

Armiranobetonski elementi od betona visokih čvrstoća naprezani savijanjem

Marijan Skazlić, Ivan Tomičić

Ključne riječi

beton visokih čvrstoća, armiranobetonski elementi, duktilnost, savijanje, tlačna čvrstoća

Key words

high strength concrete, reinforced concrete elements, ductility, bending, compressive strength

Mots clés

béton à haute résistance, éléments en béton armé, ductilité, flexion, résistance à la compression

Ключевые слова

бетон высоких прочностей, железобетонные элементы, duktilnost, izgib, naprezanje pri sжатии

Schlüsselworte

hochfester Beton, Stahlbetonelemente, Duktilität, Biegung, Druckfestigkeit

M. Skazlić, I. Tomičić

Pregledni rad

Armiranobetonski elementi od betona visokih čvrstoća naprezani savijanjem

U radu je prikazan skup znanja o svojstvima, tehnologiji i strukturi betona visokih čvrstoća. Analizirani su bitni parametri potrebni za proračun nosivih, duktilnih i uporabivih armiranobetonskih elemenata od takvih betona napreznanih na savijanje s uzdužnom silom ili bez te sile. To su računski dijagram tlačnih napreznanja, duktilnost, progib i ograničenje širine pukotina. Rezultati su uspoređeni s betonima normalne čvrstoće. Preporučuje se uporaba betona visokih čvrstoća.

M. Skazlić, I. Tomičić

Subject review

High strength reinforced concrete elements subjected to bending

Current knowledge about the properties, technology and structure of high strength concrete is presented. Significant parameters needed in the analysis of load-bearing, ductile and acceptable reinforced-concrete elements made of such concrete and subjected to bending, with longitudinal force or without this force, are considered. These parameters are: design compressive stress diagram, ductility, deflection, and crack width restraint. The results are compared with values for normal strength concrete. The use of high strength concrete is recommended.

M. Skazlić, I. Tomičić

Ouvrage de synthèse

Les éléments en béton armé à haute résistance soumis à la flexion

Les connaissances actuelles sur les propriétés, la technologie et la structure du béton à haute résistance sont présentées. Les paramètres de base nécessaires pour l'analyse de capacité, ductilité et acceptabilité des éléments en béton armé faits de ce béton et soumis à la flexion, avec une force longitudinale ou sans cette force, sont examinés. Ces paramètres sont: diagramme de la contrainte de compression estimée, ductilité, fléchissement et largeur limite de fissures. Les résultats sont comparés avec les valeurs pour béton à résistance normale. L'utilisation du béton à haute résistance est préconisée.

M. Skazlić, I. Tomičić

Обзорная работа

Железобетонные элементы из бетона высоких прочностей, напряжённые на изгиб

В работе показана совокупность знаний о свойствах, технологии и структуре бетона высоких прочностей. Анализированы существенные параметры, необходимые для расчёта несущих, duktilnih и употребительных железобетонных элементов из таких бетонов, напряжённых на изгиб с поперечной силой или без той силы. Это расчётная диаграмма напряжений при сжатии, duktilnost, izgib и ограничение ширины трещин. Результаты сравнивались с бетонами нормальной прочности. Рекомендуется употребление бетонов высоких прочностей.

M. Skazlić, I. Tomičić

Übersichtsarbeit

Biegebeanspruchte Stahlbetonelemente aus hochfestem Beton

Im Artikel ist das Wissen über die Eigenschaften, Technologie und Struktur des hochfesten Betons dargestellt. Analysiert sind die Parameter die wesentlich sind für die Berechnung der tragenden, duktilen und nutzbaren Stahlbetonelemente aus solchen Betonen bei Biegebeanspruchung mit oder ohne Längskraft. Das sind Berechnungsdiagramme der Druckspannungen, Duktilität, Durchbiegung und Begrenzung der Rissbreite. Die Ergebnisse sind mit normalfesten Betonen verglichen. Man empfiehlt die Anwendung hochfester Betone.

Autori: Doc. dr. sc. **Marijan Skazlić**, dipl. ing. građ.; prof. emer. dr. sc. **Ivan Tomičić**, dipl. ing. građ.,
Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, Zagreb

1 Uvod

U betone običnih čvrstoća svrstavaju se svi betoni do najvećeg razreda tlačne čvrstoće C 50/60. Razredi tlačnih čvrstoća koji odgovaraju betonima visokih čvrstoća su od C 55/67 do C 100/115. Najviši je razred tlačne čvrstoće prema novom hrvatskom propisu za betonske konstrukcije C 100/115. Betoni visokih čvrstoća s razredom tlačne čvrstoće većim od C 100/115 nazivaju se i betonima ultravisokih čvrstoća [1, 2].

Betoni visokih čvrstoća imaju i poboljšana svojstva trajnosti u odnosu na betone običnih čvrstoća. Odabir sastavnih sastojaka te postupci proizvodnje, transporta, ugradnje i njege složeniji su kod betona visokih čvrstoća nego kod betona običnih čvrstoća.

Za građenje nosivih, duktilnih i uporabivih armiranobetonskih konstrukcija od betona visokih 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 visoke čvrstoće moguće je graditi armiranobetonske konstrukcije smanjenih dimenzija, odnosno masa, što izravno utječe na sile zbog potresa. Ako su takve konstrukcije duktilne, one imaju sposobnost disipacije seizmičke energije uz plastično deformiranje u kritičnim područjima, odnosno plastičnim zglobovima, što također pridonosi ekonomičnom građenju uz prihvatljiv rizik u slučaju djelovanja snažnog potresa.

Osim toga, duktilne se konstrukcije mogu proračunavati po linearnoj teoriji plastičnosti te po linearnoj teoriji elastičnosti s ograničenom preraspodjelom, što ima za rezultat jednoličniju raspodjelu reznih sila po presjecima, bolju iskorištenost gradiva te kvalitetnije armiranje i betoniranje. Bitna je prednost duktilnih konstrukcija izbjegavanje krhkog sloma pojedinih elemenata, a i cijele konstrukcije, čime se štite ljudski životi u slučaju pretjeranog opterećenja građevine ili djelovanja snažnog potresa.

Sve se češće grade konstrukcije velikih raspona i/ili za velika opterećenja te visoke zgrade. Primjenom betona visokih čvrstoća izravno se postiže povećana nosivost i estetski izgled, a posredno bolja iskorištenost prostora visokih zgrada, naročito u donjim katovima. U kombinaciji s čelikom visoke granice popuštanja i duktilnosti izbjegavaju se teškoće izazvane gustim smještajem potrebne uzdužne i poprečne armature.

U građenju mostova, betoni visokih čvrstoća primjenjuju se kada se traži velika nosivost, a osobito trajnost. Isto tako, stupovi od betona visokih čvrstoća poželjni su, zbog manjih dimenzija, kod mostova preko vodotoka koji mogu nositi ploveće predmete i/ili sante leda te nadvožnjaka zbog više slobodnog prostora i preglednosti.

Od nedostataka elemenata od betona visokih čvrstoća, napreznih savijanjem s uzdužnom silom ili bez nje, može se navesti pad duktilnosti s porastom tlačne čvrstoće već iznad 55 N/mm^2 , te rano i brzo odlamanje i drobljenje zaštitnog sloja u području plastičnih zglobova. Zbog smanjene duktilnosti elemenata od betona visokih čvrstoća, nekim državnim propisima za armiranobetonske konstrukcije u seizmički aktivnim područjima ograničava se čvrstoća betona (Novi Zeland, Kanada), a u nekim (SAD, istraživači u Novom Zelandu) sugerira se primjena modificiranih izraza u proračunu poprečne armature za ovijanje u području plastičnih zglobova.

Međutim, najnoviji rezultati istraživanja pomiču granicu tlačnu čvrstoću od 55 N/mm^2 na $\approx 75 \text{ N/mm}^2$, poslije koje daljnjim povećanjem tlačne čvrstoće betona opada duktilnost elementa. Isto tako, novija su istraživanja pokazala da se rano i brzo odlamanje zaštitnog sloja može uspješno spriječiti primjenom diskontinuiranih čeličnih vlakana ugrađenih u beton (mikroarmirani beton). Osim što osiguravaju cjelovitost presjeka, vlakna pridonose ovijenosti betonske jezgre elementa u području plastičnog zgloba.

U radu je prikazan skup znanja o svojstvima, strukturi i tehnologiji betona visokih čvrstoća. Navedene su prednosti i nedostaci ove vrste betona prema betonu obične čvrstoće. Analizirani su parametri bitni za proračun armiranobetonskih elemenata od betona visokih čvrstoća napreznih savijanjem, kao što je proračunski dijagram tlačnih napreznja, duktilnost elemenata te granična stanja uporabivosti i trajnosti.

2 Struktura, svojstva i tehnologija betona visokih čvrstoća

Kod betona visokih čvrstoća potrebna je veća pažnja u izboru sastavnih sastojaka nego kod betona običnih čvrstoća. Sastojci betona visokih čvrstoća su cement, agregat, voda, kemijski i mineralni dodaci te vlakna. Njihov odabir ovisi prvenstveno o svojstvima koje želimo postići u svježem i očvrslulom stanju te vrsti konstrukcije. Problem koji se često pojavljuje kod betona visokih čvrstoća, a nije karakterističan za obične betone, jest kompatibilnost između odabranog cementa, kemijskih i mineralnih dodataka. Za sada ne postoji metodologija ocjene kompatibilnosti sastojaka betona visokih čvrstoća na temelju ispitivanja njihovih svojstava. Zbog toga se još uvijek kompatibilnost sastojaka ocjenjuje na temelju rezultata ispitivanja probnih mješavina [3, 4].

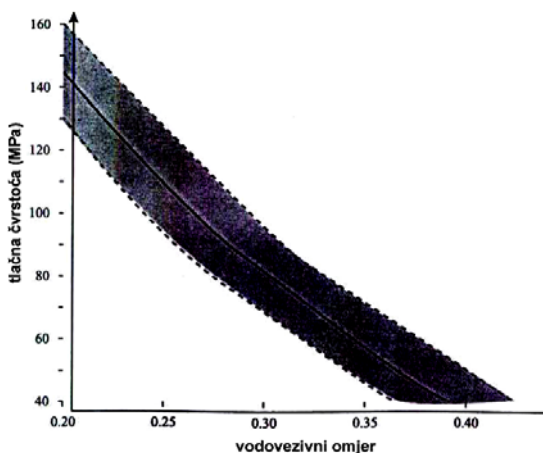
Betoni visokih čvrstoća imaju u svom sastavu veću količinu veziva ($\geq 400 \text{ kg/m}^3$) i niži vodovezivni omjer. Granulometrijski je sastav karakterističan po manjem maksimalnom zrnju agregata i većem udjelu sitnih frakcija agregata. Obradljivost betona osigurava se primjenom superplastifikatora. Prema potrebi mogu se dodavati i

drugi kemijski dodaci kao, primjerice aeranti za poboljšanje otpornosti na smrzavanje. Od mineralnih dodataka najučinkovitija je silikatna prašina. Ona reagira sa slobodnim vapnom iz cementa stvarajući CSH gel, a uz to poboljšava i cementni kamen na sučeljku s agregatom [3].



Slika 1. Krivulje naprezanje-deformacija dobivene pri vlačnom ispitivanju vlakna i matrice [5]

Krhkost betona raste s povećanjem njegove tlačne čvrstoće. Problem krhkosti kod betona visokih čvrstoća može se riješiti dodatkom vlakana (slika 1.). Intenzitet poboljšanja svojstava zbog mikroarmiranja vlaknima ovisi o količini i vrsti vlakana, prionljivosti vlakana i cementne matrice te kvaliteti same cementne matrice.



Slika 2. Odnos vodovezivnog omjera i tlačne čvrstoće nakon 28 dana kod betona visokih čvrstoća [3]

Za poboljšanje duktilnosti i drugih svojstava (čvrstoća na savijanje, žilavost, otpornost na nastanak i širenje pukotina, dinamičko ponašanje) betona visokih čvrstoća u očvrstlom stanju rabe se uglavnom čelična vlakna. Za sprječavanje raspucavanja mladog betona visokih čvrstoća i poboljšanje otpornosti na djelovanje požara upotrebljavaju se polimerna vlakna [5].

Postoji više metoda za projektiranje sastava betona visokih čvrstoća. Jedna je od najčešće primjenjivanih metoda razvijena na Sveučilištu u Sherbrookeu (Kanada) [3].

Ova je metoda upotrijebljena i u eksperimentalnom istraživačkom radu na betonima visokih čvrstoća u Hrvatskoj. [5] Na slici 2. prikazan je odnos između vodovezivnog omjera i tlačne čvrstoće dobivene nakon 28 dana na valjcima 100 x 200 mm, a koji se rabe pri projektiranju sastava betona visokih čvrstoća. Vodovezivni omjer jest odnos između mase vode i mase cementa i dodataka cementu. Vidljivo je da za odabrani vodovezivni omjer postoji veliki raspon tlačnih čvrstoća koje se mogu postići. Razlog je tome različita kvaliteta uporabljenih mineralnih i kemijskih dodataka.

Postoji i niz drugih metoda za projektiranje sastava betona visokih čvrstoća. U Americi se često primjenjuje metoda koju je predložio Tehnički odbor 363 ACI-ija [6]. U Francuskoj se upotrebljava De Larrardova metoda [7]. Od drugih metoda projektiranja sastava treba istaknuti metodu prema Mehti i Aitcinu [8].

Postupci proizvodnje, transporta, ugradnje i njegovanja betona visokih čvrstoća su složeniji nego kod betona običnih čvrstoća, pa stoga zahtijevaju i veću pozornost. Pogotovo postupak njege kod betona visokih čvrstoća ima mnogo veću važnost nego kod običnih betona i treba početi što prije i trajati dovoljno dugo. Pravilnom njegom betona visokih čvrstoća umanjuju se štetne posljedice autogenog skupljanja. Autogeno je skupljanje posljedica manjeg volumena produkata hidratacije od volumena materijala koji ulaze u proces hidratacije, a izraženije je kod betona s manjim vodovezivnim omjerom. Autogeno skupljanje počinje vrlo brzo nakon početka hidratacije.

U usporedbi s običnim betonom, beton visokih čvrstoća jest homogeniji materijal. Njegov je radni dijagram, zbog većeg modula elastičnosti, strmiji i linearan do blizu vrijednosti tlačne čvrstoće. Iako je modul elastičnosti betona visokih čvrstoća veći nego kod betona običnih čvrstoća on se ne povećava u istoj mjeri kao i tlačna čvrstoća. Zbog toga kod većih naprezanja u uporabi vitkih elemenata od betona visokih čvrstoća dolazi i do većih deformacija.

Većina pravila iz propisa i empirijskih izraza za vezu pojedinih mehaničkih svojstava koja vrijede kod betona običnih čvrstoća, ne vrijede za beton visokih čvrstoća. Na primjer, kod betona visokih čvrstoća za istu vrijednost tlačne čvrstoće vrijednosti čvrstoće na savijanje i čvrstoće cijepanjem variraju znatno više nego kod betona običnih čvrstoća [9].

Za odnos tlačne i savojne čvrstoće često se primjenjuju sljedeći izrazi [6, 10]:

$$f_r = 0,94 \cdot f_c^{1/2} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (1)$$

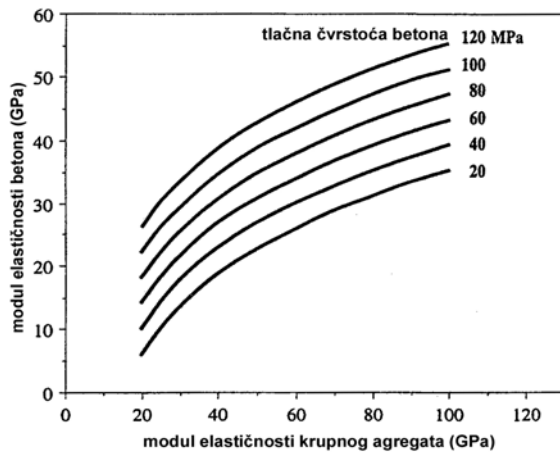
$$f_r = 0,23 + 0,12 \cdot f_c - 2,18 \cdot 10^{-4} \cdot f_c^2 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2)$$

Izrazi koji povezuju modul elastičnosti i tlačnu čvrstoću betona visokih čvrstoća jesu [11, 12]:

$$E_c = 10 \cdot \sqrt[3]{f_c + 8} \text{ [kN/mm}^2\text{]} \quad (3)$$

$$E_c = 5 \cdot \sqrt{f_c} \text{ [kN/mm}^2\text{]} \quad (4)$$

Na slici 3. prikazan je dijagram na temelju kojeg se iz poznatih vrijednosti tlačne čvrstoće betona i modula elastičnosti krupnog agregata može procijeniti modul elastičnosti betona visokih čvrstoća.



Slika 3. Dijagram ovisnosti modula elastičnosti betona visokih čvrstoća o tlačnoj čvrstoći i modulu elastičnosti krupnog agregata [3]

Mikrostruktura betona visokih čvrstoća homogenija je nego kod betona običnih čvrstoća. Ponajprije zbog niskoga vodovezivnog omjera i uporabe silikatne prašine betoni visokih čvrstoća imaju manju kapilarnu i ukupnu poroznost, a poboljšani su i sučeljak između cementnog kamena i agregata. Nehidratizirani cement u strukturi betona visokih čvrstoća može u povoljnim uvjetima okoliša naknadno hidratizirati i tako utjecati na smanjenje mikroraspucavanja betona kao posljedice isušivanja, temperaturnih promjena, autogenog skupljanja ili preopterećenja [3].

Zbog smanjene poroznosti betoni visokih čvrstoća imaju i bitno poboljšana svojstva trajnosti prema običnim betonima. Zbog toga su oni primjereniji uporabi u različitim agresivnim sredinama gdje postoji rizik pojave korozije armature ili drugih oblika oštećenja armiranobetonskih konstrukcija.

3 Parametri bitni u proračunu elemenata od betona visokih čvrstoća

3.1 Proračunski dijagrami tlačnih naprezanja

Matematički izraz za dijagram naprezanje-deformacija za betone običnih čvrstoća postavio je 1973. Popovicz, a za betone visokih čvrstoća, uvođenjem koeficijentata k i n , prilagodili su ga Thorenfeldt, Tomaszewicz i Jensen [13] u obliku:

$$\frac{\sigma_c}{f_{ck}} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cu}} \cdot \frac{n}{n-1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{cu})^{n-k}} \quad (5)$$

gdje je:

σ_c - naprezanje u betonu

f_{ck} - karakteristična tlačna čvrstoća betona

ε_c - deformacija betona koja odgovara naprezanju σ_c

ε_{cu} - granična deformacija betona koja odgovara čvrstoći f_{ck}

$k = 1,0$ za $\varepsilon_c / \varepsilon_{cu} < 1,0$

$k = 0,67 + f_{ck}/62$ za $\varepsilon_c / \varepsilon_{cu} > 1,0$

$n = 0,8 + f_{ck}/17$ (f_{ck} u N/mm²).

Granična deformacija betona dobije se prema izrazu:

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f_{ck}}{E_c} \cdot \frac{n}{n-1} \quad (6)$$

gdje je:

$E_c = 3320\sqrt{f_{ck}} + 6900$ - modul elastičnosti betona visoke čvrstoće (f_{ck} u N/mm²).

Kada se proračun provodi u skladu s ENV 1992 [14], za dobivanje proračunskog dijagrama, tlačnu čvrstoću f_{ck} biti potrebno podijeliti s koeficijentom sigurnosti za beton $\gamma_c = 1,5$ ($f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$) i reducirati faktorom $\alpha = 0,9$.

M. A. Mansur i suradnici [15] predlažu modificirani dijagram naprezanje-deformacija koji može obuhvatiti utjecaj poprečne armature i čeličnih vlakana:

$$\sigma_c = f_0 \cdot \left\{ \frac{\beta \cdot (\varepsilon_c / \varepsilon_0)}{\beta - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_0)^\beta} \right\} - \text{rastuća grana} \quad (7)$$

$$\sigma_c = f_0 \cdot \left\{ \frac{k_1 \cdot \beta \cdot (\varepsilon_c / \varepsilon_0)}{k_1 \cdot \beta - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_0)^{k_2 \cdot \beta}} \right\} - \text{padajuća grana} \quad (8)$$

gdje je:

$$\beta = \frac{1}{1 - f_0 / (\varepsilon_0 \cdot E_{it})}$$

k_1, k_2 - korekcijski faktori

E_{it} - početni modul elastičnosti betona

f_0 - vršno naprezanje za neovijeni beton

ε_0 - deformacija koja odgovara vršnom naprezanju.

Tablica 1. Prikaz izraza i parametara za modificirani dijagram naprezanje-deformacija

Ovijenost betona	Izrazi za parametre i korekcijske faktore	Konstanta *	Vrijednost konstante za beton	Vrijednost konstante za mikroarmirani beton
Neovijeni	$f_0 = m1 \cdot f_{ck}$	m1	0,94	0,96
	$E_{if} = m2 \cdot (f_0)^{0,33}$	m2	10 300	10 300
	$\varepsilon_0 = m3 \cdot (f_0)^{0,35}$	m3	0,0005	0,0005
	$k_1 = m4 \cdot (40/f_0)^2$	m4	1,00	0,96
	$k_2 = m5 \cdot (40/f_0)^{1,3}$	m5	1,00	0,80
Ovijeni sponama	$f_0'' = f_0 \cdot \left\{ 1 + n1 \cdot \left(\rho_s \cdot f_y / f_0 \right)^{n2} \right\}$	n1	0,6	11,63
	$\varepsilon_0'' = \varepsilon_0 \cdot \left\{ 1 + n3 \cdot \left(\rho_s \cdot f_y / f_0 \right)^{n4} \right\}$	n2	1,23	2,81
	$\varepsilon_0'' = \varepsilon_0 \cdot \left\{ 1 + n3 \cdot \left(\rho_s \cdot f_y / f_0 \right)^{n4} \right\}$	n3	5,9	2,6
	$\varepsilon_0'' = \varepsilon_0 \cdot \left\{ 1 + n3 \cdot \left(\rho_s \cdot f_y / f_0 \right)^{n4} \right\}$	n4	1,5	0,8
	$k_1 = f_0 \cdot \left\{ 1 + n5 \cdot \left(\rho_s \cdot f_y / f_0 \right)^{n6} \right\}$	n5	2,77	3,33
	$k_1 = f_0 \cdot \left\{ 1 + n5 \cdot \left(\rho_s \cdot f_y / f_0 \right)^{n6} \right\}$	n6	0	0,12
	$k_2 = f_0 \cdot \left\{ 1 + n7 \cdot \left(\rho_s \cdot f_y / f_0 \right)^{n8} \right\}$	n7	2,19	1,62
	$k_2 = f_0 \cdot \left\{ 1 + n7 \cdot \left(\rho_s \cdot f_y / f_0 \right)^{n8} \right\}$	n8	0,17	0,35

* konstante vrijede za slučaj horizontalno lijevane prizme 100·100·200 mm

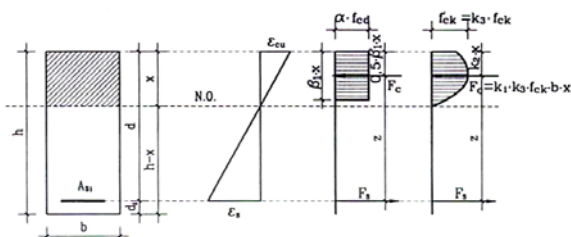
Formule za izračun ovih vrijednosti te pripadajuće veličine dani su u tablici 1.

Za dobivanje proračunskog dijagrama za proračun prema ENV 1992, potrebno je čvrstoću betona f_{ck} podijeliti s koeficijentom sigurnosti za beton $\gamma_c = 1,5$ i reducirati faktorom m1 (tablica 1.).

Državnim propisima za betone obične čvrstoće daju se pojednostavnjeni dijagrami naprezanje-deformacija u obliku parabole drugog reda i pravca ili pravokutnika. Ima prijedloga da se ti dijagrami prilagode za betone visokih čvrstoća. Osim toga, ima i novih prijedloga istraživača namijenjenih proračunu elemenata od betona visokih čvrstoća napreznih savijanjem. Ovdje će biti prikazano nekoliko od tih prijedloga.

Američkim ACI-pravilima [16] za dijagram naprezanje-deformacija kod betona običnih čvrstoća (karakteristična tlačna čvrstoća utvrđeno na valjcima jest od 20 do 50 N/mm²) predlaže se rabiti pravokutnik ili krivoctni dijagram (slika 4.). Za koeficijent α uzima se konstantna vrijednost 0,85, a za koeficijent redukcije visine:

$$\beta_1 = 1,05 - 0,05 \cdot \frac{f_{ck}}{6,9} \leq 0,85 \geq 0,65. \quad (9)$$



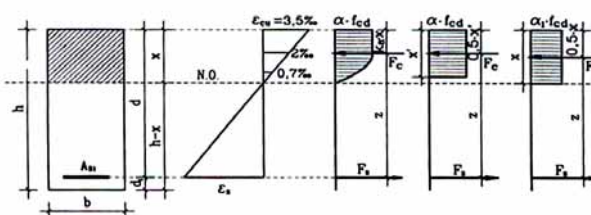
Slika 4. Prijedlozi ACI-propisa za proračunski dijagram [16]

Za betone čvrstoće veće od 55 N/mm² također se predlaže rabiti pravokutnik kojem je $\alpha = 0,85$, a $\beta_1 = 0,65$. Ovim koeficijentom nije moguće obuhvatiti efekt ovijivosti, što je nedostatak. Prema Eurokodu 2 [14], za dijagram naprezanje-deformacija rabi se parabola drugog reda i pravac ili pravokutnik za tlačne čvrstoće betona 20 do 60 N/mm² (slika 5.). Za koeficijent α uzima se da je 0,85 za sve oblike tlačnog područja, osim onih kojima se širina tlačnog područja smanjuje od neutralne osi prema tlačnom rubu (trokut, segment luka) kada je $\alpha = 0,8$.

Za betone visokih čvrstoća u CEB/FIP Bulletinu od 1990. godine [11] predlaže se za proračunski dijagram tlačnih naprezanja parabola i pravac, s tim da se vrijednost za α odredi prema izrazu:

$$\alpha = 0,6 + 10/f_{ck} \geq 0,85. \quad (10)$$

Kada se primjenjuje pravokutni dijagram tlačnih naprezanja, visine do neutralne osi, koeficijent α_1 mijenja se od 0,782 za beton čvrstoće $f_{ck} = 20$ N/mm² do $\alpha_1 = 0,578$ za beton čvrstoće $f_{ck} = 80$ N/mm². Uporabom predloženih koeficijenata nije moguće uzeti u obzir djelotvornost ovijivosti tlačnog područja.



Slika 5. Prijedlozi EC2 i CEB/FIP-a za proračunski dijagram [14, 17]

H. H. Ibrahim i J. G. Mac Gregor [17] proučavali su prijedlog pravila ACI-ja i drugih autora, te proveli opsežna eksperimentalna istraživanja, kako bi mogli definirati proračunski dijagram tlačnih naprezanja za betone visokih čvrstoća. Njihov je prijedlog prilagođeni dijagram pravila ACI-ja (podignuti pravokutnik na slici 4.), koji vrijedi za betone čvrstoće od 60 do 110 N/mm², po kojem su parametri:

$$\alpha = 0,85 - f_{ck}/800 \geq 0,725 \quad (11)$$

$$\beta_1 = 0,95 - f_{ck}/400 \geq 0,70 \quad (f_{ck} \text{ u N/mm}^2). \quad (12)$$

U radu I. Tomičića [18] načinjena je usporedba rezultata dobivenih prema navedenim prijedlozima za tlačnu silu F_C te moment nosivosti M_{Rd} , a za razred tlačne čvrstoće betona C 80/95, te pretpostavljene deformacije:

$$\varepsilon_{c2} = -3,5 \% \text{ i } \varepsilon_{s1} = 10 \%. \quad (13)$$

Usporedba rezultata pokazuje beznačajnu razliku rezultata za moment nosivosti, pa se zbog buduće pripadnosti EU kod nas predlaže rabiti prijedlog CEB/FIP-a, kada nije bitan učinak ovijenosti poprečnim sponama i/ili diskontinuiranim vlaknima, bilo parabolu i pravac ili pravokutnik do neutralne osi.

Istraživači Rashid i Mansur [19] načinili su usporedbu momenta nosivosti dobivenog vlastitim istraživanjima i onog proračunanog prema prijedlogu pravilima ACI-ja [9] te ustanovili da se tim izrazom dobije blago konzervativna vrijednost kada se primjenjuje za betone visokih čvrstoća ($M_{u,exp}/M_{u,cal} = 1,09$).

3.2 Duktilnost elemenata

Drugo vrlo značajno svojstvo armiranobetonskih konstrukcija jest duktilnost ili njihova sposobnost deformiranja do graničnog opterećenja bez znatnijeg smanjenja nosivosti. Zbog toga što je beton visokih čvrstoća krhki materijal, više od betona običnih čvrstoća te zbog povećane tlačne čvrstoće, jamstvo adekvatne duktilnosti elementa postaje prvenstvena proračunska obveza.

Na osnovi većine aktualnih državnih propisa postoji mogućnost analitičkog dokaza da povećanjem razreda tlačne čvrstoće betona raste i duktilnost elementa naprežanog savijanjem s uzdužnom silom ili bez nje. Eksperimentalna istraživanja mnogih znanstvenika, osim manjeg broja, to potvrđuje, ali samo za primjenu betona tlačne čvrstoće do 80 N/mm², a uporabom betona veće tlačne čvrstoće od ove duktilnost se smanjuje.

Nedavna opsežna eksperimentalna i teorijska istraživanja M. A. Rashida i M. A. Mansura [19] preciznije su definirala odnos tlačne čvrstoće betona i duktilnosti elementa od betona visokih čvrstoća. Autori su istražili po-

našanje armiranobetonskih greda od betona visokih čvrstoća čiji raspon čvrstoća je od 40 do 130 N/mm². Uz rezultate vlastitih istraživanja, rabili su i relevantne rezultate drugih istraživača objavljene u pristupačnoj literaturi. Kod analitičke interpretacije odnosa između tlačne čvrstoće i lokalne duktilnosti pridržavali su se vrijedećih svjetskih propisa, a osobito pravila ACI-ja.

Eksperimentalni program sadržavao je 16 greda dimenzija presjeka 250-400 mm i duljine 3400 mm, armiranih u vlačnom i tlačnom području ravnim šipkama ($\rho_s = 1,25 \div 3,46 \%$, $\rho'_s = 0,3 \div 0,94 \%$) povezanih sponama. Granica popuštanja armature bila je 460 do 540 N/mm². Koeficijent armiranja poprečnom armaturom bio je od 0,62 do 1,85 %. Mjereno je opterećenje (koncentrirana sila), deformacije i progibi kod pojave prve pukotine, popuštanja vlačne armature, drobljenja i odlamanja zaštitnog sloja i konačnog raspadnuća betona u tlačnome području, kao posljedice izvijanja tlačnih šipki i/ili slova spona. Kako su sve grede bile ograničeno armirane, naprezanje u vlačnoj armaturi doseglo je uvijek granicu popuštanja prije drobljenja betona, pa čak i odlamanja zaštitnog sloja, odnosno grede su se duktilno ponašale.

Duktilnost elemenata naprežanih savijanjem obično se izražava koeficijentom duktilnosti presjeka (lokalna duktilnost) definiranog omjerom granične zakrivljenosti (ϕ_u) i zakrivljenosti kada čelik u vlačnoj armaturi dostiže granicu popuštanja (ϕ_y) ($\mu_{1/r} = \phi_u/\phi_y$).

Međutim, kako se duktilnost elementa može procijeniti (mjeriti) i izrazom:

$$\mu_d = \delta_u/\delta_y \quad (13)$$

gdje je:

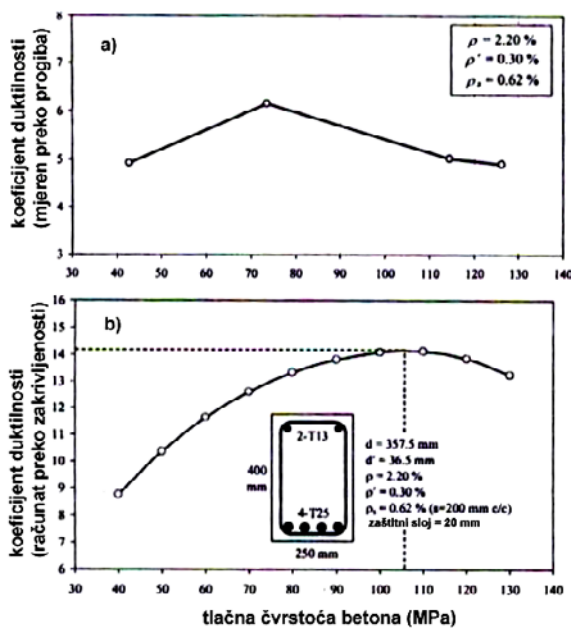
δ_u - maksimalni granični progib u sredini raspona grede neposredno pred slom (85 % od opterećenja pri slomu)

δ_y - maksimalni progib kada vlačna armatura dostigne granicu popuštanja

te zbog teškoća pri mjerenju zakrivljenosti, autori su ovih istraživanja duktilnost pri savijanju mjerili koeficijentom duktilnosti izraženim pomakom (μ_d).

Utjecaj čvrstoće betona na duktilnost

Važnost čvrstoće na duktilnost ispitanih uzoraka, autori istraživanja prikazali su na slici 6.a. Može se vidjeti da se μ_d povećava s porastom čvrstoće betona, ali samo do karakteristične čvrstoće uzorka koja se nalazi između 70 i 80 N/mm². Uzorci kojima je karakteristična čvrstoća bila veća od ove, pokazali su nižu duktilnost od maksimalno dostignute.



Slika 6. Duktinost armiranobetonske grede u ovisnosti o čvrstoći betona prema eksperimentalnim(a) i analitičkim (b) rezultatima [20]

Istraživači su također pokušali analitičkim putem doći do takvog dijagrama, rabeći koeficijent duktilnosti izražen zakrivljenošću $\mu_{1/r}$. Pritom su slom grede definirali kao onaj kada ekstremni tlačni rub ovijene jezgre dostigne graničnu deformaciju definiranu prema prijedlogu Scotta i drugih [20] u obliku:

$$\varepsilon_{\max} = 0,004 + 0,9 \cdot \rho_s \cdot \frac{f_y}{300} \quad (14)$$

gdje je:

$$\rho_s = \frac{2 \cdot (b_0 + d_0) \cdot A_s}{b_0 \cdot d_0 \cdot s} \quad \text{- koeficijent armiranja spona u odnosu na jezgru } (b_0, d_0)$$

f_y - granica popuštanja spona.

Primjenjivali su uvjete ravnoteže i Bernoullijevu hipotezu te varirali čvrstoće betona od 40 do 130 N/mm², s prirastom 10 N/mm². Rabili su reprezentativni model za ovijeni i neovijeni beton visokih čvrstoća Mansura i drugih [15], a bilinearni dijagram za odnos naprezanje-deformacija za čelik. Rezultate analitičkog istraživanja prikazali su na slici 6.b. Dobro se vidi da se duktilnost elementa povećava kako raste karakteristična čvrstoća betona, ali samo do $f_{ck} = 105$ N/mm², poslije čega opada. Također se može vidjeti da se optimalna čvrstoća betona dobivena eksperimentalnim istraživanjem i ona analitičkim postupkom ne podudaraju. Pretpostavlja se da je razlog tomu primjena različito definiranih duktilnosti. Ipak se može zaključiti da duktilnost elementa od betona visoke čvrstoće raste do neke optimalne čvrstoće

(~ 70 N/mm²), a zatim će primjenom još viših čvrstoća duktilnost biti manja. Do sličnih opažanja, ispitivanjem greda jednostruko ili dvostruko armiranih, došli su i neki drugi istraživači.

Utjecaj vlačne armature na duktilnost

Mnogim propisima, a i preporukama znanstvenika, često se duktilnost osigurava ograničenjem koeficijenta armiranja vlačnom armaturom ρ . Tako se američkim ACI-propisima u elementu naprezanom na savijanje, koeficijent armiranja vlačnog područja ograničava uvjetom: $\rho < 0,75 \rho_{bs}$ za standardnu situaciju i $\rho < 0,50 \rho_{bs}$ za konstrukcije kod kojih se predviđa preraspodjela momenata savijanja, gdje je:

$$\rho_{bs} = \frac{0,85 \cdot \alpha_v \cdot f_{ck}}{f_{yk}} \cdot \frac{\varepsilon_{cu} \cdot E_s}{-\varepsilon_{cu} \cdot E_s + f_{yk}} \quad \text{- balansirani}$$

koeficijent armiranja, odnosno onaj pri kojem istodobno dolazi do iskorištenja armature i betona. Za dvostruko armirani presjek (vlačna i tlačna armatura u presjeku) uvjet se odnosi na koeficijent armiranja ($\rho - \rho'$).

Prema Europskoj normi 1992 [14] ograničava se visina tlačnog područja:

$$\xi_{\lim} = (x/d)_{\lim} = 0,45 \quad \text{za betone razreda C 12/15 do C 35/45}$$

$$\xi_{\lim} = (x/d)_{\lim} = 0,35 \quad \text{za betone razreda C 40/50 i više}$$

$$\xi_{\lim} = (x/d)_{\lim} = 0,25 \quad \text{za primjenu teorije plastičnosti.}$$

Za veće omjere od navedenih predlaže se dvostruko armiranje.

Kako su betoni visokih čvrstoća krhkiji te imaju smanjenu graničnu tlačnu deformaciju i manje bočno širenje, pa time i niži učinak ovijenosti u odnosu na betone običnih čvrstoća, autori istraživanja [19] predlažu da se za element karakteristične tlačne čvrstoće 100 N/mm² ograniči vlačna armatura na približno 0,4 ρ_{bs} . Za čvrstoće betona između 40 i 100 N/mm² predlaže se interpolacija između 0,5 ρ_{bs} i 0,4 ρ_{bs} .

Utjecaj tlačne armature i poprečnih spona (ovijenost) na duktilnost

U elementima naprezanim savijanjem, tlačna armatura uz beton prihvaća tlačna naprezanja te time pridonosi duktilnosti elementa, odnosno njegovoj sposobnosti da mu se vlačna armatura napreže do granice popuštanja i plastično deformira prije konačnog sloma betona.

Također, poprečna armatura, uz to što prihvaća glavna kosa naprezanja i pridržava uzdužnu tlačnu armaturu od izvijanja, kada ovija tlačno područje pridonosi, zbog

efekta ovijenosti, povišenju tlačne čvrstoće i deformabilnosti betona, a time i duktilnosti elementa.

Već spomenuta istraživanja M. A. Rashida i M. A. Mansura [19] također su, uporabom podataka ispitivanja, potvrdila vrijedan doprinos tlačne armature i, osobito, poprečnih spona duktilnosti elementa. Oni su također ustanovili da je značenje poprečne armature presudno. Naime, povećanjem poprečne armature, smanjenjem njihova razmaka uzduž grede uz odgovarajuću količinu uzdužne tlačne armature, oni su znatno utjecali na povišenje duktilnosti, dok se duktilnost povećanjem tlačne armature, uz zadržani referentni razmak spona, znatno manje povećala. To se objašnjava ranim izvijanjem tlačnih šipki kada je razmak poprečne armature velik i smanjenjem višeosnoga tlačnog napreznja izazvanog ovijenošću.

U tom smislu Park i Paulay [21] predlažu da maksimalni razmak zatvorenih spona u području plastičnog zgloba armiranobetonskih elemenata ne bude veći od $d/4$ (d -statička visina grede), kada je cilj projektirati duktilnu konstrukciju.

Prema ENV 1998 [23] zahtijeva se, u području plastičnog zgloba, da razmak poprečne armature, elementa napreznog na ekscentrični tlak, zadovolji uvjete:

$s \leq 6$ promjera uzdužne armature i

$s \leq 1,5$ manje dimenzije betonske jezgre.

3.3 Moment raspucavanja

Pojava prve pukotine u elementu napreznom savijanjem nastaje kada moment savijanja, za proračunsku kombinaciju djelovanja, dostigne moment raspucavanja, definirano prema izrazu:

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{y_t} \quad (15)$$

gdje je f_r vlačna čvrstoća pri savijanju, I_g moment tromosti punog presjeka i y_t udaljenost vlačnog ruba od neutralne osi.

Za beton visokih čvrstoća, kada se rabi izraz prema pravilima ACI-ja za vlačnu čvrstoću, dobiju se podudarni rezultati za $M_{cr,cal}$ s onima dobivenim ispitivanjem $M_{cr,exp}$ ($M_{cr,exp}/M_{cr,cal} = 0,90$).

Za beton visokih čvrstoća Rashid i drugi [23] predložili su izraz za vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti u obliku:

$$f_r = 0,42 \cdot f_{ck}^{0,68} \quad (16)$$

$$E_c = 8900 \cdot f_{ck}^{0,33} \quad (17)$$

Međutim, kada se primjenjuje izraz (16) za određivanje vlačne čvrstoće betona visokih čvrstoća, istraživači [15] su utvrdili da se ispitane grede prije raspucavaju, odnosno da je srednja vrijednost $M_{cr,exp}/M_{cr,cal} = 0,62$. To je obrazloženo spriječenim skupljanjem betona vlačnom armaturom i pridruženim puzanjem betona. Da bi se prognoza momenta raspucavanja popravila, predložena je uporaba reducirane vlačne čvrstoće ($f_r - \sigma_{sh}$), gdje je σ_{sh} spriječenim skupljanjem izazvano vlačno napreznje u ekstremnim vlaknima.

Uporabom reducirane vlačne čvrstoće ($f_r - \sigma_{sh}$) i modula elastičnosti dobivenog izrazom (17), dobilo se drastično poboljšanje za moment raspucavanja, tako da se je za srednji omjer dobio povoljniji rezultat:

$$M_{cr,exp}/M_{cr,cal} = 1,19.$$

Uključivanje puzanja betona, kao posljedice napreznja izazvanog skupljanjem, jako komplicira proračun. Naime, vlačna napreznja zbog skupljanja rastu od 0 do pune vrijednosti, a opadaju, djelovanjem puzanja, s vremenom.

Predlaže se stoga, zbog pojednostavnjenja, rabiti djelotvorni modul elastičnosti u obliku:

$$E_{eff}(t, \tau_0) = \frac{E_c(\tau_0)}{1 + \chi(t, \tau_0) \cdot \phi(t, \tau_0)} \quad (18)$$

gdje je:

$E_{eff}(t, \tau_0)$ - modul elastičnosti kod prvog opterećenja

$\phi(t, \tau_0)$ - koeficijent puzanja u vrijeme t za beton prvi put opterećen kod starosti τ_0

$\chi(t, \tau_0) = 0,8$ - konačna vrijednost za koeficijent starenja.

Za termin $\chi(t, \tau_0) \cdot \phi(t, \tau_0)$ najčešće se uzima 2,2. Analitičkim analizama došlo se do spoznaje da je primjenom gornjeg podatka (2,2) reducirani modul elastičnosti: $E_c' = E_c/2$, kojim se uključuje efekt puzanja prilično točno i to za vlačno i tlačno područje.

Momentom raspucavanja $M_{cr,cal}$ izračunanom uporabom reduciranog modula elastičnosti $E_c' = E_c/2$ te računanjem vlačnog napreznja izazvanog skupljanjem σ_{sh} dobio se je zadovoljavajući omjer: $M_{cr,exp}/M_{cr,cal} = 0,97$. Slični su se rezultati dobili usporedbom momenata raspucavanja, dobivenih ispitivanjem drugih autora i onih izračunatih ovim pojednostavljenim prijedlogom.

Iz prethodne se analize vidi da se uporabom izraza, prema pravilima ACI-ja za vlačnu čvrstoću i kada se primjenjuje beton visokih čvrstoća, indirektno ocjenjuju efekti skupljanja i puzanja u prognozi momenta raspucavanja.

3.4 Progib greda pri uporabnom (proračunskom) opterećenju

Znanstvenici su istraživali [19] ponašanje greda, dimenzija već prije opisanih, kako bi došli do podataka za proračun progiba pri uporabnom opterećenju u skladu s pravilima ACI-ja. Za određivanje maksimalnog progiba, pri proračunskom opterećenju, rabili su teoriju elastičnosti. Za slučaj opterećenja primijenjenog u eksperimentalnom istraživanju, progib su dobili prema izrazu:

$$\delta_{s,cal} = \frac{M_a}{24 \cdot E_c \cdot I} (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) \quad (19)$$

gdje je:

- M_a - maksimalni moment savijanja u sredini raspona
- L - raspon grede
- a - posmični raspon
- E_c - modul elastičnosti betona
- I - moment tromosti uzet prema specifikaciji pravila ACI-ja kao I_e :

$$I_e = I_{cr} + (I_g - I_{cr}) \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \leq I_g \quad (20)$$

gdje je:

- I_g - moment tromosti punog presjeka
- I_{cr} - moment tromosti na mjestu pukotine.

Najprije su za proračun momenta raspucavanja primijenili izraze za vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti prema pravilima ACI-ja. Usporedba proračunanih i eksperimentalnih vrijednosti za progib pokazuje precijenjenost uporabljenih parametara ($\delta_{s,exp}/\delta_{s,cal} = 1,26$).

Zatim, uporabom modificiranih izraza za vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti, namijenjenih za betone visokih čvrstoća ((16) i (17)), nisu mnogo pridonijeli poboljšanju u prognozi progiba ($\delta_{s,exp}/\delta_{s,cal} = 1,23$).

Nakon toga, autori istraživanja pokušali su poboljšati izraze za f_r i E_c namijenjene betonu visokih čvrstoća (izrazi (16) i (17)), tako da su promatrali dvije mogućnosti.

Prvi slučaj, kada se uvodi samo skupljanje, izrazom za vlačnu čvrstoću, omjer progiba bio je $\delta_{s,exp}/\delta_{s,cal} = 1,22$, a u drugom slučaju kada se uvodi skupljanje i pridruženo puzanje primjenom reduciranog modula elastičnosti ($E_c' = E_c/2$) rezultat se drastično poboljšao, odnosno omjer progiba je bio $\delta_{s,exp}/\delta_{s,cal} = 0,93$.

Slične rezultate, za omjere progiba, dobili su uporabom eksperimentalnih rezultata drugih autora i predloženih izraza u drugom slučaju.

Prijedlog je da se progib elementa od betona visokih čvrstoća, za proračunsko opterećenje, proračunava uporabom izraza za reduciranu vlačnu čvrstoću ($f_r \cdot \sigma_{sh}$) i izraza za reducirani modul elastičnosti ($E_c' = E_c/2$) kojima će biti obuhvaćeno skupljanje i puzanje betona.

3.5 Maksimalne širine pukotina za proračunsko opterećenje

Isti su znanstvenici [20] mjerili maksimalne širine pukotina u visini donjeg sloja vlačne armature greda koje su bile načinjene za eksperimentiranje, te ih analitičkim putem prognozirali uporabom izraza Gergely-Lutza [16].

Nakon dobivenih rezultata usporedili su rezultate preko omjera $w_{max,exp}/w_{max,cal}$. U većini primjera rezultati su se podudarali, tako da je taj omjer bio od $0,92 \div 1,3$, izuzev grede s velikim koeficijentom armiranja u vlačnom području, kada je omjer bio 1,8, odnosno podcijenjena je prognozirana veličina za maksimalnu širinu pukotina.

Predlaže se rabiti izraze za prognozu maksimalne širine pukotina prema postupku u pravilima ACI-ja, osim za jako armirane presjeke u vlačnome području.

Kada se granično stanje uporabljivosti (ograničenje širina pukotina) proračunava prema Eurokodu 2, valja zadovoljiti:

$$w_k \leq w_g \quad (21)$$

gdje je:

$w_k = \beta_{srm} \cdot \varepsilon_{sm}$ - karakteristična širina pukotina, koja se nešto razlikuje od maksimalne specificirane u pravilima ACI-ja, pa se pri točnoj analizi to mora uzeti u obzir.

4 Zaključak

U betone visokih čvrstoća ubrajaju se betoni razreda tlačnih čvrstoća od C 55/67 do C 100/115. Osim poboljšanih vrijednosti tlačnih čvrstoća, betoni visokih čvrstoća imaju i bolja svojstva trajnosti u odnosu na betone običnih čvrstoća.

Kod betona visokih čvrstoća potrebna je veća pažnja u izboru sastojaka, a i postupci proizvodnje, transporta, ugradnje i njege složeniji su nego kod betona običnih čvrstoća.

U ovome su radu prikazana istraživanja i rezultati ispitivanja bitnih parametara potrebnih pri proračunu nosivih i duktilnih armiranobetonskih konstrukcija od betona visokih čvrstoća.

Predlažu se sljedeći zaključci:

1. Prikazano je više prijedloga za proračunski dijagram tlačnih naprezanja za proračun elemenata, napreznih savijanjem s uzdužnom silom ili bez nje. Svi predloženi dijagrami provjereni su međusobnom usporedbom momenata nosivosti, dobivenih uporabom predloženih dijagrama, te se pokazalo da se dobro podudaraju. U našoj državi prednost ima, zbog pripadnosti Europi, prijedlog CEP/FIP.
2. Istraživana je duktilnost elemenata napreznih savijanjem te je ustanovljeno da se povećanjem razreda betona iznad 40 N/mm^2 , povećava duktilnost elementa, ali samo do tlačne čvrstoće između 70 i 80 N/mm^2 a zatim opada. Analizirani su pojedini faktori koji utječu na duktilnost kao: tlačna čvrstoća betona, količina vlačne armature te utjecaj tlačne armature i poprečnih spona (armature za ovijanje). Predlaže se ograničenje vlačne armature ograničenjem koeficijenta armiranja, kako bi došlo do popuštanja armature prije drobljenja tlačnog područja. Doprinos tlačne armature je utvrđen, ali on nije zapaženo velik kao količina poprečne armature za ovijanje, pa se predlaže strogo provoditi ograničenje razmaka spona uzduž elementa.

3. Istraživanjem je ustanovljeno da se izrazom za vlačnu čvrstoću betona visoke čvrstoće ne dobivaju dobri rezultati za moment raspucavanja, pa se je tek uključivanjem skupljanja i puzanja dobio prihvatljiv prijedlog za moment raspucavanja, ali ne tako dobar kao kad se rabi prijedlog za vlačnu čvrstoću, namijenjen betonima običnih čvrstoća, prema pravilima ACI-ja.
4. Za provjeru progiba greda od betona visokih čvrstoća predlaže se rabiti prijedlog dan pravilima ACI-ja za elemente od betona običnih čvrstoća, s tim da se primjenjuje reducirani modul elastičnosti i izraz za vlačnu čvrstoću umanjen za vlačno naprezanje izazvano skupljanjem.
5. Za provjeru maksimalne širine pukotina predlaže se rabiti izraz Gergely-Lutza i kada su grede od betona visokih čvrstoća. Usporedba izmjerenih rezultata za širine pukotina i onih dobivenih analitičkim putem dobro se podudaraju.

Općenito se može kazati da je primjena betona visokih čvrstoća opravdana, te da se konstrukcije od takvog gradiva mogu uspješno proračunavati da budu nosive, duktilne, uporabive i racionalne.

LITERATURA

- [1] Skazlić, M.; Bjegović, D.: *Struktura i svojstva betona povećane tlačne čvrstoće*, GRAĐEVINAR 58 (2006) 4, 289-299
- [2] *Tehnički propis za betonske konstrukcije*, Zbornik radova sa Prvih hrvatskih dana betona, Secon HDGK, Cavtat, Hrvatska, 2005, 821-868.
- [3] Aitcin, P.C.: *High-Performance Concrete*, E&FN SPON, London, 1998.
- [4] Nawy, E.: *Fundamentals of high-performance concrete*, Second edition, John Wiley&Sons, Inc., New York, 2001.
- [5] Skazlić, M.: Mikroarmirani predgotovljeni elementi sekundarne tunelske obloge, disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [6] ACI Committee 363, *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete*, ACI 363 R-92, American Concrete Institute, Manual of Concrete in Practice, 2001.
- [7] De Larrard, F.: *A method for proportioning high-strength concrete mixtures*, Cement, Concrete and Aggregates, 12 (1), Summer 1990, 47-52.
- [8] Mehta, P. K.; Aitcin P.C.: *Principles underlying production of high-performance concrete*, Cement, Concrete and Aggregates, 12 (2), Winter 1990, 70-78.
- [9] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: *High performance concrete structural designer's guide*, 2005.
- [10] Khayat, K.; Bickley, J.; Hooton, R. D.: *High-strength concrete properties derived from compressive strength values*, Cement, Concrete and Aggregates, 17 (2), December 1995, 126-133.
- [11] CEB-FIP: *State-of-the-Art Report: High Strength Concrete*, Bulletin d'information CEB No. 197, August 1990. 61 pp.
- [12] Canadian Code CAN A23.3-M90, 1990.
- [13] Collins, M. P.; Mitchell, D.; Mac Gregor, J. G.: *Structural Design Considerations for High-Strength Concrete*, Concrete International, Vol. 15, No. 5, May, 1993, 27-34.
- [14] Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija-1-1. dio: Opća pravila i pravila za zgrade (HRN ENV 1992-1-1), prosinac 2004.
- [15] Mansur, M. A.; Chin, M. S.; Wee, T. H.: *Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams*, ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 6, November-December, 1997, 663-674
- [16] ACI Committee 318-95, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, 1995.
- [17] Ibrahim, H. H.; Mc Gregor, J. G.: *Modification of the ACI Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete*, ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 1, January-February, 1997, 40-48.
- [18] Tomičić, I.: *Konstrukcije od betona visokih i ultravisokih svojstava*, CIM 47(2001)1-2, 19-28.
- [19] Rashid, M. A.; Mansur, M. A.: *Reinforced High-Strength Concrete Beams in Flexure*, ACI Structural Journal, Vol. 102, No. 3, May-June 2005, 462-471.
- [20] Scott, B. D.; Park, R.; Priestley, M. J. N.: *Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates*, ACI Journal, Vol.79, No. 1, January-February, 1982, 13-27.
- [21] Park, R., Paulay, T.: *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley, New York, 1975.
- [22] Rashid, M. A.; Mansur, M. A.; Paramasivan, P.: *Correlations Between Mechanical Properties of High-Strength Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, V. 14, No. 3, May-June 2002, 230-238.
- [23] Eurokod 8: *Design of Structures for Earthquake Resistance*, Part 1: General Rules, Seismic Actions Rules for Buildings, CEN, Brussels, January 2003.