



**DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE
MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE**



INSTITUT IMS AD, BEOGRAD



**UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE

Konferencija
SAVREMENI MATERIJALI I
KONSTRUKCIJE SA REGULATIVOM

Zbornik radova

Beograd, 17. jun 2016. godine

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

691:66.017(082)
620.1:691(082)

КОНФЕРЕНЦИЈА Савремени материјали и конструкције са
регулативом (2016 ;
Београд)

Zbornik radova / Konferencija Savremeni materijali i
konstrukcije sa
regulativom, Beograd 17. jun 2016. ; [organizatori] Društvo
za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija
Srbije ... [et al.] ; [editor Dragica Jevtić]. - Beograd :
Društvo za ispitivanje i istraživanje i konstrukcija
Srbije, 2016 (Đurinci : Atom štampa). - [10], 130 str. :
ilustr. ; 25 cm

Radovi na srp. i engl. jeziku. - Str. [9-10]: Predgovor /
Dragica Jevtić. - Tiraž 150. - Bibliografija uz svaki rad.
- Rezimeji ; Summaries.

ISBN 978-86-87615-07-6

a) Грађевински материјали - Зборници
COBISS.SR-ID 224025356

Izdavač: **Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije**
Beograd, Kneza Miloša 9/I

Editor: **Prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn.**
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd

Štampa: "Atom štampa" - Karađorđeva 81, 11450 Sopot

Tiraž: 150 primeraka

Konferenciju **SAVREMENI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE SA
REGULATIVOM**, koja se održava u Beogradu 17. juna 2016. godine, organizovali su
Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije i Institut IMS.

Skup je organizovan uz podršku: **MINISTARSTVA PROSVETE, NAUKE I
TEHNOLOŠKOG RAZVOJA i INŽENJERSKE KOMORE SRBIJE**

Beograd, 17. jun 2016. godine

NAUČNI KOMITET

1. Prof. dr Radomir Folić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
2. Prof. dr Dragoslav Stojić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
3. Prof. dr Mirjana Malešev, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
4. Vanr. prof. dr Gordana Topličić-Ćurčić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
5. Dr Zagorka Radojević, Institut IMS, Beograd
6. Dr Nenad Šušić, Institut IMS, Beograd
7. Dr Ksenija Janković, Institut IMS, Beograd
8. Dr Milorad Smiljanić, Institut za puteve, Beograd
9. Professor Mihailo Trifunac, Civil Eng. Department University of Southern California, Los Angeles, USA
10. Prof.dr Dubravka Bjegović, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakulte, Zagreb, Hrvatska
11. Predrag Popović, Wiss, Janney, Elstner Associates, Northbrook, Illinois, USA
12. Professor Asterios Lionis, Democratus University of Trace, Faculty of Civil Eng., Greece
13. Professor Ivan Damnjanović, Texas A&M University, College Station, TX Zachry Department of Civil Engineering, USA
14. Prof. dr Meri Cvetkovska, Građevinski fakultet, Univ. „Sv. Kiril i Metodij“, Skoplje, Makedonija
15. Prof. dr Miloš Knežević, Građevinski fakultet, Podgorica, Crna Gora
16. Prof. dr Damir Zenunović, Univerzitet u Tuzli, BIH

ORGANIZACIONI ODBOR

1. Prof. dr Dragica Jevtić, Građevinski fakultet, Beograd
2. Dr Vencislav Grabulov, Institut IMS, Beograd
3. Prof. dr Branko Božić, Građevinski fakultet, Beograd
4. Prof. dr Mihailo Muravljev, Građevinski fakultet, Beograd
5. Prof. dr Boško Stevanović, Građevinski fakultet, Beograd
6. Prof. dr Zoran Grdić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
7. Prof. dr Dragoslav Šumarac, Građevinski fakultet, Beograd
8. Prof. dr Vlastimir Radonjanin, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
9. Prof. dr Karolj Kasaš, Građevinski fakultet, Subotica
10. Prof. dr Milan Dimkić, Institut "Jaroslav Černi", Beograd
11. Milutin Ignjatović, generalni direktor Saobraćajnog Instituta CIP, Beograd
12. Pal Kermeci, inž.tehn. "Potisje Kanjiža", Kanjiža
13. Vesna Zvekić, dipl.inž.tehn., „Polet“ Novi Bečej



Mihailo Muravljov¹
Dimitrije Zakić²
Marina Aškračić³
Dragan Gavrilović⁴

UDK: 691.328:624.191.8

FIZIČKO-MEHANIČKA SVOJSTVA TORKRET BETONA SA DODATKOM SINTETIČKIH VLAKANA NAMENJENOG ZA TUNELSKJE OBLOGE

Rezime: U radu su prikazani rezultati komparativnih ispitivanja torkret betona spravljenih sa dodatkom sintetičkih makro vlakana, "čistog" torkret betona (bez vlakana) i "čistog" torkret betona armiranog klasičnom (mrežastom) armaturom. Ispitivani su gredni nosači opterećeni na savijanje i svojstva cilindričnih uzoraka izvađenih iz ploča od torkret betona uzetih na gradilištu (zapreminska masa, čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju cepanjem, vodonepropustljivost i žilavost po metodi CK).

Ključne reči: torkret beton, mikroarmiranje, sintetička vlakna, eksperimentalno ispitivanje, tunnelske obloge

PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF SYNTHETIC FIBER REINFORCED SHOTCRETE USED FOR TUNNEL LININGS

Summary: The results of comparative testing of synthetic macro-fiber reinforced shotcrete, ordinary shotcrete (without fibers) and ordinary shotcrete with steel mesh reinforcement, are presented in this paper. Shotcrete beams subjected to flexure, as well as properties of core specimens taken from construction site plates (density, compressive strength, tensile splitting strength, water permeability, toughness according to WS test) were investigated.

Key words: shotcrete, fiber reinforcement, synthetic fibers, experimental testing, tunnel linings

¹ dipl.inž.graž., dr, redovni profesor u penziji, mmuravljov@imk.grf.bg.ac.rs

² dipl.inž.građ., dr, docent, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, dimmy@imk.grf.bg.ac.rs

³ dipl.inž.građ., asistent, Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, amarina@imk.grf.bg.ac.rs

⁴ generalni direktor, Sika doo, Srbija, Patrijarha Pavla 1, 22310 Šimanovci, gavrilovic.dragan@rs.sika.com

1. UVOD

Pod torkretiranjem se podrazumeva postupak nabacivanja betona na jednostranu oplatu ili na neki zid, površinu ranije izbetonirane konstrukcije, površinu stene (u useku, tunelu i slično), putem komprimovanog vazduha [1]. Često se, umesto pojma "torkret", koriste i nazivi "prskani" ili "mlazni beton", dok su u engleskom govornom području u upotrebi termini "shotcrete" ili "sprayed concrete". Pod ovim terminima često se istovremeno podrazumevaju konstruktivni materijal, proces i oprema za nanošenje torkreta. Mada relativno skup, postupak torkretiranja se dosta široko primenjuje, pošto se ovako ugrađen beton odlikuje visokim fizičko-mehaničkim svojstvima (zapreminskom masom, čvrstoćom, athezijom za podlogu, vodonepropustljivošću, otpornošću na dejstvo mraza), kao i zadovoljavajućom trajnošću. U cilju smanjivanja odskoka (tzv. "rebound" efekat), obezbeđenja neophodne tiksotropnosti mešavine i boljeg slepljivanja mase za površinu na koju se nabacuje, torkret-beton se često spravlja i sa određenim specifičnim hemijskim dodacima, kao i sa mikroarmaturom (najčešće čelična ili sintetička vlakna). Ubrzani priraštaj čvrstoće kod torkret-betona, njegova sposobnost da se lako nanosi na nepravilne površine bez potrebe za postavljanjem oplata, kao i sposobnost da obezbedi dodatnu fleksibilnost stenskoj masi, čine ovaj postupak idealnim za primenu u podzemnim radovima, kao i u oblasti sanacija.

Generalno, postoje dva postupka nanošenja torkreta na podlogu: suvi i mokri. Kod suvog postupka, do uređaja za nabacivanje – torkretnog topa, dovodi se suva mešavina agregata i cementa pod pritiskom, pa se tek neposredno pred nabacivanje na podlogu ova mešavina meša sa vodom. Pri tome, obično se koristi sitniji agregat ($D \leq 8$ mm), a korišćeni vodocementni faktor kreće se u granicama 0,32-0,37. Optimalna debljina sloja nabačenog betona iznosi 25-30 mm. U slučaju mokrog postupka, sve komponente betonske mešavine istovremeno se mešaju, a zatim se potiskuju kroz naročite cevi do mlaznice iz koje bivaju izbačeni brzinom od oko 120 m/s. Pri ovom postupku mogu se koristiti i agregati većih prečnika ($D \leq 25$ mm), uz manji utrošak cementa u odnosu na suvi postupak. Takođe, primenom ovakve tehnologije omogućeno je nabacivanje slojeva betona veće debljine, koja može da iznosi 50-70 mm [1].

U poslednje vreme, sve češće se primenjuju tzv. mikroarmirani torkret betoni (FRS – *Fiber Reinforced Shotcrete*). Razlika u odnosu na standardni torkret beton (armiran klasičnom – čeličnom armaturom u vidu mreže), je u tome što FRS beton sadrži armaturu u obliku čeličnih ili sintetičkih vlakana. Tokom nanošenja torkreta na podlogu velikom brzinom, vlakna se uniformno raspoređuju u masi betona, čime se dobija homogenija struktura kompozita u vidu prostorne matrice armirane trodimenzionalnom mikroarmaturom. Vlakna u značajnoj meri mogu da poboljšaju svojstva betona, a pre svega u domenu povećanja zateznih čvrstoća (pri aksijalnom zatezanju, savijanju i cepanju), zatim poboljšanja statičke i udarne žilavosti, kao i kontrole propagacije prslina usled skupljanja. Vlakna, takođe, povećavaju atheziju (prijanjanje) betona za podlogu, vodonepropustljivost, otpornost na dejstvo mraza i otpornost pri požarnom opterećenju.

U ovom radu, biće reči o metodologiji ispitivanja i analizi dobijenih rezultata komparativnih ispitivanja tri vrste torkret betona: prvog, spravljenog sa dodatkom sintetičkih (poliolefinskih) makro vlakana, zatim "čistog" torkret betona (bez dodatka vlakana) i, konačno, "čistog" torkret betona armiranog klasičnom (mrežastom) armaturom.

2. SPROVEDENA ISPITIVANJA

2.1. Program ispitivanja

Kao što je već u uvodnom delu istaknuto, u okviru rada će biti prezentirani i analizirani rezultati komparativnih ispitivanja uzoraka tri vrste torkret betona. Pri tome, osnovni sastav predmetnog betona u sva tri slučaja bio je identičan (agregat, cement, voda, aditivi za torkret beton), a jedina razlika odnosila se na eventualno prisustvo klasične (mrežaste) armature, odnosno mikroarmature (videti tabelu 1). Svi uzorci za ispitivanje spravljani su na gradilištu tunela Brančići kod Ljiga (Koridor 11), u jednom sloju, po mokrom postupku uobičajenom u tehnologiji torkret betona.

Komponenta		Količina (kg/m ³)
Cement CEM II/A-M(S-L) 42,5 R (Lafarge)		410
Voda - bunarska		184
W/C faktor		0,45
Superplastifikator SIKA® Viscocrete Techno 20S		2,5 (0,6 % m _c)
Ubrzivač SIKA® Sigunit L5601 AF		20,5 (5,0 % m _c)
Agregat	Rečni ("Dunavac") 0 – 4 mm	538
	Drobljeni ("Jelen Do") 0 – 4 mm	807
	Drobljeni ("Jelen Do") 4 – 8 mm	238
Poliolefinska vlakna Sikafiber T-60 (u mešavinama III i IV)		4,0 (6,0)

Tabela 1. Usvojena receptura mešavine torkret betona

Za potrebe predmetnog ispitivanja, napravljene su ukupno četiri različite mešavine, kod kojih je variran samo tip i količina armature, odnosno mikroarmature. Prva receptura (gore navedena), bila je definisana kao "čist" torkret beton – etalon (serija I), druga kao "čist" torkret beton sa klasičnom armaturnom mrežom MAR Q188 (serija II), a treća i četvrta kao mikroarmirani torkret beton sa dodatkom sintetičkih (poliolefinskih) vlakana "Sikafiber T-60" u količini od 4 kg/m³ (serija III), odnosno 6 kg/m³ (serija IV).

Što se tiče uzoraka za ispitivanje, od svake mešavine napravljena su po dva tipa grednih elemenata dužine 160 cm, nominalnih preseka b/d = 40/15 cm i b/d = 40/25 cm. Ovi elementi su bili namenjeni za ispitivanje putem savijanja, kao nosači sa rasponima 140 cm opterećeni koncentrisanim silama u sredinama raspona. Tokom ispitivanja, a pri rastućim silama, vršeno je i merenje deformacija predmetnih elemenata, što znači da je, osim sila loma, bilo predviđeno i registrovanje njihovih ugiba u sredinama raspona.

Takođe, na gradilištu su uzeti i uzorci oblika ploča dimenzija 60x60x15 cm i 60x60x25 cm izrađeni od "čistog" torkret betona (serija I), od torkret betona sa 4 kg/m³ vlakana (serija III) i od torkret betona sa 6 kg/m³ vlakana (serija IV). Prema Programu ispitivanja, iz predmetnih ploča su naknadno vađeni kernovi predviđeni za ispitivanja čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri zatezanju cepanjem, žilavosti (duktilnosti) i vodonepropustljivosti. Sva ispitivanja kernova obavljena su na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, u Laboratoriji za materijale Instituta za materijale i konstrukcije, osim ispitivanja žilavosti koje je vršeno na institutu IRMA u Ljubljani.

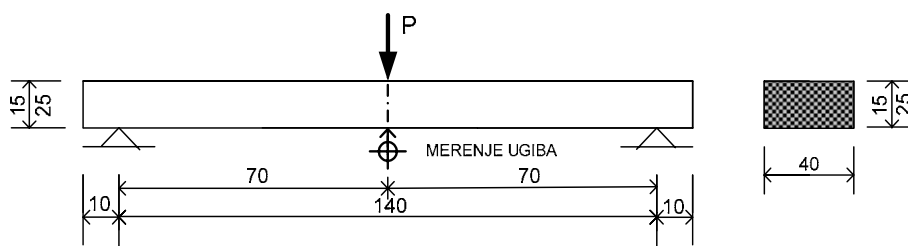
Svojstva sintetičkih (poliolefinskih) makro vlakana [7], koja su korišćena u mešavinama III i IV, prikazana su u okviru tabele 2.

Svojstvo	Vrednost
Osnovni materijal	Poliolefinska vlakna 100%
Način proizvodnje	Ekstrudiranjem
Tip vlakana	Monofilamentna, talasasta vlakna
Poprečni presek	Pravougaoni
Ekvivalentni prečnik	0.92 mm
Dužina	60 mm
Faktor oblika (l/d)	65.2
Broj vlakana / kg	27778
Toplotna provodljivost	niska
Električna provodljivost	niska
Čvrstoća pri zatezanju	≥ 560 MPa
Izduženje pri lomu	4 %
Modul elastičnosti	20.5 GPa
Tačka razmekšavanja	110°C
Tačka topljenja	280°C
Preporučeno doziranje	3 - 10 kg/m ³

Tabela 2- Tehnički podaci o poliolefinskim vlaknima "Sikafiber® T-60"

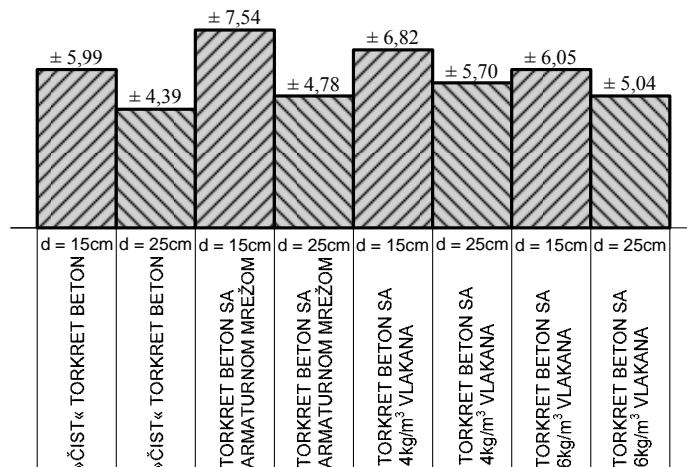
2.2. Ispitivanje grednih elemenata

Ispitivanje grednih elemenata na savijanje, uz odgovarajuća merenja deformacijskih veličina - ugiba u sredinama raspona, sprovedeno je na po tri uzorka nosača sa dva različita poprečna preseka (visine 15, odnosno 25 cm), izrađena od torkret betona serije I - IV. Dakle, ukupno su ispitana 24 gredna elementa. Ovo ispitivanje je sprovedeno saglasno dispoziciji prikazanoj na slici 1.

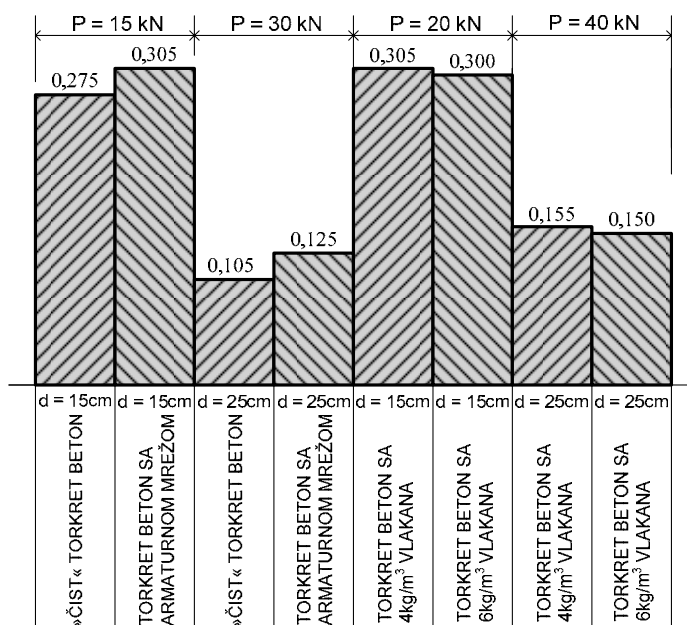


Slika 1. Dispozicija ispitivanja grednih nosača

Na slici 2 prikazane su srednje vrednosti čvrstoće pri savijanju, a na slici 3 srednje vrednosti izmerenih ugiba u sredinama raspona grednih elemenata.



Slika 2. Čvrstoće pri savijanju dobijene ispitivanjem (u MPa)



Slika 3. Ugibi nosača u sredinama raspona (u mm) pri delovanju sila P (u kN)

Kao što se može videti na slici 3, prikazani su ugibi ispitivanih grednih elemenata pri delovanju koncentrisanih sila P. S obzirom da su sva ispitivanja o kojima je reč sprovedena na po tri uzorka-nosača sa dva različita poprečna preseka, a na gredama

spravljenim od torkret betona serije I-IV, u svim slučajevima je po jedan od tri uzorka-nosača prvo ispitan do loma bez merenja deformacija. Tom prilikom je konstatovano da sve gredece (bez obzira na torkret beton primenjen u okviru njih), karakteriše izrazito krto ponašanje koje se manifestuje naglim "otkazom" pri dostizanju određene sile P_{gr} , odnosno naglim "otkazom" praćenim pojavom jedne magistralne pukotine u srednjem preseku gredece. To je ukazivalo da je kod svih gredica pri ispitivanju, praktično do samog loma, prisutna linearna zavisnost: *opterećenje (sila P) - deformacija (ugib u sredini raspona)*, pa je stoga odlučeno da se merenja ugiba vrše samo pri silama P koje će biti približno jednake poznatim silama $P_{gr}/2$. S obzirom na to, tokom ispitivanja su mereni ugibi pri veličinama sile P koje su se kretale od 15-40 kN (kako je prikazano na slici 3).

2.3. Ispitivanje kernova izvađenih iz ploča

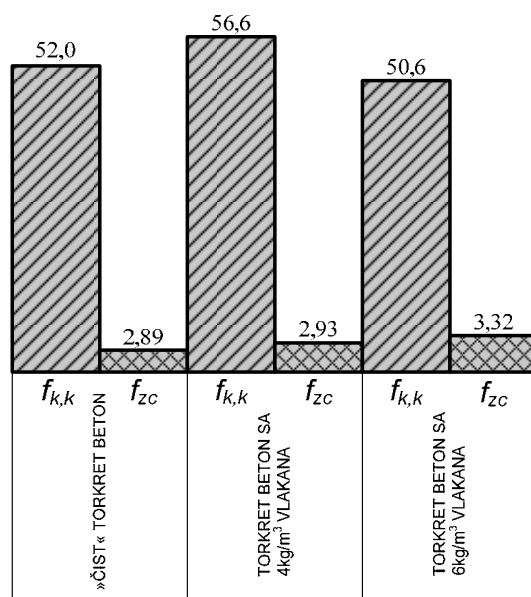
Na kernovima izvađenim iz ploča dimenzija 60x60x15 cm i 60x60x25 cm, sprovedena su ispitivanja sledećih svojstava torkret betona - serija I, III i IV:

- čvrstoće pri pritisku (na kernovima nominalnih prečnika 100 mm),
- čvrstoće pri zatezanju "cepanjem" (na kernovima nominalnih prečnika 100 mm),

i

- vodonepropustljivosti (na kernovima nominalnih prečnika 150 mm).

Na slici 4 prikazane su srednje vrednosti čvrstoće pri pritisku ($f_{k,k}$) ispitane po standardu SRPS ISO 4012:2000 i čvrstoće pri zatezanju cepanjem (f_{zc}) po standardu SRPS EN 12390-6:2012, dobijene ispitivanjem kernova.



Slika 4. Čvrstoće $f_{k,k}$ i f_{zc} (u MPa) dobijene ispitivanjem kernova

Ispitivanje vodonepropustljivosti torkret betona preko uzoraka-kernova izvađenih iz ploča dimenzija 60x60x15cm i 60x60x25cm sprovedeno je na bazi standarda SRPS U.M1.015:1998. Dobijeni rezultati (srednje vrednosti), prikazani su u tabeli 3.

Oznaka serije i debljina ploče	Dubine prodora vode		Klasa VDP prema standardu SRPS U.M1.206:2013
	Srednja vrednost (mm)	Maksimalna vrednost (mm)	
Seriya I-15cm	23	25	V-II
Seriya I -25cm	28	36	V-I
Seriya III -15cm	22	26	V-II
Seriya III -25cm	18	23	V-II
Seriya IV-15cm	24	27	V-II
Seriya IV-25cm	25	30	V-II

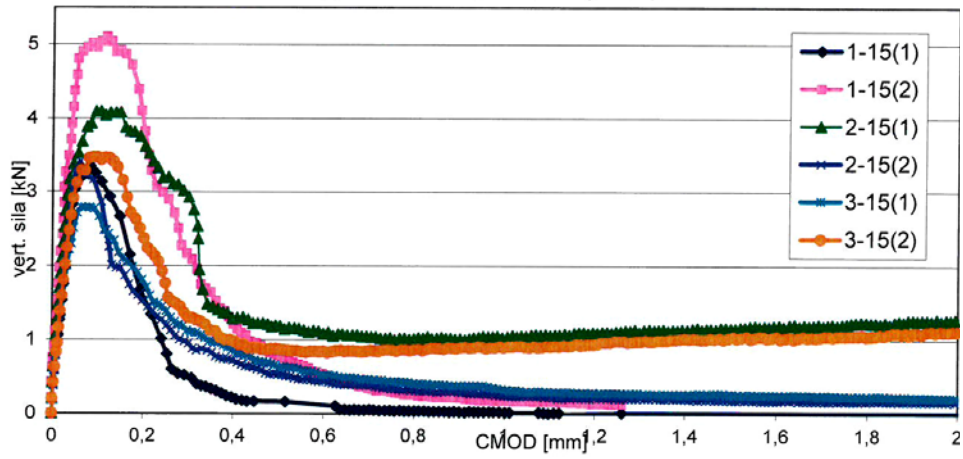
Tabela 3. Rezultati ispitivanja vodonepropustljivosti (dubine prodora vode i klase VDP)

Kao što je već ranije rečeno, specifična ispitivanja žilavosti (duktilnosti) torkret betona vršena su na institutu IRMA u Ljubljani. U tu svrhu korišćeni su uzorci-kernovi nominalnog prečnika 150 mm, izvađeni iz ploča dimenzija 60x60x15cm i 60x60x25cm, izrađenih od torkret betona serija I, III i IV. Ispitana su po 2 uzorka od svake serije i debljine ploče (ukupno 12 cilindara).

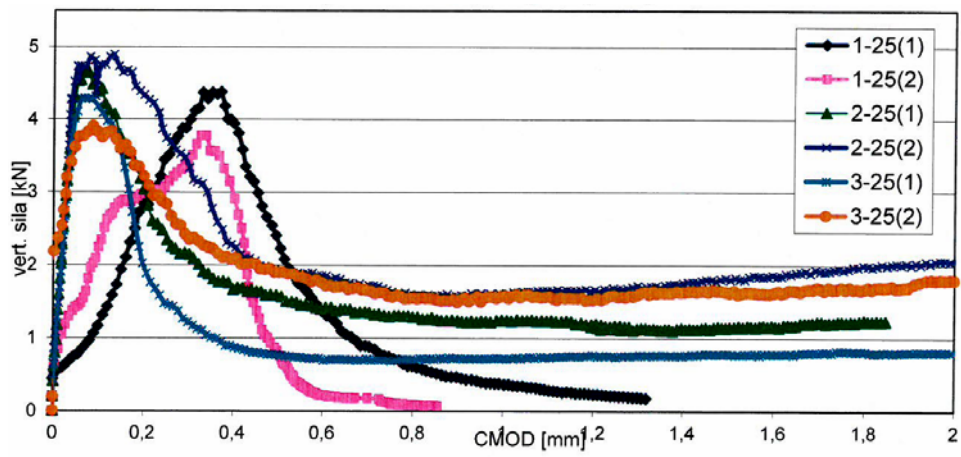
Jedan od najefikasnijih i najčešće korišćenih postupaka koji spadaju u grupu ispitivanja žilavosti (duktilnosti) betona je tzv. test cepanja pomoću klina ("*Wedge splitting test*"). Oblast koju pokriva predmetna metoda (CK) odnosi se na određivanje performansi mikroarmiranih betona, koristeći parametre definisane na osnovu radnog dijagrama sila – lokalno razdvajanje *ŠOP* (promena širine otvora prsline na mestu zareza), a koji se dobija pri statičkom ispitivanju betona cepanjem pomoću klina. Ispitivanja o kojima je reč obavezno se vrše na servo-kontrolisanim presama sa konstantnom brzinom priraštaja deformacije.

Starost uzoraka u vreme ispitivanja iznosila je cca 90 dana. U skladu sa preporukama autora metode [2], kao i na osnovu ranijih istraživanja iz ove oblasti, odlučeno je da brzina priraštaja deformacije tokom eksperimenta bude konstantna i da iznosi 0,05 mm/s. Za analizu performansi mikroarmiranog betona korišćeni su dijagrami *P-ŠOP* (sila-lokalno razdvajanje), prikazani na slikama 5 i 6, koji su dobijeni tako što je tokom cepanja probnog tela pomoću klina, paralelno sa veličinom opterećenja, registrovana i promena širine otvora prsline (*ŠOP*), na mestu zareza dubine 50 mm. U konkretnom slučaju, ova promena merena je pomoću elektronskih deformetara tipa *LVDT* (merača ugiba, odnosno razdvajanja). Tokom celokupnog postupka, pomoću odgovarajućeg softvera vršena je kontrola i registrovanje sledećih veličina: vremena, sile i deformacije (ugib 1, ugib 2 i srednja vrednost ugiba).

Na osnovu prikazanih dijagrama, mogu se odrediti različiti parametri žilavosti (duktilnosti) mikroarmiranog betona. Među njima, najznačajniji su: ekvivalentna čvrstoća f_{sp} (merena do unapred definisane karakteristične vrednosti širine otvora prsline $ŠOP_{sp} = 0.4$ mm) i ukupna količina apsorbovane energije (W) – koja predstavlja površinu ispod dijagrama sila-deformacija (lokalno razdvajanje). U tabeli 4, prikazani su rezultati ispitivanja duktilnosti torkret betona po metodi cepanja klinom (CK).



Slika 5. Dijagrami sila-lokalno razdvajanje dobijeni ispitivanjem kernova izvađenih iz ploča debljine 15 cm



Slika 6. Dijagrami sila-lokalno razdvajanje dobijeni ispitivanjem kernova izvađenih iz ploča debljine 25 cm

Napomena: CMOD (Crack mouth opening displacement) = ŠOP (Širina otvora prsline)

Oznaka serije, debljina ploče i broja uzorka	Maksimalna sila F_{max} (kN)	Čvrstoća pri maksimalnoj sili f_{max} (MPa)	Ukupna apsorbirana energija W (Nm) (do 2 mm)	Ekvivalentna čvrstoća f_{sp} (MPa) (do 0,4 mm)
Seriya I-15 (1)	3,35	5,63	572.0	3.33
Seriya I-15 (2)	5,11	4,66	1604.7	4.01
Seriya II-15 (1)	4,09	3,94	3034.3	4.47
Seriya II-15 (2)	3,41	3,11	1292.4	2.39
Seriya III-15 (1)	2,79	2,44	1230.7	2.23
Seriya III-15 (2)	3,47	3,27	2403.8	3.10
Seriya I-25 (1)	4,37	4,08	1989.1	2.87
Seriya I-25 (2)	3,77	3,68	1699.1	2.65
Seriya II-25 (1)	4,65	4,75	3236.3	4.62
Seriya II-25 (2)	4,89	4,77	4369.5	5.94
Seriya III-25 (1)	4,29	4,27	2130.9	3.48
Seriya III-25 (2)	3,91	3,81	3892.3	3.69

Tabela 4. Rezultati ispitivanja žilavosti (duktilnosti) torkret betona na osnovu metode CK

3. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Na osnovu obimnih komparativnih ispitivanja torkret betona spravljenih sa dodatkom poliolefinskih vlakana pod nazivom "Sikafiber T-60" (u količini od 4 kg/m³, odnosno 6 kg/m³), kao i uzoraka od "čistog" torkret betona bez vlakana i uzoraka od "čistog" torkret betona armiranog klasičnom (mrežastom) armaturom, a čiji su eksperimentalni rezultati prikazani u okviru ovog rada, može se zaključiti sledeće:

- sva ispitivanja koja su obavljena na grednim elementima (opterećenim na savijanje koncentrisanim silama u sredinama raspona), kao i na kernovima izvađenim iz pločastih elemenata (čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju cepanjem, vodonepropustljivost, žilavost po metodi CK), pokazala su neujednačenost rezultata ispitivanja – što je posledica, pre svega, nehomogenog sastava i strukture betona koji se ugrađuje postupkom torkretiranja;

- sve ispitivane gredne elemente karakterisale su relativno visoke čvrstoće pri savijanju koje su se kretale u intervalu $\pm 4,39$ do $\pm 7,54$ MPa; u slučaju grednih elemenata sa armaturnom mrežom MAR Q188, zaključeno je da je ista postavljena tako da nema većeg uticaja na nosivost preseka; pregledom preseka gredica utvrđeno je pomeranje armaturne mreže koja se od siline udara torkret betona krivila i time smanjivala debljinu zaštitnog sloja;

- s druge strane, u grednim elementima spravljenim sa mikroarmaturom, u presecima su jasno uočljiva vlakna koja su uniformno raspoređena po celom preseku;

- poređenjem rezultata koji se odnose na gredne elemente od "čistog" torkret betona i na elemente sa vlaknima, proizilazi da uticaj vlakna na čvrstoće pri savijanju postoji, ali da je on relativno mali; ovaj uticaj je nešto jače izražen kod uzoraka spravljenih sa većom količinom vlakana;

- na osnovu analize rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku, proizilazi da su sve dobijene čvrstoće $f_{k,k}$ prilično velike - veće od 50 MPa; takođe, može se zaključiti da ovo

svojstvo ne zavisi u značajnoj meri od količine upotrebljenih vlakana, i da su, šta više, te čvrstoće pri količini vlakana od 4 kg/m^3 veće nego u slučaju torkreta sa 6 kg/m^3 vlakana;

- slični zaključci važe i u slučaju ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem (f_{zc}), čiji rezultati pokazuju da vlakna imaju određenog uticaja na tu čvrstoću, naročito u slučaju veće količine vlakana (6 kg/m^3), gde se u odnosu na "čist" torkret beton dobija povećanje čvrstoće od oko 15%;

- što se tiče ispitivanja vodonepropustljivosti, svi torkret betoni pokazali su zadovoljavajuće rezultate (u većini slučajeva registrovana dubina prodora vode kretala se između 20 i 30 mm, što odgovara klasi vodonepropustljivosti V-II prema standardu SRPS U.M1.206:2013); takođe, analizom rezultata prikazanih u tabeli 3, može se zaključiti da najujednačeniji kvalitet po ovom pitanju ima beton serija III (sa dodatkom 4 kg/m^3 vlakana);

- na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja žilavosti (duktilnosti) mikroarmiranog torkret betona metodom CK, može se izvući generalni zaključak da se najbolji efekat postiže primenom betona serija III (sa dodatkom 4 kg/m^3 vlakana), kod koga su dobijene najviše vrednosti ukupne apsorbovane energije i ekvivalentne čvrstoće;

- osim po pitanju pojedinih fizičko-mehaničkih svojstava i parametara žilavosti (duktilnosti), mikroarmirani torkret betoni pokazali su bolje performanse (u odnosu na etalon) i u domenu ponašanja nakon loma; naime, prisustvo vlakana koja premošćavaju nastale pukotine, doprinosi očuvanju integriteta (celovitosti) ispitivanih uzoraka i nakon dostizanja maksimalnog opterećenja;

- konačno, na bazi svih napred navedenih rezultata, autori stoje na stanovištu da sintetička (poliolefinska) vlakna pod nazivom "Sikafiber T-60" mogu da se upotrebe kao zamena za klasičnu (mrežnu) armaturu kod tunelskih obloga; pri tome, kao optimalan kompozit ovog tipa, u tehničko-tehnološkom smislu, može da se usvoji mikroarmirani torkret beton serije III - sa dodatkom 4 kg/m^3 predmetnih vlakana.

4. LITERATURA

- [1] M. Muravljov, *Osnovi teorije i tehnologije betona*, Građ. knjiga, Beograd, 1991.
- [2] Tschegg, E.K., *New Equipment for Fracture Tests on Concrete*, Materialprüfung 33, No. 11 - 12, München, 1991, str. 338 - 342.
- [3] Zakić D., *Eksperimentalno istraživanje parametara duktilnosti kod betona mikroarmiranih sintetičkim vlaknima*, Savremeno graditeljstvo, godina III, br. 07-2011, str. 24-37, UDK: 624.012.45.04, ISSN 1986-5759.
- [4] Balaguru P.N., Shah S.P., *Fiber Reinforced Cement Composites*, Mc Graw-Hill, New York, 1992.
- [5] Jevtić, D., Zakić, D., Savić, A., *Relevantne statičke i dinamičke metode za ocenu žilavosti mikroarmiranih betona*, Građevinski materijali i konstrukcije br.1/2011, str. 3-27, ISSN 0543-0798, UDK: 624.012.45; 666.982.2; 620.178.2=861.
- [6] *European specification for sprayed concrete*, EFNARC, Surray, UK, 1996.
- [7] *Product data sheet "Sikafiber T-60"*, Sika, 2009.