



STABILNOST ARMIRANO BETONSKIH ZIDOVA PRI SEIZMIČKOM OPTEREĆENJU

*Pregledni rad/Review paper
Primljen/Received: 25. 10. 2018.
Prihvaćen/Accepted: 16. 11. 2018.*

Mladen Kožul

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, izv. prof. dr. sc.

Ante Džolan

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, magistar građevinarstva

Sažetak: Oštećenja armirano betonskih zidova, uočena nakon potresa u Chileu (2010) i Novom Zelandu (2011), pokazuju da zidovi nisu postigli očekivano duktilno ponašanje, te mogu otkazati zbog lokalne i globalne nestabilnosti. Stoga se danas, u tom pravcu, vrše opsežna eksperimentalna i numerička istraživanja kako bi se definirao mehanizam otkazivanja armirano betonskih zidova, posebice u odnosu na njihovo moguće izvijanje. U ovom radu je opisan jedan postojeći mehanizam bočnog izvijanja zidova. Kako na bočno izvijanje armirano betonskih zidova utječe veliki broj parametara, nužno je nastaviti s istraživanjima ovog složenog fenomena.

Ključne riječi: armirano betonski zidovi, duktilnost, bočno izvijanje.

STABILITY OF REINFORCED CONCRETE WALLS UNDER SEISMIC LOAD

Abstract: The damage to reinforced concrete walls, observed after the earthquakes in Chile (2010) and New Zealand (2011), shows that the walls did not achieve the expected ductile behavior and could fail due to local and global instability. Therefore, extensive experimental and numerical research is presently conducted in this direction in order to define the failure mechanism of reinforced concrete walls, especially in relation to their possible buckling. This paper describes one existing mechanism of lateral buckling of walls. Since lateral buckling of reinforced concrete walls is affected by a large number of parameters, it is necessary to continue with the research of this complex phenomenon.

Key words: reinforced concrete walls, ductility, lateral buckling.



1. Uvod

Primjena armirano betonskih zidova u visokogradnji praktički je neizbježna zbog njihove učinkovitosti i ekonomičnosti. Kao nosivi element, vrlo se često koriste u kombinaciji s armirano betonskim okvirima i zidanim zidovima, te prednapetim betonskim elementima. Primjenom modernih numeričkih metoda analize konstrukcija moguće je dobiti približan odziv takvih mješovitih nosivih sustava na seizmičko djelovanje. Armirano betonski zidovi koriste se za preuzimanje gravitacijskih opterećenja, ali je njihova uloga značajnija u preuzimanju bočnih opterećenja kao što je seizmičko, ili opterećenje vjetrom. Zbog velike krutosti takvih zidova u njihovoj ravnini postali su praktički nezamjenjivi u konstrukcijama objekata visokogradnje. Oni također imaju nezaobilaznu ulogu u sanaciji i ojačanju postojećih objekata, koji ne zadovoljavaju moderne seizmičke propise.

Armirano betonski zidovi, zbog svoje krutosti, preuzimaju daleko veće posmične sile nego stupovi okvirne konstrukcije. Zbog toga je njihova duktilnost manja od duktilnosti okvirnih konstrukcija, ponajprije zbog mogućnosti posmičnog sloma, koji se smatra krtim. Usprkos čestoj primjeni ovih zidova pri projektiranju zgrada, o njima se premalo govori u našoj stručnoj literaturi. Analiza zidova uglavnom se svodi na njihovo ponašanje u ravnini, dok se ponašanje izvan ravnine zanemaruje zbog male krutosti zida u bočnom pravcu. Međutim, uočeno je u dosta slučajeva da dolazi do deformacija izvan ravnine zida, što može dovesti do gubitka njihove stabilnosti.

Armirano betonski zidovi uglavnom se dijele na niske i vitke zidove, te povezane i nepovezane. Pod niskim zidovima obično se podrazumijevaju zidovi čiji je odnos ukupne visine h_w i dužine l_w manji od dva. Oni su obično slabo armirani i podvrgnuti posmičnom deformiranju. U vitke zidove spadaju zidovi kod kojih je taj odnos veći od dva. U većini nacionalnih propisa definirana je minimalna debljina zidova u iznosu $d_{\min} = 15\text{cm}$. Isto tako, u pojedinim nacionalnim propisima, definiran je minimalni odnos između svijetle visine zida i njegove debljine zbog ograničenja vitkosti. Vitki zidovi karakterizirani su histereznim ponašanjem i lomom uslijed savijanja.

U područjima visoke seizmičnosti nije uobičajeno dimenzionirati zidove kako bi ostali u elastičnom području tijekom očekivanog potresa. Dopuštanjem pojave neelastičnih deformacija reduciraju se seizmičke sile koje zid mora preuzeti. Kako bi se osiguralo stabilno neelastično ponašanje potrebno je osigurati dovoljnu duktilnost zida u kritičnom području. Eksperimenti su pokazali da u slučaju pravilnog armiranja kritične zone vitki zidovi postižu stabilno histerežno ponašanje i značajnu duktilnost. U mnogim zemljama koriste se zidovi pravokutnog poprečnog presjeka, ili povezani zidovi takvog presjeka, bez ojačanja rubnih dijelova. Na primjer, u Čileu i drugim zemljama koriste se zidovi debljine 15-20cm, bez rubnih ojačanja. Takvi zidovi su osjetljivi na izvijanje. Primjer ovakvog ponašanja vidljiv je u Čileu nakon potresa iz 2010 godine (Slika 1.), magnitude $M=8.8$, te na Novom Zelandu nakon potresa iz 2011 godine (Slika 2.), magnitude 6.3. Ovdje je posebice izraženo oštećenje zidova L i T oblika zbog toga što tlačna deformacija betona dosegne graničnu vrijednost prije popuštanja armature u vlaku.

Vjeruje se da tendencija izvijanja zidova puno ovisi o odnosu svijetle katne visine h_e zida i njegove debljine b_w , povijesti opterećenja, te veličini tlačne sile. Postoje dvije hipoteze o načinu otkazivanja, odnosno gubitka stabilnosti. Jedna od njih pretpostavlja da vlačno popuštanje, za opterećenje u jednom smjeru, omekšava



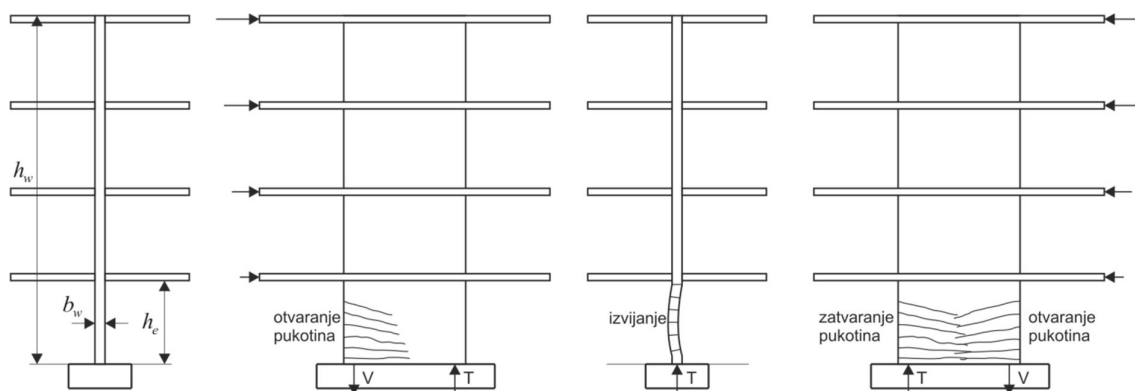
rubno područje u slijedećoj promjeni smjera opterećenja, što dovodi do bočne nestabilnosti rubnog područja zida. Druga hipoteza pretpostavlja da se najprije javlja drobljenje betona u rubnom području zida, što dovodi do smanjenja njegovog presjeka. U ovom slučaju zid postaje trenutno nestabilan, ili će idući ciklusi tlačnog i vlačnog naprezanja dovesti do nestabilnosti reduciranog presjeka rubnog dijela zida, prema prvoj hipotezi. Ipak se najvjerojatnijom čini situacija kada se bočno izvijanje zida javlja nakon što je došlo do drobljenja rubnog područja zida. Iako se bočno izvijanje javlja kada je rubno područje zida u tlaku, izvijanje može biti jako uvjetovano veličinom vlačne deformacije u prethodnom ciklusu opterećenja [2]. Ovo se javlja zbog toga što rezidualne vlačne deformacije u rubnoj armaturi, koja je prethodno popustila, stvaraju pukotine u betonu rubnog područja, što dovodi do smanjenja bočne krutosti zida. Rezidualna čvrstoća zida mora osigurati preuzimanje gravitacijskog opterećenja s deformiranom plohom zida.



Slika 1. Oštećenje zida-potres u Chileu



Slika 2. Oštećenje zida-potres u Novom Zelandu



Slika 3. Bočna nestabilnost zida [1]

2. Mehanizam bočnog izvijanja zidova

Paulay i Goodsir [7, 8] prvi su opisali razvoj mehanizma bočnog izvijanja armirano betonskih vitkih zidova. Taj mehanizam opisan je u nastavku teksta. Pri velikim rotacijama u ravnini zida rubno područje trpi velike vlačne deformacije, koje izazivaju približno vodoravne pukotine. To dovodi do vlačnog popuštanja rubne uzdužne armature. Nakon promjene smjera opterećenja dolazi do povrata elastičnog dijela ukupne deformacije armature, pa stoga pukotine ostaju dijelom otvorene jer u armaturi ostaju rezidualne plastične deformacije. Tijekom ovog tlačnog dijela ciklusa opterećenja rubnog područja zida tlačna naprezanja preuzima samo armatura. U ovom trenutku dolazi do pojave bočnih pomaka zida, jer vrlo mala nepreciznost pri ugradnji armature dovodi do ekscentriciteta. Sve dok armatura ima dovoljnu uzdužnu krutost bočni pomaci ostaju mali. Pri povećanju tlačnog naprezanja armatura jedne strane zida počinje popuštati zbog ekscentriciteta, što za posljedicu ima nejednoliku raspodjelu naprezanja na oba sloja vertikalne armature zida. Armatura na drugoj plohi zida nije popustila i ona je jedini izvor trenutne bočne krutosti. Ovisno o veličini prethodno postignute vlačne deformacije armature (prije promjene smjera opterećenja) mogu se javiti različite mogućnosti s povećanjem tlačnih naprezanja. Pukotine se mogu u potpunosti zatvoriti, te uspostaviti prijenos tlačnog naprezanja preko betona i armature, ili one mogu ostati otvorene, što dovodi do tlačnog popuštanja armature uz jedno lice zida. U ovom drugom slučaju bočni se pomaci brzo povećavaju, što dovodi do sloma izvijanjem. Neovisno o scenariju koji će se pojaviti, bočni pomaci i momenti drugog reda utjecat će na ponašanje zida u ravnini, što treba uzeti u obzir [2].

3. Izvijanje prizmatičnih elemenata pri cikličkom opterećenju

Konfiguracija zida sa zglobovima na mjestima točaka infleksije deformacijske plohe zida usvojena je kao realna pretpostavka utemeljena na pokusima s armirano



betonskim stupovima. Do danas postoji nekoliko indikacija kako procijeniti, ili definirati područje zida u kojem se javlja bočno izvijanje (područje $l_b \times h_b$ prikazano na slici4.). To se odnosi i na povezanost ovog razmišljanja s postojanjem ovijenog rubnog područja zida. Utjecaj rubnih uvjeta i gradijenta deformacije uzduž poprečnog presjeka zida također je nedovoljno istražen, kao i verifikacija izraza za određivanje duljine izvijanja l_0 .

Efektivna visina zida h_{eff} može se definirati u odnosu na stupanj upetosti zida na različitim etažama (Slika4). Ako se radi o vitkim zidovima može se uzeti da je zid potpuno upet u donju i gornju etažu, te je stoga efektivna visina zida $h_{eff} = 0.5h_e$. Kao proračunska aproksimacija može se uzeti da je kritična vitkost, definirana kao odnos efektivne visine zida i njegove debljine

$$\lambda_{cr} = \frac{h_{eff}}{b_w}, \quad (1)$$

povezana s vlačnom deformacijom.

Ovdje se koriste teorijske postavke iz rada [2]. Maksimalni bočni pomak može se izraziti u funkciji debljine zida ($\delta = \xi b_w$). Veza između maksimalnog bočnog pomaka i zakrivljenosti θ_{max} može se prikazati u obliku:

$$\delta = \xi b_w = \theta_{max} \left(\frac{kh_e}{\pi} \right)^2. \quad (2)$$

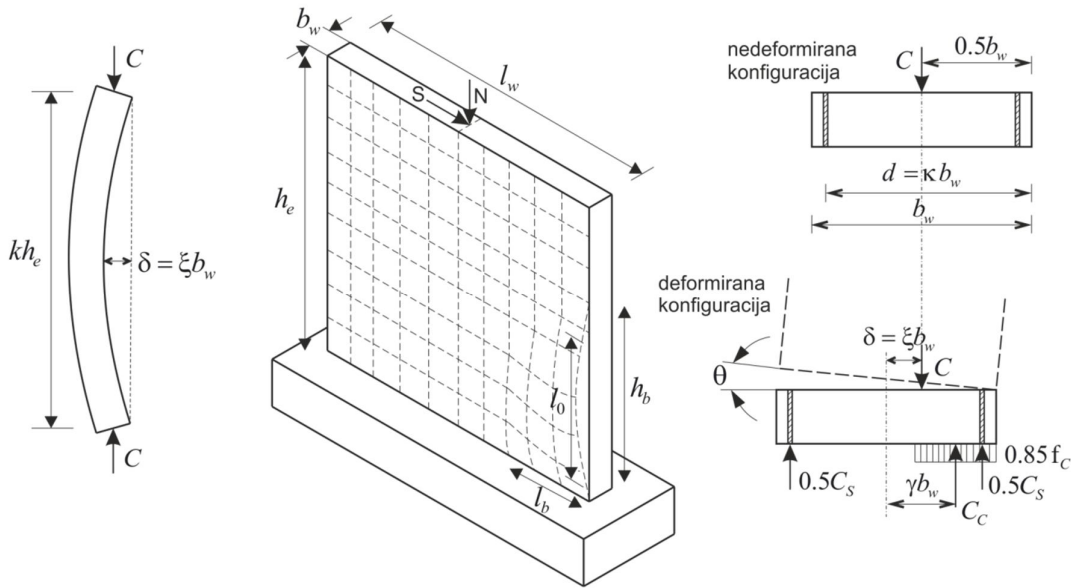
S druge strane, kao aproksimacija, maksimalna zakrivljenost može se definirati kao odnos razlike maksimalne vlačne deformacije armature ε_{sm} i rezidualne deformacije armature ε_{res} prema statičkoj visini presjeka d :

$$\theta_{max} = \frac{\varepsilon_{sm} - 0.005}{d}. \quad (3)$$

Rezidualna vlačna deformacija armature je deformacija koju ima armatura nakon što je prethodno vlačna zona prešla u tlačnu promjenom smjera opterećenja. Znači, to je deformacija armature neposredno prije nego što bude tlačno opterećena, a jednaka je:

$$\varepsilon_{res} = \frac{\varepsilon_{sm} - f_{sm}}{E_s - \varepsilon_y}, \quad (4)$$

gdje je ε_y deformacija armature pri popuštanju, a f_{sm} je maksimalno vlačno naprezanje u armaturi. Zbog pojednostavljenja rezidualna deformacija armature, u izrazu (3), uzeta je u iznosu od $\varepsilon_{res} = 0.005$.



Slika 4. Geometrija zida i ravnoteža sila u sredini područja izvijanja [1]

Ravnoteža sila i momenata u presjeku s maksimalnim bočnim pomakom daje:

$$\sum F = 0 \Rightarrow C = C_s + C_c, \quad (5)$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow C \xi b_w = C_c \gamma b_w. \quad (6)$$

Ravnoteža momenata promatra se u odnosu na sredinu presjeka.

Ako se pretpostavi da je naprezanje u uzdužnoj armaturi f_y , a tlačna sila u betonu C_c predstavljena jednolikim naprežanjem veličine $0.85f_c'$, može se pisati:

$$C_s = \rho b_w f_y, \quad (7)$$

$$C_c = 0.85f_c'(1 - 2\gamma)b_w. \quad (8)$$

Zamjenom jednadžbi (5) i (7) u (8) dobiva se nakon sređivanja:

$$(1 - 2\gamma) \left(\frac{\gamma}{\xi} - 1 \right) = \frac{\rho f_y}{0.85f_c'} = \frac{m}{0.85}, \quad (9)$$

gdje je $m = \rho f_y / f_c'$ mehanički koeficijent armiranja. Prethodna jednadžba ima realno rješenje samo ako je zadovoljen uvjet:

$$\xi \leq 0.5 \left[1 + \frac{2m}{0.85} - \sqrt{\left(\frac{2m}{0.85} \right)^2 + \frac{4m}{0.85}} \right]. \quad (10)$$



Vraćanjem ove vrijednosti u jednadžbu (2), te njezinim rješavanjem po veličini b_w / h_e , uz označavanje debljine zida kao kritične debljine $b_{w,cr}$, dobiva se:

$$\frac{b_{w,cr}}{kh_e} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon_{sm} - 0.005}{\kappa \xi}}. \quad (11)$$

Glavne varijable u prethodnoj jednadžbi su: koeficijent vitkosti zida kh_e / b_w , maksimalna vlačna deformacija ε_{sm} u uzdužnoj armaturi, parametar statičke visine κ za uzdužnu armaturu, te ξ . Parametar κ može se odrediti iz veze $d = \kappa b_w$, ali se može uzeti da je $\kappa \approx 0.8$. Parametar ξ odnosi se na mehanički koeficijent armiranja. Za praktične probleme može se uzeti vrijednost ovog parametra $0.4 \leq \sqrt{\xi} \leq 0.6$. Ako se usvoje vrijednosti $\kappa = 0.8$ i $\sqrt{\xi} = 0.5$, tada jednadžba (11) prelazi u:

$$\frac{b_{w,cr}}{kh_e} = 0.7 \sqrt{\varepsilon_{sm} - 0.005}. \quad (12)$$

U slučaju da je došlo do odvajanja zaštitnog sloja betona prije gubitka stabilnosti (ovo se obično javlja pri tlačnim deformacijama 0.003-0.005), tada je logičnije uzeti $\kappa = 1$, a za kritičnu debljinu zida $b_{w,cr}$ uzeti debljinu jezgre zida (ovijeni dio betona). Za tipične geometrije vitkih zidova može se uzeti da su oni upeti u razinama međukatnih konstrukcija, pa je $k = 0.5$. U tom slučaju jednadžba (12) prelazi u:

$$\frac{b_{w,cr}}{h_e} = 0.35 \sqrt{\varepsilon_{sm} - 0.005}. \quad (13)$$

U slučaju zamora pri nižem broju ciklusa opterećenja maksimalna vlačna deformacija uzdužne armature približno je jednaka $\varepsilon_{sm} = 0.05$. U tom slučaju jednadžba (13) daje rezultat $h_e / b_{w,cr} = 13$. Ova analiza je utemeljena na idealizaciji rubne zone zida, što znači da je usvojena jednolika raspodjela tlačne deformacije po rubnoj zoni. Stvarna raspodjela tlačne deformacije po dužini zida je drukčija, što ovaj gornji rezultat čini konzervativnom procjenom.

4. Zapažanja i zaključci

Izvijanje vitkih armirano betonskih zidova prvenstveno ovisi o odnosu svijetle katne visine i debljine zida (h_e / b_w). Čini se da je bočna nestabilnost posljedica drobljenja betona u kritičnoj zoni zida. Propisima bi trebalo ograničiti vitkost zidova, uzimajući za debljinu zida utegnuti dio poprečnog presjeka. Kao glavni uzrok bočne nestabilnosti zidova može se istaći vlačna deformacija rubne armature. Ovaj parametar je važan jer on kontrolira stvaranje pukotina u vlačnoj rubnoj zoni zida. Isto tako, dužina zida je ključan parametar koji kontrolira razvoj mehanizma bočne nestabilnosti. Parametar tlačnog naprezanja, ili normalizirana tlačna sila, također je vrlo bitan jer on može kontrolirati profil deformacija uzduž zida. Utjecaj ovog parametra je različit u elastičnom i neelastičnom području. On može utjecati na



povećanje ili smanjenje bočnih pomaka, ovisno o interakciji s drugim parametrima. Karakter cikličkog opterećenja je još jedan parametar koji ima značajan utjecaj na bočnu stabilnost zidova. Značajan utjecaj na ponašanje može imati vodoravna armatura zida, te njezino sidrenje u rubnim zonama. Osim toga, na duktilnost rubnih zona zida značajan utjecaj ima armatura za ovijanje, kako njezin razmak, tako i profil. Vidljivo je da na bočnu stabilnost armirano betonskih zidova utječe velik broj parametara, što otežava analizu, te sugerira da o svima njima treba voditi računa.

5. Literatura

1. Chai Y.H., Elayer D.T., *Lateral Stability of Reinforced Concrete Columns under Axial Reversed Cyclic Tension and Compression*, ACI Structural Journal 1999, 96(5), 780-789.
2. Paulay T., Priestly M.I.N., *Stability of Ductile Structural Walls*, ACI, Structural Journal 1993, 90(4), 385-392.
3. P.F. Parra, J.P. Moehle, *Lateral Buckling in Reinforced Concrete Walls*, 10th U. S. National Conference on Earthquake Engineering, July 21-25, 2014, Anchorage, Alaska.
4. J.P. Almeida, A. Rosso, K. Bayer, S. Sritharan, *New experimental findings on the stability of thin reinforced concrete walls*, JPEE, 2014.
5. F. Dashti, R.P. Dhakal, S. Pampanin, *Simulation of out-of-plane instability in rectangular RC structural walls*, Second Eur. Conf. Earthq. Eng. Seismol., Istanbul, 2014, pp, 1-12.
6. M. Saaticoglu, D. Palermo, A. Ghobarah, D. Mitchell, R. Simpson, P. Adebar, et al., *Performance of reinforced concrete buildings during the 27 February 2010 Maule (Chile) earthquake*, 40(2013), 693-710.
7. W.J. Goodsir, *The design of coupled frame-wall structures for seismic actions*, 1985.
8. T. Paulay, W.J. Goodsir, *The ductility of structural walls*, Bulletin of the New Zealand National Society of Earthquake Engineering, 18 (1985), 250-269.
9. S.J. Menegon, J.L. Wilson, E.F. Gad, N.T.K. Lam, *Out-of-plane buckling of limited ductile reinforced concrete walls under cyclic loads*, 2015 NZSEE Conference, Paper number O-04.