupkom livenja, pri čemu on bez ikakvog dodatnog mehaničkog uticaja (vibriranja i dr.) kompaktnom masom ispunjava sve prostore ograničene oplatom, prostore između šipki armature, kao i prostore između šipki armature i oplata. Pri tome, on se karakteriše visokom trajnošću, a njegova čvrstoća pri pritisku dostiže i nivoe od preko 60 MPa.

Samozbijajući beton se, sasvim logično, a to proizilazi i iz svega napred rečenog, po svom sastavu razlikuje od klasičnog betona koji se u najvećem broju slučajeva ugrađuje vibriranjem. Osnovne razlike ogledaju se u sledećem:

- upotreba manje količine krupnog agregata, čije nominalno najkrupnije zrno ne bi trebalo da bude veće od 25mm;

- prisustvo veće količine finih čestica, sitnijih od 125 μ m (cement, aktivni ili inertni mineralni dodaci, najfinija zrna agregata);
- obavezna primena aditiva superplastifikatora, odnosno aditiva poslednje generacije te vrste hemijskih dodataka betonu poznate kao *aditivi visoke sposobnosti redukcije vode* (High Range Water-Reducing Agents - HRWRA);
- primena aditiva modifikatora viskoziteta svežeg betona (Viscosity Modifying Agents - VMA).

Ovde se napominje da se aditivi tipa modifikatora viskoziteta svežeg betona koriste prevashodno u slučajevima betonskih mešavina sa manjim sadržajem čestica sitnijih od 125 μ m, kada taj dodatak betonu daje odlučujući doprinos kohezivnosti mešavine, odnosno kada on doprinosi obezbeđenju njegove homogenosti i u uslovima visokog stepena fluidnosti. Na ovom mestu takođe treba reći da se danas proizvode i hemijski dodaci betonu koji imaju simultano delovanje: jedan takav dodatak proizvodi kako efekat aditiva sa visokom sposobnošću redukcije vode u betonu (HRWRA), tako i efekat aditiva tipa modifikatora viskoziteta svežeg betona (VMA).

Imajući u vidu sve napred navedeno, proizilazi zaključak da upotreba samozbijajućeg betona u pogonima za proizvodnju betonskih prefabrikata u potpunosti isključuje potrebu za instalisanjem opreme tipa vibroplatformi (vibrostoplova), a shodno tome omogućava i primenu čeličnih oplata-kalupa manje težine (mase). Isključivanje potrebe vibriranja betona, dakle, otvara mogućnost da se u sklopu konkretnog tehnološkog procesa primenjuju manje robustni, kabasti i kruti, pa samim tim i lakši kalupi nego u dosadašnjoj praksi, kada je vibriranje betona ulivenog u kalupe predstavljalo nezaobilaznu tehnološku operaciju. Pored toga, upotrebom samozbijajućeg betona u određenoj meri se, uz obezbeđenje nezanemarljivog ekonomskog efekta usled smanjenja utroška cementa, ubrzava proizvodni proces (prevashodno zbog eliminacije ranije neophodnog vremena vibriranja), dok se u konačnom svakako dobijaju i krajnji proizvodi višeg kvaliteta nego u dosadašnjoj praksi.

Ubrzavanju proizvodnog procesa pri primeni samozbijajućeg betona svakako vrlo značajno može da doprinese i njegovo kombinovanje sa nekim od postupaka ubrzanog očvršćavanja betona. U vezi sa tim, u daljem će se prikazati rezultati jednog konkretnog ispitivanja samozbijajućeg betona kod koga je radi ostvarivanja dovoljno visokih početnih - manipulativnih čvrstoća primenjen postupak zavarivanja kao i primer samozbijajućeg betona koji bi se ugrađivao u prefabrikovane armiranobetonske elemente za podzemna telefonska okna.

2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

2.1. Ispitivanja sprovedena na samozbijajućem betonu izloženom ubrzanom očvršćavanju

Prilikom definisanja koncepcije i programa ispitivanja pošlo se od ideje da se napravi samozbijajući beton (SCC) na bazi superplastifikatora najnovije generacije, trofrakcijskog rečnog agregata (D=16mm) uz dodatak filera (krečnjačkog kamenog brašna), cementa i vode, pri čemu bi predmetni beton trebalo da bude pogodan za

proizvodnju betonskih i armiranobetonskih prefabrikata putem zaparivanja. Kao aditiv korišćen je superplastifikator na bazi polikarboksilata pod nazivom ViscoCrete - 20HE, proizvođača Sika (Švajcarska). Kao osnovni uslov kvaliteta projektovanog samozbijajućeg betona usvojena je u praksi najčešće korišćena marka MB 30.

U vezi sa napred navedenim polaznim parametrima, odlučeno je da predmetni beton bude dvojako tretiran u smislu postupka očvršćavanja: kao beton-etalon koji očvršćava u normalnim uslovima (u vodi temperature $20\pm 2^{\circ}\text{C}$) i kao tzv. zaparivani beton (u klima komori na temperaturi 70°C , u trajanju od 8h). Takođe, odlučeno je da se, po usvajanju određene recepture, na svežem betonu sprovedu sledeća ispitivanja: određivanje zapreminske mase, "Slump-flow" test uz primenu Abramsovog konusa i "L-box" test. Na očvrslom betonu (kako nezaparivanom -etalonu, tako i zaparivanom) ispitivani su zapreminska masa i čvrstoća pri pritisku posle 8h, 1 dan (24h), 7 dana i 28 dana.

Receptura ispitivanog samozbijajućeg betona projektovane marke MB 30 definisana je na bazi poznatih razlika između mešavina klasičnog (običnog) i samozbijajućeg betona, a čiji se sastavi šematski, preko zapreminskih odnosa, prikazuju na narednoj slici.

OBİČAN BETON SAMOZBIJAJUĆI BETON

VAZDUH		VAZDUH cca 2%
VODA		VODA 15-20%
CEMENT		FINE ČESTICE 20-25%
PESAK		PESAK 30-35%
KRUPAN AGREGAT		KRUPAN AGREGAT 30-35%

Slika 1. Šematski prikaz razlika između mešavina klasičnog i samozbijajućeg betona

U vezi sa slikom 1, treba naglasiti da iako u sastavu samozbijajućeg betona kao obavezna konstituenta figuriše i aditiv tipa superplastifikatora, njegovo učešće u datoj šemi nije prikazano, pošto je reč o količini koja se po zapremini (a takođe i po masi) može u potpunosti zanemariti.

Na bazi napred prikazane šeme sastavljanja mešavina za samozbijajuće betone, definisan je sledeći sastav predmetnog betona:

- cement (PC 42,5R - NOVI POPOVAC) 380 kg/m³,
- voda (vodocementni faktor 0,43) 163,4 ≈ 164 kg/m³,
- aditiv (1,5% u odnosu na masu cementa) 5,7 ≈ 6 kg/m³,
- filer - krečnjačko kameno brašno 120 kg/m³,
- trofrakcijski agregat "Moravac" (D = 16mm) - ukupno 1700 kg/m³,
 - frakcija 0/4 (50%) → 850 kg/m³;
 - frakcija 4/8 (20%) → 340 kg/m³;
 - frakcija 8/16 (30%) → 510 kg/m³;
- računsa vrednost zapremenske mase svežeg betona 2370 kg/m³
- vodopraškasti faktor (odnos mase vode i finih čestica) 0.33 .

Kao što je već rečeno, kao aditiv (hemijski dodatak) korišćen je superplastifikator na bazi polikarboksilata pod nazivom ViscoCrete-20HE, proizvođača Sika (Švajcarska). Prema podacima dobijenim od strane proizvođača, predmetni hemijski dodatak poseduje sledeća svojstva:

- zapreminska masa iznosi cca 1080 kg/m³,
- pH vrednost se nalazi u granicama od 3,8 do 4,8 ,
- preporučeno doziranje u količini od 1-2% u odnosu na masu upotrebljenog cementa,
- maksimalna redukcija količine vode pri istoj konzistenciji betona iznosi preko 30%,
- ViscoCrete-20HE je naročito pogodan za proizvodnju samozbijajućeg betona koji se izlaže postupcima ubrzanog očvršćavanja, odnosno od koga se zahtevaju visoke rane čvrstoće.

Laboratorijska ispitivanja predmetnog betona sprovedena su na mešavini spravljenoj u protivstrujnoj laboratorijskoj mešalici, pri čemu je trajanje homogenizacije komponentata iznosilo cca 10 minuta.

Na svežem betonu dobijeni su sledeći rezultati ispitivanja (kao prosečne vrednosti na bazi tri nezavisna merenja):

- Zapreminska masa: 2348 kg/m³,
- "Slump-flow" test uz primenu Abramsovog konusa:
 - vreme rasprostiranja betonske mešavine do prečnika 500mm 5 sec. (preporučeno vreme 3-6sec.),
 - konačno rasprostiranje betonske mešavine srednji prečnik 680 mm (preporučene mere 600-750mm),
- "L-box" test (uslov: $\Delta h < 20\%$) 8,3% .

Tabela 1. Rezultati ispitivanja očvrsllog betona

Vreme ispitivanja	Vrsta betona	Zapreminska masa (kg/m ³)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)	
			kocka d = 10cm	kocka d = 20cm
Posle 8 časova	- nezaparivani	2365	3,3	3,0
	- zaparivani	2376	20,6	18,5
Posle 1 dan (24 časa)	- nezaparivani	2380	15,3	13,8
	- zaparivani	2385	25,8	23,2
Posle 7 dana	- nezaparivani	2390	40,0	38,0
	- zaparivani	2410	30,2	27,2
Posle 28 dana	- nezaparivani	2410	42,7	40,6
	- zaparivani	2340	39,8	37,8

Rezultati ispitivanja očvrsllog betona (prosečne vrednosti dobijene na bazi tri nezavisna merenja) daju se, kao što se vidi, u tabeli 1.

2.2. Ispitivanja sprovedena na samozbijajućem betonu MB 45

Ispitivanja sprovedena na samozbijajućem betonu koji bi se ugrađivao u prefabrikovane armiranobetonske elemente za podzemna telefonska okna, obuhvatila su sledeće:

- a) Na svežem betonu:
 - zapreminska masa,
 - "Slump-flow" test uz primenu Abramsovog konusa,
 - "L-box" test.
- b) Na očvrslom betonu:
 - zapreminska masa posle 3, 7 i 28 dana;
 - čvrstoća pri pritisku posle 3, 7 i 28 dana.

Sastav samozbijajućeg betona, u predmetnom slučaju, definisan je na sledeći način:

- cement (PC 20M(S-L) 42,5R - BEOČIN) 380 kg/m³
- voda (vodocementni faktor 0,47) 180 kg/m³
- aditiv - superplastifikator (1,2 % u odnosu na masu cementa) 4,6 ≈ 5 kg/m³
- filer - krečnjačko kameno brašno 120 kg/m³
- trofrakcijski agregat "Moravac" (D = 16mm) - ukupno 1700 kg/m³
 - frakcija 0/4 (50%) → 850 kg/m³
 - frakcija 4/8 (20%) → 340 kg/m³
 - frakcija 8/16 (30%) → 510 kg/m³
- računaska vrednost zapreminske mase svežeg betona 2385 kg/m³
- vodopraškasti faktor (odnos masa vode i finih čestica) ≈ 0,36

Kao što se vidi, količina cementa, filera – krečnjačkog brašna i agregata "Moravac" je bila ista kao i u prvom slučaju.

Rezultati ispitivanja na svežem betonu su sledeći (prosečne vrednosti na bazi tri merenja):

- Zapreminska masa: 2380 kg/m³.
- "Slump-flow" test uz primenu Abramsovog konusa:
 - vreme rasprostiranja betonske mešavine do prečnika 500mm 6 sec. (preporučeno vreme 3-6sec.)
 - konačno rasprostiranje betonske mešavine srednji prečnik 620 mm (preporučene mere 600-750mm).
- "L-box" test (uslov: $\Delta h < 20\%$) 15,8 %.

Rezultati ispitivanja očvrstlog betona (prosečne vrednosti na bazi tri merenja) daju se u tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku posle 3, 7 i 28 dana

Starost uzoraka (dani)	Zapreminska masa (kg/m ³)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)	
		kocka d = 15cm	kocka d = 20cm
3	2390	37,0	35,2
7	2370	50,2	47,7
28	2370	57,6	54,7

3. ZAKLJUČAK

Na osnovu svih napred prikazanih rezultata ispitivanja proizilaze sledeći zaključci:

- predmetni betoni u svežem stanju zadovoljavaju sve bitne uslove koji se odnose na samozbijajuće betone (konzistencija, kohezivnost, viskozitet);
- po završetku osmočasovnog zaparivanja sa maksimalnom temperaturom od 70°C, čvrstoća samozbijajućeg betona (prikazana kao primer 1) iznosila je preko 60% čvrstoće koja odgovara traženoj marki betona MB30;
- čvrstoća samozbijajućeg betona nakon osmočasovnog zaparivanja iznosila je 18,5MPa, što je veća vrednost od minimalne "manipulativne čvrstoće" od 15MPa koju za betonske prefabrikate propisuje aktuelni standard JUS U.E3.050;
- pri starosti od 28 dana oba betona (nezaparivani i zaparivani) zadovoljavaju uslove propisane za traženu marku betona MB30, pri čemu je čvrstoća zaparivanog betona bila za cca 7% manja od čvrstoće nezaparivanog betona (etalona).

Na bazi svega napred navedenog, može se izvući i generalni zaključak koji glasi: dobijeni rezultati nedvosmisleno pokazuju da se ispitivani samozbijajući beton može veoma uspešno primeniti u procesu prefabrikacije betonskih elemenata putem zaparivanja.

Isto tako, može se konstatovati da samozbijajući beton (prikazan kao primer 2) zadovoljava sve bitne uslove neophodne za samozbijajuće betone (SCC) koji bi se ugrađivali u prefabrikovane armiranobetonske elemente za podzemna telefonska okna.

LITERATURA:

- [1] Živković S., Zakić D., Bojović D.: *Projektovanje sastava i svojstva jedne vrste samozbijajućeg betona*, IX Međunarodni naučni skup INDIS 2003, Novi Sad, 2003.
- [2] Živković S., Jevtić D., Zakić D., Savić A.: *Neki rezultati istraživanja mikroarmiranih samozbijajućih betona*, Zbornik radova sa Simpozijuma u organizaciji JUDIMK-a, Novi Sad, 20-21. oktobar 2005, str. 63-73.
- [3] Jevtić D.: *Dodaci betonu*, Naučno-stručni skup "Harmonizacija domaće i evropske regulative u oblasti tehnologije betona saglasno standardu EN 206-1:2000", Beograd, oktobar 2004. godine, str. 113-128.
- [4] Szilagyi H., Domsa J., Mircea A.: *Research Upon Self-Compacting Concrete for the Precast Industry In Construction*, fib Symposium "Keep concrete attractive", Budapest, 2005, pp. 235-238.
- [5] Masanori H.: *State-of-the-Art Report on Manufacturing of Self-Compacting Concrete*, International Workshop on Self-compacting Concrete, Kochi, Japan, 23-26 August 1998, pp. 360-367.
- [6] Muravljev M., Jevtić D., Zakić D.: *Istraživanje mogućnosti primene samozbijajućeg betona u prefabrikaciji betonskih elemenata*, Internacionalni Naučno-Stručni Skup Građevinarstvo – Nauka i Praksa, Žabljak, februar 2006., str 569-574.
- [7] Savić A.: *Idejni projekat lučnog mosta sa projektom betona za gornji stroj konstrukcije*, diplomski rad, Beograd, decembar 2004.
- [8] Živković S., Jevtić D., Radonjanin V.: *Istraživanje na području materijala i njihove primene*, Materijali i konstrukcije 48 (2005) 4, str 9-24, generalni izveštaji i prikaz radova.
- [9] Katalog 2007, Građevinarstvo, SIKA d.o.o., www.sika.co.yu
- [10] Walraven J., *Inovative Materials and Technologies for Concrete Structures*, fib Symposium "Keep concrete attractive", Budapest, 2005, pp. 207-216.
- [11] Corradi M., Khurana R., Magarotto R.: *Tailored Properties of Concrete to Keep It Attractive*, fib Symposium "Keep concrete attractive", Budapest, 2005, pp. 223-228.

POSSIBLE APPLICATION OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Summary :*The results of laboratory testing of self-compacting concrete (SCC) made with a new-generation superplasticizer are presented in this paper. The testing was performed both in normal curing conditions (specimens cured in water with temperature $20\pm 2^{\circ}\text{C}$), as well as using accelerated hardening regime - steaming (inside the heating chamber at 70°C). The density and technological parameters of the fresh concrete ("Slump-flow Test" and "L-box Test") were measured first, and later (after 8h, 24h, 7 days and 28 days) the density of the hardened concrete as well as the compressive strength were measured. The obtained results show undoubtedly that the tested self-compacting concrete may be successfully applied in the process of precasting of concrete elements.*

Key words: *Selfcompacting concrete (SCC), superplasticizer, steaming, precasting, laboratory testing.*