

# Proračun na poprečne sile greda od betona velikih čvrstoća ojačanih vlaknima

Ivan Tomičić

## Ključne riječi

beton ojačan vlaknima, velike čvrstoće, poprečne sile, proračun, greda, nosivost, trajnost

## Key words

béton auto-compactant, cendre volante, essai, propriétés mécaniques, étude de la composition, durabilité, résistance à la compression

## Mots clés

fibre reinforced concrete, high strength, beam, transverse force, analysis, bearing capacity, durability

## Ключевые слова

усиленный волокнами бетон, балка, высокие прочности, поперечные силы, расчёт, несущая способность, долговечность

## Schlüsselworte

faserverstärkter Beton, hohe Festigkeiten, Balken, Querkräfte, Berechnung, Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit

I. Tomičić

Pregledni rad

## Proračun na poprečne sile greda od betona velikih čvrstoća ojačanih vlaknima

U radu se navode prednosti primjene betona velike čvrstoće, ojačanog čeličnim vlaknima, za poboljšanje nosivosti, trajnosti i uporabivosti tradicijski armiranih i prednapetih konstrukcija. Prikazani su eksperimentalno i teorijski dobiveni izrazi za proračun greda naprezanih poprečnim silama. Obuhvaćeni su svi relevantni parametri i doprinos uklinjanja zrna agregata te djelotvornost vlakana. Predlaže se primjena ovoga betona za građenje nosivih i trajno uporabivih konstrukcija.

I. Tomičić

Subject review

## Analysis of transverse force action for beams made of high-strength fibre-reinforced concrete

Advantages of fibre-reinforced high-strength concrete, particularly in improving the bearing capacity, durability and usability of traditional reinforced-concrete and prestressed structures, are explained. Experimental and theoretical expressions for analyzing beams subjected to transverse forces are presented. All relevant parameters, and the contribution of interlocking of aggregate grains as well as the beneficial action of fibres, are considered. The use of this concrete is recommended for the construction of load-bearing and permanently-usable structures.

I. Tomičić

Ouvrage de synthèse

## Analysis of transverse force action for beams made of high-strength fibre-reinforced concrete

Advantages of fibre-reinforced high-strength concrete, particularly in improving the bearing capacity, durability and usability of traditional reinforced-concrete and prestressed structures, are explained. Experimental and theoretical expressions for analyzing beams subjected to transverse forces are presented. All relevant parameters, and the contribution of interlocking of aggregate grains as well as the beneficial action of fibres, are considered. The use of this concrete is recommended for the construction of load-bearing and permanently-usable structures.

И. Томичич

Обзорная работа

## Расчёт на поперечные силы балок из бетона высоких прочностей, усиленных волокнами

В работе приводятся преимущества применения бетона высокой прочности, усиленного стальными волокнами для улучшения несущей способности, долговечности и употребляемости традиционно армированных и предварительно напряжённых конструкций. Показаны экспериментально и теоретически полученные выражения для расчёта балок, напрягаемых поперечными силами. Охвачены все релевантные параметры и вклад вклинивания зёрен агрегата, а также действенность волокон. Предлагается применение этого бетона для строительства несущих и долговечно употребляемых конструкций.

I. Tomičić

Übersichtsarbeit

## Berechnung querbelasteter Balken aus hochfestem faserverstärktem Beton

Im Artikel zitiert man die Vorteile der Anwendung von hochfestem Beton, verstärkt mit Stahlfasern, für die Verbesserung der Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Nutzbarkeit der traditionsmässig bewehrten und vorgespannten Konstruktionen. Dargestellt sind experimental und theoretisch gewonnene Formeln für die Berechnung von Balken belastet durch Querkräfte. Umfasst sind alle relevante Parameter und der Beitrag der Einkeilung der Zuschlagkörner sowie die Wirksamkeit der Fasern. Vorgeschlagen ist die Anwendung dieses Betons für den Bau tragfähiger und dauernd nutzbarer Konstruktionen.

Autor: Prof. emer. dr. sc. **Ivan Tomičić**, dipl. ing. grad., Vramčeva 21, Zagreb

## 1 Općenito

Za građenje tradicijski armiranih i prednapetih konstrukcija od betona velikih čvrstoća, osobito u potresnim područjima, postoji veliko zanimanje širom svijeta. Razlog je tome racionalnost, otpornost na seizmičke sile, trajnost i estetski izgled građevine.

Primjenom betona velike čvrstoće moguće je graditi armiranobetonske konstrukcije manjih dimenzija, odnosno masa, što izravno utječe na sile izazvane potresom. Ako su takve konstrukcije još i duktilne, one imaju sposobnost disipacije seizmičke energije u kritičnim područjima, što također pridonosi ekonomičnom građenju uz prihvatljiv rizik u slučaju djelovanja snažnog potresa.

Kada se rabe konstrukcije velikih raspona i/ili za velika opterećenja, zbog poznatih prednosti, primjenjuju se prednapete konstrukcije. Takve konstrukcije, ovisno o stupnju prednapinjanja, mogu biti potpuno prednapete, ograničeno prednapete i djelomično prednapete. Zbog toga što je duktilnost vrlo poželjno svojstvo, osobito u potresnim područjima, sve se više počinju primjenjivati djelomično prednapete konstrukcije kod kojih se dopuštaju pukotine ograničene širine.

Kombinacijom betona velike čvrstoće, skraćeno BVČ, i prednapinjanja mogu se postići dodatni doprinosi glede nosivosti, trajnosti i uporabivosti. Međutim, zbog toga što se BVČ ponašaju više krhko od betona obične čvrstoće, skraćeno BNČ, a što je nepoželjno, u svijetu su provedena opsežna istraživanja kako otkloniti taj nedostatak [1, 2, 3, 4, 5].

Jedna od mogućnosti ublažavanja krhkosti, odnosno postizanja duktilnosti, jest ugradnja diskontinuiranih čeličnih ili polimernih vlakana, što se objašnjava činjenicom da se vlaknima postiže učinak ovijenosti. Osim toga, BVČ s ugrađenim vlaknima, poznati kod nas kao mikroarmirani betoni velikih čvrstoća, imaju veliku početnu tlačnu čvrstoću i povećanu vlačnu, reducirano skupljanje i puzanje u odnosu na BNČ, što su poželjna svojstva, osobito kada se konstrukciju prednapinje.

U ovom radu bit će predložena eksperimentalna i teorijska istraživanja tradicijski armiranih i prednapetih greda, načinjenih od BVČ, ojačanih čeličnim diskontinuiranim vlaknima, naprezanih poprečnim silama, te predloženi izrazi za određivanje posmične čvrstoće i proračunske poprečne sile nosivosti potrebne za njihovo dimenzioniranje.

## 2 Istraživanja i rezultati ispitivanja

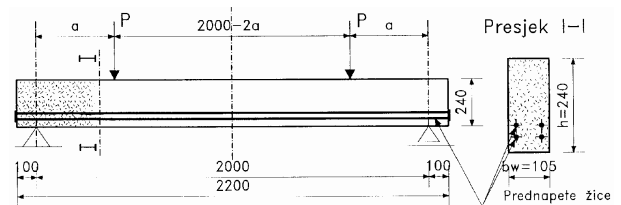
Tijekom proteklih godina bilo je više eksperimentalnih i teorijskih istraživanja ponašanja greda od BVČ i BNČ, ojačanih diskontinuiranim vlaknima, od kojih se navode značajnija.

Li i drugi [1] istraživali su učinak oblika i količine vlakana na posmičnu čvrstoću armiranobetonskih greda. Narayanan, Swamy i Kiang-Hwee [2,3,4] istraživali su utjecaj količine vlakana, posmične vitkosti ( $a/d$ ), čvrstoće betona i količine uzdužne armature u gredi na posmičnu čvrstoću. Najnovija istraživanja koja su proveli Padmarajaiah i Ramaswamy [5] obuhvaćala su sve dosad navedene parametre te dodatno učinak izmjera zrna agregata (učinak uklinjavanja u kosoj pukotini). Ova posljednja istraživanja bit će skraćeno prikazana u nastavku.

Autori su ispitali 13 potpuno/djelomično prednapetih gredica, čvrstoće  $65 \text{ N/mm}^2$ , načinjenih od portlandskoga cementa, agregata promjera zrna  $12,5 \text{ mm}$  i manjeg uz dodatak čeličnih vlakana, zakrivljenog oblika, promjera  $0,5 \text{ mm}$  i srednje duljine  $40 \text{ mm}$ . Volumenski udio vlakana bio je  $0, 0,5, 1,0$  i  $1,5 \%$ . Vodocementni omjer bio je  $0,36$  te omjer cementa, finog agregata i zrnatog agregata  $1:1,128:1,385$ .

Gredica, izmjera presjeka  $105 \times 240 \text{ mm}$  i duljine  $2200 \text{ mm}$  bilo je osam potpuno prednapetih i pet djelomično (slika 1.). Svaka žica bila je istezana do naprezanja  $0,57f_p$  ( $f_p$ -čvrstoća čelika).

Glavna je svrha ispitivanja gredica bila utvrđivanje poboljšanja posmične čvrstoće i duktilnosti kada su u njih ugrađena čelična vlakna. Gredice su bile naprezane dvjema silama, smještenim simetrično, tako da posmični raspon ( $a$ ) bude  $400 \text{ mm}$  za potpuno prednapete gredice i  $350 \text{ mm}$  za djelomično prednapete uzorke.



Slika 1. Dimenzije i opterećenje ispitanih prednapetih gredica

Osim glavne prednapete armature, neki su uzorci imali i poprečnu armaturu (spona). Radi usporedbe, bilo je gredica bez čeličnih vlakana, s vlaknima po cijeloj duljini i visini te onih s vlaknima samo u posmičnim rasponima, također po punoj visini.

### Rezultati ispitivanja pokazuju:

1. Gredice bez ugrađenih vlakana i one s vlaknima preko cijele duljine i visine, ali bez spona, krhko su se ponašale zbog pomanjkanja spona, kod naprezanja poprečnim silama, ili točnije dostizanjem istodobno nosivosti na savijanje i posmik, u slučaju potpunog prednapinjanja i dostizanjem nosivosti na posmik u slučaju djelomično prednapetih gredica. Gredice kri-

tične na posmik sa sponama, s vlaknima ili bez njih, te gredice s vlaknima na duljini posmičnog raspona, ali bez spona, potpuno ili djelomično prednapetih, lomile su se po modelu koji je zamijenio krhki zbog posmika u duktilni zbog savijanja. Razlog tome je odgođen slom zbog povećane nosivosti na posmik. Ovo potvrđuje svrhu ugradnje vlakana u grede, posmično kritične, kojima se ugradnjom poboljšala nosivost na posmik i duktilnost, odnosno uzrok sloma kod njih bit će dostizanje nosivosti na savijanje, i to jednako kod gredica s ugrađenim vlaknima na duljini posmičnog raspona ili po cijeloj duljini. Iz ovoga slijedi - racionalno je ugrađivati vlakna samo na duljini posmičnog raspona.

- Maksimalno povećanje posmične čvrstoće kod potpuno prednapetih greda pri pojavi prve pukotine, zbog dodavanja vlakana, iznosilo je 5, 10 i 20 % za udio vlakana 0,5, 1,0 i 1,5 %. Vršna se je čvrstoća povećavala za 3, 10 i 20 % za potpuno prednapete grede s količinom vlakana 0,5, 1,0 i 1,5 %. U slučaju djelomičnog prednapinjanja, povećanje vršne čvrstoće zbog dodavanja vlakana, količine 1,0 i 1,5 %, iznosilo je 12 i 17,5 %, redosljedom. Osim toga, prisutnost vlakana omogućila je transformiranje modela sloma ispitanih uzoraka, od krhkoga prema duktilnom.
- Modificirani izraz Narayanana [2] (izraz (5) u ovom radu) primjenjivao se je za potvrđivanje rezultata ispitivanja 31 uzorka prednapetih gredica i 94 tradicijski armiranih uzoraka s ugrađenim vlaknima i drugih istraživača. Za grede od betona čvrstoće 20 do 110 N/mm<sup>2</sup>, posmične vitkosti od 0,5 do 8, rabila su se ravna, naborana i vlakna s kukama kojima je faktor vlakana bio F 0,25 do 3,0 (za F vidjeti izraz (11)). Usporedba rezultata dobivenih ispitivanjem i prema navedenom izrazu (5) pokazuje dobro podudaranje. Također je utvrđeno da izmjere zrnaca agregata znatno utječu na posmičnu čvrstoću betona s ugrađenim vlaknima.
- Potpuno prednapete grede bez vlakana ili s vlaknima po cijeloj visini i duljini, posmične vitkosti  $a/d < 2,5$ , lome se po modelu, istodobno, zbog savijanja i posmika, a uzorci djelomično prednapeti, posmične vitkosti od 2,35 do 1,98, lome se dostizanjem nosivosti na posmik (dijagonalni slom). Međutim, kada se vlakna ugrade samo na duljini posmičnog raspona i za  $a/d < 2,5$ , grede se lome dostizanjem nosivosti na savijanje (vertikalne pukotine), što potvrđuje da vlakna povećavaju posmičnu čvrstoću i da posmična vitkost utječe na vrstu sloma.

### 3 Postupak proračuna

#### 3.1 Tradicijski armirane grede naprezane poprečnim silama

Grafična poprečna sila nosivosti armirane grede od BVČ, ojačane diskontinuiranim čeličnim vlaknima, može se definirati kao suma pojedinačnih grafičnih poprečnih sila:

$$V_{uf} = V_{cf} + V_d + V_b + V_{sw} + V_a \quad (1)$$

gdje je:

$V_{cf}$  - grafična poprečna sila koju prihvaća betonska greda ojačana čeličnim vlaknima

$V_d$  - grafična poprečna sila koju prihvaća glavna uzdužna armatura djelovanjem trna

$V_b$  - grafična poprečna sila koju prihvaća otpor izvlačenja vlakana uzduž kose pukotine

$V_{sw}$  - grafična poprečna sila koju prihvaćaju vertikalne spone unutar grede

$V_a$  - grafična poprečna sila koju prihvaćaju zrnca agregata uklinjanjem u kosoj pukotini.

Prvi član u izrazu (1)  $V_{cf} = v_{cf} \cdot b_w \cdot d$  vrednuje doprinos betona, ojačanog vlaknima, nosivosti na poprečne sile, a u funkciji je vlačne čvrstoće cijepanja valjka. Ova čvrstoća, ako se ne ispituje, može se dobiti po izrazu  $1/3 \sqrt{f_{ckf}} + 1,918RI$  [5], gdje je  $f_{ckf}$  tlačna čvrstoća kocke od BVČ ojačanog vlaknima u N/mm<sup>2</sup>, a  $RI = v_f l_f / d_f$  - indeks ojačanja (volumenski udio vlakana  $v_f$  puta omjer oblika vlakana  $(l_f/d_f)$ ).

Drugi član  $V_d$  vrednuje djelovanje trna glavne vlačne armature ( $A_s$ ) preko koeficijenta armiranja  $\rho = A_s / (b_w \cdot d)$  i učinka posmične vitkosti ( $a/d$ ), gdje je  $b_w$  - širina grede, a  $d = h - d_t$  - djelotvorna (statička) visina grede.

Treći član  $V_b$  vrednuje otpor čupanju vlakana, a ovisi o njihovom broju u poprečnom presjeku koji se dobije na osnovi računa vjerojatnosti:

$$N_f = \alpha^1 \frac{v_f}{A_f} \quad (2)$$

gdje je:

$\alpha^1$  - orijentacijski faktor

$A_f = \frac{d_f^2 \cdot \pi}{4}$  - ploština vlakna

$v_f$  - volumenski udio vlakana

$d_f$  - promjer vlakna.

Kada su vlakna jednoliko raspršena u neograničenom prostoru betona, očekuje se da su čelična vlakna slučajno usmjerena, s jednakom vjerojatnošću, u različitim smjerovima, u prostoru. Usmjerenost tih vlakana u be-

tonu, i dosljedno tome po jedinici presjeka elementa, izražena vjerojatnim brojem, bit će pod utjecajem ograničenja prostora i činjenice da je tendencija vlakana padanje na dno i time horizontalno usmjerenje, osobito u slučaju vibriranja takvog betona. Zbog vibriranja, slučajnost orijentiranja vlakana u betonu kreće se od trodimenzijskih uvjeta prema dvodimenzijskim. Prema tome, faktor  $\alpha'$  uzet je na osnovi dvodimenzijske orijentacije da se kreće od 0,55 do 0,74 (srednja vrijednost 0,645). Na osnovi toga, vertikalna posmična otpornost (čvrstoća) čupanju vlakana, uzduž kose pukotine, bit će:

$$v_b = 0,645 \tau \text{RI} \cdot d_b \quad (3)$$

gdje je:

RI =  $v_f l_f / d_f$  - indeks ojačanja

$\tau$  - srednja prionljivost vlakana u betonu

$d_b$  - faktor prionljivosti kojim se procjenjuje karakteristika različitih vlakana (npr. za vlakna s kukom za koja je  $\tau = 4,15 \text{ N/mm}^2$ ,  $d_b = 0,75$ ).

Narayanan i Darwish [2] predlažu izraz za posmičnu čvrstoću u obliku:

$$v_{uf} = \bar{e} \left[ 0,24 f_{specf} + 80 \rho \frac{d}{a} \right] + v_b \quad (4)$$

Na osnovi vlastitih istraživanja, autori u radu [5] predlažu izraz za posmičnu čvrstoću, koji sadrži doprinos betona, uklinjavanje zrna agregata, otpor trna presijecanju i otpor čupanju vlakana, u konačnom obliku:

$$v_{uf} = \zeta \left[ \bar{e} \left\{ 0,32 \left( \frac{\sqrt{f_{ckf}}}{3} + 1,918 \text{RI} \right) + 75 \rho \frac{d}{a} \right\} + \bar{g} \cdot v_b \right] \quad (5)$$

gdje je  $\zeta$  faktor koji vrednuje maksimalni učinak izmjere agregata, a dan je, prema prijedlogu Bažanta [5], u obliku:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d}{25d_a}}} \quad (6)$$

gdje je:

$\bar{e}$  - bezdimenzijski faktor kojim se uzima u obzir učinak djelovanja luka. Autori prijedloga proračuna predlažu ovaj faktor u funkciji posmične vitkosti  $a/d$ . On će biti 1,0 kada je  $a/d > 2,8$ , a imat će vrijednost 2,8  $d/a$  kada je  $a/d$  između 1,0 i 2,8 i veličinu 1,5 kada je  $a/d < 1,0$ .

$\bar{g}$  - koeficijent za koji se uzima da je 1,0 kada je  $a/d > 2,8$  i 1,3 za  $a/d \leq 2,8$ , dobiven je regresivnom analizom rezultata ispitivanja.

Poprečna sila  $V_{sw}$  u jednadžbi (1) predstavlja doprinos spona posmičnoj nosivosti, a može se izračunati u skladu s vrijedećim propisima.

Faktor  $\zeta$  vezan za doprinos izmjere agregata  $V_a$  u izrazu (1), u jednadžbi (5) predstavlja koeficijent kombinacije.

Pojednostavnjeni izraz (1) za graničnu poprečnu silu može se sada pisati u obliku:

$$V_{uf} = v_{uf} b_w \cdot d + V_{sw} \quad (7)$$

### 3.2 Prednapete grede naprezane poprečnim silama

Granična poprečna sila nosivosti prednapete grede od BVČ, ojačane čeličnim vlaknima, jest modificirani izraz za nosivost greda tradicijski armiranih:

$$V_{uf} = \left[ 1 - 0,55 \frac{f_{pe}}{f_p} \right] v_{uf} \cdot b_w \cdot d + \frac{M_o}{d} + V_{sw} \quad (8)$$

gdje je:

$v_{uf}$  - posmična čvrstoća grede (izraz (5))

$f_{pe}$  - djelotvorna čvrstoća prednapete žice

$f_p$  - karakteristična čvrstoća žice za prednapinjanje

$M_o$  - moment dekompresije vlačnog ruba.

Za određivanje omjera  $f_{pe}/f_p$  primjenjuje se izraz:

$$\frac{f_{pe}}{f_p} = \frac{P_e}{n \cdot A_{ps} \cdot f_p + A_s \cdot f_y} \quad (9)$$

gdje je:

$P_e$  - djelotvorna sila prednapinjanja

$A_{ps}$  - ploština žice za prednapinjanje

$A_s$  - ploština nenapete armature

$n$  - broj prednapetih žica

$f_y$  - karakteristična granica popuštanja nenapetog čelika.

Volumenski udio ukupne armature u izrazu (5), bit će:

$$\rho = \frac{n \cdot A_{ps} + A_s}{b_w \cdot d} \quad (10)$$

### 3.3 Posmična čvrstoća (koso raspucavanje)

Za prognoziranje posmične čvrstoće koja odgovara pojavi prve kose pukotine grede od BVČ s ugrađenim čeličnim vlaknima rabi se izraz:

$$v_{cr} = 0,3 \left[ \frac{1}{3} \sqrt{f_{ckf}} + 1,918 \text{RI} \right] + 20 \rho \left( \frac{d}{a} \right) + 0,55 \left( F^{3/4} \right) \quad (11)$$

gdje je:

$F = \text{RI} \cdot d_b$  - faktor vlakna

RI =  $v_f (l_f / d_f)$  - indeks ojačanja

$\rho$  - koeficijent armiranja glavne vlačne armature (nenapete ili nenapete i prednapete).

#### 4 Prilagodba izraza uvjetima norme EN 1992-1-1

Opći uvjet nosivosti na poprečne sile glasi:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (12)$$

gdje je :

$V_{Sd} = \gamma_g \cdot V_g + \gamma_q \cdot V_q + \gamma_p \cdot V_p$  - proračunska poprečna sila djelovanja [7, 8, 9]

$V_{Rd} = V_{cfd} + V_{dd} + V_{bd} + V_{swd} + V_{ad}$  - proračunska poprečna sila nosivosti.

Proračunske poprečne sile nosivosti, usklađene s EN 1992, dobiju se tako da se čvrstoće dijele s koeficijentom sigurnosti za materijale [7, 8, 9].

#### Tradicijski armirane grede

##### Proračunska poprečna sila nosivosti

Primjenjuju se izrazi (7)

$$V_{Rd} = v_{ufd} \cdot b_w \cdot d + V_{swd} \quad (13)$$

gdje je:

$v_{ufd}$  - ukupna proračunska posmična čvrstoća koja sadrži doprinos betona, djelovanja trna, otpora vlaknaca izvlačenju i uklinjanja zrna agregata (vidjeti prilagođeni izraz (5))

$V_{swd} = \frac{A_w \cdot f_{ywd} \cdot z}{s_w}$  - proračunska poprečna sila nosivosti koju prihvaćaju vertikalne spona

$A_w$  - ploština poprečne armature (spona) na razmaku  $s_w$  (sve poprečne grane)

$f_{ywd} = f_{yw} / \gamma_s$  - proračunska granica popuštanja ( $\gamma_s = 1,15$  - koeficijent sigurnosti za čelik)

$z$  - krak unutrašnjih sila

$s_w$  - razmak spona uzduž grede.

Uvrštavanjem ovih vrijednosti nosivosti u jednadžbu [12],

može se izračunati potrebna poprečna armatura  $A_w$ .

##### Proračunska posmična čvrstoća

Prilagođuje se izraz (5).

$$v_{ufd} = \zeta \left[ \bar{e} \left\{ 0,32 \left( \frac{\sqrt{f_{ckf,d}}}{3} + 1,918RI \right) + 75 \rho \frac{d}{a} \right\} + \bar{g} \cdot v_{bd} \right] \quad (14)$$

gdje je:

$f_{ckf,d} = f_{ckf} / \gamma_c$  - proračunska tlačna čvrstoća BVČ ojačano vlaknima ( $\gamma_c = 1,5$ )

$v_{bd} = v_b / \gamma_c$  - proračunska čvrstoća čupanja vlakana (rabi se izraz (3))

#### Prednapete grede

##### Proračunska poprečna sila nosivosti

Primjenjuju se izrazi (8) i (14).

$$V_{ufd} = \left[ 1 - 0,55 \frac{f_{pe}}{f_p} \right] v_{ufd} \cdot b_w \cdot d + \frac{M_o}{d} + V_{sw} \quad (15)$$

gdje je:

$$\rho = \frac{n \cdot A_{ps} + A_s}{b_w \cdot d} \text{ - koeficijent armiranja u izrazu (14)}$$

##### Proračunska posmična čvrstoća pri kosom raspucavanju

Rabi se izraz (11).

$$v_{crd} = 0,3 \left[ 1 / 3 \sqrt{f_{ckf,d}} + 1,918RI \right] + 20 \rho (d/a) + 0,55 (F^{3/4}) \quad (16)$$

gdje je

$$F = RI \cdot d_b, \quad a \quad \rho = \frac{n \cdot A_{ps} + A_s}{b_w \cdot d} \text{ ili } \rho = A_s / (b_w \cdot d) \text{ za prednapete ili nenapete grede.}$$

prednapete ili nenapete grede.

##### Komentar predloženih izraza

Predložene izraze za proračun greda od betona velike čvrstoće, ojačanih čeličnim vlaknima, napreznih poprečnim silama, autori su istraživanja provjeravali uspoređivanjem proračunskih rezultata s odgovarajućim veličinama dobivenim vlastitim ispitivanjem te onima drugih istraživača i utvrdili dobro podudaranje. Međutim, usporedbom rezultata, dobivenim predloženim izrazima s onima dobivenim prijedlozima drugih istraživača, ustanovili su određene razlike. Obrazložili su to zanemaranjem doprinosa uklinjanjem zrna agregata u kosoj pukotini u izrazima prethodnih istraživača. Također, usporedbom rezultata ustvrdili su da se posmična nosivost, jednako armiranih greda od BVČ, povećava povećanjem udjela diskontinuiranih čeličnih vlakana u betonu.

#### 5 Zaključak

Za građenje sigurnih, trajnih i uporabivih tradicijski armiranih i prednapetih konstrukcija, poželjan je, uz kvalitetan čelik i beton visokih svojstava, kao na primjer beton velike čvrstoće, ojačan diskontinuiranim čeličnim vlaknima. Za proračun sustava od takvog materijala ne odgovaraju izrazi koji se primjenjuju za proračun konstrukcija od betona obične čvrstoće. Stoga su u ovom radu prikazane formule, dobivene na osnovi najnovijih eksperimentalnih i teorijskih istraživanja, za određivanje proračunske posmične čvrstoće, te proračunske poprečne

ne sile nosivosti tradicijski armiranih i prednapetih konstrukcija napreznanih poprečnim silama.

Predloženi su izrazi u funkciji svih relevantnih parametara, uz dodatak doprinosa uklinjavanja zrna agregata u kosoj pukotini, te djelotvornosti čeličnih vlakana ugrađenih u svježi beton. Poboljšana svojstva betona i čelika omogućuju građenje konstrukcija velikih raspona i za velika opterećenja. Osim toga, konstrukcije od takvog materijala, s većom vjerojatnošću, zadovoljavaju uvjete trajnosti i uporabivosti. Posebno je važno istaknuti da se grede takvih konstrukcija, napreznanih na poprečne sile, ponašaju više duktilno u odnosu na one od betona obič-

ne čvrstoće i bez vlakana, što je veoma važno za građenje u potresnim područjima. To se objašnjava povećanim otporom na krhki slom i većom mogućnošću dostizanja granice popuštanja u čeliku, odnosno duktilnim ponašanjem.

Reducirano raspucavanje, odnosno povećana trajnost, rezultat je otpora vlakana izvlačenju. Poželjna su, stoga, zakrivljena vlakna i ona s kukama na krajevima zbog povećane djelotvornosti u odnosu na ravna, pa se ona preporučuju ugrađivati prilikom primjene ovog novog i atraktivnog materijala za građenje racionalnih, trajnih i uporabivih konstrukcija, osobito u seizmičkim područjima.

#### LITERATURA

- [1] Li, V.; Ward, R.; Hamza, A. M.: *Steel and Synthetic Fibers as Shear Reinforcement*, ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 5, September- October, 1992, 499-508.
- [2] Narayanan, R.; Darwish, I.Y.S.: *Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement*, ACI Structural Journal, Vol. 84, No. 3, May-June, 1987, 216- 224.
- [3] Swamy, R.N.; Bahia, H.M.: *The Effectiveness of Steel Fibers as Shear Reinforcement*, Concrete International, Vol. 7, No. 3, March, 1986, 35-40.
- [4] Kiang-Hwee, T.; Paramashivam, P.; Murugappan, K.: *Steel Fibers as Shear Reinforcement in Partially Prestressed Beams*, ACI Structural Journal, Vol. 92, No. 6, November-December, 1995, 643-652.
- [5] Padmarajaiah, S. K.; Ramaswamy, A.: *Behavior of Fiber-Reinforced Prestressed and Reinforced High-Strength Concrete Beams Subjected to Shear*, ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 5, September-October, 2001, 752-761.
- [6] Park, R., Paulay, T.: *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons, New York, 1975.
- [7] ACI Committee 318-95, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, 1995.
- [8] Eurocod 8: *Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*, CEN, Brussels, January, 2003.
- [9] Tomičić, I.: *Betonske konstrukcije*, DHGK, Zagreb, 1996.