UDK 624.072.2.001.2.666.973

Primljen / Received: 8.7.2011.
Ispravljen / Corrected: 5.10.2012.
Prihvaćen / Accepted: 17.10.2012.
Dostupno online / Available online: 15.11.2012.

Proračun greda od lakoagregatnog betona

Autor:

Prof.emer.dr.sc. Ivan Tomičić, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Stručni rad

Ivan Tomičić

Proračun greda od lakoagregatnog betona

U radu je prikazana mogućnost primjene lakoagregatnog betona u građenju armiranobetonskih elemenata naprezanih savijanjem. Obrazložena je opravdanost uporabe tog materijala za građenje niskih i visokih zgrada, mostova, industrijskih objekata te hidrotehničkih građevina, osobito u seizmičkim područjima. Postupci proračuna, dani za elemente naprezane savijanjem, od normalno teškog betona mogu se, uz manje izmjene, primjenjivati i za konstrukcije od lakog betona.

Ključne riječi:
lakoagregatni beton, postupak proračuna, nosivost, duktilnost, progib, raspucavanje

Professional paper

Ivan Tomičić

Analysis of lightweight aggregate concrete beams

The possibility of using the lightweight aggregate concrete for construction of reinforced-concrete elements subjected to bending stress is presented in the paper. The adequacy of this material for construction of low and high buildings, bridges, industrial facilities, and water engineering facilities, especially in earthquake-prone areas, is presented and substantiated. Computation procedures given for normal-weight concrete elements subjected to bending stress, can also be applied, with minor modifications, to lightweight concrete structures..

Key words:
lightweight aggregate concrete, computation procedure, load-bearing capacity, ductility, deflection, cracking

Fachbericht

Ivan Tomičić

Berechnung eines Trägers aus Leichtbeton

In der Arbeit wird die Möglichkeit der Verwendung von Leichtbeton beim Bau von Stahlbetonelementen unter Biegungsspannung dargestellt. Die Rechtfertigung der Verwendung dieses Materials zum Bau von niedrigen und hohen Gebäuden, Brücken, Industrieanlagen und hydrotechnischen Bauwerken vor allem in seismischen Gebieten wird erläutert. Die Berechnungsverfahren für Elemente unter Biegungsspannung aus normal schwerem Beton können mit kleineren Anpassungen auch für Leichtbetonkonstruktionen übernommen werden.

Schlüsselwörter:
Leichtbeton, Berechnungsverfahren, Tragfähigkeit, Duktilität, Biegung, Dekrepitation

1. Uvod

Kod nas, a još više u svijetu, zbog dokazanih prednosti, sve se više pokazuje zanimanje za lagane i kvalitetne betone kakav je onaj od laganog agregata, skraćeno LAB (lakoagregatni beton), uz tradicijski beton od normalno teškog agregata, skraćeno NTB (normalno teški beton). Konstrukcije od LAB-a, već danas, primjenjuju se u građenju niskih do višekatnih zgrada, mostova, industrijskih objekata, plovila na moru te obalnih sustava. Povećano zanimanje za konstrukcije od LAB-a, nažalost, ne prate adekvatni propisi. Najviše se primjenjuju američke norme ACI 213R-03 [1] i ACI 318-05 [2] koje uključuju osnovna pravila za konstrukcije od LAB-a kao i budući potencijal njihove primjene. S druge strane, mnoge razvijene zemlje nemaju propise, što se objašnjava pomanjkanjem iskustva u primjeni LAB-a. Razlog je tome nedovoljno znanje o proizvodnji lakoagregatnog betona i koristi njegove primjene. Odnedavno u Eurokodu 2: EN 1992-1-1 2004 [4] dano je posebno poglavlje o konstrukcijama od LAB-a koje će znatno pridonijeti primjeni tog materijala. Neki proračunski naputci mogu se naći u Britanskim standardima BS 8110 [3] te u propisima CEB-FIP Model Code [5].

Nedavna istraživanja na Nacionalnom sveučilištu u Singapuru [6] pridonijela su boljem poznavanju ponašanja konstrukcija od LAB-a te mogućnosti proračuna sustava od toga gradiva. Rezultati ovih istraživanja te njihova primjena na proračun greda od LAB-a bit će prikazani i primjenjeni i u ovom radu. U proračunu greda od LAB-a, naprezanih savijanjem, primjenjuju se pravila koja se rabe pri proračunu konstrukcija od normalno teškog betona, s tim da pojedini parametri moraju biti rezultat istraživanja ponašanja greda od LAB-a. Postupci proračuna u ovom radu osnivat će se na Europskoj normi [4] te manjim dijelom na američkim propisima [2].

2. Eksperimentalna i analitička istraživanja

U ovom radu skraćeno će biti prikazana istraživanja s Nacionalnog sveučilišta u Singapuru [6], koja su imala za cilj analizirati poboljšana svojstva lakoagregatnog betona i njegovu praktičnu primjenu. Istraživači su, na osnovi eksperimentalnih pothvata, dali dovoljno podataka za utvrđivanje parametara potrebnih u proračunu po graničnim stanjima nosivosti i uporabivosti, kao što je tlačna čvrstoća f_{ck}, koeficijenti armiranja vlačnog ρ i tlačnog ρ' područja te poprečne armature ρ_w. Također, dano je dovoljno podataka za provjeru duktilnosti, krutosti i raspucavanja greda od LAB-a.

2.1. Eksperimentalna istraživanja

Prema [6], ispitana je 21 greda od LAB-a i tri referentne, radi usporedbe, od NTB-a. Grede su bile podijeljene u pet grupa za istraživanje svakog relevantnog parametra, dok su ostala svojstva u pojedinim grupama ostala nepromijenjena. Tlačna čvrstoća varirala je od 20 do 75 MPa. Vrijednost za koeficijent armiranja vlačnog područja bila je 0,67 i 1,02 %.
Uzorci greda bili su pravokutnog presjeka 150/300 mm i duljine 3,1 m (2,8 m raspon), opterećene s dvije koncentrirane sile, smještene simetrično u rasponu na razmaku od 800 mm. Grede su bile armirane uzdužnom armaturom u vlačnom i tlačnom području. Poprečna armatura u obliku zatvorenih spona bila je od žice Ø 10 mm. Sve grede bile su osigurane za duktilno ponašanje pri savijanju zatvorenim sponama, profilom i njihovim razmakom te tlačnom armaturom.
Grede su bile opremljene instrumentima za mjerenje progiba, deformacija betona i čelika te zakrivljenosti u srednjem području kao i širina pukotina u razini vlačne armature greda. Opterećenje je bilo monotono do granice popuštanja čelika te nastavljeno tako do sloma.

2.2. Rezultati ispitivanja i rasprava

Krivulje *"opterećenje-progib"* u sredini raspona dobivene su za dva para greda od LAB-a i NTB-a. Dijagrami su bili opisani, za obje vrste betona, preko četiri različita odvojena događaja a to su:

1. raspucavanje zbog savijanja;
2. popuštanje vlačne armature;
3. drobljenje i odvajanje zaštitnog sloja i
4. raspadanje tlačnog betona.

Rezultati ispitivanja bili su uspoređivani s prognoziranim, dobivenim prema [2, 3, 4, 5], Prognozirani su parametri: vlačna čvrstoća pri savijanju f_r i modul elastičnosti E_c. Služili su za dobivanje sljedećih veličina: moment raspucavanja, moment popuštanja armature, granični moment, maksimalna širina pukotina i progib u sredini raspona, uporabom redukcijskog faktora λ kada se je radilo o uzorcima od LAB-a.

Raspucavanje dvaju uzoraka greda od LAB-a i NTB-a bilo je uspoređivano tijekom i nakon opterećenja. Uzorci od LAB-a i NTB-a pokazivali su izvanrednu sličnost, osim broja pukotina. Taj broj kod greda od NTB-a varirao je između 9 i 11, a za grede od LAB-a između 10 i 16, na središnjem dijelu raspona (800 mm).

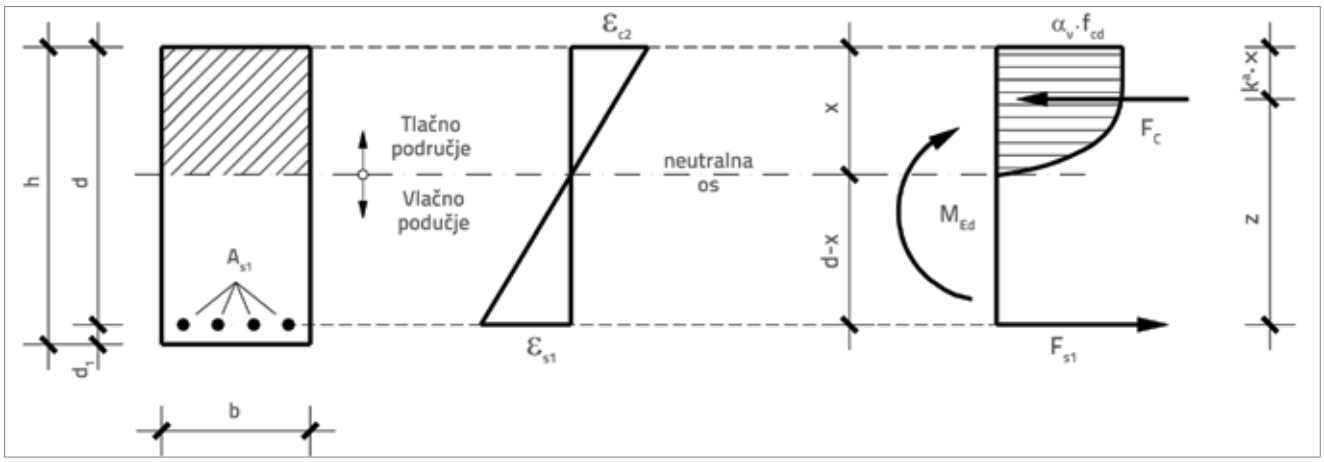
Moment pri pojavi prvih pukotina, M_{cr} važan je parametar u prognozi momenta tromosti, a potom za određivanje progiba grede. Ispitivanja su pokazala da je ova veličina osjetljiva na čvrstoću betona i kakvoću vlačne armature za obje vrste greda. Primijećeno je da se grede od LAB-a počinju ranije raspucavati u odnosu na odgovarajuće od NTB-a kada je čvrstoća betona bila niska, a pod jednakim opterećenjem kada je čvrstoća bila visoka. Moment raspucavanja M_{cr}, potreban za usporedbu, bio je proračunan u skladu s propisima. Prema većini navedenih propisa, vrijednost tog momenta je u funkciji prognozirane vlačne čvrstoće betona pri savijanju f_r. Prijedlog proračuna M_{cr} prema [1, 2] daje jednako dobre rezultate za grede od LAB-a i one od NTB-a, pa se predlaže za praktičnu primjenu, dok se

prijedlozima drugih propisa ne dobivaju podudarni rezultati za obje vrste betona.
Maksimalne širine pukotina registrirane na uzorcima od LAB-a i NTB-a bile su statistički obrađene. Pokazalo se da te širine bitno ovise o koeficijentu armiranja vlačnog područja ρ. Ugradnja većeg broja šipki manjeg promjera rezultira većim brojem pukotina manjih širina. Valja istaknuti, kada su svi parametri isti za grede od LAB-a i NTB-a, uporaba greda od LAB-a rezultira većim brojem uskih pukotina, što je povoljno za trajnost u odnosu na grede od NTB-a. Osim toga, istraživanja su pokazala dobro podudaranje očitanih maksimalnih širina pukotina i onih dobivenih primjenom izraza iz EN 1992-1-1 za obje vrste greda, dok su rezultati dobiveni primjenom jednadžbe Gergely-Lutza, a u skladu s [1, 2] nešto lošiji, odnosno prognozirani su manji od izmjerenih.

Krutost i progib bili su razmatrani preko krivulje "opterećenje-progib" ili "moment-zakrivljenost" dobivenih eksperimentalno. Rezultati su pokazali da su krutosti greda uz iste parametre prije i poslije raspucavanja, od LAB-a manje negoli za odgovarajuće grede od NTB-a, što se obrazlaže nižim modulom elastičnosti E_c greda od LAB-a. Vrijednosti dobivene primjenom propisa ACI 318-05 i EN 1992-1-1 međusobno se dobro podudaraju, ali su usporedne vrijednosti, dobivene BS 8110, prema njima mnogo niže. Istraživanja su također pokazala da izvjesno povećanje kakvoće betona i količine armature povećava krutost greda nakon raspucavanja bez obzira na to od kojega su od oba predviđena betona. Međutim tlačna armatura i razmaci spona u području savijanja imaju neznatan utjecaj na krutost greda. Usporedba progiba greda od LAB-a i onih od NTB-a pokazuje da su progibi greda od LAB-a za 10 % veći od progiba greda od NTB-a. Rezime svega je to da je maksimalni progib greda od obje vrste betona, nakon raspucavanja u sredini raspona, dobiven ispitivanjem veći od onoga prognoziranog primjenom svih navedenih propisa kada se primjenjuje modul elastičnosti E_c. Istraživači predlažu, stoga, za prognozu progiba nakon raspucavanja primjenjivati efektivni moment tromosti I_e i smanjeni modul elastičnosti na polovicu, tj. $E_c/2$, jednako za grede od LAB-a i one od NTB-a. To potvrđuje omjer eksperimentalnog i prognoziranog srednjeg progiba kada se rabi I_e, 0,99 za grede od NTB-a i 0,91 za one od LAB-a.

Model sloma i nosivost svih ispitanih greda za obje vrste betona odgovarao je onome zbog savijanja, kada najprije popušta armatura (čelik dostiže granicu popuštanja), a potom nastupa krti slom tlačnog betona. Maksimalne tlačne deformacije betona, praćene drobljenjem zaštitnog sloja i zatim iznenadnim slomom presjeka, bile su za grede od NTB-a između 0,0023 i 0,0038 te za grede od LAB-a od 0,0025 do 0,0038. Međutim, usporedba greda od NTB-a i onih LAB-a kod granične nosivosti pokazala je vrlo slične maksimalne deformacije betona. Usporedba graničnih nosivosti greda od NTB-a i onih od LAB-a s istim parametrima pokazivala je da se one dobro podudaraju. Bilo je zapaženo da samo količina vlačne armature utječe na graničnu nosivost, osim ako je koeficijent armiranja visok i kakvoća betona velika. Slično krutosti na savijanje, granična nosivost nije bitno osjetljiva na promjenu tlačne armature i razmake poprečnih spona u području maksimalnog savijanja.
Istraživači su proveli proračun graničnog momenta nosivosti prema propisima ACI 318-05 i EN 1992-1-1 uz još neke državne norme, te zaključili da se tako prognozirane granične nosivosti, dobivena preko momenta M_u, međusobno dobro podudaraju i da je omjer eksperimentalne i prognozirane vrijednosti isti za slične grede od LAB-a i NTB-a. Zaključak je da se grede od LAB-a, naprezane savijanjem, mogu proračunavati u skladu s propisima koji vrijede za betone od NTB-a.

Duktilnost, kao vrlo poželjno svojstvo armiranobetonskih elemenata i konstrukcija, zbog mogućnosti preraspodjele momenata savijanja, apsorpcije seizmičke energije te izbjegavanja krtog sloma, valja osigurati i kod greda od LAB-a. Svojstvo grede da se deformira bez gubitka nosivosti, odnosno svojstvo duktilnosti, kod grednih sustava najčešće se definira koeficijentom duktilnosti koji predstavlja omjer zakrivljenosti kod sloma betona i one kada naprezanje u vlačnoj armaturi dostiže granicu popuštanja.
Kod usporedbe ponašanja greda od LAB-a i NTB-a istraživači razlikuju [6] dva koeficijenta duktilnosti, prvi predstavlja omjer zakrivljenosti kada beton popušta (točka na padajućoj grani koja odgovara 85-postotnom graničnom opterećenju) μ_{cc} i drugi kod konačnog sloma betona μ_{cf}. Ispitana duktilnost greda preko zakrivljenosti μ_{cc} bila je u granicama od 1,96 do 4,47 za grede od NTB-a i 1,25 do 5,93 za one od LAB-a.
Za postizanje adekvatne duktilnosti, propisima se obično ograničuje koeficijent armiranja vlačnom armaturom ρ, koji se definira kao dio balansiranog koeficijenta armiranja ρ_{bal}. Eksperimentalnim istraživanjem je utvrđeno da duktilnost opada s povećanjem koeficijenta armiranja ρ jednako za grede od LAB-a i NTB-a. Međutim, osjetljivost duktilnosti na omjer $(\rho-\rho')/\rho_{bal}$ za dvostruko armirane presjeke ili ρ/ρ_{bal} za jednostruko armirane presjeke je nešto niža kod greda od LAB-a u usporedbi s gredama od NTB-a, ali često i jednaka. Zbog toga se, zahtjev mnogih propisa o tome da se osigura duktilnost pri savijanju ograničenjem koeficijenta armiranja vlačnog područja, koji se odnosi na grede od NTB-a, a glasi $\rho \leq 0{,}75\rho_{bal}$, može primjenjivati i za grede od LAB-a.
Istraživanja su također pokazala da tlačna armatura ima utjecaj na duktilnost zbog ojačanja tlačnog područja, kao i poprečna armatura zbog efekta ovijenosti zatvorenim sponama. Ograničenje razmaka spona za grede od NTB-a koje iznosi d/4 (d-statička visina presjeka) može se također primijeniti za grede od LAB-a.
Za prognozu duktilnosti preko zakrivljenosti važan je parametar tlačna deformacija betona. Prema američkim propisima ACI 318-05, ona iznosi ε_{cu}=0,003, a prema europskim normama EN 1992-1-1 ona je 0,0035, ali za



Slika 1. Opis presjeka, dijagrami naprezanja i deformacija, unutrašnje i rezne sile

betone tlačne čvrstoće niže od 50 MPa. Za više čvrstoće ε_{cu} se reducira. Zahtjev ACI propisa za elemente od NTB-a je nešto konzervativniji, ali je za one od LAB-a prihvatljiv te se predlaže za primjenu na elemente od oba betona.
Dodatno, kada se radi o preraspodjeli momenta savijanja, prema [1, 2] predlaže se, za uvjet duktilnosti μ_{cc}=3, da bude $\rho \leq 0{,}5\rho_{bal}$ za grede od NTB-a, a za one od LAB-a da bude $\rho \leq 0{,}4\rho_{bal}$.

3. Postupak proračuna greda od lakoagregatnog betona

3.1. Općenito

Prikazani postupak proračuna je u skladu s Eurokodom 2, prilagođenim svojstvima greda od lakoagregatnog betona, te prema američkim propisima ACI-318-05, kao alternativnom mogućnošću i radi usporedbe rezultata proračuna za široku razinu čvrstoća betona. Predviđa se uporaba tablica [9] i dijagrama koji vrijede za NTB-a, s tim da se primjenjuju čvrstoće i deformacije prema tablici 11.3.1. nove norme EN 1992-1-1, kao i drugi podatci za proračun konstrukcija od LAB-a.

3.2. Grede naprezane momentom savijanja prema EN 1992-1-1

Eksperimentalna istraživanja su pokazala da u potpunosti vrijede pravila koja se primjenjuju za grede od NTB-a i za grede LAB-a, s tim da se rabe čvrstoće i deformacije prema tablici 11.3.1. iz [4].
Za dimenzioniranje presjeka primjenjuje se uvjet ravnoteže

$$M_{Ed} = M_{Rd} \tag{1}$$

gdje je proračunski moment savijanja (M_{Ed}) dan izrazom (1a), a proračunski moment nosivosti (M_{Rd}) izrazom (1b):

$$M_{Ed} = \sum_j \gamma_{gj} \cdot M_{gj} + \gamma_q \cdot M_{q1} + \sum_{i>1} \gamma_q \cdot \psi_{qi} \cdot M_{qi} + \gamma_p \cdot M_p \tag{1a}$$

$$M_{Rd} = F_c \cdot z = F_{s1} \cdot z \tag{1b}$$

Proračunska tlačna sila u betonu (slika 1.) je

$$F_c = f_{lcd}\alpha_v \cdot x \cdot b, \text{ gdje je } f_{lcd} = \alpha_{cc} \cdot f_{lck} / \gamma_C \tag{2}$$

Pračunska vlačna sila u armature je

$$F_{s1} = A_{s1} \cdot f_{yd} \tag{3}$$

Bezdimenzijski moment savijanja je

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \tag{4}$$

Iz tablica prikazanih u [9] za proračunati μ_{Ed} očitaju se deformacije ε_{c2} i ε_{s1}, koeficijent kraka unutrašnjih sila ζ te proračuna armatura po izrazu:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} \cdot \zeta \cdot d} \tag{5}$$

Presjek se smatra da je duktilan ako je zadovoljen uvjet za $(x/d)_{lim}$, odnosno uvjet jednostrukog armiranja ovisnog od razreda betona.
Ako presjek grede ne zadovoljava uvjet duktilnosti, valja proračunati dodatnu vlačnu i tlačnu armaturu:

$$A_{s1} = \frac{M_{Rd,\lim}}{z_{\lim} \cdot f_{yd}} + \frac{M_{Ed} - M_{Rd,\lim}}{(d - d_2) f_{yd}} \tag{6}$$

$$A_{s2} = \frac{M_{Ed} - M_{Rd,\lim}}{(d - d_2) f_{s2}} \tag{7}$$

gdje je $M_{Rd,lim} = \mu_{Rd,lim} \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{cd}$.

Proračun na poprečne sile greda od LAB-a ne razlikuje se od onoga za grede od NTB-a.

Prema propisima ACI-318-05, postupak proračuna greda naprezanih savijanjem od LAB-a ne razlikuje se od onoga za grede od NTB-a, pa se ovdje neće razmatrati.
Prema propisima ACI 318-05 presjek se smatra duktilnim

uvjetom za slučaj preraspodjele momenata savijanja ako zadovoljava uvjet za koeficijent armiranja $\rho \leq 0{,}5\rho_{bal}$ za grede od NTB-a i $\rho \leq 0{,}4\rho_{bal}$ za one od LAB-a, gdje je

$$\rho_{bal} = 0{,}85\,\beta_1 \cdot f_c'/f_y \,\frac{-\varepsilon_{cu} \times E_s}{-\varepsilon_{cu} \times E_s + f_y} \tag{8}$$

balansirani koeficijent armiranja dobiven iz uvjeta jednake nosivosti na tlak i vlak (tlačna armatura zanemarena).

3.3. Ograničenje progiba prema EN 1992-1-1

Za ograničenje progiba grede primjenjuje se uvjet

$$f_{tot} \leq f_g \tag{9}$$

gdje je:

$$f_{tot} = K \cdot l^2 \frac{1}{r_{tot}} \text{ - ukupni progib} \tag{10}$$

$$\frac{1}{r_{tot}} = \frac{1}{r_m} + \frac{1}{r_{cs,m}} \text{ - ukupna zakrivljenost} \tag{11}$$

f_g - granični dopušteni progib dan propisima
l - raspon grede
$K=1/k_1$ - koeficijent ovisan o statičkom sustavu (k_1 prema [4]).

Srednja zakrivljenost izazvana opterećenjem je

$$\frac{1}{r_m} = \zeta \frac{1}{r_{II}} + (1-\zeta)\frac{1}{r_I} \tag{12}$$

gdje su:

$$\zeta = 1-\beta\left(\frac{M_{cr}}{M_{Ed}}\right)^2 \text{ - faktor preraspodjele} \tag{13}$$

$$M_{cr} = \frac{f_{ct,m} \cdot b \cdot h^2}{6} \text{ -moment raspucavanja} \tag{14}$$

M_{Ed} -moment savijanja za uporabnu kombinaciju

$$\frac{1}{r_{II}} = \frac{\varepsilon_s}{d-x} \text{ - zakrivljenost za stanje naprezanja II} \tag{15}$$

$$\frac{1}{r_I} = \frac{M_{Ed}}{0{,}5E_c \cdot I_{id}} \text{ - zakrivljenost za stanje naprezanja I} \tag{16}$$

$$f_{lct,m} = \eta_1 \cdot 0{,}30 \cdot f_{ck}^{2/3} \text{ za } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \tag{17}$$

faktor redukcije $\eta_1 = 0{,}4 + 0{,}6\, w/2200$ za grede od LAB-a (w - volumenska težina agregata)

Srednja zakrivljenost zbog skupljanja je

$$\frac{1}{r_{cs,m}} = \zeta \frac{1}{r_{cs,II}} + (1-\zeta)\frac{1}{r_{cs,I}} \tag{18}$$

gdje su:

$$\frac{1}{r_{cs,I}} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot S_I}{I_I} \text{ - zakrivljenost za stanje naprezanja I} \tag{19}$$

$$\frac{1}{r_{cs,II}} = \frac{\varepsilon_{cs} \cdot \alpha_e \cdot S_{II}}{I_{II}} \text{ - zakrivljenost za stanje naprezanja II} \tag{20}$$

$\alpha_e = E_{lcm}/E_{ceff}$ - omjer modula elastičnosti
ε_{cs} - relativna deformacija od skupljanja betona

Modlul elastičnosti grede E_{lcm} prikazan je izrazom (21)

$$E_{lcm} = 22\left[(f_{ck}+8)/10\right]^{0,3} \cdot (\rho/2200)^2 \text{ (GPa)} \tag{21}$$

Prema američkim propisima ACI-318-05 predlaže se uporaba Bransonove formule za ograničenje progiba.

Uvjet za ograničenje glasi

$$f_{tot} = f_k + f_d \leq f_g \tag{22}$$

Progib pod kratkotrajnim opterećenjem

$$f_k = K\frac{M_k \cdot l^2}{I_e \cdot E_{cm} \cdot 0{,}5} \tag{23}$$

gdje je:

M_k - maksimalni moment savijanja statičkog sustava od kratkotrajnog opterećenja,
$K=1/k_1$ - koeficijent ovisan o statičkom sustavu (k_1-tablica u [8]):

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \tag{24}$$

gdje su:

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{h-x} \text{ - moment raspucavanja} \tag{25}$$

M_a - maksimalni moment u elementu za uporabno opterećenje
I_{cr} - moment tromosti na mjestu pukotine
$f_r = 0{,}62\lambda\sqrt{f_c^{©}}$ - vlačna čvrstoća pri savijanju
λ - faktor redukcije za grede od LAB-a (λ=0,85 za sve lagane betone)

$$E_c = 0{,}043\rho^{3/2} \cdot f_c^{©1/2} \text{ (MPa).} \tag{26}$$

Progib pod dugotrajnim opterećenjem

$$f_d = K_r \cdot \varphi(t,t_o) f_{kd} \tag{27}$$

gdje je:

$K_r = 1{,}0 - 0{,}6\frac{A_{s2}}{A_{s1}} \geq 0{,}4$ - uključeno puzanje i skupljnje

$K_r = 0{,}85 - 0{,}45\frac{A_{s2}}{A_{s1}} \geq 0{,}4$ - uključeno puzanje

$\varphi(t,t_o)$ - koeficijent puzanja.

Izostavljeno značenje nekih poznatih simbola detaljno je prikazano u [8].

3.4. Ograničenje raspucavanja prema EN1992-1-1

Za ograničenje raspucavanja primjenjuje se uvjet:

$$w_k \leq w_g \tag{28}$$

gdje je:
w_k - karakteristična širina pukotina
w_g - granična širina pukotina dana propisima.

Srednja deformacija određuje se po izrazu:

$$w_k = s_{r,\max}\left(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}\right) \tag{29}$$

Prema tome:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_1 \dfrac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}}\left(1+\alpha_e \rho_{p,eff}\right)}{E_s} \geq 0,6\frac{\sigma_s}{E_s} \tag{30}$$

σ_s - naprezanje u vlačnoj armature,
α_e - omjer E_s/E_{cm}
$\rho_{p,eff}=A_s/A_{c,eff}$ - omjer površine armature i sudjelujuće vlačne površine poprečnog presjeka
$A_{c,eff}$ - sudjelujuća vlačna površina presjeka
k_t - faktor ovisan o trajanju opterećenja
k_r=0,6 - za kratkotrajno opterećenje
k_r=0,4 - za dugotrajno opterećenje

Maksimalni razmak pukotina dobije se (31) u ovisnosti o razmaku šipki glavne armature, izrazi (31a) i (31b):

$$s_{r,\max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \varphi / \rho_{p,eff} \text{ ,ako je razmak šipki: } \geq 5\left(c+\frac{\varphi}{2}\right) \tag{31a}$$

$$s_{r,\max} = 1,3\left(h-x\right) \text{, ako je razmak šipki: } > 5\left(c+\frac{\varphi}{2}\right) \tag{31b}$$

Pri tome je:
ϕ -promjer šipke
c - debljina zaštitnog sloja
k_1 - koeficijent prionljivosti
k_2 - koeficijent koji uzima u obzir distribuciju deformacija k_2 = 0,5 (savijanje), k_2 = 1,0 (vlak).

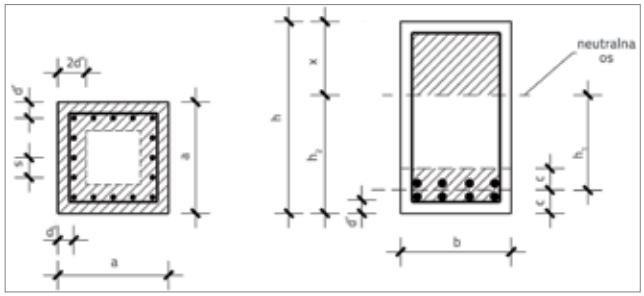
Koeficijenti k_3 i k_4 definirani su prema [4] i iznose: k_3 = 3,4; k_4 = 0,425.

Prema [2] predlaže se rabiti formula Gergely-Lutza, dobivena na osnovi velikog broja eksperimenata. Postupak je brz i za praksu dostatno točan. Namijenjen je za grede armirane rebrastim čelikom. Prema [6], može se primjenjivati za grede, od LAB-a jednako dobro kao i za one od NTB-a, što je potvrđeno eksperimentima.

Za grede naprezane savijanjem predložen je izraz

$$w_{\max} = 11,0\frac{h_2}{h_1}\sigma_s \sqrt[3]{A \cdot d'} \cdot 10^{-6} \text{ (mm)} \tag{32}$$

gdje je:
σ_s - naprezanje u armaturi na mjestu pukotine za uporabno opterećenje
A = 2d′×s - površina koja gravitira jednoj šipci (centrični vlak)
A = 2c×b/n - površina betona simetrično uzeta s obzirom na težište vlačne armature, podijeljena s brojem šipki (n) (slika 2.)



Slika 2. Primjeri određivanja sudjelujućeg područja armature

d′ - udaljenost težišta prvog reda šipki do vlačnog ruba (mm)
h_2 - udaljenost neutralne osi do vlačnog ruba
h_1 - udaljenost od neutralne osi do težišta vlačne armature.

Ako se želi načiniti usporedba između maksimalne širine pukotina prema [1, 2] i karakteristične prema EN 1992-1-1, rabi se modificirani izraz za srednju širinu pukotina:

$$w_m = 8,3\frac{h_2}{h_1}\sigma_s \sqrt[3]{A \cdot d'} \cdot 10^{-6} \tag{33}$$

Kriterij ograničenja širina pukotina, u skladu s EN-normom, sada glasi:

$$w_k = \beta \times w_m \leq w_g \tag{34}$$

gdje je:
β - faktor za dobivanje karakteristične širine pukotina (β=1,7- za uporabno opterećenje ili β=1,3-za prinudne deformacije).

4. Zaključak

Tijekom proteklih godina u svijetu, manje kod nas, primiječeno je zanimanje za građenje armiranobetonskih konstrukcija od laganih betona, prije svega primjenom lakog agregata. Razlog su tome priznate gospodarske i izvedbene prednosti toga gradiva, a to su: konstrukcije od lakoagregatnog betona su lakše od standarnih, odnosno teških betona, što je važno za građenje u seizmičkim područjima, premošćenje većih raspona i olakšana primjena predgotovljenih elemenata, odnosno premošćenje jednakih raspona ali uz smanjene izmjere elemenata. Najnovija istraživanja su pokazala da se bez većih poteškoća mogu proizvoditi betoni od lakog agregata i visokih čvrstoća, jednakih onima od normalno teškog betona. Nažalost, proizvodnju i primjenu konstrukcija od lakih betona ne prate adekvatini propisi. Najviše se primjenjuju američke

norme ACI-213R-03, manje propisi CEB-FIP Model Code i norme EN 1992-1-1. Nedavna istraživanja na nacionalnom sveučilištu u Singapuru pridonijela su boljem poznavanju ponašanja greda od lakoagregatnog betona te mogućnosti njihova proračuna, što je doprinos i autora ovoga rada.

Na osnovi ukupnih eksperimentalnih i teoretskih istraživanja provedenih u svijetu mogu se navesti neki važni zaključci u primjeni lakog betona načinjenog od drobljene ekspandirane gline:

1) Svojstva konstrukcija od lakoagregatnog betona vrlo su slična onima od normalno teškog betona, te ih se može gotovo uvijek primjenjivati tamo gdje i standarne konstrukcije.
2) Grede od LAB-a pokazuju veći progib u odnosu na one od NTB-a, približno 10 %. Za prognozu progiba može se primjenjivati isti postupak koji se standardno rabi za grede od NTB-a, samo što se umjesto efektivnog modula elastičnosti Ec primjenjuje polovica njegove vrijednosti Ec/2. Prema EN 1992-1-1, predlaže se za modul elastičnosti betona $E_{lcm} = E_{cm} \cdot \eta_E$, gdje je $\eta_E=(\rho/2200)^2$.
3) Čvrstoće betona, načinjenih uporabom agregata od drobljene ekspandirane gline uz dodadatak silicijske prašine i standardnog pijeska, mogu biti ravnopravne onima od normalno teškog betona. Ovo omogućuje primjenu proračunskih metoda koje su namijenjene za konstrukcije od NTB-a. Konkretno, grede načinjene od LAB-a, različitog sastava, mogu imati slične nosivosti gredama od NTB-a (usporedni uzorci u eksperimentalnim istraživanjima) i pokazivati, pri usporedbi, slične dijagrame opterećenje - progib.
4) Ojačanje tlačnog područja radi povećanja duktilnosti greda načinjenih od LAB-a može se postići zatvorenim sponama i tlačnom armaturom jednako učinkovito kao i kod greda od NTB-a.
5) Eksperimentalna istraživanja su pokazala da se duktilnost greda, naprezanih savijanjem, može osigurati ograničenjem glavne vlačne armature, što se primjenjuje za grede od NTB-a jednako dobro i za grede od LAB-a.

Zbog dokazanih gospodarskih i graditeljskih dobiti, preporučuje se više, osobito u seizmičkim područjima, primjenjivati lakoagregatni beton za građenje sigurnih, trajnih i uporabivih konstrukcija. Pomanjkanje odgovarajućih konstrukcijskih propisa za proračun i građenje valjalo bi što prije riješiti izradom normi osnovanih na dosadašnjim i dodatnim istraživanjima.

LITERATURA

[1] ACI Committee 213: Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI 213R-03), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2003, 38 pp.

[2] ACI Committee 318: Building Code Requirements for Structural Consrete (ACI 318-05) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005, 467 pp.

[3] BS 8110: 1: 1997, Structural Use of Concrete, Part 1-Code of Practice for Design and Construction, British Standards Institution, London, UK, 1997, 168 pp.

[4] EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-1,-General Rules and Rules for Building, CEN, Brussels, December 2004, 225 pp.

[5] CEB-FIP Model Code 1990, Design Code, 1993, 437 pp.

[6] Sin, L.H., Huan, W.T., Islam, M.R., Mansur, M.A.: Reinforced Lightweight Concrete Beams in Flexure, ACI Structural Journal, Vol. 108, No.1, January-February 2011, pp 3-12.

[7] Park, R., Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, New York, 1975.

[8] Tomičić, I.: Betonske konstrukcije, DHGK, Zagreb 1996.

[9] Kišiček, T., Sorić, Z., Galić, J.: Tablice za dimenzioniranje armiranobetonskih presjeka, GRAĐEVINAR 62 (2010) 11 str. 1001-1010