



PRORAČUN ARMIRANOBETONSKOG ZIDA PREMA EC-8

Doc. dr. sc. **Mladen Kožul**, dipl. ing. građ.

Kristina Hajduk, mag. građ.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

Sažetak AB zidovi vrlo često se koriste za osiguranje bočne krutosti i čvrstoće višekatnih zgrada u zonama srednje i visoke seizmičnosti. Takvi zidovi doživljavaju plastične deformacije pri računskom potresnom opterećenju, te se najčešće dimenzioniraju prema kapacitetu nosivosti. Ključni element proračuna prema kapacitetu nosivosti je procjena računskih posmičnih sila. Ta procjena mora uzeti u obzir sve uzroke koji mogu dovesti do povećanja posmičnih sila (a time i momenata savijanja) u odnosu na one dobivene metodom ekvivalentnog statičkog opterećenja. Metoda ekvivalentnog statičkog opterećenja je standardna metoda većine nacionalnih propisa za regularne i simetrične konstrukcije niže katnosti (do 10 etaža).

Ključne riječi: armirani beton, kapacitet nosivosti, potresna otpornost

CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE WALL ACCORDING TO EC 8

Abstract: RC walls are very often used to provide lateral stiffness and strength of multi-story buildings in zones of medium and high seismicity. Such walls undergo plastic deformations under computational earthquake loads, and are usually sized in relation to bearing capacity. The key element of the calculation in terms of bearing capacity is to assess computational shear forces. That assessment must make allowances for all causes that may lead to increase in shear forces (and thereby bending moments) in relation to those obtained by the method of equivalent static load. The method of equivalent static load is the standard method of most national rules for regular and symmetrical structures of lower number of stories (up to 10 stories).

Key words: reinforced concrete, bearing capacity, seismic resistance



1. UVOD

1.1. Proračun unutarnjih sila

Kod klase duktilnosti DC M i DC H potrebno je uzeti u obzir nesigurnosti pri proračunu poslije elastičnih dinamičkih učinaka (koristeći pojednostavljene metode).

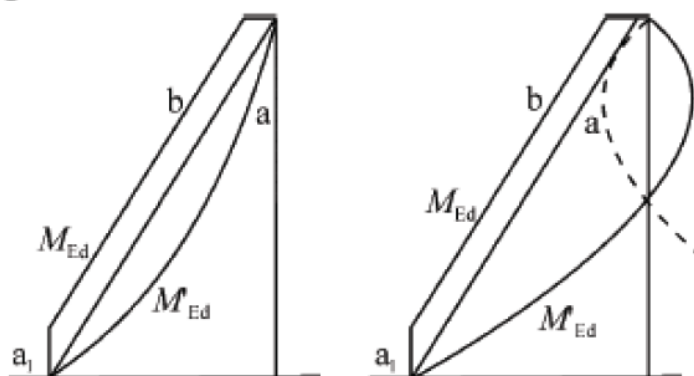
Ako nije dostupna točnija metoda dopušteno je upotrijebiti iduća pravila:

- Dopuštena preraspodjela unutarnjih sila zbog potresnog djelovanja između primarnih potresnih zidova do 30 %,
- Poprečne sile preraspodijeliti tako da to znatno ne utječe na omjer momenata i poprečnih sila,
- Kod zidova izloženih velikim promjenama uzdužne sile, momente i poprečne sile preraspodijeliti na zidove s malim tlačnim opterećenjem ili vlačnim naprezanjima,
- Kod povezanih zidova dopuštena preraspodjela unutarnjih sila između veznih greda različitih katova do 20 %.

2. DIMENZIONIRANJE NA MOMENT SAVIJANJA I POPREČNU SILU

2.1. Pojednostavljeni postupak

- Za momente savijanja:
- Proračunski dijagram momenata savijanja (b) je ovojnica proračunskog dijagrama momenata vertikalno pomaknutog za razmak jednak a_1 (vlačni pomak);
- Ovojnica se može uzeti linearno ako u konstrukciji nema važnih diskontinuiteta mase, krutosti ili otpornosti po visini.



Key

- a** moment diagram from analysis
- b** design envelope
- a_1** tension shift

Slika 1. Proračunska ovojnica momenata (lijevo: zidni sustavi; desno: dvojni sustavi)



- Za poprečne sile:

Kod klase duktilnosti DC M i DC H potrebno je uzeti u obzir moguće povećanje poprečnih sila nakon popuštanja u podnožju primarnog potresnog zida.

Proračunske potresne sile V_{ed} treba izvesti u skladu s izrazom: $V_{ed} = \varepsilon V'_{ed}$

gdje su: V'_{ed} - poprečna sila dobivena proračunom

ε - faktor povećanja ($\varepsilon > 1.5$)

$$\varepsilon = q \sqrt{\left(\frac{\gamma_{Ed} \times M_{Ed}}{q M_{Ed}}\right)^2 + 0,1 \left(\frac{S_e(T_c)}{S_e(T_1)}\right)^2} \leq q$$

gdje je:

Q – faktor ponašanja uzet u proračunu

M_{Ed} – proračunski moment savijanja

M_{Rd} – proračunska otpornost na savijanje u podnožju zida

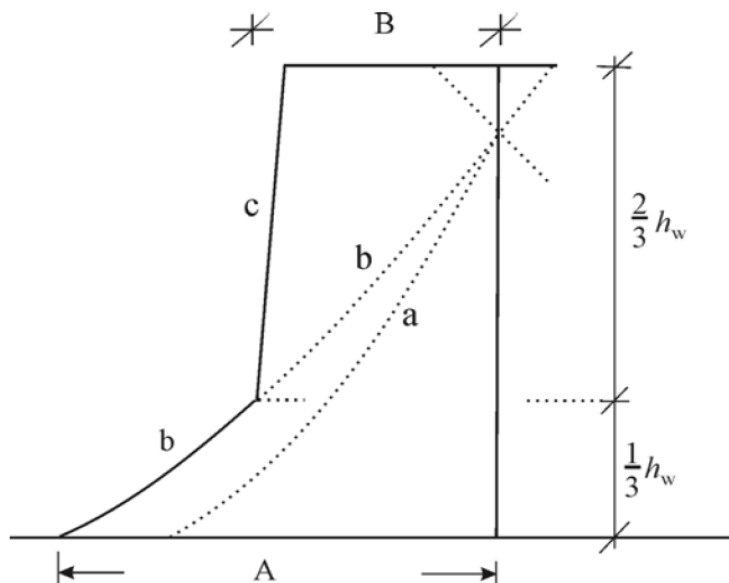
γ_{Rd} – faktor kojim se u obzir uzima povećanje čvrstoća zbog ojačanja čelika (ako nema točnijih podataka može se uzeti $\gamma_{Rd} = 1.2$)

T_1 – osnovni period u smjeru djelovanja poprečnih sila

T_c – gornja vrijednost perioda u području stalnog spektralnog ubrzanja spektra

$S_e(T)$ – ordinata elastičnog spektra odziva

U dvojn timer sustavima koji sadrže vitke zidove treba uzeti u obzir proračunsku ovojnica poprečnih sila u skladu sa slikom.



Slika 2. Proračunska ovojnica poprečnih sila za vitke zidove dvojn timer sustava

gdje su:

a – dijagram poprečnih sila zida dobiven proračunom

b – povećani dijagram poprečnih sila zida

c – proračunska ovojnica

A – $V_{wall,base}$, veličina poprečne sile pri podnožju zida

B – $V_{wall,top} \geq V_{wall,base}/2$, veličina poprečne sile na vrhu zida



2.2. Otpornost na savijanje i posmik

Vrijednost normaliziranog osnovnog opterećenja, v_d , u primarnim potresnim zidovima ne treba premašiti 0,4.

U proračunu otpornosti na savijanje presjeka zida u obzir se uzima vertikalna armatura hrpta.

Složene presjeka zidova koji se sastoje od spojenih ili pravokutnih dijelova koji se međusobno sijeku (presjeci oblika L, T, U, I ili sličnih) treba uzeti kao cjelovite elemente koji se sastoje od hrpta ili hrptova koji su paralelni ili približno paralelni sa smjerom djelujuće potresne poprečne sile i od pojasnice ili pojasnica koje su okomite ili približno okomite na njih.

U proračunu otpornosti na savijanje, treba uzeti da se širina pojasnice sa svake strane hrpta proteže od lica hrpta za najmanje:

- a) stvarnu širinu pojasnice
- b) polovinu razmaka do susjednog hrpta zida
- c) 25 % ukupne visine zida iznad promatrane razine.

- Proračun na poprečne sile sastoji se od provjere:
 - dijagonalnog tlačnog,
 - dijagonalnog vlačnog sloma hrpta

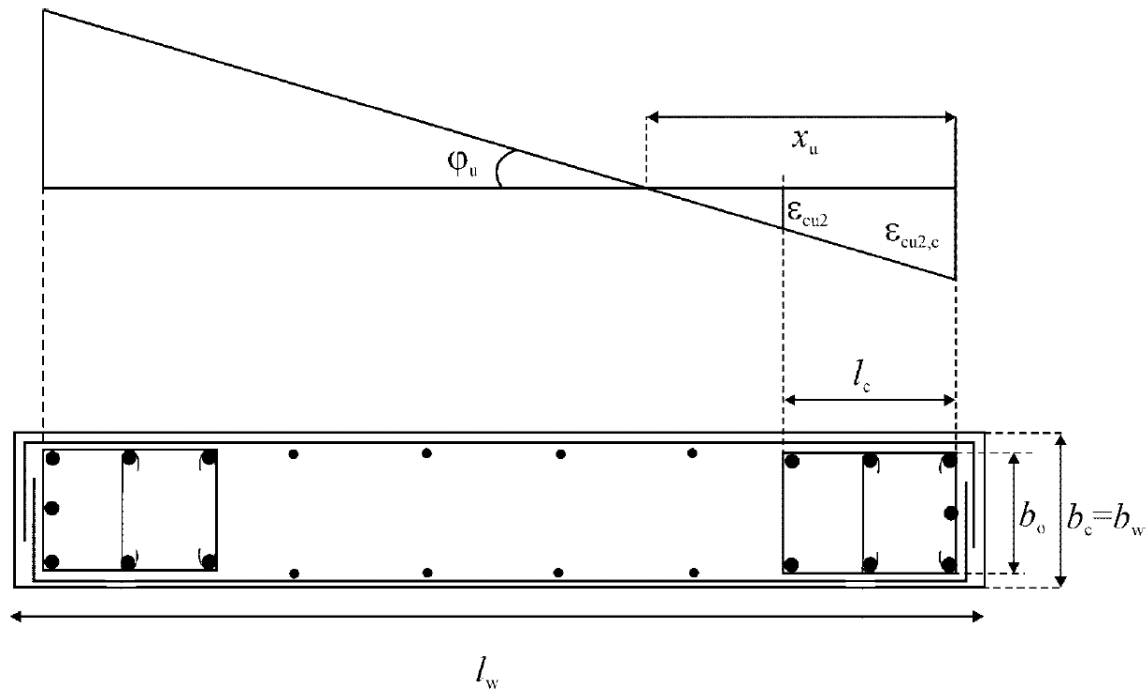
Kod provjere dijagonalnog tlačnog sloma hrpta mora biti zadovoljen uvjet

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

V_{Ed} – proračunska poprečna sila

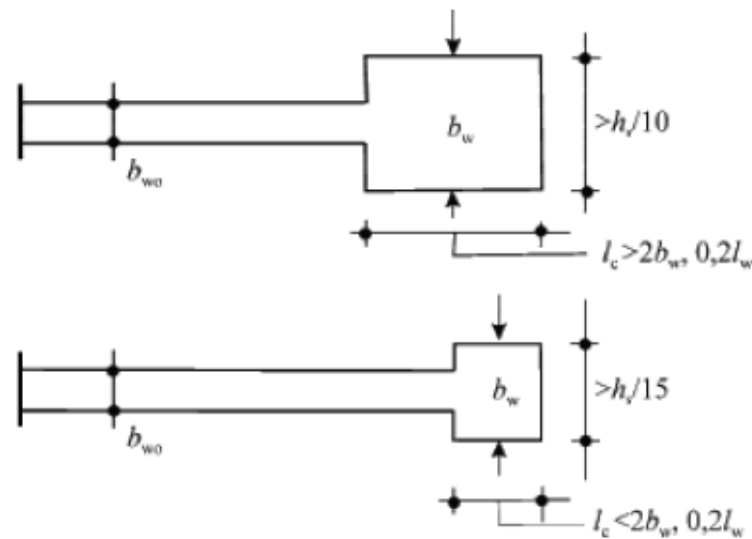
$V_{Rd,max}$ – najveća proračunska poprečna sila koju može preuzeti zid bez otkazivanja tlačnih štapova (dijagonala)

Ovijanje se treba vertikalno protezati na visini h_{cr} kritičnoga područja, a horizontalno uzduž duljine l_c mjerene od rubnoga tlačnog vlakna zida do točke gdje se neovijeni beton može odlomiti zbog velikih tlačnih deformacija. Ako nisu dostupni točniji podaci, tlačna deformacija pri kojoj se očekuje odlamanje smije se uzeti jednakom $\epsilon_{cu2} = 0,0035$. Ovijeni rubni element smije se ograničiti na razmak $x_u(1 - \epsilon_{cu}/\epsilon_{cu2,c})$ od središta spona u blizini rubnog tlačnog vlakna do visine ovijenog tlačnog područja x_u pri najvećoj procijenjenoj zakrivljenosti iz ravnoteže za konstantnu širinu b_0 ovijenog tlačnog područja i za najveću deformaciju $\epsilon_{cu2,c}$ ovijenog betona procijenjenu na temelju točke 3.1.9 norme EN 1992-1-1:2004 na ϵ_{cu2} , $c = 0,0035 + 0,1 a\omega w d$. Najmanja vrijednost l_c ovijenog rubnog elementa ne treba biti manja od $0,15W$ ili $1,50 bw$.



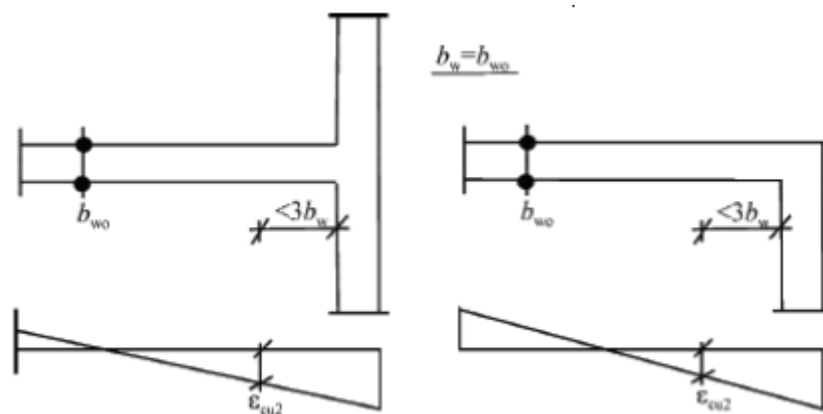
Slika 3. Ovijeni rubni element zida sa slobodnim rubom (gore: deformacije pri najvećoj zakrivljenosti; dolje: presjek zida)

- Ne zahtijeva se ovijeni rubni element u pojasnicama zida ako je debljina $bf \geq hs / 15$, a širina $f \geq hs / 5$, gdje je hs svijetla visina kata (slika 5.9). Međutim, na krajevima takvih pojasnica zbog savijanja zida izvan ravnine smiju se zahtijevati ovijeni rubni elementi.
- Omjer uzdužne armature u rubnim elementima ne treba biti manji od 0,005.
- Debljina b_w ovijenoga dijela presjeka zida (rubni elementi) ne treba biti manja od 200 mm. Međutim, ako duljina ovijenoga dijela ne premašuje $2b_w$ i $0,2l_w$, tada b_w ne treba biti manje od $hs / 15$, gdje je hs katna visina.
Ako duljina ovijenoga dijela premašuje najviše $2 b_w$ i $0,2 l_w$, tada b_w ne treba biti manje od $hs/10$.



Slika 4. Minimalna debljina rubnih dijelova zida

- Treba upotrijebiti spone s preklapima tako da je svaka uzdužna šipka povezana sa sponom ili poprečnom sponom.
- Ako je zid spojen s pojasnicom debljine $b_f \geq h_s / 15$ širine $f \geq h_s / 5$ (h_s je svijetla visina kata) i ako je potrebno da se ovijeni rubni element proširi iz pojasnice u hrbat za dodatnu duljinu do $3b_{w0}$, tada debljina b_w rubnog elementa u hrptu treba biti u skladu s odredbama za b_{w0}



Slika 5. Deformacija slobodnog ruba zida i zida s pojasnicom

- Iznad kritičnoga područja rubni se elementi trebaju osigurati još u jednom katu više s najmanje polovinom ovijene armature koja se zahtijeva u kritičnom području.
- Mora se spriječiti prerano raspucavanje hrpta zbog poprečne sile postavljanjem najmanje količine armature u hrptu $\rho_{h,min} = \rho_{v,min} = 0,002$.



- Armatura hrpta treba imati promjer ne manji od 8 mm ali ne veći od osmine širine hrpta b_{w0} . Ona treba biti postavljena na razmacima ne većim od 250 mm ili 25 puta promjer šipke, a mjerodavna je manja vrijednost.
- Da bi se uravnotežili nepovoljni učinci raspucavanja uzduž hladnog spoja i pridružene nesigurnosti, kroz takve spojeve treba postaviti najmanju količinu potpuno usidrene vertikalne armature. Najmanji omjer te armature, r_{min} , nužan za ponovnu uspostavu otpornosti ne raspucaloga betona na posmik, iznosi:

$$\rho_{min} \geq \begin{cases} \left(13 f_{ctd} - \frac{N_{Ed}}{A_w} \right) / \left(f_{yd} (1 + 1,5 \sqrt{f_{ctd} / f_{yd}}) \right) \\ 0,0025 \end{cases}$$

gdje je A_w ukupna ploština horizontalnog presjeka zida, a N_{Ed} ima pozitivan predznak za tlačno naprezanje.

$q = 3,75$ – faktor ponašanja

Visina kritičnog područja

$$h_{cr} = \max \left\{ \frac{l_w = 515 \text{ cm}}{6} = \frac{1317}{6} = 219,5 \text{ cm} \right\} \rightarrow h_{cr,max} = 515 \text{ cm}$$

l_w - duljina zida

h_w – ukupna visina zida

$$h_{cr} \leq \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot l_w = 2 \cdot 515 = 1030 \text{ cm} \\ (h_s \rightarrow n \leq 6 \text{ katova} \rightarrow h_s = 308 \text{ cm}) \\ 2 \cdot h_s \rightarrow n > 7 \text{ katova} \end{array} \right\} \rightarrow h_{cr} = 308 \text{ cm}$$

Izračun ovojnice momenata savijanja

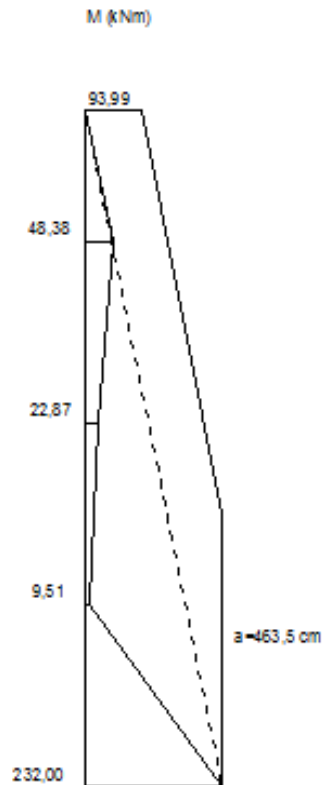
$$\text{Debljina hrpta: } d_{w0} \geq \max \left\{ \frac{h_s}{20} = \frac{308}{20} = 0,154 \right\} \rightarrow d_{w0} = 154 \text{ mm}$$

a -momentni dijagram prema proračunu

b-proračunska ovojnica

a_1 – "vlačni pomak"

$$a_1 = d \cdot \cot \theta = 0,9 \cdot l_w \cdot \cot \theta = 0,9 \cdot 515 \cdot \cot 45^\circ = 463,5 \text{ cm}$$



Slika 6. Proračunska ovojnica dijagrama momenata savijanja

Proračun potrebne uzdužne armature za karakterističan zid

Računska djelovanja na zid:

$$M_{Ed} = 232 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -1272,96 \text{ kN}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1,5} = 16,67 \text{ MPa} = 1,667 \text{ kN/cm}^2$$

$$v_{sd} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-1272,96 \cdot 10^3}{200 \cdot 5150 \cdot 16,67} = -0,074$$

$$\mu_{sd} = \frac{M_{sd}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{232 \cdot 100}{20 \cdot 5150^2 \cdot 1,667} = 0,00262$$

-potrebna površina armature u rubnom dijelu (rubni serklaž) zida:

$$\omega = 0,05$$

$$A_{s1} = A_{s2} = \omega \cdot b \cdot h \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = 0,05 \cdot 20 \cdot 515 \cdot \frac{1,667}{43,48} = 19,74 \text{ cm}^2$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$



Usvojeno: $8\phi 18$ ($A_s = 20,35 \text{ cm}^2$)

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{20,35 \cdot 43,48}{20 \cdot 515 \cdot 1,667} = 0,0515$$

$$v_{sd} = -0,074$$

$$\rightarrow \mu_{sd} = 0,089$$

$$M_{Bd} = \mu_{sd} \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} = 0,089 \cdot 20 \cdot 515^2 \cdot \frac{1,667}{100} = 7869,91 \text{ kNm}$$

Potrebna vertikalna armatura

-Minimalni postotak armiranja:

$$\mu_{sd} = \frac{M_{sd}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{232 \cdot 100}{20 \cdot (0,9 \cdot 515)^2 \cdot 1,667} = 0,00324 \rightarrow \varepsilon_c = 0,3\text{‰} = 0,03\% < 0,2\%$$

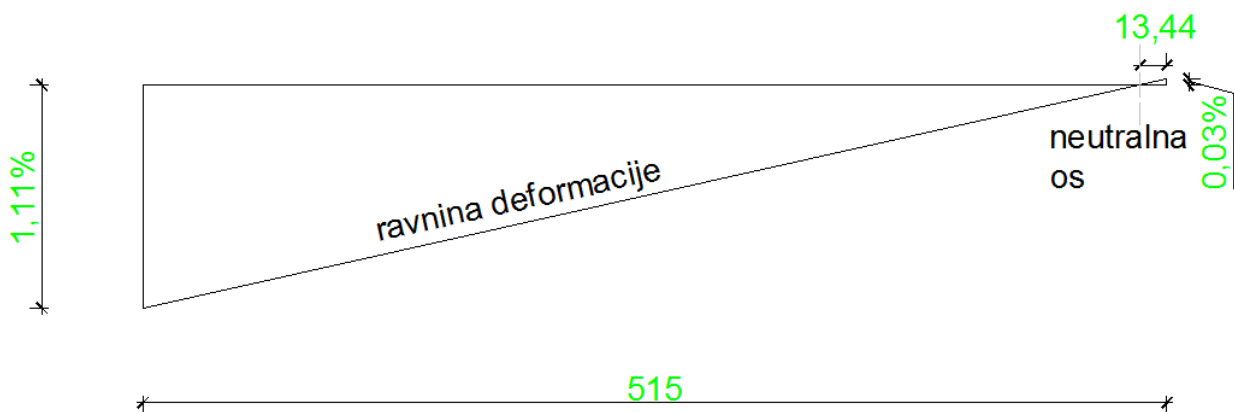
$$\xi = 0,029$$

Položaj neutralne osi:

$$x = \xi \cdot d = 0,029 \cdot (0,9 \cdot 515) = 13,44 \text{ cm}$$

$$A_{s,umtka} = 0,002 \cdot A_c = 0,002 \cdot 20 \cdot 100 = 4 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

Usvojeno: Q-257 ($A_{s,usvojeno} = 2,57 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$) –obostrano



Slika 7. Deformacije zida



3. KRITIČNO PODRUČJE

$$1.) \text{ Duljina } l_c \text{ od kraja } \geq \begin{cases} 0,15 \cdot l_w = 0,15 \cdot 515 = 77,25 \text{ cm} \\ 1,5 \cdot b_w = 1,5 \cdot 20 = 30 \text{ cm} \end{cases} \rightarrow l_c = 30 \text{ cm}$$

$$2.) \text{ Debljina } b_w \text{ za } l_c \geq \begin{cases} 0,2 \text{ m} \\ l_c \leq \max \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot b_{st} = 2 \cdot 20 = 40 \text{ cm} \\ \frac{l_w}{3} = \frac{515}{3} = 103 \text{ cm} \end{array} \right\} \\ \frac{h_g}{15} = \frac{308}{15} = 20,53 \text{ cm} \end{cases} \rightarrow b_w = 0,2 \text{ m}$$

$$3.) \text{ Vertikalna armatura : } \rho_{min} = 0,5\% \rho_{max} = 4\%$$

$$4.) \text{ Ovijena armatura } \leq \left\{ s_w \leq \begin{cases} d_{bw} = 8 \text{ mm} \\ 8 \cdot d_{bl} = 8 \cdot 18 = 144 \text{ mm} \\ b_0/2 = (200 - 2 \cdot 34)/2 = 66 \text{ mm} \\ 175 \text{ mm} \\ \omega_{wd} \geq 0,08 \rightarrow \text{DCM} \end{cases} \right\} \rightarrow s_w = 10 \text{ cm}$$

Provjera graničnih stanja nosivosti

Dijagonalni tlačni slom hrpta zbog posmika

a) U kritičnom području

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$$

$$\alpha_{cw} = 1 - \text{ za konstrukcije koje nisu prednapregnute}$$

Za DCM- kao u EC2 s $z = 0,8l_w$ i nagibom tlačnih štapova prema vertikali $\tan \theta = 1$

$$v_1 = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{25}{250}\right) = 0,54$$

$$V_{Rd,max} = \frac{1,0 \cdot 20 \cdot (0,8 \cdot 515) \cdot 0,54 \cdot 1,667}{1 + 1} = 3708,74 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} > V_{Ed} = 33,33 \text{ kN}$$

b) Van kritičnog područja – kao u EC2 za DCM $V_{Rd,max} > V_{Ed}$



3.1. Horizontalna armatura

ρ_h iz izraza: $V_{Ed,s} = b_{w0} \cdot (0,8 \cdot l_w) \cdot \rho_h \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta$; $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$ DCM

Horizontalne šipke moraju zadovoljiti sljedeći kriterij:

$$V_{Ed} \leq b_{w0} \cdot (0,8 \cdot l_w) \cdot \rho_h \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta$$

$$\rho_h \geq \frac{V_{Ed}}{b_{w0} \cdot (0,8 \cdot l_w) \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta} = \frac{33,33}{0,8 \cdot 515 \cdot 43,48 \cdot 20 \cdot 1} = 0,000093 = 0,0093\%$$

$$\rho_{hmin} = \max \left\{ 0,25 \cdot \rho_v = 0,25 \cdot 0,0205 = 0,005125 \right\} \rightarrow \rho_{hmin} = 0,1\%$$

$$\rho_h = \frac{A_h}{b_{w0} \cdot s_h} \rightarrow A_h = \rho_h \cdot b_{w0} \cdot s_h = 0,000093 \cdot 20 \cdot 100 = 0,18 \text{ cm}^2$$

$$\frac{A_h}{2} = 0,14 \text{ cm}^2$$

Usvojeno iz uvjeta minimalne armature: Q-257 ($A_{s,usvojeno} = 2,57 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$) –obostrano

Izračun obvojne armature za karakterističan zid:

Odabrana armatura Q – 257 i 3φ18

Promjer vilica: $d_{sv} = 8 \text{ mm}$ (φ8) na razmaku 10 cm

Prvi period konstrukcije $T_1 = 0,161 < T_c = 0,4 \text{ s}$

Faktor duktilnosti izražen zakrivljenošću μ_φ mora biti barem:

$$\mu_\varphi = 1 + 2 \cdot (q_v - 1) \cdot \frac{T_c}{T_1} \quad \text{za } T_1 < T_c$$

$$\mu_\varphi = 1 + 2 \cdot (3,75 - 1) \cdot \frac{0,4}{0,161} = 14,66$$

Kontrola tlačnih naprezanja:

$$v_d = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{1272,96}{20 \cdot 515 \cdot 1,667} = 0,074 < 0,40 - \text{normalizirana tlačna sila}$$

$$\omega_v = \frac{\rho_v \cdot f_{yrd}}{f_{cd}} = \frac{2 \cdot 2,57 \cdot 43,48}{20 \cdot 100 \cdot 1,667} = 0,067$$

$$\mu_\varphi = 14,66$$

Deformacija armature:

$$\varepsilon_{syrd} = \frac{434,8}{200000} = 0,00217$$

$b_c = 20 \text{ cm}$ – širina zida

$$b_0 = 200 - 2 \cdot 34 = 132 \text{ mm} = 13,2 \text{ cm}$$



Proračun armiranobetonskog zida prema EC-8

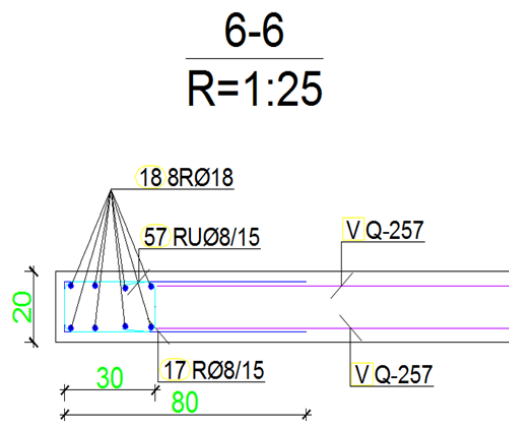
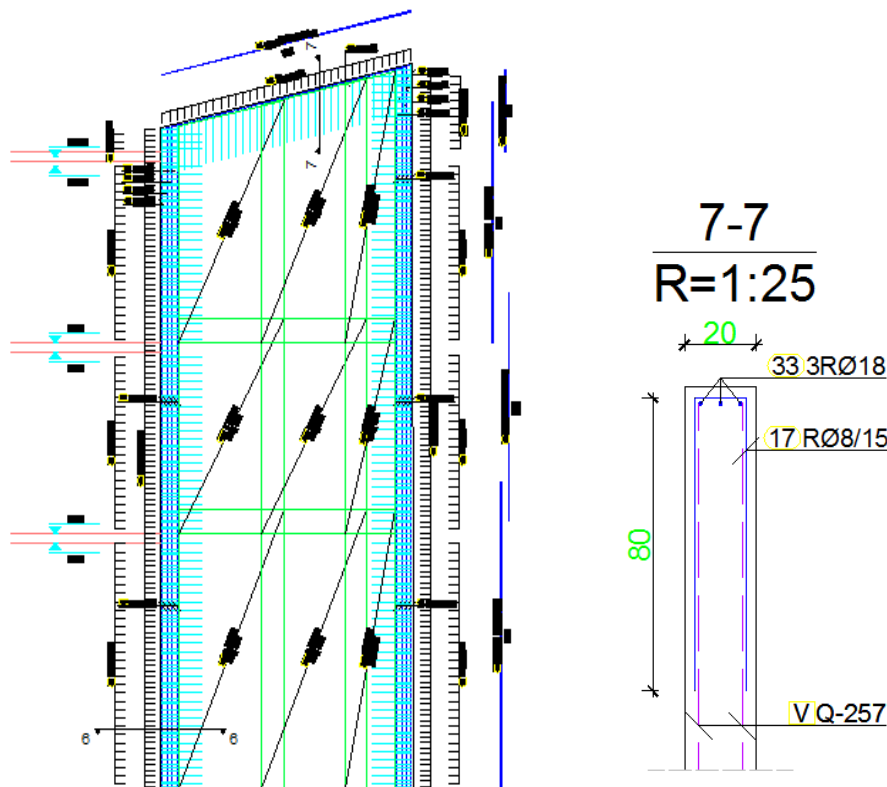
$$\omega_{\text{vrd}} = \frac{\text{volumen vitica}}{\text{volumen betonske jezgre}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{0,5 \cdot (2 \cdot 30 + 2 \cdot 14) \cdot \frac{100}{10}}{13,2 \cdot 30 \cdot 100} \cdot \frac{43,48}{1,667} = 0,28$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{\sum b_i^2}{6 \cdot b_0 \cdot h_0} = 1 - \frac{2 \cdot 11,4^2 + 2 \cdot (3 \cdot 10)^2}{6 \cdot 13,2 \cdot 30} = 0,13$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2 \cdot b_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{s}{2 \cdot h_0}\right) = \left(1 - \frac{10}{2 \cdot 13,2}\right) \cdot \left(1 - \frac{10}{2 \cdot 30}\right) = 0,516$$

$$\alpha = 0,13 \cdot 0,516 = 0,067$$



Slika 8. Nacrt armature armiranobetonskog zida



4. ZAKLJUČAK

Faktor povećanja posmičnih sila mora uzeti u obzir sljedeće učinke koji utječu na neelastičan odgovor konstrukcije:

- Povećana važnost viših oblika osciliranja (modova, tonova) u odgovoru konstrukcije tijekom njezinog neelastičnog deformiranja u kritičnim zonama. Neelastične deformacije najviše utječu na prvi oblik, te stoga dolazi do redukcije krutosti, produljenja prvog perioda konstrukcije i smanjenja spektralnog ubrzanja, a time i seizmičkih sila, odnosno ukupne posmične sile u razini temelja konstrukcije. Nadalje, posmične sile koje su aktivirane prvim oblikom osciliranja smanjuju se zbog disipirane (potrošene) energije u tom obliku osciliranja.
- Traženo prekoračenje čvrstoće na savijanje (rezerva čvrstoće) vodi približno linearnom povećanju zahtjeva po posmičnim silama u razini temelja konstrukcije.

Za osiguranje ovih zahtjeva nužna je nelinearna analiza u vremenskom području (*time-history*). Zbog njezine proračunske kompleksnosti i neprikladnosti za praktične inženjerske dinamičke proračune konstrukcija EC8 uvodi ovaj amplifikacijski faktor.

LITERATURA

1. Bakos, K. – Gamba, P. – Burai, P. (2011): Rapid estimation of point source chemical pollutant coverage in catastrophe situation using hierarchical binary decision tree ensemble end probability membership value based ensemble approaches. 3rd IEEE GRSS Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing-WHISPERS 2011, Lisboa, Portugal, 2011. In press.
2. EUROCODE 1: Opterećenja na konstrukcije
3. EUROCODE 2: Dimenzioniranje betonskih konstrukcija
4. EUROCODE 8: Projektiranje seizmički otpornih konstrukcija