

OSNOVNI PRINCIPI I PRAVILA PROJEKTOVANJA, PRORAČUNA I IZGRADNJE ZIDANIH ZGRADA PREMA EC 6 I EC 8

BASIC PRINCIPLES AND RULES FOR DESIGN, CALCULATION AND CONSTRUCTION OF MASONRY STRUCTURES ACCORDING TO EC 6 I EC 8

UDK: 006.44:624.042.7(4)??

Pregledni rad

Prof. dr Boško STEVANOVIĆ, dipl. građ. inž.¹⁾

Prof. dr Đorđe LAĐINOVIĆ, dipl. građ. inž.²⁾

REZIME

Projektovanje zidanih konstrukcija predstavlja kombinaciju tradicionalnih i savremenih saznanja, a uvođenjem Evrokodova izjednačava se njihovovo projektovanje sa projektovanjem drugih tipova konstrukcija. Saglasno podeli sadržaja evropskih standarda za projektovanje konstrukcija, Evrokod 6 navodi opšta pravila za projektovanje, dok su u Evrokodu 8 data dodatna pravila koja treba uzeti u obzir pri projektovanju zidanih konstrukcija u seizmičkim uslovima. U radu je dat pregled najvažnijih odredbi za proračun i koncept projektovanja zidanih zgrada saglasno evropskim standardima EN 1996 i EN 1998. Osnovni koncept projektovanja višespratnih zidanih zgrada u seizmički aktivnim područjima ogleda se u tome da se u okviru linearne analize dozvoli redukcija očekivanih seizmičkih dejstava dobijenih na osnovu elastičnog spektra odgovora, pri čemu nivo redukcije seizmičkih sila zavisi od usvojenog konstrukcijskog sistema i propisanog ponašanja konstrukcije.

Cljučne reči: zemljotres, zidane zgrade, Evrokod 6, Evrokod 8.

SUMMARY

Design of masonry structures implies a combination of traditional and contemporary knowledge. By introducing Eurocodes, their design is equated with the design of other type of structures. According to the division of contents of European standards for structural design, the Eurocode 6 provides general rules for design, while Eurocode 8 provides additional rules that should be taken into consideration in design of masonry structures for earthquake resistance. This paper provides a review of the most important provisions for the calculation and design concept for masonry structures in compliance with European standards EN 1996 and EN 1998. The basic design concept of masonry structures in seismically active areas is to allow the reduction of expected seismic activity within linear analysis which are obtained based on elastic response spectrum, where the level of design seismic forces depends on the adopted structural system and prescribed behavior of the structure during earthquakes.

Key words: Earthquake, masonry buildings, Eurocode 6, Eurocode 8.

1. UVOD

U okviru Evrokodova za konstrukcije, problematikom zidanja i zidanih konstrukcija bavi se Evrokod 6 (EC 6) čiji je naziv **Evrokod 6: Proračun zidanih konstrukcija** („Eurocode 6: Design of masonry structures“). Kada je u pitanju seizmička otpornost zidanih konstrukcija, ona se u najvećoj meri postiže upotrebom armirano-betonskih elemenata u okviru zidanih zidova.

Zbog mogućnosti velikih disperzija kvaliteta materijala koji se ugrađuju u zidove, kao i zbog najčešće ograničenih mogućnosti sprovođenja rigorozne kontrole pri izvođenju zidarskih radova, vrednosti mehaničkih karakteristika zidanih konstrukcijskih elemenata najčešće se usvajaju sa velikom oprežnošću, pa je stoga u poređenju sa konstrukcijama od drugih materijala (armirani beton, čelik, drvo), pouzdanost zidanih konstrukcija u odnosu na vertikalna opterećenja objektivno uvek veća nego kod drugih konstrukcija. To znači da je verovatnoća otkazivanja zidanih konstrukcija pri takvim opterećenjima uvek nešto niža nego kod konstrukcija koje bi se sa više prava nego zidane mogle smatrati konstrukcijama od savremenih materijala.

Adresa autora: ¹⁾ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd
E-mail: bole@imk.grf.bg.ac.rs

²⁾ Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
E-mail: ladjin@uns.ac.rs

Ovaj stav, međutim, ne važi kada se radi o zidanim konstrukcijama izloženim horizontalnim, a posebno seizmičkim opterećenjima, pri čijem delovanju u punoj meri dolaze do izražaja specifične dinamičke karakteristike takvih konstrukcijskih sistema i krto ponašanje inače veoma nehomogenih zidnih struktura.

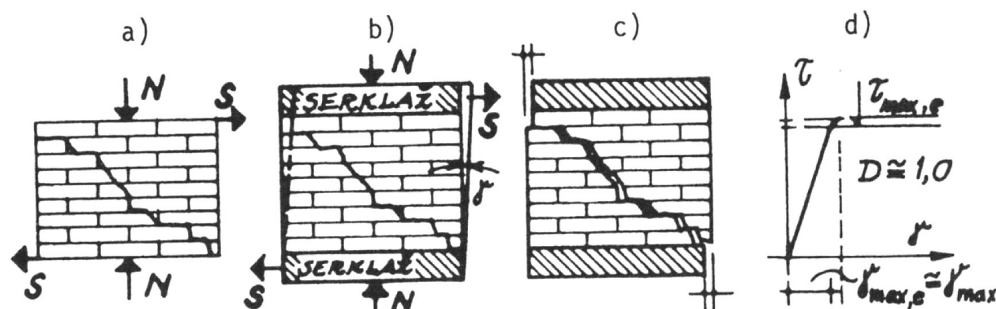
Zidane konstrukcije imaju niz slabosti u pogledu njihovog ponašanja u zemljotresima, što je prevashodno vezano za krtost zidova i relativno veliku masu ovih konstrukcija. Zidovi od opeke su u stanju da prenesu relativno velike napone pritiska, ali imaju malu otpornost na zatezanje i smicanje. Pojava velikih oštećenja zidanih objekata pri dejstvu jakih zemljotresa vezana su i za, kao što je već istaknuto, nepouzdanost svojstava ugrađenih materijala i otežane uslove nadzora pri izvođenju radova. Zbog svega navedenog nijedna druga vrsta konstrukcija ne podleže tako rigoroznim zahtevima u pogledu aseizmičkog projektovanja i građenja kao zidane zgrade.

Zidovi i stubovi izvedeni isključivo od elemenata za zidanje povezanih malterom, koji se još nazivaju običnim zidanim konstrukcijama, budući da imaju ponašanje koje u najvećem broju slučajeva odgovara ponašanju izrazito krutih materijala, seizmičkim silama se odupiru samo svojim elastičnim radom, odnosno svojim dovoljno visokim čvrstoćama i krutošću. U takvim okolnostima, pri određenim nivoima seizmičkih opterećenja, obične zidane konstrukcije naglo otkazuju, čime se čitav konstrukcijski sistem kompromituje, što znači da u takvim uslovima dolazi do njegovog brzog kolapsa.

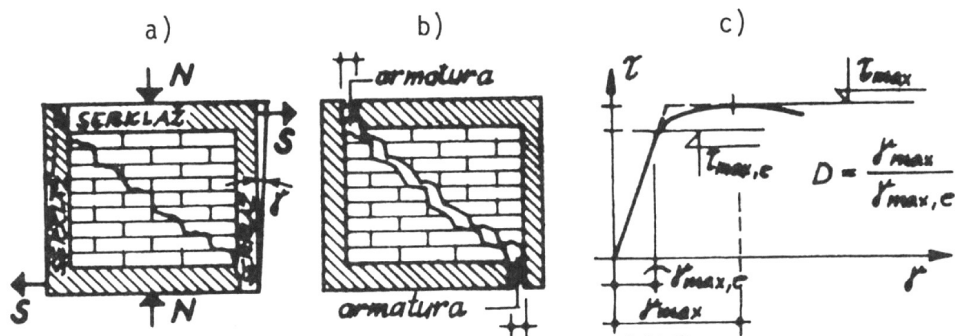
Ponašanje običnih zidanih konstrukcija pri delovanju seizmičkih (horizontalnih) sila može se prikazati pu-

tem modela predstavljenog na slici 1. Kao što pokazuje slika 1a, „čist“ zid, a to isto važi i za zid kod koga na gornjem i donjem kraju postoje tzv. horizontalni armiranobetonski serklaži saglasno slici 1b, otkazuju naglo, u trenutku formiranja kose pukotine, pri čemu do pojave te pukotine konstrukcija radi skoro idealno elastično saglasno slici 1d. Međutim, nastanak navedene pukotine praktično označava i kolaps sistema, jer on, neposredno nakon toga, dolazi u stadijum potpune destrukcije (slika 1c). Sve ovo predstavlja karakteristike zidova kao krutih – neduktilnih sistema (sa duktilnošću $D = \gamma_{\max} / \gamma_{\max,e} \cong 1$).

Ukoliko bi se kao jedan drugi model za analizu ponašanja zidanih konstrukcija pri delovanju seizmičkih sila usvojio zid uokviren armiranobetonskim serklažima (slika 2), tj. ako bi se posmatrao „običan“ zid sa horizontalnim i vertikalnim serklažima prema slici 2a, takav sistem u odnosu na horizontalna opterećenja ne bi imao značajno veću nosivost, ali bi on, s obzirom na parametar duktilnosti, bio daleko ispred prethodno razmatranog slučaja. I ovde bi praktično pri istoj elastičnoj deformaciji (klizanju) $\gamma_{\max,e}$ i pri odgovarajućem naponu $\tau_{\max,e}$ došlo do pojave kose pukotine (slika 2a), ali ta pukotina sada ne bi označavala granično stanje – lom sistema. Naime, posle pojave navedene pukotine, u posmatranom zidu (uključujući tu i pojavu pukotina u betonskim delovima – serklažima), u igru se u punoj meri uključuje prisutna armatura serklaža (slika 2b), pa zahvaljujući toj armaturi konstrukcija ne doživljava odmah kolaps, već se uz značajno deformisanje još neko vreme odupire dejstvu sile S . Stoga dijagram ponašanja zida u ovim okolnostima ima



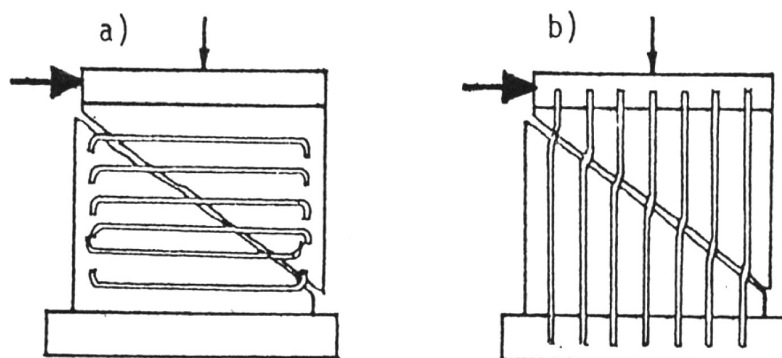
Slika 1. Model ponašanja običnih zidanih konstrukcija pod dejstvom seizmičkih (horizontalnih) sila



Slika 2. Model ponašanja zidova uokvirenih armiranobetonskim serklažima pod dejstvom seizmičkih sila

oblik dat na slici 2c, tj. oblik koji ukazuje i na tzv. postelastični „rad“ sistema.

Ovde se napominje da vrlo slično – duktilno ponašanje, koje se karakteriše parametrom duktilnosti $D > 1$ (slika 2c), imaju i zidovi armirani na načine prikazane na slici 3, a logično i zidovi sa armaturnim mrežama koje formiraju sistemi horizontalnih i vertikalnih čeličnih šipki, na osnovu čega proizilazi da se duktilnost zidanih konstrukcija može obezbediti isključivo postupkom armiranja. Takve – armirane zidane konstrukcije, u koje, šire posmatrano, treba ubrojati i konstrukcije od zidova



Slika 3. Zidovi sa horizontalnom i vertikalnom armaturom

uokvirenih armiranobetonskim serklažima, daleko bolje podnose seizmička opterećenja – imaju veću aseizmičnost (mada se ni u takvim slučajevima ne isključuje mogućnost pojave oštećenja – pukotina), i pri zemljotresima ne ispoljavaju karakteristiku krtog loma koji praktično označava kolaps običnih zidanih konstrukcija.

Veća sigurnost armiranih zidanih konstrukcija i zidanih konstrukcija uokvirenih armiranobetonskim serklažima pri delovanju zemljotresa, koji u opštem slučaju uslovljavaju oscilovanja svih, pa i zidanih konstrukcijskih sistema, posledica je upravo duktilnog ponašanja takvih sistema pod seizmičkim opterećenjem.

U pomenutom Evrokodu 6 razmatranje armiranobetonskih elemenata u okviru zidanih zidova, odnosno definisanje osnovnih pravila za konstruisanje i proračun zidanih zidova, kao nosećih elemenata konstrukcije specificirano je u tri grupe:

1. armirani zidovi,
2. prethodno napregnuti zidovi i
3. zidovi uokvireni armiranobetonskim serklažima.

Usvajanjem i objavljivanjem Evropskog standarda EN 1996-1-1, 2005. godine (EC 6 – deo 1-1), definisani su svi najvažniji zahtevi, koji moraju biti zadovoljeni pri konstruisanju i građenju armiranih zidova. Pored odredbi standarda EC 6, za analizu armiranih zidanih konstrukcija u seizmičkim područjima, moraju se uzeti u razmatranje i dodatne odredbe, koje su definisane za seizmički otporne konstrukcije u Evrokodu 8.

Pored nesumnjivih prednosti koje armirani zidovi imaju za prijem horizontalnih sila, ovaj tzv. unapređeni sistem građenja zidanih konstrukcija zahteva dodatnu

kontrolu kvaliteta izvedenih radova, zato što nakon izvođenja betonska ispuna i ugrađena armatura ostaju „skriveni“.

Funkcionisanje armiranih zidova se zasniva na zajedničkom radu armature, opeka i blokova, maltera i ispuna od betona, kao i njihovih sličnih temperaturnih koeficijenta širenja i skupljanja. Male razlike između temperaturnih koeficijenata omogućavaju da komponentni materijali rade zajedno u okviru normalnih temperaturnih promena, čime je izbegnuta pojava dodatnih napona na kontaktu armature i maltera ili betona, koji mogu narušiti adheziju između ovih materijala i sprečiti dalji prenos sila.

Armatura mora biti ankerovana u zidni element na način koji će osigurati da armatura može biti napregnuta. Ovaj mehanizam se obezbeđuje kroz malter ili ispunu od betona. Naime, kad su armirane zidane grede, potporni zidovi ili zidovi zgrada opterećeni sopstvenom težinom, korisnim opterećenjem ili bočnim opterećenjem usled delovanja seizmičkih sila ili sila vetra, sile se putem pritiska kroz zidani element prenose u malter ili ispunu od betona, a zatim kroz te materijale i kroz kontaktnu zonu do armature koja se napreže na zatezanje.

2. ODREDBE EVROKODA 6, KOJE SE ODOSE NA AB ELEMENTE ZIDOVA

U poglavlju 1.5, Evrokoda 6, dati su termini i definicije, koji se primenjuju pri projektovanju zidanih konstrukcija.

Osnovni pojmovi, koji se odnose na AB elemente zidova, su:

– **reinforced masonry**: *armirani zid* – zidani zidovi u koje su, u okviru maltera ili betona, ugrađene armaturne šipke ili mreže, tako da se svi ugrađeni elementi zajedno učestvuju u prenošenju opterećenja,

– **prestressed masonry**: *prethodno napregnuti zid* – zid u kojime su, pomoću zategnute armature (kablova), namerno izazvani unutrašnji naponi pritiska,

– **confined masonry**: *zid uokvirem serklažima* – zid uokviren armiranobetonskim ili armiranim zidanim elementima u vertikalnom i horizontalnom pravcu,

– **concrete infill**: *betonska ispuna* – beton koji se upotrebljava za ispunjavanje šupljina i praznina u okviru zidova,

– **bed joint reinforcement**: *armatura horizontalnih spojnica* – armaturni čelik fabrički proizveden za ugrađivanje u horizontalne spojnice,

– **reinforcing steel**: *čelik za armiranje* – armaturni čelik za armiranje zidova,

– **prestressing steel**: *čelik za prethodno naprezanje* – čelične žice, šipke i užad za prethodno naprezanje

U poglavlju 3 standarda EN 1996-1-1:2005 definisani su osnovni materijali za izradu armiranih zidova: elementi za zidanje, malter, beton i armatura.

Za malter u horizontalnim spojnicama armiranih zidova propisane su minimalne čvrstoće pri pritisku (f_m), u zavisnosti od vrste upotrebene armature:

- min. 4 MPa, za obične armaturne šipke i
- min. 2 MPa za prefabrikovanu armaturu.

Osnovni uslovi kvaliteta za beton kao materijal za ispunu u zidanim konstrukcijama su:

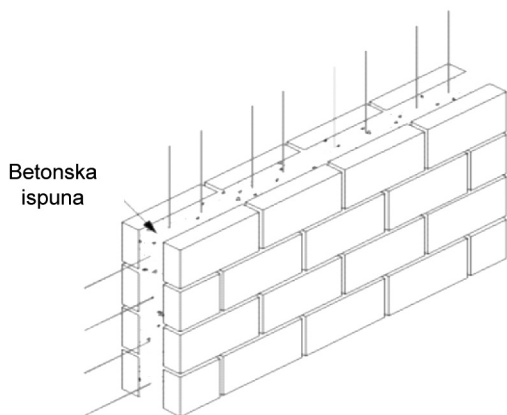
– beton mora biti u saglasnosti sa odredbama standarda EN 206.

– beton se specificira na osnovu karakteristične čvrstoće pri pritisku „ f_{ck} “ (klasa čvrstoće betona), koja odgovara 28-dnevnoj čvrstoći određenoj na cilindru ili kocki, prema standardu EN 206.

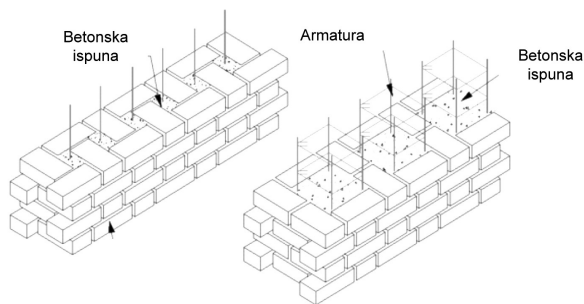
– klasa čvrstoće betona ne sme biti manja od 12/15 MPa.

– beton može biti projektovanih svojstava ili projektovanog sastava i treba da sadrži količinu vode koja je potrebna da se obezbedi specificirana čvrstoća i da se istovremeno dobije odgovarajuća ugradljivost.

– ugradljivost betona treba da bude takva da osigura potpuno popunjavanje šupljina u zidu, pri propisanom postupku ugrađivanja betona. Klase konzistencije S3 – S5 (definisane metodom sleganja) zadovoljavaju taj uslov u najvećem broju slučajeva. Izuzetno, za šupljine u zidovima gde je najmanja dimenzija manja od 85 mm, moraju se koristiti betoni klase konzistencije S5 ili S6, pri čemu treba preduzeti mere da se smanji skupljanje betona.



Slika 4. Armiranobetonska ispunu u dvoslojnom zidanom zidu



Slika 5. Betonska ispunu u šupljinama zidanog zida

– maksimalna veličina zrna agregata za betonsku ispunu u zidanim zidovima ograničena je na 20 mm. U slučajevima kada su šupljine manje od 100 mm ili kada je zaštitni sloj betona do armature manji do 25 mm, zrna agregata moraju biti manja od 10 mm.

Beton se u okviru zidanih konstrukcija, u najopštijem slučaju, može upotrebiti u sledećim slučajevima:

– kao betonska ispunu za popunjavanje praznina i šupljina u zidovima (slika 4, 5 i 6),

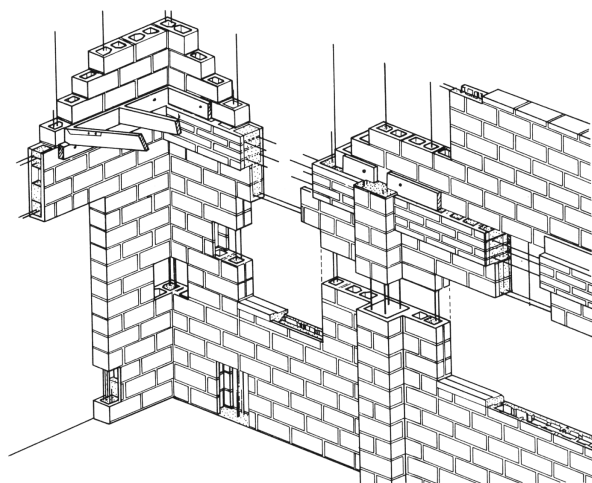
– za izvođenje horizontalnih i vertikalnih armiranobetonskih serklaža (slika 7) i

– za izvođenje armiranobetonskih obloga zidova (slika 8).

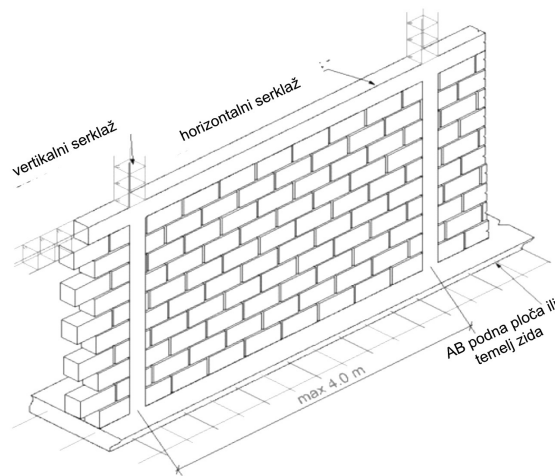
Osnovni uslovi kvaliteta za armaturu i čelik za prednaprezanje u zidanim konstrukcijama su definisani na sledeći način:

– za armiranje zidanih zidova mogu se koristiti ugljenični čelik i nerđajući čelik.

– u odnosu na poprečni presek, armatura može biti glatka i rebrasta.



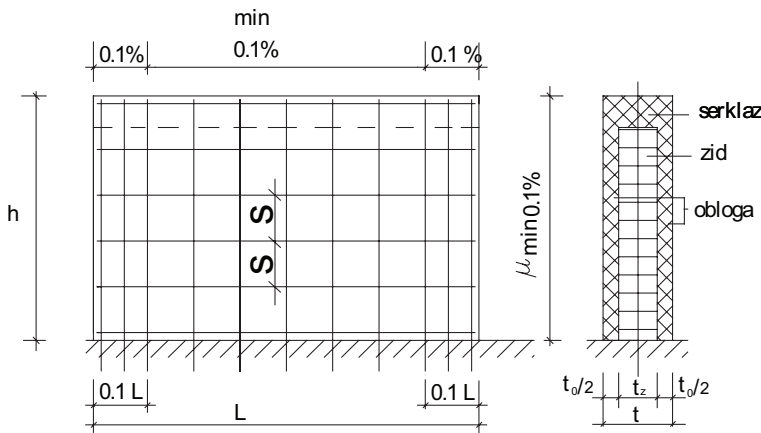
Slika 6. Betonske ispune u elementima za zidanje



Slika 7. Zid uokviren armiranobetonskim serklažima

– karakteristična čvrstoća armature (f_{yk}) mora biti u skladu sa odgovarajućim standardom (Anex C standarda EN 1992-1-1).

– kao vrednost koeficijenta termičkog širenja armature može se uzeti $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, a razlike između ove vrednosti i termičkih koeficijenata elemenata za zidanje ili betona, se mogu zanemariti.



Slika 8. Armatura betonske obloge zidanog zida

– uslovi kvaliteta prefabrikovane armature za horizontalne spojnice definisani su u standardu EN 845-3.

– uslovi kvaliteta čelika za prednaprezanje definisani su u standardu EN 10138, a karakteristične vrednosti se uzimaju iz standarda EN 1992-1-1.

Armatura se za armiranje zidanih zidova, u najopštijem slučaju, može upotrebiti u sledećim slučajevima:

– vertikalna armatura u izbetoniranim prazninama i šupljinama u zidovima (slike 4, 5 i 6),

– horizontalna armatura u horizontalnim spojnica zidova (slika 9) ili u izbetoniranim prazninama dvoslojnih zidova (slika 4),

– horizontalna i vertikalna armatura u armiranobetonskim serklažima (slika 7) i

– horizontalna i vertikalna armatura u okviru armiranobetonskih obloga zidova (slika 8).

Čelik za armiranje mora imati zadovoljavajuću trajnost, odnosno mora biti koroziono otporan ili odgovarajuće zaštićen. Kada je neophodna zaštita ugljeničnog

čelika da bi se obezbedila odgovarajuća trajnost armature, mora se uraditi galvanizacija armaturnih šipki, tako da cinčana prevlaka ima minimalnu debljinu, koja je propisana u zavisnosti od klase izloženosti ili se mora zaštititi epoksidnim premazom. Zaštita armature postupkom galvanizacije izvodi se nakon završenog oblikovanja armature.

U slučajevima kada se koristi nezaštićena armatura propisana je minimalna debljina zaštitnog sloja betona u zavisnosti od klase izloženosti i sastava betona (količina cementa i vodocementni faktor).

Čelik za prednaprezanje mora da ima zadovoljavajuću trajnost kada je propisno ugrađen, tako da se odupre relevantnim uslovima mikro izloženosti u toku planiranog životnog veka objekta. U slučajevima kada je potrebna galvanizacija čelika za prednaprezanje, sastav čelika mora biti odgovarajući za takav postupak zaštite. Svi elementi koji se koriste u postupku prednapreznja (ankeri, spojnice, cevi, čelične pločice) moraju biti koroziono otporni u sredini u kojoj se ugrađuju.

Proračun armiranih zidanih elemenata izloženih savijanju, savijanju i aksijalnom pritisku ili samo aksijalnom pritisku, pored osnovnih pretpostavki na kojima se bazira i proračun armiranobetonskih konstrukcija, bazira se i na sledećim pretpostavkama:

– armatura je izložena istim varijacijama dilatacija, kao i okolni deo zida,

– čvrstoća na zatezanje elemenata za zidanje se uzima da je jednaka nuli (zanemaruje se),

– maksimalna dilatacija pri pritisku za zidani zid zavisi od kvaliteta materijala za zidanje,

– maksimalna dilatacija pri zatezanju u armaturi zavisi od kvaliteta armature,

– dijagram napon – dilatacija za zid se može uzeti isti kao i kod nearmiranih zidova, odnosno kao lineran, kao parabola, parabola+prava ili kao pravougaoni

– dijagram napon – dilatacija za armaturu je definisan u standardu EN 1992-1-1,

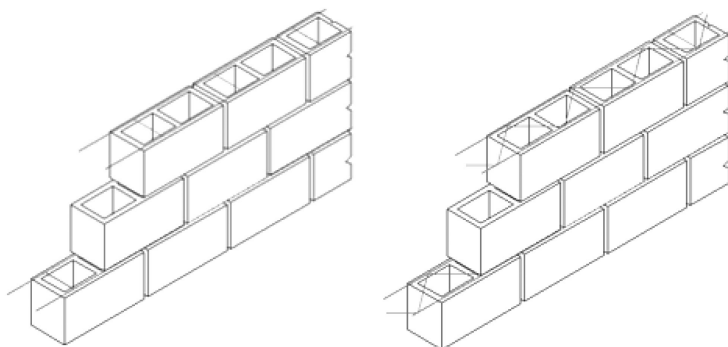
– za poprečni presek koji nije ceo pritisnut, granična dilatacija pri pritisku ne sme biti veća od $e_{mu} = -0.0035$ (3.5%) za grupu elemenata za zidanje 1 i $e_{mu} = -0.002$ (2%) za grupu elemenata za zidanje 2, 3 i 4,

– deformaciona svojstva betonske ispune treba uzeti ista kao i za zid,

– kada se u pritisnutoj zoni nalaze i zid i betonska ispuna, napon pritiska treba sračunati na osnovu dijagrama napona baziranog na čvrstoći pri pritisku slabijeg materijala.

Postupak proračuna zidanih konstrukcija se praktično zasniva na istim pretpostavkama na kojima je bazirana i metoda graničnog stanja loma armiranobetonskih konstrukcija.

Usled eksploatacionih uslova u armiranim zidovima, kao i u ostalim armiranim zidanim elementima, ne bi smele da se pojave neprihvatljive prsline i veliki ugibi.

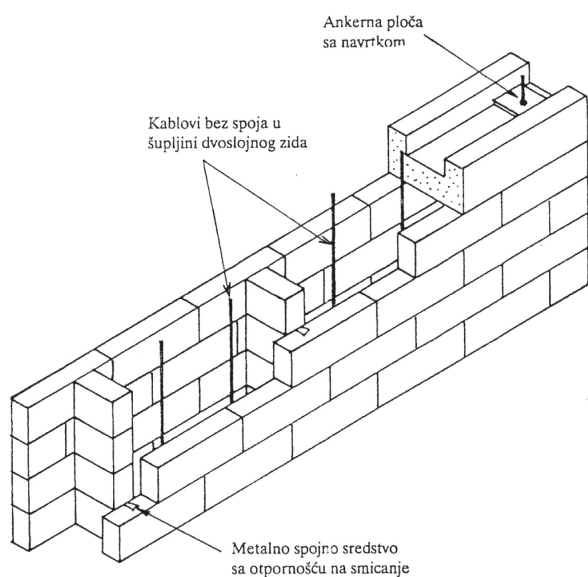


Slika 9. Obična i rešetkasta prefabrikovana armatura za armiranje zidanih zidova u horizontalnim spojnica

U prethodno napregnutim zidanim zidovima ne bi smeje da se pojave prsline usled savijanja niti da se pojave značajniji ugibi pri eksploatacionim uslovima.

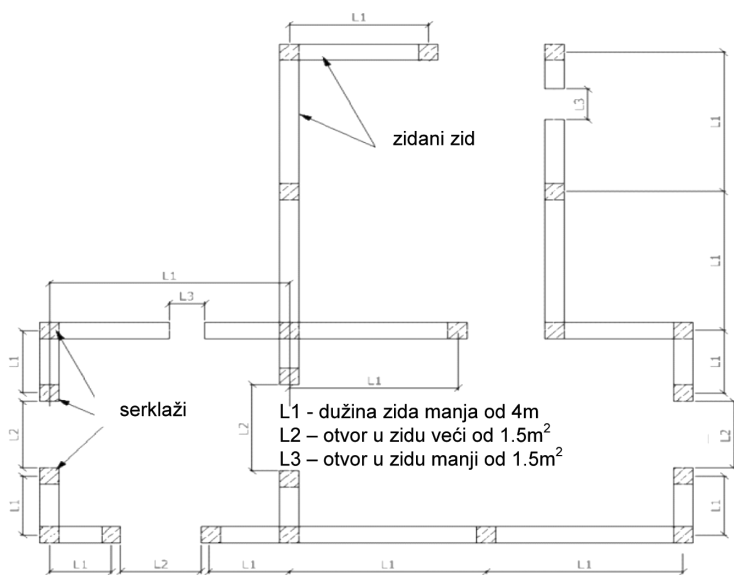
Za zidove uokvirene vertikalnim i horizontalnim armiranobetonskim serklažima proračun prema граничном stanju upotrebljivosti sprovodi se na isti način kao i za nearmirane zidove.

Za prethodno napregnute zidove (slika 10) detalji armiranja i postavljanja elemenata veze moraju biti u skladu sa standardom EN 1992-1-1.



Slika 10. Prethodno napregnuti zid

Pri izvođenju armiranobetonskih serklaža u okviru zidanih zidova, armaturu i beton treba ugrađivati nakon izvođenja zidova, čime se postiže zadovoljavajuće ankerovanje.



Slika 11. Raspored vertikalnih serklaža u osnovi zidane zgrade

Pored svih pravila koja važe za armiranobetonske konstrukcije, kod zidanih zidova sa horizontalnim i vertikalnim serklažima, treba uzeti u obzir i sledeće preporuke (slika 11):

– armiranobetonski serklaži se moraju izvesti na svakoj etaži, na svakom ukrštanju zidova i sa obe strane otvora koji imaju površinu veću od 1.5 m²,

– dodatni armiranobetonski serklaži se moraju postaviti u zidovima na svakih 4 m u horizontalnom i vertikalnom pravcu.

Površina porečnog preseka armiranobetonskih serklaža ne sme biti manja od 0.02 m², a najmanja dimenzija u porečnom preseku ne sme biti manja od 15 cm. Površina vertikalne armature u serklažu mora biti najmanje 0.8% od površine poprečnog preseka serklaža ili najmanje 200 mm². Kao uzengije se ne mogu koristiti šipke sa prečnikom manjim od 6 mm, a najveće dozvoljeno međusobno rastojanje između dve uzengije je 30 cm.

3. DODATNA PRAVILA ZA PROJEKTOVANJE ZIDANIH KONSTRUKCIJA U SEIZMIČKIM USLOVIMA

3.1. Proračun seizmičkih uticaja

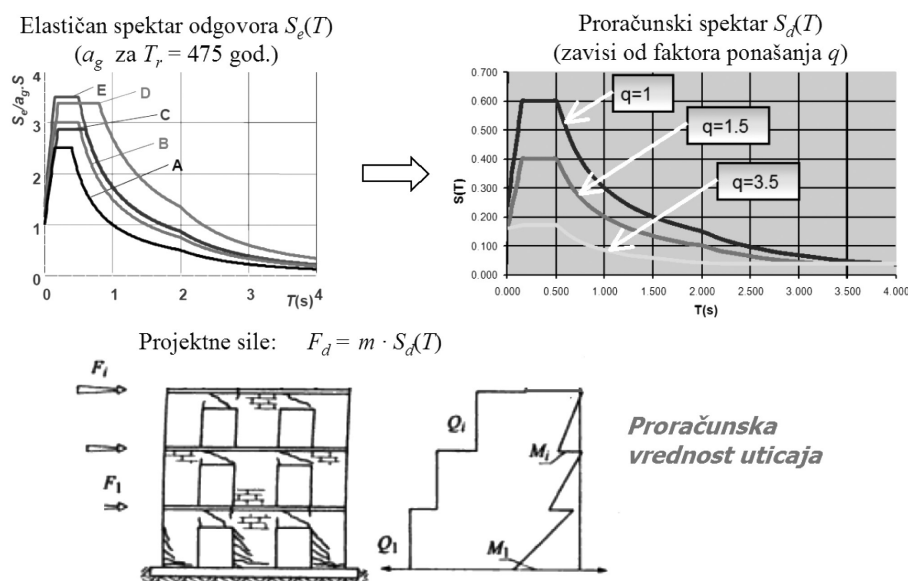
U Evrokodu 6 su data opšta pravila za projektovanje zidanih zgrada, dok su u Evrokodu 8 data dodatna pravila koja treba uzeti u obzir pri projektovanju zidanih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima.

Osnovni cilj Evrokoda 8 je da, u slučaju zemljotresa, obezbedi da su: a) ljudski životi zaštićeni; b) oštećenja ograničena; i c) objekti značajni za zaštitu ljudi u upotrebnom stanju. Nivo zaštite koji može da se obezbedi za različite kategorije zgrada stvar je optimalnog dodeljivanja resursa, tako da se može očekivati da se to razlikuje od države do države, što zavisi od relativnog značaja seizmičkog rizika u odnosu na ostale rizike, kao i od globalnih ekonomskih resursa.

U skladu sa proklamovanim ciljem, zgrade moraju da budu projektovane i izvedene na takav način da sledeći zahtevi budu zadovoljeni: a) zahtev da se objekat ne sruši; i b) zahtev ograničenja oštećenja; svaki sa odgovarajućim stepenom pouzdanosti. Konstrukcija mora da bude projektovana i izvedena da izdrži projektno seizmičko dejstvo bez lokalnog ili globalnog rušenja, odnosno da zadrži svoj integritet i preostali kapacitet nosivosti nakon zemljotresa. Projektno seizmičko dejstvo je izraženo u smislu: a) referentnog seizmičkog dejstva povezanog sa referentnom verovatnoćom prekoračenja 10% u 50 godina ili referentnim povratnim periodom 475 god.; kao i b) faktora značaja γ_p uzimajući u obzir razlike u nivou pouzdanosti. Za seizmičko dejstvo sa većom verovatnoćom pojave od projektnog (sa verovatnoćom prekoračenja 10% u 10 godina, tj. povratnim periodom 95 god.) zgrade se projektuju tako da mogu da izdrže zemljotres bez pojave oštećenja i odgovarajućih zastoja u korišćenju.

U cilju zadovoljenja osnovnih zahteva, noseća konstrukcija se mora proveriti za sledeća granična stanja: a) granično stanje nosivosti; i b) granično stanje upotrebljivosti. Granična stanja nosivosti su ona koja su povezana sa rušenjem ili drugim oblicima loma konstrukcije koji mogu da ugroze sigurnost ljudi, dok su granična stanja upotrebljivosti povezana sa oštećenjima preko kojih definisani zahtevi upotrebljivosti više ne mogu da budu zadovoljeni. Za granično stanje nosivosti mora da se dokaže da konstrukcijski sistem poseduje odgovarajući kapacitet otpornosti i disipacije energije koji su povezani sa nivoom do kojeg se nelinearni odgovor očekuje. U operativnom smislu balans između otpornosti i kapaciteta disipacije energije je karakterisan preko vrednosti faktora ponašanja q i pridružene klase duktilnosti.

Kapacitet konstrukcijskih sistema da se dejstvu ze-



Slika 12. Elastičan i projektni spektar odgovora za seizmičku analizu

mljotresa suprotstave u nelinearnom domenu omogućava njihov proračun sa seizmičkim silama koje su manje od onih koje odgovaraju linearno elastičnom odgovoru. U cilju da se izbegne eksplicitna nelinearna analiza, uzimajući u obzir kapacitet konstrukcije za disipaciju energije kroz duktilno ponašanje njenih elemenata, sprovodi se elastična analiza zasnovana na spektru odgovora koji je redukovano u odnosu na elastični spektar (slika 12).

Proračunski model konstrukcije za seizmičku analizu zgrade treba da adekvatno odražava masu, krutost i nosivost celog sistema.

Krutost konstrukcijskih elemenata određuje se uzimajući u obzir njihovu deformabilnost na savijanje i smicanje, a ako je potrebno i aksijalnu deformabilnost. S obzirom da se za vreme zemljotresa očekuje pojava prslina i određeni stepen oštećenja zidova, u računskoj analizi zidanih zgrada je potrebno koristiti krutost isprskalnih preseka. U nedostatku precizne procene krutosti, potkrepljene odgovarajućom analizom, krutost na savi-

janje i smicanje može biti uzeta kao polovina vrednosti elastične krutosti celog preseka bez prslina.

Vrednosti modula elastičnosti nalaze se unutar granica: $500f_k < E < 3000f_k$, gde je f_k karakteristična čvrstoća zida pri pritisku, koja zavisi od marke zida, odnosno od kvaliteta opeke i maltera. U nedostatku eksperimentalnih podataka, vrednost modula elastičnosti zida može se uzeti kao: $E=1000f_k$.

U proračunskom modelu zidani nadvoji mogu biti uzeti u razmatranje kao vezne grede između dva zida ako su regularno spojeni za susedne zidove i spojeni za vezne grede (serklaže) u nivou tavanice i nadvratne grede ispod. Ako proračunski model uzima u obzir vezne grede, konstrukcija se može analizirati kao okvir da bi se u vertikalnim i horizontalnim elementima konstrukcije odredili uticaji od seizmičkih dejstava.

U seizmičkoj analizi višespratnih zidanih zgrada se uobičajeno pretpostavlja da su mase koncentrisane u nivou međuspratnih konstrukcija, kao i da su tavanice beskonačno krute u svojim ravnima. Pri horizontalnom opterećenju zgrada najbitniji uticaj imaju pomeranja u horizontalnim ravnima, pa se samo ta pomeranja uzimaju eksplicitno u obzir, dok su sva ostala obuhvaćena implicitno. Na ovaj način je kretanje tavanice na nekom spratu opisano sa tri parametra: dve translacije u horizontalnoj ravni i uglom obrtanja oko vertikalne ose.

Inercijalni efekti od seizmičkog dejstva izračunavaju se uzimajući u obzir prisustvo masa od svih gravitacionih opterećenja koje se javljaju u sledećoj kombinaciji dejstava:

$$\Sigma G_{kj} \text{ „+“ } \Sigma Y_{E,i} \cdot Q_{k,i} \quad (1)$$

gde su: G_{kj} karakteristične vrednosti stalnih opterećenja, $Y_{E,i}$ koeficijent kombinacije, a $Q_{k,i}$ karakteristične vrednosti promenljivih dejstava i , dok simbol „+“ označava „kombinuje se sa“.

Referentni metod za određivanje seizmičkih uticaja je modalna analiza u kombinaciji sa metodom spektra odgovora, gde se koristi linearno elastični model konstrukcije i projektni spektar seizmičkog dejstva. Zavisno od konstrukcijskih karakteristika zgrade, može da se koristi jedan od sledeća dva tipa linearno-elastične analize: 1) „metoda ekvivalentnih bočnih sila“ za zgrade koje zadovoljavaju određene uslove; i 2) „multi-modalna spektralna analiza“ koja može da se primenjuje za sve tipove zgrada.

Konstrukcije zgrada se u okviru seizmičkog proračuna klasifikuju kao regularne (pravilne) i neregularne

(nepravilne), pri čemu se posebno se razmatra regularnost zgrade u osnovi i po visini. Za zgrade koje ispunjavaju kriterijume regularnosti u osnovi, analiza može da se sprovede primenom dva ravanska modela, po jedan za svaki glavni (horizontalan) pravac. U slučaju neregularnih zgrada u osnovi, moraju se koristiti prostorni modeli da bi se obuhvatili nepovoljni efekti torzije. Ako su efekti torzije izraženi, po pravilu dolazi do povećanja pomeranja i deformacija, naročito pri nelinearnom odgovoru konstrukcije.

Sa namerom da se uzmu u obzir nepouzdanosti u položaju masa i u prostornoj varijaciji seizmičkih kretanja, izračunati položaj centra mase svake tavanice i mora da se posmatra kao premešten iz svog nominalnog položaja za dodatni slučajni ekscentricitet u svakom pravcu: $e_{ai} = \pm 0,05L_p$, gde je L_i dimenzija tavanice upravno na razmatrani pravac seizmičkog dejstva.

Metoda ekvivalentnih bočnih sila primenjuje se kod zgrada koje mogu da se analiziraju sa dva ravanska modela i čiji odgovor ne zavisi bitno od uticaja viših svojstvenih oblika vibracija. To su zgrade koje su regularne po visini i čiji je osnovni period vibracija T_1 manji i od $4T_C$ i od 2,0 s. Zidane zgrade po pravilu ispunjavaju ove uslove. Seizmička smičuća sila u osnovi F_b za svaki horizontalan pravac za koji se zgrada analizira, treba da se odredi prema sledećem izrazu $F_b = m S_d(T_1)\lambda$, gde je m ukupna masa zgrade iznad temelja ili iznad vrha krutog podruma, T_1 je osnovni period slobodnih vibracija za posmatrani horizontalan pravac, $S_d(T_1)$ je ordinata u projektnom spektru za period T_1 , dok je λ korekcionni faktor, čija je vrednost jednaka $\lambda = 0,85$ ako je $T_1 \leq 2T_C$ i zgrada ima više od dva sprata, odnosno $\lambda = 1,0$ u svim drugim slučajevima. Ukupna seizmička sila se po visini zgrade raspodeljuje proporcionalno veličini i položaju spratnih masa.

Multimodalna spektralna analiza se primenjuje na zgrade koje ne zadovoljavaju uslove regularnosti u osnovi i/ili po visini. Pri primeni ove metode mora da se uzme u obzir uticaj svih svojstvenih oblika vibracija koji značajno doprinose globalnom odgovoru zgrade. Ovaj zahtev se smatra zadovoljenim ako zbir efektivnih modalnih masa za razmatrane svojstvene oblike vibracija iznosi najmanje 90% od ukupne mase konstrukcije ili ako su uzeti u obzir svi tonovi sa efektivnim modalnim masama koje su veće od 5% ukupne mase konstrukcije. Kada se koristi prostorni proračunski model, navedeni uslovi moraju da se provere za svaki relevantni pravac.

U EN 1998 se razmatra simultano horizontalno seizmičko dejstvo u dva ortogonalna pravca. Ekstremna vrednost bilo kog uticaja usled istovremenog dejstva komponenti seizmičkog dejstva, određuje se kao kombinacija uticaja od pojedinačnih dejstava. Pri tome se primenjuje jedna od sledećih kombinacija:

$$\text{prvi način: } E_{Ed} = \sqrt{E_{Edx}^2 + E_{Edy}^2} \quad (2)$$

$$\text{drugi način: } E_{Ed} = E_{dx} + 0,3 E_{Edy} \text{ ili } E_{Ed} = E_{dy} + 0,3 E_{Edx} \quad (3)$$

gde E_{Edx} i E_{Edy} predstavljaju vrednosti uticaja usled seizmičkog dejstva u pravcu izabranih osa x i y zgrade. Znak svake komponente u navedenim gornjim kombinacijama mora da se usvoji tako da bude najnepovoljniji za svaki posmatrani uticaj.

3.2. Dokaz sigurnosti

Raspodela ukupne sile smicanja između različitih zidova, koja je dobijena linearnom analizom, može se modifikovati pod uslovom:

a) da je zadovoljena globalna ravnoteža (tj. da je dobijena ista ukupna sila smicanja u osnovi i da je postignut isti položaj rezultante sila);

b) da sila smicanja ni u jednom zidu nije umanjena za više od 25%, niti povećana za više od 33%; i

c) da su posledice redistribucije uzete u obzir kod dijafragmi (tavanica).

Smatra se da je sigurnost protiv rušenja (granično stanje nosivosti) u seizmičkoj proračunskoj situaciji osigurana ukoliko su zadovoljeni zahtevi koji se odnose na nosivost, duktilnost, ravnotežu, stabilnost temelja, kao i na seizmičke razdelnice (dilatacije). Za sve konstrukcijske elemente (zidove) sledeća relacija mora da bude zadovoljena:

$$E_d \leq R_d \quad (4)$$

gde je E_d proračunska vrednost uticaja od projektnog seizmičkog dejstva u skladu sa EN 1990 koja, ako je neophodno, uključuje i uticaje drugog reda (koji kod zidanih zgrada po pravilu nisu merodavni), a R_d je odgovarajuća proračunska vrednost nosivosti, izračunata u skladu sa odredbama za korišćene materijale (preko karakteristične vrednosti čvrstoće materijala f_k i parcijalnih koeficijenata sigurnosti γ_m) i u skladu sa proračunskim modelom koji odgovara specifičnom tipu konstrukcijskog sistema.

Proračunska vrednost bio kog uticaja E_d određuje se kao vrednost uticaja od kombinacije dejstava za seizmičke proračunske situacije:

$$\Sigma G_{kj} \text{ „+“ } P \text{ „+“ } A_{Ed} \text{ „+“ } \Sigma Y_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (5)$$

gde G_{kj} predstavlja karakterističnu vrednost stalnog dejstva j , P je karakteristična vrednost prednapreznja (ako postoji), A_{Ed} je proračunska vrednost seizmičkog dejstva ($= \gamma_1 A_{Ek}$, γ_1 – faktor značaja, A_{Ek} – karakteristična vrednost seizmičkog dejstva), $\Psi_{2,i}$ je koeficijent kombinacije za kvazi-stalnu vrednost promenljivog dejstva i , dok su $Q_{k,i}$ karakteristične vrednosti promenljivih dejstava i .

Dokaz sigurnosti zgrade protiv rušenja mora biti eksplicitno obezbeđena osim za zgrade koje ispunjavaju pravila za „jednostavne zidane objekte“. Za proveru sigurnosti protiv rušenja, proračunska otpornost svakog konstrukcijskog elementa se utvrđuje u saglasnosti sa EN 1996-1-1:2004. Kod dokaza granične nosivosti za seizmičku proračunsku situaciju, koriste se parcijalni koeficijenti sigurnosti γ_m za elemente za zidanje i γ_s za čelik. Ove vrednosti treba odrediti u Nacionalnom aneksu, a prepo-

ručena vrednost za γ_m je 2/3 vrednosti navedene u Nacionalnom aneksu dokumenta EN 1996-1-1:2004, ali ne manje od 1,5, dok preporučena vrednost za γ_s iznosi 1,0.

3.3. Materijali, načini građenja i odredbe za projektovanje i građenje

U Evrokodu 8 je propisano da elementi za zidanje moraju biti dovoljno robusni da bi se izbegli lokalni krta lomovi. Osim u slučaju niske seizmičnosti, normalizovana čvrstoća na pritisak elemenata za zidanje, određena u skladu sa EN 772-1, ne sme biti manja od vrednosti $f_{b,min}$ upravno na površinu spojnice, odnosno $f_{bh,min}$ paralelno površini spojnice u ravni zida. Kao zone niske seizmičnosti tretiraju se ili one oblasti kod kojih projektno ubrzanje tla a_g za tlo tipa A nije veće od 0,08g (0,78 m/s²) ili one gde proizvod $a_g \cdot S$ nije veći od 0,10g (0,98 m/s²).

Vrednosti $f_{b,min}$ i $f_{bh,min}$ za upotrebu u nekoj zemlji, treba da se odrede u Nacionalnom aneksu svake zemlje, a preporučene vrednosti su: $f_{b,min} = 5 \text{ N/mm}^2$ i $f_{bh,min} = 2 \text{ N/mm}^2$. Zahteva se minimalna čvrstoća maltera $f_{m,min}$, koja je generalno veća od minimalne vrednosti date u EN 1996 – preporučena vrednost je $f_{m,min} = 5 \text{ N/mm}^2$ za nearmirane zidove i zidove sa serklažima, odnosno $f_{m,min} = 10 \text{ N/mm}^2$ za armirane zidove. Postoje tri alternativne klase spojeva elemenata za zidanje: a) spojnice potpuno ispunjene malterom; b) nepopunjene spojnice; i c) nepopunjene spojnice sa mehaničkim spajanjem elemenata za zidanje.

U zonama srednje i visoke seizmičnosti, radi racionalnosti, projektuju se konstrukcije sa duktilnim ponašanjem, a u ostalim zonama sa ograničenom duktilnošću. Već je rečeno da se zidane zgrade svrstavaju kao: 1) konstrukcije sa nearmiranim zidovima; 2) konstrukcije sa zidovima ojačanim serklažima; i 3) konstrukcije sa armiranim zidovima. Za navedene načine građenja, preporučene su veoma male vrednosti gornje granice faktora ponašanja q (1,5; 2,0 i 2,5 respektivno).

U slučaju upotrebe konvencionalnih metoda prove-re nosivosti, gde se mehaničke karakteristike materijala redukuju sa parcijalnim faktorima sigurnosti za materijale, a za raspodelu sila po elementima upotrebljavaju metode elastične analize, proračunska otpornost konstrukcije može biti dosta manja od stvarne. Zbog toga bi se, u načelu, preporučene vrednosti faktora ponašanja q mogle modifikovati uzimajući u obzir moguću rezervu nosivosti. Na osnovu analize više od 40 nearmiranih zidanih zgrada, dobijene su vrednosti faktora rezerve nosivosti (otpornosti) između 1,8 i 2,4 (Magenes, 2006).

Zbog male zatezne čvrstoće i niske duktilnosti, smatra se da nearmirani zidovi koji su projektovani samo u skladu sa odredbama EN 1996, imaju nizak kapacitet disipacije (DCL) i da njihovu primenu treba ograničiti. Zbog navedenih razloga nearmirani zidovi koji zadovoljavaju odredbe postojećeg Evrokoda ne smeju biti primenjeni ako vrednost $a_g \cdot S$ prelazi određenu granicu $a_{g,urm}$, koja se mora odrediti u Nacionalnom aneksu. Vrednost za $a_{g,urm}$ ne treba da je manja od one koja predstavlja prag za slučaj niske seizmičnosti, a preporučena vrednost iznosi 0,20g.

Zidane zgrade moraju se sastojati od tavanica i zidova, koji su povezani u dva ortogonalna horizontalna pravca i u vertikalnom pravcu. Spoj između tavanica i zidova mora se adekvatno obezbediti čeličnim zategama (spinama) ili armiranobetonskim horizontalnim serklažima. Može se koristiti bilo koji tip tavanica ako su ispunjeni opšti zahtevi za kontinuitet i efektivno delovanje dijafragme. Smičući zidovi, tj. zidovi koji služe za prihvatanje seizmičkih sila, moraju se postaviti u najmanje dva ortogonalna pravca, a treba da ispune određene geometrijske zahteve, a zidovi koji ne zadovoljavaju minimalne geometrijske zahteve se mogu razmatrati kao sekundarni seizmički elementi.

Za nearmirane zidove, koji zadovoljavaju odredbe EN 1998-1, dodatno se zahtevaju horizontalne betonske grede (serklaži) ili, alternativno, čelične zatege koje se moraju postaviti u ravni zida u nivou svake tavanice, čiji razmak ni u kom slučaju ne sme biti veći od 4,0 m. Ove grede ili zatege moraju formirati kontinualne obodne elemente koji su fizički povezani. Horizontalne betonske grede (serklaži) moraju imati podužnu armaturu čiji poprečni presek nije manji od 200 mm².

Za zidove sa serklažima dodatno se zahteva da horizontalni i vertikalni vezni elementi (serklaži) moraju biti međusobno povezani i usidreni za elemente glavnog konstrukcijskog sistema. Da bi se dobila kvalitetna veza između serklaža i zidanog dela, beton ovih elemenata se mora ugraditi nakon izvođenja zidanog dela. Dimenzije poprečnog preseka i horizontalnih i vertikalnih serklaža ne smeju biti manje od 150 mm. Kod dvoslojnih zidova, debljina veznih elemenata (seklaža) treba da obezbedi povezivanje oba sloja i njihovo efektivno utezanje. Vertikalni serklaži za utezanje zidova se moraju postaviti: a) na slobodnim krajevima svih konstrukcijskih elemenata zida; b) sa obe strane svakog otvora u zidu čija je površina veća od 1,5 m²; c) unutar zida, ako je potrebno, da razmak između serklaža ne bude veći od 5 m; i d) kod svakog ukrštanja zidova, gde god su vertikalni serklaži na rastojanju većem od 1,5 m. Horizontalni serklaži postavljaju se u ravni zida u nivou svake tavanice, pri čemu razmak ni u kom slučaju ne sme biti veći od 4 m. Oko podužne armature treba da se postave uzengije prečnika ne manjeg od 5 mm i na razmaku ne manjem od 150 mm. Nastavljanje armature mora se postići preklapima na dužini ne manjoj od 60 prečnika šipki. Čelik za armiranje mora biti klase B ili C u saglasnosti sa EN 1992-1-1:2004, tabela C.1.

Za armirane zidove se zahteva da se horizontalna armatura postavlja u spojnice ili u žlebove u elementima za zidanje, na vertikalnom razmaku ne većem od 600 mm. U posebne elemente za zidanje sa udubljenjima, mora se postaviti armatura za nadvoje i parapetne grede (nadzidke). Moraju se koristiti čelične armaturene šipke prečnika ne manjeg od 4 mm, savijene oko vertikalnih šipki na ivicama zida. Minimalni procenat horizontalne i vertikalne armature u zidu, u odnosu na celu površinu preseka, ne sme biti manji od 0,05%, odnosno 0,08%, respektivno. Mora se izbeći visok procenat horizontalne armature koji bi doveo do loma pritisnutih elemenata za

zidanje pre tečenja čelika. Vertikalna armatura mora biti smeštena u odgovarajući džepovima, šupljinama ili otvorima elemenata za zidanje, poprečnog preseka ne manjeg od 200 mm²: a) na oba slobodna kraja svakog zidnog elementa; b) kod svakog ukrštanja zidova; i c) unutar zida, tako da razmak između ove armature ne bude veći od 5 m. Parapetne grede i nadvoji se moraju pravilno povezati sa zidanim delovima susednih zidova i pričvrstiti za njih horizontalnom armaturom.

Zahvalnost

Rad je urađen u okviru naučno-istraživačkog projekta TR 36043 „Razvoj i primena sveobuhvatnog pristupa projektovanju novih i proceni sigurnosti postojećih konstrukcija za smanjenje seizmičkog rizika u Srbiji“ koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA:

- [1] Eurocode 6 – Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures (European standard EN 1996-1-1:2005), 2005, pp. 123.
- [2] CEN-EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2004. Prevod – Građevinski fakultet, Beograd, 2009
- [3] Lađinović Đ., Ačić M.: Koncept projektovanja zidanih zgrada u seizmičkim područjima prema Evroko-
du EN 1998-1. Izgradnja 65, br. 5-6, Beograd, 2009, str. 289-302
- [4] M. Muravljev, B. Stevanović: Zidane i drvene konstrukcije zgrada, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2003.