

PRIMJENA MIKROARMIRANOG PRSKANOG BETONA U TUNELOGRADNJI

Doc.dr Mato Uljarević, dipl. inž.građ.¹

Mr Bojana Grujić, dipl. inž.građ.²

Žarko Grujić, dipl. inž. građ.³

UDK: 624.19 : 666.982.2

DOI: 10.14415/zbornikGFS22.010

Rezime: U radu su predstavljene mogućnosti primjene mikroarmiranog prskanog betona za izradu optimalne primarne podgrade tunelske konstrukcije, za odgovarajuće geotehničke sredine. Na bazi sprovedenih istraživanja pri iskopu hidrotehničkog tunela u radu se prikazuju prednosti primjene ovog betona kao primarne ali i definitivne obloge tunela.

Ključne riječi: *Tunel, mikroarmirani beton, podgrada i obloga tunela.*

1. UVOD

Osnovni zadatak tehničke discipline o podzemnim konstrukcijama jeste proučavanje osnovnih principa građenja, kao i uslova projektovanja u različitim stijenskim masama a da pri tome ostane zadovoljen uslov stabilnosti ovih objekata. S tim u vezi, danas se postavljaju oštri i strogi uslovi i kriterijumi primjene različitih vrsta materijala koji se koriste za izradu primarne podgrade tunelske konstrukcije. Primarna podgrada je svojim oblikom prilagođena iskopnoj konturi objekata a svojom krutošću bi trebalo da se odupre svim potencijalnim uticajima.

Materijalima koji se koriste za izradu primarne podgrade tunelske konstrukcije, a to su beton, sidra, remenate, armatura ili kombinacija istih bi trebalo dodati i prskani mikroarmirani beton. Iako je raspoređivanje vlakana podložno stohastici, dovoljno je inženjerski pouzdano za brzo osiguranje iskopa u stijeni, uz dodatak sidrenja, po potrebi.

2. MJEŠAVINA MIKROARMIRANOG BETONA I TEHNOLOGIJA IZRADE

Mikroarmirani prskani beton predstavlja savremeni i složeni kompozitni materijal koji je dobijen zahvaljujući ojačanju cementne matrice pomoću ravnomjerno dispergovanih različitih vrsta vlakana: čeličnih, sintetičkih, etilenskih, polipropilenskih, staklenih i drugih u matrici betona. Ova vrsta betona predstavlja složeni beton gdje se jasno mogu razlikovati dvije komponente: osnovni materijal-matrica i dodatni materijal-mikroarmatura čiji je osnovni zadatak da poboljša karakteristike osnovnog materijala -

¹ Arhitektonsko-građevinski fakultet u Banjoj Luci

² Arhitektonsko-građevinski fakultet u Banjoj Luci

³ Arhitektonsko-građevinski fakultet u Banjoj Luci

matrice. U ovom slučaju vlakna imaju višestruku ulogu a njihov najveći doprinos je povećanje čvrstoće i duktilnosti kompozita, uz istovremeno smanjenje zapreminskih deformacija skupljanja. Tehnologija izrade mikroarmiranog prskanog betona ne razlikuje se bitno od tehnologije izrade običnog prskanog betona. Razlike su primjetne jedino kod opreme za ugrađivanje gdje je tradicionalnu opremu zbog dozaže vlakana potrebno modifikovati. Naime, zbog eliminisanja mogućnosti stvaranja “grudvica” od sitne faze osnovnog kompozita i vlakana, neophodno je vlakna dozirati na samoj mlaznici uz prethodno raspršivanje istih u adekvatnoj opremi.

Količina vlakana koja se primjenjuje u mješavini mikroarmiranog betona značajno varira u zavisnosti od tipa primjenjenih vlakana i željenih karakteristika betona i kreće se u rasponu od 0,1% pa sve do 5% u odnosu na ukupnu zapreminu gotovog betona. Uobičajene količine čeličnih vlakana kreću se u obimu od 20 – 80 kg po 1m³ mješavine svježeg ugrađenog betona (što predstavlja 0,25-1,0% zapremine betona). Dodatak vlakana utiče kako na cementne kompozite u svježem, tako i u očvrslom stanju.

U parametre vlakana spadaju: vrsta i količina, prečnik, faktor oblika tj. odnos dužine i prečnika, prionljivost, mehanička svojstva i dr. Svakako, trebalo bi naglasiti da parametri upotrijebljenih vlakana u okviru mješavine diktiraju i opredjeljuju svojstva kompozita (mehanička, reološka, koroziona trajnost, otpornost na požar, otpornost na udar...) a samim tim i ponašanje primarne obloge u aktivnom stanju.

U mikroarmiranoj mješavini potrebno je obezbijediti ravnomjernu disperziju vlakana u svim pravcima i u cijeloj zapremini mješavine. Primjena pojedinačnih vlakana mnogo više utiče na promjenu ugradljivosti i obradljivosti svježih mješavina nego fibrilizovana (međusobno povezana) vlakna. Isti efekat se postiže i prilikom upotrebe vlakna manjeg prečnika i većih dužina tj. vlakana sa većim faktorom oblika (l/d). Dakle, sa porastom faktora oblika broj vlakana u jedinici zapremine betona se značajno povećava a posebno ako je riječ o monofilamentnim vlaknima.

Konzistencija osnovnog kompozita se značajno mijenja sa dodavanjem odgovarajuće količine vlakana (postaje inertnija i kruća) i sa povećanjem faktora oblika (l/d), kao i sa porastom nominalno najkrupnijeg zrna agregata (D). Ovakva slika mješavine mikroarmiranog betona utiče i na poboljšana svojstva vodopropustljivosti primarne obloge tunela izgrađene od ovog betona. Za postizanje željenog efekta u mikroarmiranom betonu suočeni smo sa suprotstavljenim zahtjevima. S jedne strane da bi smo dobili homogen kompozit, optimalno je moguća ugradnja manjeg procenta vlakana sa većim faktorom oblika ili nešto većim procentom sa manjim faktorom oblika. Sa druge strane sve fizičko-mehaničke osobine kompozita mikroarmiranog betona zahtijevaju vlakna sa većim faktorom oblika, ili deformisanim krajevima, većom dozažom.

Uz sve ovo, trebalo bi pri izvođenju-nanošenju mikroarmiranog prskanog betona provesti stroge kontrolne mjere, kojima bi se obezbijedio zahtijevani kvalitet. Takođe je bitno napomenuti da je zbog tehnologije izrade i pojave “odskoka” sastav ugrađenog prskanog betona nešto drugačiji u odnosu na projektovani, a time su ostvarene drugačije fizičko-mehaničke karakteristike betona u odnosu na projektovani.

Projektovani sastav mješavine za 1m³ prskanog betona za hidrotehnički tunel pod pritiskom bez vlakana sastojao se od slećih količina osnovnih materijala:

- cement 378 kg
- BS1 42 kg
- agregat: 0-4mm...55%
4-8mm...20%
8-16mm...25%

S obzirom na količinu dodatih vlakana izvedeni su sledeći sastavi mješavina, i to:

- sastav "A" - bez vlakana
- sastav "B" - sa 40 kg vlakana na 1m³ mješavine
- sastav "C" - sa 60 kg vlakana na 1m³ mješavine
- sastav "D" - sa 80 kg vlakana na 1m³ mješavine
- sastav "E" - bez vlakana, ali sa armaturnom mrežom Q-131

Ispitivanja su sprovedena u cilju racionalizacije tunelske obloge. U tu svrhu su izrađene probne dionice od mikroarmiranog prskanog betona debljine 10 cm, sa čeličnim vlaknima.

Programom ispitivanja predviđeno je ispitivanje sledećih svojstava:

- a) Ispitivanje svojstava svježeg prskanog betona
- b) Ispitivanje svojstava očvrstlog betona na uzorcima izvađenim iz panela i to:
 - pritisna čvrstoća kod starosti: 3; 7; 28 i 90 dana
 - zatezna čvrstoća pri savijanju i žilavost kod starosti betona 28 i 90 dana na prizmama 10x10x40cm
 - vodonepropusnost kod starosti betona 90 dana na valjcima ϕ 15cm
 - abrazijska otpornost kod starosti betona 90 dana

Rezultati ispitivanja očvrstlog betona (pritisna čvrstoća) prikazani su u tabeli br. 1.

Tabela br. 1. Čvrstoća na pritisak

Sastav betona	Dozaža vlakana	Pritisna čvrstoća					
		17 dana		28 dana		90 dana	
		Zapr.masa (kg/m ³)	f _b Mpa	Zaprem.masa (kg/m ³)	f _b MPa	Zaprem.masa (kg/m ³)	f _b Mpa
A	-	2,203	27,5	2,199	27,9	2,184	37,4
B	0,41	2,201	26,2	2,217	26,2	2,188	37,6
C	0,65	2,205	28,9	2,215	31,0	2,215	38,5
D	0,83	2,228	31,9	2,18	32,3	2,179	39,8

Rezultati čvrstoća na zatezanje:

Tabela br. 2. Čvrstoća na zatezanje

Sastav betona	Dozaža vlakana	Čvrstoća pri zatezanju cijepanjem f _{zc} (Mpa)			
		28 dana		90 dana	
		Smjer ispitivanja			
		(V)	(H)	(V)	(H)
A	-	3,2	4,1	4,3	4,4
B	0,41	4,8	4,4	5,1	4,5
C	0,65	5,2	4,1	6,0	4,5
D	0,83	5,4	4,4	8,0	-

Rezultati čvrstoća na savijanje:

Tabela br.3. Zatezna čvrstoća savijanjem

Sastav betona	Dozaža vlakana	Čvrstoće pri zatezanju savijanjem				Žilavost					
		28 dana		90 dana		28 dana			90 dana		
		f_b (MPa)	f_u (MPa)	f_b (MPa)	f_u (MPa)	gF_{el} (J/M2)	GF (J/M2)	I10 -	gF_{el} (J/M2)	GF (J/M2)	I10 -
A	0,00	4,8	0,0	7,1	0,0	0,87	0,87	1,0	1,48	1,48	1,0
B	0,41	5,1	1,0	7,5	0,8	0,91	1,68	1,8	1,53	2,32	1,6
C	0,65	5,6	2,8	7,7	3,2	0,97	3,15	4,0	1,63	4,58	2,8
D	0,83	6,3	4,0	7,8	4,5	0,91	5,34	5,9	1,8	5,67	3,3

Tabela br. 4. Habanje mikroarmiranog betona

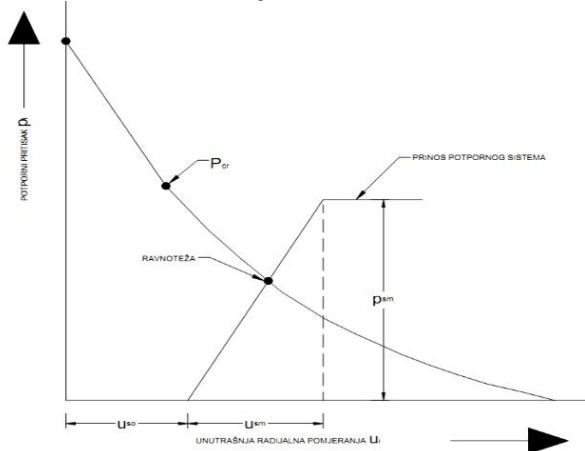
Sastav betona	Dozaža vlakana (%)	Habanje 90 dana
		Gubitak mase ($cm^3/50cm^2$)
A	0,00	25,3
B	0,41	17,0
C	0,65	14,0
D	0,83	12,1

5. NAPONSKO-DEFORMACIONA SLIKA OKO ISKOPA TUNELA

Brzina izrade primarne podgrade tunela istovremeno diktira konačnu izradu (realizaciju) i ekonomsku opravdanost predmetnog objekta. S tim u vezi, dovoljno je bitno i poznavanje naponsko-deformacionih procesa oko iskopa tunela.

Stanje napona oko radnog čela tunela je trodimenzionalno. U neiskopanom dijelu stijenske mase, na dužini od 1,5 prečnika tunela od čela tunela, stanje napona je nepromjenjeno i jednako je primarnom (prirodnom) stanju napona u terenu. Na čelu tunela, stijenska masa stvara pritisak na mjestu buduće konture iskopa koji iznosi 20-30 % prirodnog napona u dotičnom terenu. Odgovarajući pritisak u zoni čela dozvoljava iskopanim dionicama da stoje dovoljno dugo dok se ne postavi podgrada. Ovaj uticaj se postepeno smanjuje do nule na razdaljini od 4,5 prečnika tunela od radnog čela. Zbog trodimenzionalnog rasporeda napona na radnom čelu tunela, primjena dvodimenzionalnih numeričkih analiza interakcije sistema podgrade tunela i okolne stijenske mase mora biti veoma pažljiva. Većina dvodimenzionalnih numeričkih formulacija za analize iskopa pretpostavlja ravanske uslove deformacija. Međutim, ovi uslovi su primjenjivi samo na dijelove tunela daleko od radnog čela. U numeričkoj simulaciji građenja tunela, ako je tunel prvo iskopan a potom postavljen pasivni sistem podgrade, podgradni sistem neće nositi opterećenje. To je zato što bi se sve deformacije desile prije nego što je postavljena podgrada. Sa druge strane, ukoliko je podgrada postavljena u modelu prije nego što je tunel iskopan, podgradni sistem će biti izložen cjelokupnom prirodnom opterećenju, a to je scenario koji se može desiti samo ukoliko se podgrada postavi prije nego što nastanu bilo kakve deformacije u granicama iskopavanja. To bi vodilo ka konzervativnom rješenju, pošto se u stvarnosti događa izvjestan stepen relaksacije napona, jer je već izvršena određena deformacija tunelske konture u vrijeme kada je postavljena podgrada. Brzina izrade primarne podgrade od

mikroarmiranog betona svakako je u funkciji ravnoteže tačke presjeka karakteristične krive podgrade i karakteristične krive stijenske mase.



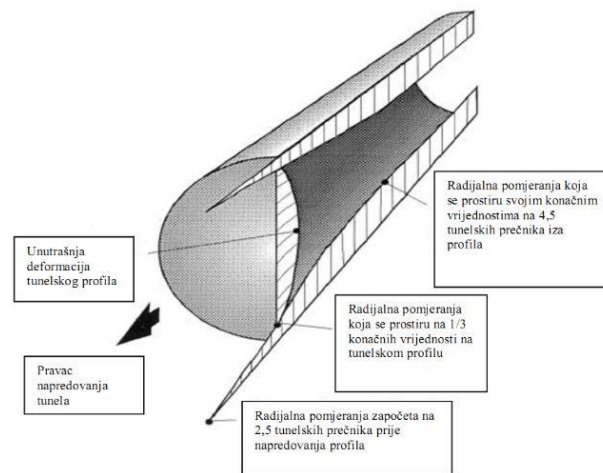
Slika br.1. Uticaj potpornog sistema pomjeranja tunelskog zida kao posljedica uvođenja ravnoteže

Sukcesivnim rješavanjem naponsko-deformacionog problema, za različite pretpostavke o vrijednosti otpora podgrade dobija se niz pokazatelja karakterističnih stanja podzemne prostorije. Preciznije rečeno, za svaku pretpostavljenu vrijednost o kontaktnom naponu na konturi podzemne prostorije u trenutku uspostavljanja ravnog stanja deformacije (varirajući ga od početne vrijednosti do nule), rješavanjem naponsko deformacionog problema, dobijaju se vrijednosti pomjeranja na konturi u funkciji otpora podgrade.

Teško je dati egzaktnu analizu kojom će se utvrditi potrebna podgrada. Zbog toga se u izradi podgradnih sistema predlaže pristup reaktivnog pritiska podgrade na okolnu stijenu. Odabrani tip podgrade, pa samim tim i mikroarmiranog betona svojim fizičko-mehaničkim karakteristikama kao i geometrijom obezbjeđuje (može da nosi) reaktivno opterećenje radijusa otvora okomito na tangentu konturne površine otvora. Ovako predviđeno reaktivno opterećenje će u slici naponskih stanja predstavljati manji glavni napon (σ_3) koji se kao takav unosi u model loma prema Hook Brown-u, ako su u pitanju stijene minimalne čvrstoće ili Mor-Culona ako su u pitanju mekše stijene ili tla. U slučaju da nije zadovoljen kriterijum loma u novoj iteraciji se mijenja ili geometrija odabrane podgrade ili tipovi loma sve dok uslov ne bude zadovoljen.

Pri tome je prividan otpor podgrade jednak prirodnom naponu na određenoj udaljenosti (oko 2.5 prečnika tunela) unutar stijenske mase ispred radnog čela, jednak oko $\frac{1}{4}$ prirodnog naponu na mjestu radnog čela i postepeno se svodi na nulu. Zbog toga je nužno izvršiti naponsko-deformacijsku analizu stijenske mase u zoni iskopa. Primjenom osno-simetrične analize deformacija na tunelu odgovarajućeg kružnog preseka mogu se, sa prihvatljivim nivoom aproksimacije, dobiti pomjeranja u funkciji napredovanja radnog čela i odrediti trenutke postavljanja podgrade, odnosno procijeniti deformacije konture tunelskog iskopa koje se dešavaju prije njenog postavljanja. Vrijeme postavljanja podgrade definiše se na osnovu uslova stabilnosti nepodgrađene stijenske mase i tehnološkog ograničenja deformacija konture tunelskog iskopa prije postavljanja podgrade, a u funkciji primjenjenog načina gradnje na posmatranoj dionici. Ravnoteža se uspostavlja ako karakteristična kriva podgrade siječe karakterističnu krivu stijenske

mase. Ako se podgrada ugradi prekasno, možda je već nastupila deformacija stijenske mase u tolikoj mjeri da se ne može spriječiti slabljenje ispucalog materijala sl.br.1. Sa druge strane, ako nosivost podgrade nije odgovarajuća, podgrada može da dostigne svoju granicu izdržljivosti prije presijecanja karakteristične krive stijenske mase. U bilo kom od ova dva slučaja podgradni sistem neće imati efekta, jer neće biti uspostavljeno ravnotežno stanje. Trebalo bi imati u vidu da plastični lom stijenske mase oko tunela ne mora da znači urušavanje tunela. Na osnovu naprijed navedenog vidi se da vrstu podgrade i vrijeme njenog ugrađivanja treba pažljivo izabrati imajući u vidu geomehaničke karakteristike stijenske mase, stabilnost nepodgrađene konture iskopa i tehnološke mogućnosti i ograničenja.



Slika br.2. Radijalna pomjeranja u korak sa napredovanjem tunelskog profila

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu obimnih ispitivanja koja su sprovedena na hidrotehničkom tunelu i objavljenih rezultata može se zaključiti da su prednosti mikroarmiranog betona u odnosu na klasičan prskani beton armiran mrežama višestruki:

- armaturna mreža na pojedinim mjestima znatno odstupa od konture iskopa, te je potrebno više torkreta da se armaturna mreža prekrije
- manji utrošak prskanog betona (zbog potrebe manje debljine)
- upotrebom mikroarmiranog prskanog betona se bolje popunjavaju neravnine iskopa i pukotine u stijenama
- rad sa mikroarmiranim torkret betonom je sigurniji, jer se kod primjene klasičnog prskanog betona armaturne mreže postavljaju u uslovima nepotpune stabilizacije iskopa, pa je rad u takvim uslovima opasniji i mnogo teži
- postiže se višestruka ušteta u vremenu primjenom mikroarmiranog prskanog betona zbog bržeg napredovanja radova na osiguranju tunelskog otvora
- radove na malim površinama mnogo je lakše organizovati primjenom mikroarmiranog mlaznog betona

- brzina izrade obloge diktira brže postizanje ravnoteže oko tunelskog otvora a time dobijamo ekonomičniju podgradu
- kod primjene mikroarmiranog prskanog betona pozicija postavljanja armature se isključuje
- radove na malim površinam mnogo je lakše organizovati primjenom mikroarmiranog mlaznog betona
- vlakna slučajno raspoređena u masi betona prožimaju beton na znatno manjem rastojanju nego uzengije što ima veliki značaj
- čvrstoća na zatezanje mikroarmiranog prskanog betona koja odgovara pojavi prve pukotine i granične pukotine su povećane u odnosu na beton bez vlakana pri djelovanju poprečnih sila
- znatno je povećana apsorpcija energije i duktilnost kod elemenata koji su napregnuti poprečnim silama a koji su izrađeni od vlaknastog prskanog betona.

Sa svim svojim prednostima, može se zaključiti da je primjena prskanog, mikroarmiranog betona višestruka, kako u podzemnim tako i u nadzemnim konstrukcijama. Usavršavanjem tehnologije izrade i vrste upotrijebljenih vlakana u matrici betona, prethodne navedene karakteristike pomenutog betona kao i njegova upotreba postaće još raznovrsnije i obimnije.

LITERATURA

- [1] Practical Rock Engineering – CH.5-EXCAVATION AND SHOTCRETE SUPPORT , E. Hoek **2000**.
- [2] Tehnologija i svojstva mikroarmiranog betona u tunelskoj oblozi sa osvrtom na njenu nosivost kao podgradne konstrukcije, M. Uljarević **1993**.
- [3] Analiza rezultata ispitivanja betona mikroarmiranog čeličnim vlaknima-Spajić D. Jevtić, D. Zakić, **2004**.god.
- [4] ACI Committet 336. 2R-88, Suggested Analysis and Design Procedures for Combined Footings and Mats-**2002**.
- [5] ACI Committet 346M-09. Specification for Cast-in-Place Concrete Pipe-2009
- [6] Primjena specijalnih vrsta betona za izradu primarne podgrade tunelske konstrukcije, B. Grujić **2012**.

APPLICATION OF FIBER REINFORCED SHOTCRETE IN TUNNELING

Summary: *The paper presents the possibilities of applying fiber reinforced shotcrete for making optimal tunnel primary support structures for appropriate geotechnical environment. Based on research conducted at the hydropower tunnel excavation, the paper shows the benefits of applying the concrete as the primary and final lining.*

Keywords: *Tunnel, reinforced concrete lining, and tunnel lining.*