

DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE  
 SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA

# MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

# MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA  
 JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

## SADRŽAJ

<b>Snežana MARINKOVIĆ</b> <b>Ivan IGNJATOVIĆ</b> PONAŠANJE ARMIRANOBETONSKIH GREDA OD BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA POD KRATKOTRAJNIM OPTEREĆENJEM <b>Pregledni rad</b> .....	5
<b>Iva DESPOTOVIĆ</b> <b>Zoran GRDIĆ</b> <b>Gordana TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ</b> <b>Nenad RISTIĆ</b> PRVIH 20 GODINA SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA <b>Pregledni (stručni) rad</b> .....	21
<b>Anja TERZIĆ</b> <b>Ljubica PAVLOVIĆ</b> PRIMENA MIKROSKOPSKIH METODA U ANALIZI MIKROSTRUKTURE RAZLIČITIH TIPOVA BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM <b>Pregledni rad</b> .....	34
<b>Ivan IGNJATOVIĆ</b> <b>Snežana MARINKOVIĆ</b> MEHANIČKE KARAKTERISTIKE BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA <b>Pregledni rad</b> .....	40
<b>Dragica JEVTIĆ</b> <b>Dimitrije ZAKIĆ</b> <b>Aleksandar SAVIĆ</b> SPECIFIČNOSTI TEHNOLOGIJE SPRAVLJANJA BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA <b>Pregledni rad</b> .....	52
<b>Radomir FOLIĆ</b> <b>Dragana GLAVARDANOV</b> MEHANIZAMI OŠTEĆENJA, MODELI ODRŽAVA- NJA I SANACIJA BETONSKIH KONSTRUKCIJA POJAČANIH FRP ELEMENTIMA <b>Pregledni rad</b> .....	63
<b>Miroslava RADEKA</b> KARAKTERIZACIJA MIKROSTRUKTURE TRAN- ZITNE ZONE BETONA NA BAZI AGREGATA OD RECIKLIRANOG BETONA POMOĆU SEM-a <b>Pregledni rad</b> .....	74
<b>Elefterija ZLATANOVIĆ</b> JET GROUTING <b>Pregledni rad</b> .....	82

## CONTENTS

<b>Snežana MARINKOVIĆ</b> <b>Ivan IGNJATOVIĆ</b> SHORT-TERM BEHAVIOUR OF REINFORCED RECYCLED AGGREGATE CONCRETE BEAMS	5
<b>Iva DESPOTOVIĆ</b> <b>Zoran GRDIĆ</b> <b>Gordana TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ</b> <b>Nenad RISTIĆ</b> FIRST 20 YEARS OF SELF COMPACTING CONCRETE .....	21
<b>Anja TERZIĆ</b> <b>Ljubica PAVLOVIĆ</b> APPLICATION OF MICROSCOPIC METHODS IN THE MICROSTRUCTURAL ANALYSES OF DIFFERENT TYPES OF CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES .....	34
<b>Ivan IGNJATOVIĆ</b> <b>Snežana MARINKOVIĆ</b> MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE .....	40
<b>Dragica JEVTIĆ</b> <b>Dimitrije ZAKIĆ</b> <b>Aleksandar SAVIĆ</b> SPECIFIC PROPERTIES OF RECYCLED AGGRE- GATE CONCRETE PRODUCTION TECHNOLOGY	52
<b>Radomir FOLIĆ</b> <b>Dragana GLAVARDANOV</b> DAMAGE MECHANISMS, MAINTENANCE & REPAIR MODELS OF CONCRETE STRUCTURES STRENGTHENED WITH FRP ELEMENTS .....	63
<b>Miroslava RADEKA</b> THE CHARACTERISATION OF THE MICRO- STRUCTURE OF THE RECYCLED AGGREGATE CONCRETE INTERFICIAL ZONE EMPLOYING SEM	74
<b>Elefterija ZLATANOVIĆ</b> JET GROUTING .....	82

## PRVIH 20 GODINA SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA

Iva DESPOTOVIĆ  
Zoran GRDIĆ  
Gordana TOPLIČIĆ-ČURČIĆ  
Nenad RISTIĆ

PREGLEDNI (STRUČNI) RAD  
UDK: 666.974 = 861

### 1 NASTANAK I RAZVOJ SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA

Samougrađujući beton (Self-Compacting Concrete - SCC), po mnogim autorima „najrevolucionarnije otkriće betonske industije XX veka“, ne zahteva vibriranje za ugrađivanje i zbijanje. Pod dejstvom sopstvene težine u potpunosti ispunjava sve delove oplata čak i prisustvu gusto postavljene armature.

Početak razvoja ovih betona se vezuje za Japan početkom osamdesetih godina prošlog veka, mada podaci dostupni u svetskoj literaturi ukazuju da su „samoravnjajući“ (self-levelling) betoni bez sklonosti ka segregaciji (unsegregable) proučavani još 1975-76. godine u Italiji. Bilo je predloga da se definiše reoplastični beton (Prof. Mario Collepardi, Politehnički fakultet, Milano) koji iako tečan, ima veliku koheziju i samim tim nisku tendenciju ka segregaciji ili izdvajanju vode. Takva ideja nije zaživela jer je ACI dozvoljavao maksimalnu vrednost sleganja 175 mm da bi se, u odsustvu superplastifikatora, izbeglo preveliko izdvajanje vode.

Glavni inženjerski problem u Japanu bilo je ubrzano propadanje armiranobetonskih konstrukcija, posebno onih na moru i u obalnim područjima. Problem trajnosti konstrukcija je bio usko povezan sa korozijom armature

u betonu, izazvane karbonatizacijom zaštitnog sloja betona i agresivnim delovanjem jona hlorida. Ako se tome pridoda i nedostatak kvalifikovane građevinske radne snage, razumljivo je što je u tom pravcu bio usmeren najveći broj istraživanja koje je predvodio Hajime Okamura sa Univerziteta u Tokiju. Prototip samozbijajućeg betona je napravljen 1988. godine i tom prilikom je nazvan „beton visokih performansi“ (High Performance Concrete - HPC).

Profesori Aitcin i Gagne su 1989. godine „beton visokih performansi“ definisali kao beton visoke trajnosti koji je i danas prihvaćen u celom svetu, pa je Okamura definisao „samozbijajući beton visoke trajnosti“ [5].

Zahvaljujući radu RILEMA (Međunarodno udruženje laboratorija i eksperata za materijale i konstrukcije) SCC je stigao u Evropu. Međunarodni simpozijumi na temu SCC su organizovani u Glazgovu 1996., Stokholmu 1999., Tokiju 2001., Rejkjaviku 2003. i Čikagu 2005. I druge relevantne grupe osnivaju svoje posebne tehničke komisije, tehničke ili radne grupe koje će se baviti istraživanjem i razvojem SCC-a. FIB (Međunarodna Federacija za Beton), nastala 1998. godine osniva tehničku grupu TG 8.4 koju predvodi Ozava, jedan od začetnika istraživanja samougrađujućeg betona, sa zadatkom izrade Preporuka i/ili Pravila za širu primenu SCC-a i Vodiča za budući razvoj projektovanja i izvođenja konstrukcija na bazi SCC-a.

EFNARC (Evropska Federacija Proizvođača Građevinske Hemije i Betonskih Sistema) nastala 1989. godine, formirala je svoj Tehnički Komitet SCC u čijem su radu učestvovali predstavnici svih vodećih proizvođača građevinske hemije (Degussa, Mapei, Sika, Domilco), a kao rezultat rada nastale su preporuke „Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete“. Evropsko društvo za istraživanje i razvoj tehnologije je pokrenulo u sklopu aktivnosti Eu Ram Project-a program „Racionalna proizvodnja i poboljšanje radnog okruženja kroz primenu SCC“. Projekat je trajao od 1997. do 2000. godine i rezultirao objavljivanjem izveštaja „Principi i preporuke za SCC“.

#### Adresa autora:

Iva Despotović, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, stipendista Ministarstva nauke, dipl.inž.građ., magistrantica

Zoran Grdić, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, dr. vanredni profesor, dipl.inž.građ.

Gordana Topličić-Čurčić, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, dr. asistent, dipl.inž.građ.

Nenad Ristić, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, stipendista Ministarstva nauke, dipl.inž.građ., student doktorskih studija

praksi. Definiše se kao prosečan napon u uzorku izloženom aksijalnom pritisku pri sili loma. SCC sa istim vodocementnim faktorom će imati nešto veću čvrstoću u poređenju sa vibriranim betonom jer se ostvaruje jača veza između agregata i očvršle paste. Priraštaj čvrstoće će biti isti, tako da se dostignuta čvrstoća praktično proverava kao i kod vibriranog betona, bez obzira da li je primenjen postupak ubrzanog očvršćavanja zaparivanjem.

**Čvrstoća pri zatezanju** se određuje nešto složenije nego pri pritisku, zbog toga što je teško obezbediti homogeno naponsko stanje zatezanja u uzorku. Metode ispitivanja su: ispitivanje direktnim aksijalnim zatezanjem, ispitivanje cepanjem putem linijskog pritiska i ispitivanje savijanjem. SCC može da se projektuje tako da zadovolji bilo koju propisanu klasu čvrstoće pri pritisku. Za datu klasu betona i starost, zatezna čvrstoća se sa sigurnošću može smatrati istom kao i kod vibriranog betona, jer na nju zapremina paste (cement + praškaste čestice + voda) nema značajniji uticaj. Treba napomenuti da je i odnos čvrstoće pri zatezanju i pritisku istog reda veličine kao i kod vibriranog betona.

**Statički modul elastičnosti** se koristi u elastičnim proračunima ugiba, često kao kontrolni parametar pri projektovanju ploča, kod proračuna prethodno napregnutih konstrukcija, itd. Kako veći deo zapremine betona čini agregat, onda vrsta i količina agregata kao i njegov modul elastičnosti bitno utiču na modul elastičnosti betona. Izbor agregata sa visokim modulom elastičnosti povećava modul elastičnosti betona. Međutim, povećanje zapremine paste bi moglo da smanji ovaj parametar. Kako SCC ima često veći sadržaj paste od vibriranog betona, mogu se očekivati razlike u smislu nešto nižih vrednosti modula elastičnosti. Iskustveni podaci pokazuju da je odnos modula elastičnosti i čvrstoće pri pritisku, izražen kao  $E/f_c^{0.5}$  isti kod SCC-a i vibriranog betona što odgovara preporukama ACI [4].

**Tečenje** se definiše kao postepeno povećavanje deformacije tokom vremena pod konstantnim naponom, ubrajajući i druge vremenski zavisne deformacije, koje nisu povezane sa vremenjenim naponom, na pr. skupljanje, bubrenje itd. Tečenje pod naponom pritiska smanjuje sile prednaprezanja u prethodno napregnutim elementima i uzrokuje spor transfer opterećenja sa betona na armaturu. Nasuprot tome, tečenje pod naponom zatezanja može da bude korisno jer delimično otklanja napone prouzrokovane drugim ograničenim kretanjima (hidrauličko skupljanje, termički efekti). Tečenje se odvija u cementnoj pasti i uzrokovano je njenom poroznošću koja je direktno povezana sa vodocementnim faktorom. Tokom hidratacije smanjuje se poroznost cementne paste te se u posmatranom betonu, sa porastom čvrstoće, smanjuje i tečenje. Vrsta cementa utiče na proces tečenja, pogotovo ako je ograničeno vreme trajanja opterećenja, u smislu da će cement koji hidratise brže uzrokovati veću čvrstoću pod opterećenjem, niži odnos napon/čvrstoća i niže tečenje. Uticaj upotrebljenog agregata za spravljanje betona se ogleda u tome da će se tečenje smanjivati sa porastom zapremine i modula elastičnosti agregata.

Zbog veće zapremine cementne paste s pravom se može očekivati veća deformacija tečenja kod SCC-a u odnosu na vibrirani beton iste čvrstoće, ali su takve razlike male i „pokrivene“ sigurnosnim pretpostavkama datim u Evrokodu [1].

**Skupljanje** je deformacija koja je funkcija vremena i nastaje usled kontrakcije produkata hidratacije (hidrataciono skupljanje), usled isparavanja vode tokom perioda vezivanja cementa (plastično skupljanje) i skupljanja tokom perioda očvršćavanja cementa (hidrauličko skupljanje). Plastično skupljanje je najveće u poređenju sa ostalim navedenim oblicima, ali se odvija veoma brzo, u prvih nekoliko časova, pa se kao takvo uglavnom i ne registruje. Njegovi štetni efekti (pojava prslina i pukotina na površinama betonskih elemenata) se lako eliminišu pravilnom negom betona, tako da ispitivane vrednosti skupljanja na očvrslom betonu predstavljaju zbir hidratacionog i hidrauličkog skupljanja. Prisustvo agregata povoljno utiče na skupljanje u smislu da se sa povećanjem zapremine agregata i njegovog modula elastičnosti, skupljanje betona u odnosu na cementnu pastu smanjuje. Vrednosti i formule date u Evrokodu za vibrirani beton, važe i u slučaju samougrađujućeg betona. Interesantno je primetiti, da uprkos činjenici da SCC ima veći sadržaj paste i manje krupnog agregata u odnosu na vibrirani beton, ne pokazuje veće hidrauličko skupljanje. Naprotiv, zbog redukovane sadržaja vlage i kompaktne mikrostrukture vrednosti hidrauličkog skupljanja su manje, te hidrataciono po veličini može da ga prevaziđe.

Testovi tečenja i skupljanja na različitim tipovima SCC-a i uporednom, vibriranom betonu su pokazali da su generalno deformacije kod SCC-a, prouzrokovane ukupnim skupljanjem veće, tečenjem manje, ali su vrednosti ukupnih deformacija približno jednake.

**Koeficijent termičkog širenja** je dilatacija nastala u betonu usled jedinične temperaturne promene. Vrednost varira u zavisnosti od sastava betona, njegove starosti i sadržaja vlage. Kako najveći deo betona čini agregat, korišćenje agregata sa nižim koeficijentom termičkog širenja će smanjiti ovaj koeficijent kod rezultujućeg betona. Po EN 1992-1 veličina koeficijenta termičkog širenja se kreće od 8-13 mikrodilatacija/°C i u slučaju vibriranog i u slučaju samougrađujućeg betona. Treba napomenuti da propisi Novog Zelanda (NZS 3101.2006) preporučuju uvećanje ovog koeficijenta za 15% kada se koristi za SCC [3].

**Prianjanje za armaturu** - armirani beton se zasniva na efektivnom prianjanju betona i armature. Prianjajuća snaga betona bi trebalo da bude dovoljna za izbegavanje athezionog loma. Kvalitet prianjanja zavisi od razmeštaja armature i kvaliteta ugrađenog betona. Za pravilan prenos prianjajućih sila između čelika i betona neophodan je odgovarajući betonski zaštitni sloj.

Loše prianjanje često rezultuje lomom betona, promenom pozicije armature prilikom ugrađivanja betona, ili izdvajanjem vode i segregacijom betona pre očvršćavanja što smanjuje kvalitet kontakta na donjoj strani betonskih elemenata. Fluidnost i kohezija SCC-a minimiziraju ove štetne uticaje naročito za vršnu armaturu u visokim presecima.

U slučaju vlaknima armiranog betona, prenos sile i dužina ankerovanja u različitim tipovima SCC-a su upoređeni sa vibriranim betonom iste pritiskne čvrstoće. Rezultati za SCC su bili na strani sigurnosti u odnosu na vrednosti sračunate prema EN 1992-1 i EN 206-1.

**Smičuća otpornost** - površina očvršlog SCC-a nakon ugrađivanja i očvršćavanja može da bude prilično glatka i nepropusna. Bez bilo kakvog „tretmana“ površine nakon ugrađivanja prvog sloja, otpornost na smicanje između prvog i drugog sloja može da bude niža nego

**Agregat** normalne težine treba da zadovolji EN 12620 i zahteve trajnosti po EN 206-1. Laki agregat treba da ispuni EN 13055-1. Agregat sitniji od 0,125 doprinosi sadržaju praškastih supstanci u SCC-u.

Sadržaj vlage, upijanje vode, granulacija i variranja prašinstih čestica u agregatu mora da se pažljivo i kontinuirano prate da bi se proizvodio samougrađujući beton konstantnog kvaliteta. Upotreba opranog agregata će dati produkt veće konzistencije. Oblik i granulometrijski sastav agregata su veoma bitni i utiču na pakovanje zrna i sadržaj pora. Neke metode projektovanja mešavina koriste zapreminu šupljina u agregatu za određivanje potrebne zapremine paste i maltera.

**Krupan agregat** prema EN 12620 je odgovarajući za spravljanje samougrađujućeg betona. U tu svrhu je uspešno primenjivan i laki agregat, ali treba primetiti da on može da ispliva na površinu ako je viskoznost paste niska što ne može da se otkrije preko testa segregacije sa sitom. Razmak armature je odlučujući faktor pri određivanju maksimalnog zrna agregata da se on ne bi zaglavljivao prolazeći kroz postavljenu armaturu. L-box test je pouzdan pokazatelj sposobnosti prolaza SCC mešavine. Veličina maksimalnog zrna bi generalno trebalo da bude ograničena na 12-20 mm, mada je korišćen i krupniji agregat. Granulometrijski sastav i oblik krupnog agregata direktno utiču na tečenje i sposobnost prolaza SCC-a. Što su zrna agregata loptastija manje će se zaglavljivati i tečenje će biti bolje zbog manjeg unutrašnjeg trenja.

**Sitan agregat (pesak)** ima znatno veći uticaj na svojstva svežeg samougrađujućeg betona od krupnog agregata. Frakcije sitnije od 0,125 mm ulaze u sastav prašinstih čestica paste i trebalo bi ih uračunati u odnos voda/prašinstih čestice. Velika zapremina paste u SCC-u pomaže smanjenju unutrašnjeg trenja, ali je veoma važno pravilno odrediti granulometrijski sastav.

**Reciklirani agregat** - njegovom upotrebom se rešava problem otpadnog materijala i štete prirodni izvori. U recikliranju građevinskog otpada prednjače Holandija i Danska (sa 85% recikliranog građevinskog otpada) a slede ih Belgija i Nemačka (sa 75%). U evropskoj regulativi, agregati dobijeni recikliranjem su podgrupa agregata dobijenih iz sporednih izvora i podležu normama EN 12620, EN 13055-1 i EN 13242. Veoma interesantna i još uvek nedovoljno istražena je mogućnost korišćenja recikliranog agregata u proizvodnji SCC-a. Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj je 2008. odobrilo naučni projekat koji se realizuje na građevinskim fakultetima u Nišu, Beogradu i Novom Sadu, sa ciljem da se ispita mogućnost primene recikliranog agregata u građevinarstvu.

**Aditivi** – superplastifikatori ili reduktori vode visokog ranga su suštinski važne komponente SCC-a. Modifikatori viskoziteta se takođe koriste da bi se smanjila segregacija i osetljivost mešavine na promenljivost ostalih konstituenata, posebno sadržaja vlage. Drugi aditivi kao što su aeranti, ubrzivači ili retarderi mogu da se koriste na isti način kao i u vibriranom betonu, s tim što treba da postoje preporuke proizvođača o upotrebi u skladu sa EN 934-2. Izbor aditiva za optimalne performanse betona je uslovljen njegovim fizičkim i hemijskim osobinama. Naime, jako su uticajni faktori poput finoće, sadržaja karbonata, alkalija ili trikalcijum-aluminata ( $C_3A$ ), pa se preporučuje da se pažljivo prouči svaka eventualna izmena vrste ili količine aditiva.

**Superplastifikatori/reduktori vode visokog ranga** – većina proizvođača aditiva ima ponudu prilagođenu zahtevima potrošača. Aditiv treba da omogući potrebno smanjenje vode i fluidnost, ali isto tako da postigne efekat disperzije tokom vremena predviđenog za transport i ugrađivanje. Zahtevana retenzija (zadržavanje) konzistencije zavisi od načina ugrađivanja. Prefabrikovani beton zahteva kraće vreme retenzije od betona koji se transportuje i ugrađuje na licu mesta.

**Modifikatori viskoziteta** su aditivi koji menjaju koheziju SCC-a bez značajne promene fluidnosti. Koriste se za minimiziranje uticaja promene sadržaja vlage, prašinstih čestica u pesku ili njegove granulometrije, čineći da SCC bude izdržljiviji, tj. manje osetljiv na variranja u količini ili osobinama ostalih konstituenata. To ne znači da se njihovom upotrebom umanjuje potreba za dobrim projektovanjem betonskih mešavina i pažljivim odabirom materijala.

**Aeranti** se koriste u SCC-u da obezbede otpornost na mraz. Takođe mogu da poboljšaju finiširanje ravnih površina dok je uvlačenje vazduha uglavnom korisno za stabilizovanje niskog sadržaja prašinstih čestica kod samougrađujućih betona nižih čvrstoća.

**Pigmenti** prema EN 12878 mogu da se uspešno koriste i kod SCC-a kao i kod vibriranog betona, ali obzirom da utiču na osobine betona u svežem stanju moraju se uraditi prethodne probe. Generalno, zbog visoke fluidnosti SCC-a, disperzija pigmenta je bolja i boja uniformnija nego kod vibriranih betona. Kako SCC ima veći sadržaj paste potrebna je i veća doza pigmenta za postizanje zahtevane boje.

**Vlakna** – korišćena su i čelična i polimerna vlakna kod samougrađujućeg betona, mada ona smanjuju sposobnost tečenja i sposobnost prolaza koroz armature. Stoga su neophodne prethodne probe da bi se odredili optimalni tip, dužina i količina za postizanje željenih osobina kako svežeg, tako i očvrslog betona. Polimerna vlakna mogu da poboljšaju stabilnost betonske mešavine u smislu da sprečavaju sleganje i pojavu prslina usled plastičnog skupljanja betona. Čelična ili duga polimerna vlakna se koriste za modifikaciju žilavosti očvrslog betona. Njihova dužina i broj se određuju prema maksimalnom zrnima agregata i strukturnim zahtevima.

**Voda** – prema EN 1008, s tim što recikliranu, industrijsku vodu treba posebno ispitati [1].

### 3.2 Projektovanje mešavina

Ne postoji standardni metod za projektovanje SCC mešavina, već su brojne akademske institucije, kompanije koje se bave proizvodnjom prefabrikovanih betonskih elemenata, kao i proizvođači građevinske hemije razvili sopstvene recepture. Recepture često koriste zapreminu kao ključni parametar, zbog važnosti popunjavanja šupljina između zrna agregata. Neke metode formiraju optimalnu granulometrijsku krivu, a neke „propisuju“ optimalno tečenje i stabilnost prvo paste, a zatim i maltera pre dodavanja agregata. Evropski vodič za SCC [1] daje sledeću preporuku za spravljanje mešavine uz napomenu da jedan ili više konstituenata mogu da „izađu“ van okvira navedenih u tabeli 4:

i ograničenjima u proizvodnji betona. U poređenju sa običnim betonom, sva tri tipa mešavine imaju povećan sadržaj superplastifikatora [7].

I u našoj zemlji se rađena određena ispitivanja i objedinjuju pojedinačna iskustva u projektovanju mešavina, mada zvanične preporuke još ne postoje. U tabeli 8 je dat primer mešavine projektovane na Građevinskom fakultetu u Beogradu [5].

Tabela 8: Primer SCC mešavine u Srbiji:

cement	$m_c = 500 \text{ kg/m}^3$ ; $v_c = 0.1667 \text{ m}^3$
silikatna prašina	$m_{sp} = 50 \text{ kg/m}^3$ ; $v_{sp} = 0.0227 \text{ m}^3$
voda	$m_v = 219 \text{ kg/m}^3$ ; $v_v = 0.2190 \text{ m}^3$
superplastifikator	$m_{hd} = 9 \text{ kg/m}^3$ ; $V_{hd} = 0.0090 \text{ m}^3$
kameno brašno	$m_f = 145 \text{ kg/m}^3$
frakcija 0-2 mm	$m_{0-2} = 495.0 \text{ kg/m}^3$
frakcija 2-4 mm	$m_{2-4} = 251.1 \text{ kg/m}^3$
frakcija 4-8 mm	$m_{4-8} = 264.3 \text{ kg/m}^3$
frakcija 8-11,2 mm	$m_{8-11} = 214.8 \text{ kg/m}^3$
frakcija 11,2-16 mm	$m_{11-16} = 280 \text{ kg/m}^3$

#### 4 METODE ISPITIVANJA SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA

SCC je osmišljen da u potpunosti zadovolji standard EN 206-1 u pogledu zapremine mase, porasta čvrstoće, finalne čvrstoće i trajnosti. Obradljivost SCC-a

je veća od najviše klase konzistencije opisane standardom EN 206-1 i može se okarakterisati sledećim osobinama:

- sposobnost tečenja, ispunjavanja (filling ability),
- sposobnost prolaza između armaturnih šipki bez zaglavljivanja (passing ability),
- otpornost na segregaciju tj. stabilnost mešavine (segregation resistance).

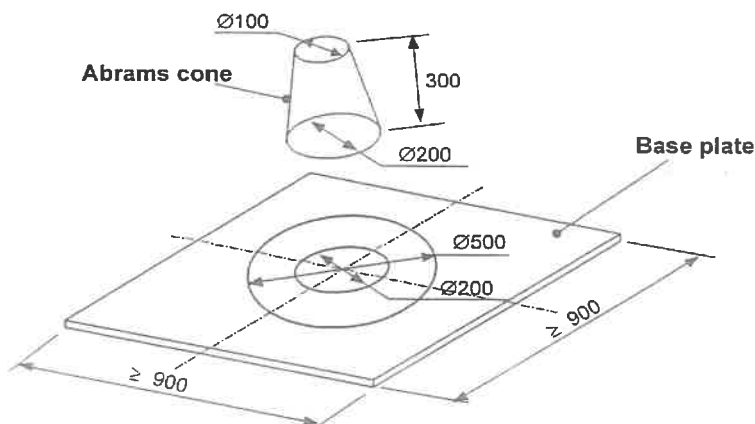
Betonska mešavina će biti klasifikovana kao samougrađujući beton jedino ako su zahtevi za sve tri karakteristike u potpunosti ispunjeni. To ukazuje da prilikom ispitivanja treba da se kombinuje više predloženih metoda. Razvijeno je više različitih metoda ispitivanja konzistencije SCC-a, ali nijedna od njih ne određuje sve relevantne aspekte obradljivosti, tako da se prilikom ispitivanja mora koristiti više metoda. Metode ispitivanja su navedene u tabeli 9 [8].

#### 4.1 SLUMP-FLOW TEST I $T_{50cm}$ TEST

Ovo je najčešće korišćen test koji daje dobre rezultate u određivanju sposobnosti pokretljivosti sveže betonske mase – tečenja, ali ne pokazuje sposobnost prolaza između šipki armature. Takođe, može da naznači otpornost betona prema segregaciji. Argument protiv ovog testa je da u potpunosti slobodno razlivanje betona, neometeno bilo kakvim granicama, ne odgovara stvarnim uslovima u praksi, ali se uspešno može iskoristiti za procenu konzistencije fabrički spravljenog betona koji se doprema na gradilište. Aparatura prema EN 12350-2 data je na slici 2.

Tabela 9: Metode ispitivanja konzistencije samougrađujućih betona

	Metod ispitivanja	Cilj ispitivanja
1	Slump-flow (test konzistencije)	sposobnost tečenja
2	$T_{50cm}$ slump-flow	sposobnost tečenja
3	J-ring (J-prsten)	sposobnost prolaza
4	V-funnel (V-levak)	sposobnost tečenja
5	V-funnel za $T_{5min}$	otpornost na segregaciju
6	L-box (L-kutija)	sposobnost prolaza
7	U-box (U-kutija)	sposobnost prolaza
8	Fill-box (kutija za punjenje)	sposobnost prolaza
9	GTM Screen stability test (GTM sito)	otpornost na segregaciju
10	Orimet test	sposobnost tečenja

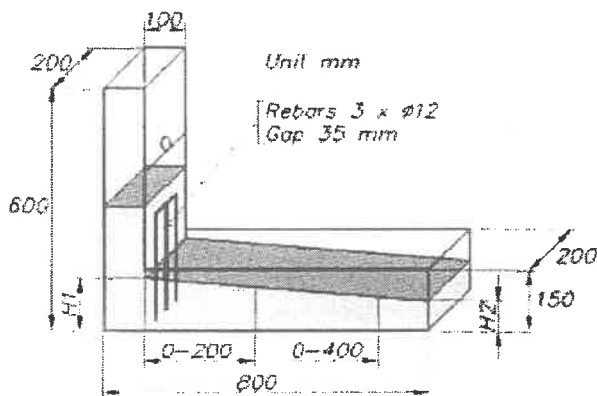


Slika 2. Aparatura za slump-flow test

Levak se puni sa oko 12 dm<sup>3</sup> betona i meri vreme potrebno da beton prođe kroz levak. Što je kraće izmereno vreme, to je sposobnost tečenja betona bolja. Zadovoljavajućim za SCC se smatra vreme od 10 sekundi. Produženo vreme tečenja ukazuje na moguću sklonost betona da „zablokira“ između šipki armature. Nakon ovoga, levak se može ponovo napuniti i ostaviti 5 minuta da beton odstoji. Ukoliko se pritom javi segregacija, vreme tečenja ( $T_{5min}$ ) koje se ponovo meri, biće znatno povećano. Test može da ukaže na još neke osobine betona: ako ima previše krupnog agregata, beton će se zaglavljivati. Dugo vreme tečenja se takođe dovodi u vezu sa niskom deformabilnošću, što se i očekuje od visoko viskozni pasty sa velikim unutrašnjim trenjem [9].

#### 4.4 L-BOX TEST

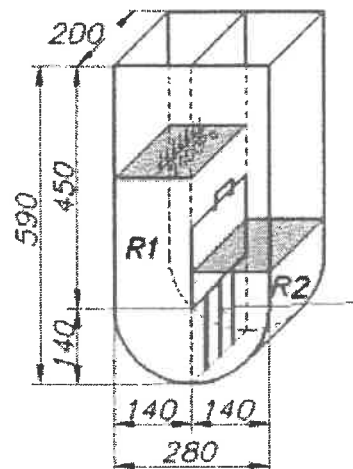
Ovaj test je razvio Peterson na bazi japanskih ispitivanja betona pod vodom. Test služi za procenu tečenja betona i sklonosti „zaglavljivanja“ između šipki armature. Aparatura se sastoji iz kutije „L“ oblika, pravougaonog poprečnog preseka, sa horizontalnim i vertikalnim delom razdvojenim pokretnim poklopcem (izlazom) ispred koga se nalazi vertikalna armatura. Vertikalni odeljak se napuni betonom, a zatim se poklopac podigne da se omogući tečenje betona u horizontalni deo. Kad tečenje prestane meri se visina betona na kraju horizontalnog dela i ostatka u vertikalnom delu ( $H_2/H_1$  na slici 5). To je pokazatelj sposobnosti prolaza betona između armature, a fizički predstavlja nagib betona u mirovanju. Horizontalni odeljak može da bude obeležen na 200 i 400 mm od izlaza pa da se meri vreme dok beton dostigne ove repere. Ovo vreme se označava sa  $T_{20}$  i  $T_{40}$  i pokazatelj je tečenja, mada konkretne vrednosti još nisu dogovorene. Armatura, u principu, može da bude različitog prečnika i postavljena na različitim razmacima, mada se preporučuje, kao i kod običnog betona, razmak jednak trostrukoj vrednosti nominalno najvećeg zrna agregata. Menjanjem razmaka armature se menja i „strogost“ testa. L-box test je najčešće korišćen test, kako u laboratorijskim tako i u gradilišnim uslovima jer određuje dve bitne karakteristike samougrađujućih betona. Pojava segregacije može se uočiti vizuelno, a zatim i ispitati na horizontalnom delu. Nije sa sigurnošću utvrđeno kako zidovi kutije utiču na tečenje betona, ali ovakva postava, do nekog stepena pokazuje šta se zaista dešava sa betonom u oplati [8].



Slika 5. L-box aparatura

#### 4.5 U-BOX TEST

Test je razvijen u japanskom Tehnološkom istraživačkom centru Tajsej korporacije. Koristi se za procenivanje sposobnosti tečenja samougrađujućih betona. Aparatura obuhvata sud koji je središnjom pregradom podeljen na dva odeljka (označeni sa  $R_1$  i  $R_2$  na slici 6), između kojih se nalazi klizni poklopac (izlaz). Armaturene šipke sa nominalnim prečnikom 13 mm su postavljene na izlazu sa osovinskim razmakom od 50 mm. Levi odeljak se napuni sa oko 20 dm<sup>3</sup> betona, zatim se izlaz otvori i beton teče naviše u drugi deo. Meri se visina betona u oba dela. Alternativni oblik kutije, ali sa istim principom rada predlaže Japansko društvo građevinskih inženjera. Test obezbeđuje dobru direktnu procenu tečenja. Kada bi beton imao svojstva vode njegov nivo bi u oba dela U-kutije bio jednak, tj. razlika  $H_1-H_2$  bi bila jednaka nuli. Zbog toga što je razlika nivoa betona u delovima U-kutije bliža nuli, to je bolje tečenje i sposobnost prolaza betona. Razmak između šipki armature se može smatrati suviše malim, a otvoreno je i pitanje do koje visine je penjanje betona prihvatljivo u praksi.



Slika 6. Konstrukcija U-kutije

#### 4.6 FILL-BOX TEST

Test je poznat i kao „Kadžima test“. Koristi se za određivanje tečenja samougrađujućeg betona sa maksimalnim zrnom agregata 20 mm. Aparatura se sastoji iz providnog kontejnera, ravne i glatke površine u kome je smešteno 35 prepreka napravljenih od PVC-a, prečnika 20 mm i centralnim rastojanjem 50 mm, slika 7. Na gornjoj strani je postavljena dovodna cev sa levkom. Kontejner se puni betonom kroz dovodnu cev i razlika u visini betona između dve strane kontejnera je mera tečenja.

Test je teško izvoditi na mesu ugradnje betona zbog složenosti aparature i velike količine betona (oko 45 dm<sup>3</sup>). Daje dobre pokazatelje osobina samougrađujućeg betona. Čak i mešavine sa dobrim tečenjem će pokazati loše rezultate na testu ako su skloni segregaciji. Smatra se da je samougrađujući beton utoliko boljih svojstava što je veća ispunjenost kutije, pod uslovima u kojima se test obavlja.

Tabela 10: Kriterijumi za ocenu testova svežeg SCC-a

osobina	kriterijum
Slump-flow klasa SF1	$\geq 520$ mm, $\leq 700$ mm
Slump-flow klasa SF2	$\geq 640$ mm, $\leq 800$ mm
Slump-flow klasa SF3	$\geq 740$ mm, $\leq 900$ mm
dozvoljeno odstupanje za Slump flow	$\pm 80$ mm od ciljne vrednosti
V-funnel klasa VF1	$\leq 10$ s
V-funnel klasa VF2	$\geq 7$ s, $\leq 27$ s
dozvoljeno odstupanje za V-funnel test	$\pm 3$ s
L-box klasa PA1	$\geq 0,75$
L-box klasa PA2	$\geq 0,75$
dozvoljeno odstupanje za L-box test	ne više od 0,05 ispod ciljne vrednosti
otpornost na segregaciju, klasa SR1	$\leq 23$
otpornost na segregaciju, klasa SR2	$\leq 18$

## 5 PRIMENA SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA

Nakon višegodišnjih istraživanja ponašanja i osobina samougrađujućeg betona krenulo se sa izgradnjom najrazličitijih objekata i to najpre u Japanu. U ovom radu će biti predstavljeni neki od najznačajnijih.

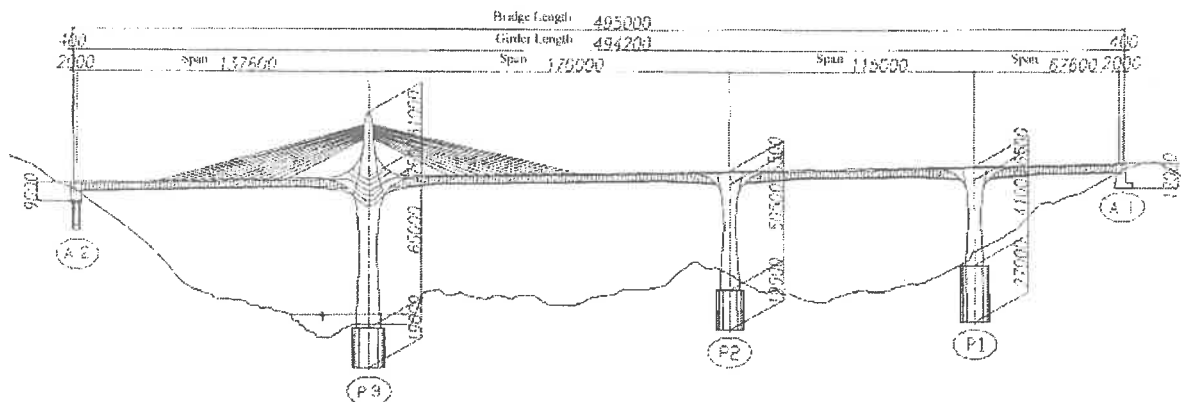
### 5.1 Most Ritto, Japan

Nalazi se na autoputu, najviši srednji stub je visok 65 m. Projektom je zahtevana čvrstoća betona pri pritisku

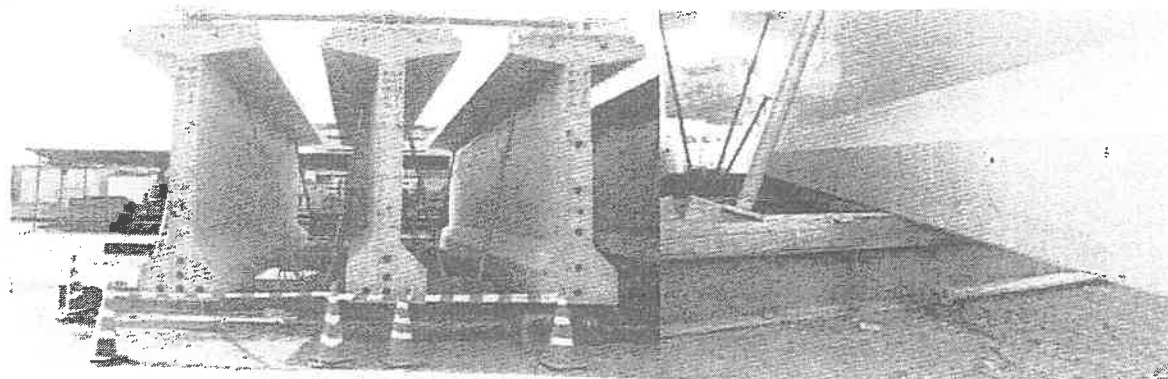
50 N/mm<sup>2</sup> a armature pri zatezanju 685 N/mm<sup>2</sup> zbog uticaja seizmike, slika 9 [7].

### 5.2 Viadukt Higashi Oozu, Japan

Prefabrikovani, prethodnonapregnuti T-nosači su korišćeni kao glavni nosači na viaduktu. U početku je planiran običan, vibrirani beton sa rasprostranjem (slump-flow) 80 mm. Međutim, pokazalo se da je on nepraktičan zbog ogromnih dimenzija nosača, pa se SCC nametnuo kao odlično rešenje, slika 10 [7].



Slika 9. Most Ritto



Slika 10. Glavni nosači viadukta Higashi Oozu



## 6 ZAKLJUČAK

Samougrađujući beton je doneo značajan prosperitet industriji betona omogućivši kvalitetniju i bržu gradnju, prihvatljivu kako sa ekološkog tako i sa veoma značajnog aspekta zdravstvene zaštite radnika. Proteklih 20 godina u svetu su održani brojni kongresi i seminari posvećeni ovoj problematici i pokretani različiti naučno-istraživački projekti u okviru kojih su proučavane i unapređivane osobine SCC-a. Kako ovaj beton određuju karakteristike u svežem stanju: konzistencija, sposobnost prolaza kroz armaturu bez zaglavljivanja i otpornost na segregaciju, to je propisano desetak različitih testova za njihovo proveravanje, s tim što mora da se kombinuje nekoliko testova zajedno da bi se sve navedene osobine ispitala. Osnovni konstitutivni materijali su isti kao i kod vibriranog betona, dok SCC zahteva obavezno prisustvo veće količine praškastih čestica i aditive najnovije generacije (za modifikaciju viskoziteta i redukciju vode). Spravljanje je jako jednostavno, koristi se običan mikser, ali je neophodno kontrolisati sadržaj vlage/vode (mikser mora da bude suv i čist, obavezno se proverava sadržaj vlage u agregatu) na koji je SCC posebno osetljiv. Nakon opsežnih istraživanja krenula je i praktična primena SCC-a. Postao je nezamenljiv u slučajevima gusto postavljene armature, kratkih rokova gradnje, zahtevane visoke čvrstoće. Dok širom sveta niču kapitalni objekti, naša zemlja se, sledeći svetska saznanja i iskustva, sopstvenim istraživanjima polako priključuje korisnicima SCC-a kao „najznačajnije tekovine betonske industrije u XX veku“ [3].

## ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo za nauku Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR-16004 pod nazivom: "Istraživanje

## REZIME

### PRVIH 20 GODINA SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA

Iva DESPOTOVIĆ  
Zoran GRDIĆ  
Gordana TOPLIČIĆ-ČURČIĆ  
Nenad RISTIĆ

Prva samougrađujuća betonska mešavina je projektovana 1988. godine na Tokijskom Univerzitetu u Japanu. Proglašen „revolucionarnim“ otkrićem betonske industrije, zaokupio je pažnju naučne javnosti, pa je u narednih 20 godina pokrenut niz projekata i eksperimenata i održano više naučnih skupova na kojima su prezentovani postignuti rezultati. U radu je dat pregled osobina samougrađujućeg betona, konstitutivnih materijala, metoda ispitivanja i najznačajnijih izvedenih objekata.

**Ključne reči:** samougrađujući beton, konstitutivni materijali, metode ispitivanja, izvedeni objekti

savremenih betonskih kompozita na bazi domaćih sirovina, sa posebnim osvrtom na mogućnosti primene betona sa recikliranim agregatom u betonskim konstrukcijama"

## 7 LITERATURA

- [1] *European Guidelines for Self-Compacting Concrete*; ERMCO,EFNARC, EFCA, CEMBUREAU; pp 63; May 2005.
- [2] Muračljov M.: *Građevinski materijali I*; Građevinska knjiga; Beograd; 2005.
- [3] Khrapko M.: *SCC-A Solution for Technology Hungry Concrete Construction*; CBE Consultancy, Ltd
- [4] Bin Azmi A.: *The properties and flexural behaviour of Self-Compacting Concrete using palm oil fuel ash and admixture*; Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia; april 2008.
- [5] Živković S.: *Svojstva i tehnologija samozbijajućeg betona*; Građevinski kalendar; 2007; str. 234-304.
- [6] Larrard F.,Ferraris C.F., Sedran T.: *Fresh Concrete: A Herschel-Bukley Material*; Materials and Structures; 31 [211] pp. 494-498; 1998.
- [7] Ouchi M., Nakamura S., Osterberg T., Hallberg S., Lwin M.: *Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and The United States*; pp. 20; 2006.
- [8] Grdić Z., Despotović I., Topličić-Čurčić G.: *Metode ispitivanja SCC betona prema standardu EFCA (evropske asocijacije za beton)*; Simpozijum DIMK; Zbornik radova; str. 515-522; Divčibare 2008.
- [9] Grdić Z., Despotović I., Topličić-Čurčić G.: *Properties of Self-Compacting Concrete with different types of additives*; Facta Universitatis, Series Architecture and Civil Engineering, Vol 6, N°2; pp. 173 -177; 2008.

## SUMMARY

### FIRST 20 YEARS OF SELF COMPACTING CONCRETE

Iva DESPOTOVIĆ  
Zoran GRDIĆ  
Gordana TOPLIČIĆ-ČURČIĆ  
Nenad RISTIĆ

First self-compacting concrete mix is made in University of Tokyo in Japan. Named as „revolutionary“ discover of concrete industry, it took attend of science world, in next 20 years there was a plenty of projects, experiments, and science reunions where results are presented. This paper consists review of properties of self-compacting concrete, constituent materials, test methods and realised objects.

**Key words:** self-compacting concrete, constituent materials, test methods, realised objects