

Optimizacija kvaliteta betonske matrice uvođenjem superplastifikatora i njeno ojačavanje primenom čeličnih vlakana

Vera Momirović, dipl.inž.¹⁾

Optimizacija osobina betonske matrice i njeno ojačanje čeličnim vlaknima predstavlja jedan od preduslova za projektovanje vlaknastog betona. Procesom se selektivno određuje vrsta komponenata, sadržaj superplastifikatora, kohezivne emulzije i veziva da bi se postigao zahtevani stepen kohezivnosti betonske matrice. Umešavanjem odabrane vrste čeličnih vlakana u ovako pripremljenu matricu, moguće je sa većom preciznošću kreirati fizičko-mehaničke osobine očvrstlog vlaknastog betona koje se traže projektnim zadatkom.

Ključne reči: Vlaknasti beton, komponente, tehnološke osobine, čelično vlakno, karakteristike betona, primena.

Uvod

VLAKNASTI beton je specifičan građevinski materijal, koji se po svojim fizičko-mehaničkim osobinama suštinski razlikuje od klasičnog armiranog ili nearmiranog betona.

Umešavanjem vlakana u svežu matricu betona dobija se kompozit sa izraženim plastičnim svojstvima. Zavisno od vrste primenjenih vlakana (staklena, polipropilenska, čelična i dr.), mogu se uvećati neke od slabo izraženih karakteristika klasičnog nearmiranog betona kao što su: otpornost na udar, žilavost, čvrstoća pri zatezanju, dinamička čvrstoća, otpornost na visokociklični i niskociklični zamor, otpornost na habanje, kavitaciju i dr.

Ozbiljnija istraživanja u razvoju ove vrste betona započeta su kroz eksperimentalne radove početkom 1960-tih godina, a nastavljena su velikim državnim naučnim projektima u: SAD, Rusiji, V. Britaniji, Švedskoj, Francuskoj, Nemačkoj, Japanu, Australiji itd.

Danas, vlaknasti materijali imaju sve širu primenu u mnogim granama tehnike, a kompoziti na bazi ugljeničnih i staklenih vlakana postali su nezamenljivi osnovni konstrukcioni materijali u proizvodnji sredstava ratne tehnike.

Tako je i vlaknasti beton po svojim specifičnim osobinama postao atraktivan građevinski materijal širokog spektra primene. Posebno se izdvaja njegova upotrebljivost za izgradnju vojnih objekata posebne namene, što je u svetskim kretanjima uslovalo izdašnije finansiranje fundamentalnih i intenziviranje primenjenih istraživanja. Stečena su mnoga eksperimentalna i praktična iskustva na izgradnji objekata inženjerskog obezbeđenja oružanih snaga najrazvijenijih zemalja sveta. Vlaknasti beton je ocenjen kao visokokvalitetni materijal upotrebljiv za: brze popravke oštećenja na kolovoznim konstrukcijama, mostovima i sl., brzu izgradnju poljske fortifikacije, objekte stalne fortifikacije (raketni položaji, topovske kupole, bunkeri), brzu izgradnju lansirnih i plovni mostova, podzemnih objekata izvedenih u obliku sfernih i cilindričnih ljuski i izradu maketa za lažno prikazivanje objekata i reljefa.

U radu je izložena optimizacija ulaznih parametara u cilju postizanja odgovarajućeg stepena kohezivnosti betonske matrice. Ukazano je i na polazne aspekte ojačavanja iste čeličnim vlaknima koji proizlaze iz dosadašnjih eksperimentalnih istraživanja.

Izbor komponenata

Najčešće se u široj literaturi uopštavaju vrste i kvaliteti komponenata za spravljanje matrice vlaknastog betona. Obično se preporučuje upotreba cementa bilo koje vrste i klase, kameni agregati različitog porekla standardnih granulacija, zatim hemijski i mineralni dodaci adekvatni očekivanim osobinama svežeg i očvrstlog betona.

Saglasno specifičnim zahtevima inženjerije, po pitanju karakteristika predmetnog materijala iz ovako uopštene slike ulaznih konstituenata, nameće se potreba za što preciznijim izborom osnovnih komponenata koje treba usmeriti po sledećim parametrima:

- *cement*, vrsta veziva određuje se na osnovu uslova sredine i namene objekta prema ENV 197-1 podeli, sa orijen-tacijom na klasu 45; deklarisanje kvaliteta je standardno po tehničkim uslovima iz JUS B.C1.011/82., a određuje se po JUS EN metodama,
- *kameni agregat*, za formiranje stabilne skeletne strukture i dobijanje guste malterske sredine, u kojoj bi se lako i haotično raspodelila vlakna, treba koristiti isključivo drobljene frakcije sa nominalnim maksimalnim zrnom 16 ili 22 mm; posebno se naglašava da gradacija sitne frakcije 0/4mm ima sledeće okvirne granice:

veličina otvora sita mm	maseni sadržaj granulata %
0.09	10
0.125	13
0.25	15-25
0.50	30-50
1.00	40-80
2.00	65-100
4.00	90-100

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

- *superplastifikator*, dosadašnje iskustvo nedvosmisleno ukazuje da ovaj hemijski dodatak čini svežu smešu pokretljivom, lakša je distribucija vlakana, a cementna emulzija postaje gušća u raspoloživom prostoru rastvora cementa i vode; svojim kvalitetom i količinom superplastifikator može direktno uticati na veličinu kohezije svežeg betona, odnosno na atheziju vlakana u matrici, pa samim tim na karakter pojave prslina i propagaciju pukotina u očvrslom betonu izloženom raznim vidovima opterećenja.
- *voda*, za spravljanje betonskih mešavina koristi se voda iz vodovodne mreže koja zadovoljava standard JUS U.M1.058 kojim su propisani tehnički uslovi kvaliteta vode za spravljanje betona.

Osobine matrice svežeg betona

Novi pristup u projektovanju karakteristika očvrslag vlaknastog betona podrazumeva analitičko modeliranje niza tehnoloških parametara koji definišu osobine i utvrđuju sastav matrice svežeg betona [1].

To znači, da pomenuti parametri kreiraju tehnološkičnost [2] izraženu kroz: konzistenciju, homogenost, kohezivnost, kompaktilnost, segregaciju, izdvajanje vode i završnu obradivost svežeg betona iz koje kao posledica izlazi tehnološki optimalni sastav matrice.

Od navedenih relevantnih faktora na kvalitet očekivanih karakteristika očvrslag vlaknastog kompozita veliki uticaj ima kohezija sveže matrice ojačane vlaknima. Po definiciji kohezija betonske smeše predstavlja privlačnu silu između čestica cementa, vode i agregata, i ukoliko se ona što duže održi opirući se spoljnim destruktivnim uticajima, utoliko će homogenost smeše i kvalitet očvrslag betona biti ostvareni u većoj meri. Ovo fazno stanje materije naročito je važno održati u toku spravljanja i ugrađivanja betona mikroarmiranog čeličnim vlaknima. Pri tome treba ispoštovati dva principa: prvi - uspostavljanje maksimalne polazne kohezije matrice koju optimizira stepen konzistencije i drugi - minimalno izdvajanje vode iz ugrađenog uzorka /elementa što vizuelno ukazuje na ocenu stanja niza drugih faktora (segregiranost, sadržaj superplastifikatora i vode i dr.).

Maksimalna polazna kohezija ostvaruje se visokom gustinom cementne mineralne emulzije koja podrazumeva stepen koncentracije rastvora u sistemu: cement - voda - fine čestice agregata krupnoće do 0,25mm.

Poznato je da se primenom superplastifikatora može efikasno uticati na „cement-mehanizam” smanjenja vode [3] pa tako indirektno i na koheziju matrice betona. Zato superplastifikator postaje obavezna komponenta u kreiranju karakteristika vlaknastog betona.

Ekspperimentalni deo

Za realizaciju optimizacije izvršene su laboratorijske probe za koje su upotrebljene sledeće ulazne komponente: cement PC 45B *Beočinske fabrike cementa*, drobljeni kameni agregat iz kamenoloma u Podbukovima (*D.V.P., „Erozija”-Valjevo*) u frakcijama 0-4, 4-8, 8-16mm, superplastifikator „Reobet SPK 989” proizvod *HI „Prvi maj”- Čačak*, voda iz vodovoda.

Hemijska analiza i fizičko-mehaničke osobine cementa

prikazane su u tabelama 1 i 2.

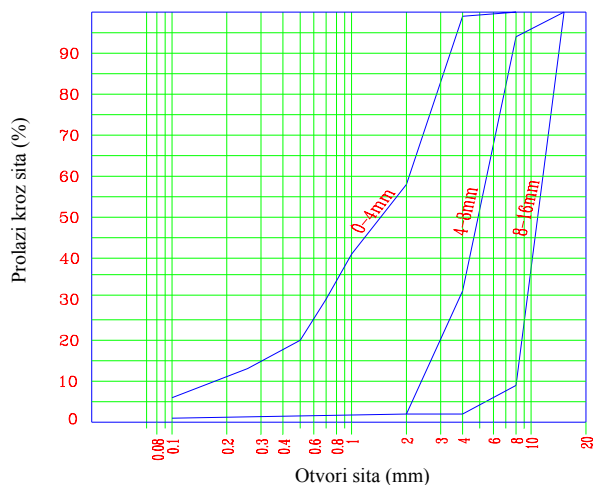
Tabela 1. Hemijski sastav cementa

Hemijski sastav (JUS B.C8.020/85.)	% mas.
a. Hidrauličko vezivo	
SiO ₂	20,17
Al ₂ O ₃	5,82
Fe ₂ O ₃	2,60
CaO	60,11
b. Primese	
Nerastvorljivi ostatak	0,26
Vlaga na 105°C	0,54
Gubitak žarenjem bez vlage i CO ₂	1,48
Vezani CO ₂ u CaCO ₃	0,16
Vezani CaO u CaCO ₃	0,20
Vezani CaO u CaSO ₄	1,43
Slobodni CaO	1,56
Vezani SO ₃ u CaSO ₄	3,17
Na ₂ O	0,01
K ₂ O	1,19
MgO	3,17
MnO	0,05
Ukupno:	100,92

Tabela 2. Fizičko-mehaničke osobine cementa

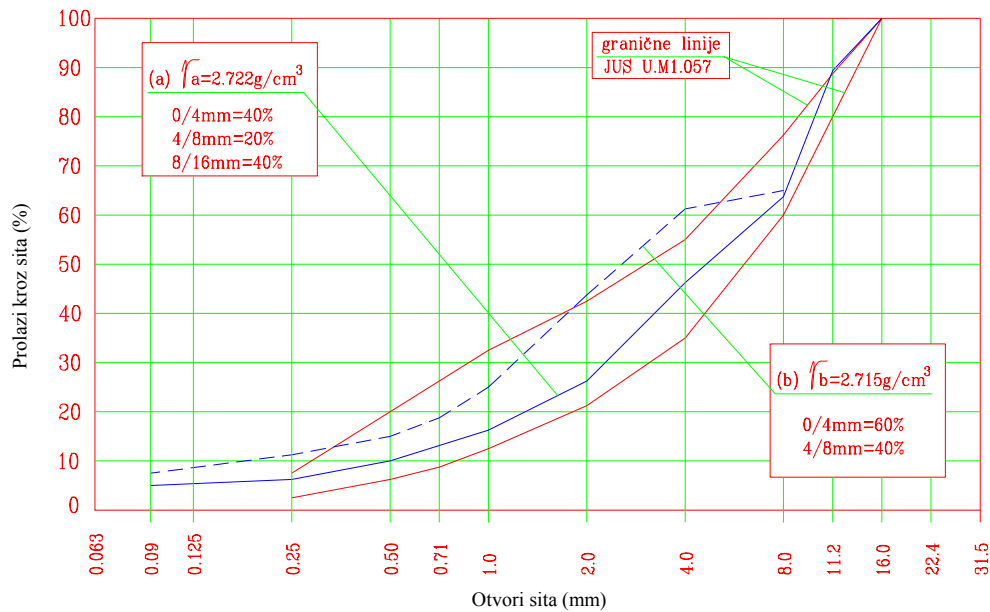
a. Fizička svojstva	Kvalitet
Specifična površina (Blaine), cm ² /g	3700
Gustina, g/cm ³	3,06
Vezivanje:	
voda za standardnu konzistenciju, %mas.	25
početak vezivanja, mm	191
kraj vezivanja, min.	290
Stalnost zapremine (Le Chatelier), mm	0,9
b. Mehanička čvrstoća	
Pritisna čvrstoća, MPa	
– na 3 dana	26,5
– na 28 dana	59,7
Savojna čvrstoća, MPa	
– na 3 dana	6,1
– na 28 dana	9,0

Granulometrijski sastav frakcija kamenog agregata „Podbukovi” i sadržaj sitnih čestica određeni su prema standardima JUS B.B8.029 i JUS B.B8.036. Dijagram prosejavanja prikazan je na sl.1.



Slika 1. Dijagram granulometrijskog sastava agregata

Za spravljanje probnih mešavina primenjena su dva granulometrijska sastava - kontinualni (a) i diskontinualni (b), sl.2.



Slika 2. Granulometrijski sastavi mešavina kamenog agregata „Podbukovi“

Optimizacija matrice izvršena je na bazi analize rezultata ispitivanja koji su selektovani kroz tri faze označene tipovima matrica A, B i C, tabela 3.

Tabela 3. Parametri matrice

Faza optimizacije / tip matrice	A	B	C
Sadržaj cementa, kg/m ³ betona	300	300	400
Granulacija	(a)	(b)	(b)
Sadržaj superplastifikatora, % / masu cementa	3	5	5

Optičajni tehnološki parametri za optimizaciju i izbor sastava sveže betonske matrice dati su u tabelama 4 i 5, a rezultati ispitivanja osnovnih i polaznih karakteristika očvrslag betona u tabeli 6.

Analiza rezultata

Uvođenjem veličine/koefficienta kohezije u proces projektovanja sveže matrice, stvoren je orijentir u smislu kvalitativnog pokazatelja i pravca koji će u nastavku ispitivanja izvršiti orijentaciju izbora očekivanih osobina očvrslag betona.

U grupi A-matrica figurišu mešavine sa oskudnom količinom cementa i umerenom dozom superplastifikatora za ovu vrstu betona. Stanje A-matrica najbolje se prepoznaje iz odnosa $W/C-V_k$. Eksperimentalno dobijene tačke grafički su prikazane na sl.3.

Tačka W_k na dijagramu predstavlja karakterističnu količinu vode koja daje maksimalno kohezivnu matricu (3A) od svih šest polaznih mešavina. Sa W_k količinom vode (149,4l), 300kg cementa i 3% superplastifikatora dobija se kohezivna kompatibilna matrica slabo plastične

Tabela 4. Projektovani parametri svežeg betona

R.b., tip matrice	W [l]	W/C	F/C	G_{ce}	V_{ce} [l]	\mathfrak{M}_{ce} [kg]	V_{ag} [l]	\mathfrak{M}_{og} [kg]	\mathfrak{M}_{ke} [kg]	V_{ke} [l]
1.A	179.2	0.597	0.621	0.345	284	488	716	1949	632	337
2.A	163.5	0.545	0.569	0.365	269	472	731	1990	619	323
3.A	149.4	0.498	0.522	0.385	255	458	745	2028	608	311
4.A	145	0.483	0.507	0.392	250	454	750	2042	605	306
5.A	140	0.467	0.491	0.400	245	449	755	2055	601	301
6.A	135	0.450	0.474	0.408	240	444	760	2069	597	297
1.B	144	0.480	0.520	0.386	254	459	746	2025	674	334
2.B	140	0.467	0.505	0.393	250	455	750	2036	671	330
3.B	129	0.430	0.470	0.410	239	444	761	2066	663	320
1.C	148	0.370	0.410	0.444	295	568	705	1914	771	370
2.C	150	0.375	0.415	0.441	297	570	703	1909	772	372
3.C	155	0.388	0.428	0.433	302	575	698	1895	776	376
4.C	158	0.395	0.435	0.429	305	578	695	1887	778	379

Korišćene oznake u tabeli su: W-količina vode/m³betona, W/C-vodocementni faktor, F/C-fluidovezivni faktor, G_{ce} -gustina cementne emulzije, V_{ce} -zapremina cementne emulzije, \mathfrak{M}_{ce} -masa cementne emulzije, V_{ag} -zapremina kamene ispupe, \mathfrak{M}_{og} -masa kamene ispupe, \mathfrak{M}_{ke} -masa kohezivne emulzije, V_{ke} -zapremina kohezivne emulzije. Cementna emulzija je rastvor cementa, vode i superplastifikatora. Kohezivna emulzija je rastvor cementne emulzije i finih čestica kamenog agregata sitnijih od 0,25mm.

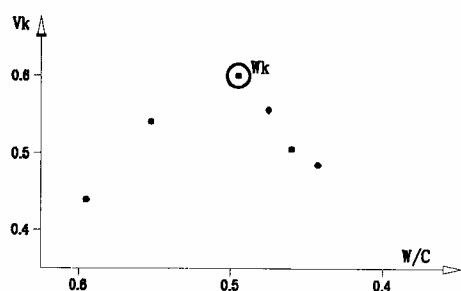
Tabela 5. Faktori tehnološkičnosti betona

R.b., tip matrice	Koeficijent kohezije, V_k	Kvalitativne ocene			
		Konzistencija	Kompaktibilnost	Segregacija	Izdvajanje vode
1.A	0,448	tečna	samougradiv	Grupisanje krupnih zrna agregata u toku mešanja	Na površini uzorka je tanak sloj bistre vode; iscurivanje vode iz ivica kalupa
2.A	0,546				
3.A	0,605	slabo plastična	ugradiv	Manja grupisanja agregata koja se razbijaju alatima	
4.A	0,560				
5.A	0,521	kruta	teško ugradiv	Grupisanje krupnijih zrna agregata u toku vibriranja uzoraka	Vodeni „film“ na površini uzorka
6.A	0,509				
1.B	0,933	plastična	ugradiv	Bez pojava segregacije	Masni „film“ bele boje
2.B	0,974				kruta
3.B	1,000				
1.C	0,953	slabo plastična	ugradiv		Masni „film“ bele boje
2.C	0,914				
3.C	0,885	plastična	lako ugradiv		
4.C	0,878				

Tabela 6. Fizičko-mehaničke osobine očvrslg betona

Red. br. tip matrice	Zapreminska masa [kg/m ³]	Čvrstoća pri pritisku na 28 dana, [MPa]		
		kocke 10x10x10 cm	kocke 20x20x20 cm	srednja
1.A	2415	27.2	24.5	33.3
2.A	2444	33.2	29.9	
3.A	2474	40.0	36.0	
4.A	2455	37.2	33.5	
5.A	2463	41.0	36.9	
6.A	2453	43.5	39.2	
1.B	2463	44.5	40.0	41.0
2.B	2447	41.8	37.6	
3.B	2479	50.5	45.4	
1.C	2470	32.0	28.8	37.3
2.C	2462	51.0	45.9	
3.C	2452	47.0	42.3	
4.C	2477	35.8	32.2	

konzistencije, koja daje gustu strukturu očvrslg betona zadovoljavajuće čvrstoće (36,0).

Slika 3. Uticaj vodocementnog faktora (W/C) na veličinu kohezije (V_k)

Matrice 1A i 2A daju „razređene“ – tečne, samougradive smeše sa osetnom tendencijom segregacije i relativno manjim mehaničkim čvrstoćama. Matrice 4A, 5A i 6A bez obzira na relativno postignute veće mehaničke čvrstoće, pripadaju kategoriji teško ugradivih smeša i zahtevaju posebne tehnološke mere obrade.

Prema tome, matrica 3A je polazna mešavina iz grupe A i ulazi u dalji proces mera optimizacije za spravljanje vlnastog betona.

U grupi matrica B zadržana je ista količina cementa, povećano je učešće superplastifikatora na 5% i primenjena je diskontinualna gradacija mešavine kamenog agregata. Ovim merama uvećan je prostor (V_{ke}) za smeštaj kohezivne emulzije za 5% u odnosu na polaznu matricu 3A.

Povećanjem sadržaja superplastifikatora smeša postaje visokokohezivna, ali dvojaka po osobinama

karakterističnim za obradivost sa polaznim indeksom $V_k \approx 0,95$. Ispod ove granice, smeša se u daljem postupku doraduje i ugrađuje po uobičajnim široko primenjivanim metodama. Iznad graničnog indeksa, smeša se tretira po specijalnim tehnološkim postupcima (presovanje, vibrovaljanje, estrudiranje i sl.).

Sa postignutim efektima u grupi B, potrebno je u daljem postupku odabranu matricu 1B osposobiti za prihvatanje čeličnih vlakana, što se postiže povećanjem sadržaja cementa sa 300 na 400kg, a to je ujedno i donja granica koja se preporučuje u svetskoj literaturi [4].

Tako su u grupi C postignute visokokohezivne smeše prilagodive uobičajnim načinima spravljanja, ugradnji i obradi betona. Izbor optimalnog rešenja iz ove grupe zavisi od tehnoloških zahteva (mehanička čvrstoća, otpornost, postojanost i dr.) koje treba kvalitetom da ostvari očvrslg beton.

Ojačavanje matrice primenom čeličnih vlakana

Običan nearmirani beton predstavlja krutu matricu materijala koja dodavanjem vlakana prelazi u plastičan i žilav kompozit. Ako se spravljanje i ugrađivanje obavlja uobičajnim metodama i sredstvima, onda se vlaknasti beton može da okarakterise kao betonska matrica sa nehomogenom strukturom armiranom čeličnim, haotično orijentisanim vlaknima.

U svetu je razvijeno više matematičkih modela strukture ove vrste materijala na osnovu kojih su programirane odgovarajuće metode proračuna.

Mehanizam ojačavanja vlaknima [5] zasniva se na poznatom principu preuzimanja napona zatezanja iz matrice

na vlakna. Prenos se odvija po površini spoja vlakana i matrice, a može se ostvariti ili samo smičućim, kada se ugrađuju prava i glatka vlakna okruglog preseka, ili kombinacijom smičućih i normalnih napona kod primene tzv. Dramix®, Harex®, „Crimped“, Ribon®, „Paddled“ i sl. vlakana. Sadejstvo matrice i vlakana traje od momenta prihvatanja zatežućih sila pa do pojave prvih mikroprslina, kada sva naprezanja preuzimaju vlakna do konačnog izvlačenja ili kidanja.

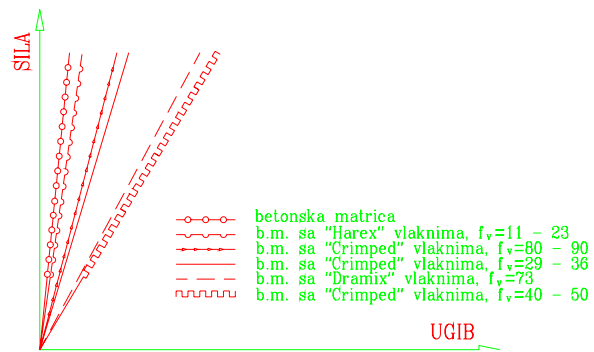
Vlakna svojim oblikom, veličinom, kvalitetom i količinom različito utiču na karakter i tok mehanizma loma, a adekvatno tome, na kvalitet i karakter primene vlaknastog betona.

Kod objekata kod kojih se zahteva postepeno slabljenje krutosti konstrukcije i svojstvo konstrukcionog materijala da apsorbuje energiju od dinamičkog i visokocikličnog zamora, mehanizam loma mora da se posledično manifestuje višim stepenom duktiliteta.

Iz sastava i strukture kompozita proizlazi količina energije koja predstavlja specifičnu karakteristiku vlaknastog betona. Ova mogućnost apsorbovanja energije može biti veća od spoljnih dinamičkih uticaja i sačuvati konstrukciju od rušenja. Ukoliko su spoljni uticaji jakog intenziteta, utoliko u vlaknasti kompozit mora biti na nivou kvaliteta visoke izdržljivosti izražene kroz plastičnost i žilavost betona. Zato su ove dve osobine u široj svetskoj literaturi najčešće analitički eksplloatisane sa aspekta

mnogobrojnih uticajnih faktora vezanih prvenstveno za oblik i dimenzije, zatim količinu i zateznu čvrstoću čeličnih vlakana.

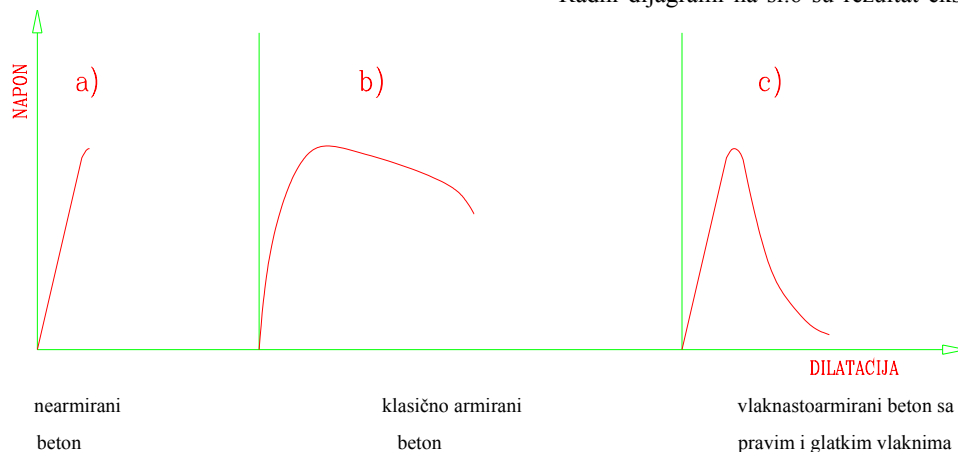
Efekti ojačavanja krute matrice se najjednostavnije kontrolišu statusom radnog dijagrama betona. Tako u zoni elastičnog ponašanja strukture betona, veliki uticaj na položaj krive ima oblik, faktor oblika (L/d) i količina čeličnih vlakana, (sl.4).



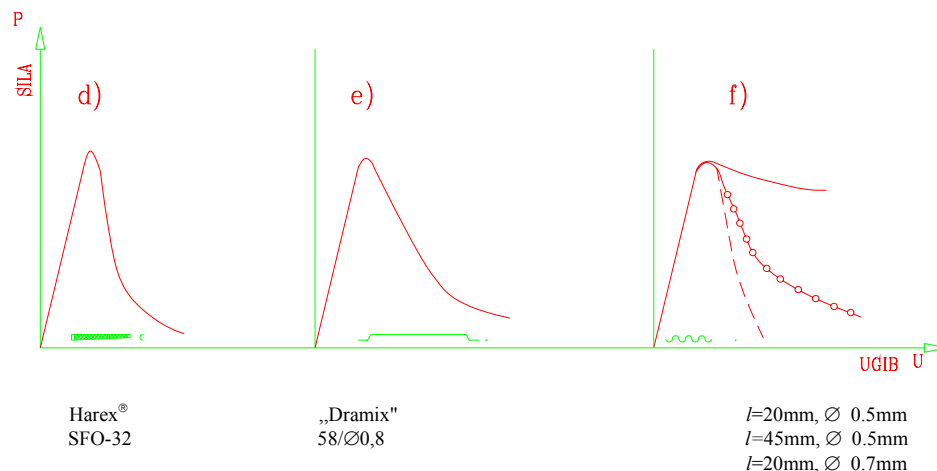
Slika 4. Položaj kriva u zoni elastičnih deformacija

Najvarijabilniji tokovi krivih obično se manifestuju u zonama plastičnih i pseudoplastičnih deformacija betona opterećenih na savijanje. Neke modalitete radnih dijagrama vlaknastoarmiranih betona prikazuju slike 5 i 6.

Radni dijagrami na sl.6 su rezultat eksperimentalnih is-



Slika 5. Karakteristični oblici radnih dijagrama (σ , ϵ) betona (literarni podaci)



Slika 6. Karakteristični oblici radnih dijagrama betona pri savijanju (eksperimentalni podaci)

pitivanja koja jasno ukazuju na uticaj izbora čeličnih vlakana i važnost postizanja koeficijenta kohezije (V_k) na tok krive. U tom smislu potrebna su dalja istraživanja.

Zaključak

Atraktivnost mnogih svetskih zdanja, velika izdržljivost konstrukcija u problematičnim trusnim zonama, kao i dostupni podaci iz vojnih izvora potvrđuju da je primena vlaknastog betona u ovim objektima opravdala svoju ulogu.

Specifičnost i savremenost ovog materijala zahteva novi i studiozniji pristup kako bi se što realnije odgovorilo projektnim zahtevima u pogledu osobina i kvaliteta.

U tom procesu od samog početka potrebno je napraviti dobar izbor materijala i prethodnim ispitivanjima optimizirati sve uticajne parametre koji će u projektu betona biti precizno plasirani i merama kontrole opsežno obuhvaćeni.

Upravo ovaj rad daje primer samo jednog detalja iz

programa prethodnih ispitivanja, koja definišu ulazne podatke za projektne zahteve konstrukcija sa specijalnom namenom.

Literatura

- [1] VASOVIĆ, T. Značajni i novi tehnološki parametri u tehnologiji betona. *Savremeni problemi tehnologije betona i tehnologije građenja*. Savez građevinskih inženjera i tehničara Srbije, Beograd, 1993, p.68-85.
- [2] MURAVLJOV, M. *Osnovi teorije i tehnologije betona*. Građevinska knjiga, Beograd, 1991, p.64-77.
- [3] JEVIĆ, D. *Dodaci betonu. Tehnologija betona*. seminar, Savez inženjera i tehničara Srbije, Cavtat, 1982, p.39-62.
- [4] TADIĆ, A. *Vlaknasti beton*. studija, int. dok., VTI VJ Beograd, 1992.
- [5] KEER, J.G. *Fibre Reinforced Concrete. Concrete Technology & Design*. Surrey University Press, ed. R.N.Swamy, Sheffield, 1984, p.52-105.

Rad primljen: 25.7.2000.god.