

Pojačanje fasadnih zidanih zidova čeličnim okvirima

Hrvoje Vukić¹, Marko Bartolac², Josip Galić³

¹Sveučilište u Zagrebu Arhitektonski fakultet, hrvoje.vukic@arhitekt.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, marko.bartolac@grad.unizg.hr

³Sveučilište u Zagrebu Arhitektonski fakultet, josip.galic@arhitekt.hr

Sažetak

Zidane zgrade čine velik dio povijesnoga fonda, a zbog male vlačne i posmične otpornosti nearmiranog ziđa posebno su osjetljive na potresno djelovanje. U radu se daje pregled najčešćih tehnika seizmičkog pojačanja, s naglaskom na rješenja kojima se postiže optimalno pojačanje imajući u vidu složenost intervencije i povezivanje s energetsom obnovom. Kao istraživački zanimljivo rješenje izdvojeno je pojačanje čeličnim okvirima, uz razmatranje krutosti okvira, načina sidrenja i povezivanja zategama tijekom obnove ovojnice postojećih zgrada iz razloga jer bi se takvi okviri mogli ugraditi zajedno s vanjskom stolarijom u sklopu energetske obnove pročelja zgrade.

Ključne riječi: nearmirano ziđe, seizmičko pojačanje, fasadni zid, otvor u zidu, čelični okvir, energetska obnova

Retrofitting of facade masonry walls with steel frames

Abstract

Masonry buildings constitute a large part of the historic building stock and, due to the low tensile and shear resistance of unreinforced masonry, they are particularly vulnerable to seismic action. This paper provides an overview of the most common seismic strengthening techniques, with an emphasis on solutions that enable optimal strengthening while considering the complexity of the intervention and its integration with energy retrofit measures. Strengthening with steel frames is identified as a particularly interesting research direction, with consideration given to frame stiffness, anchorage details, and connection using steel ties during the renovation of the building facade. Such frames could potentially be installed together with external windows as part of the energy retrofit of the building facade.

Key words: unreinforced masonry, seismic strengthening, facade wall, wall opening, steel frame, energy retrofit

1 Uvod

Zidane građevine pripadaju najstarijim i najraširenijim konstrukcijskim sustavima, a značajan dio postojećega fonda nalazi se u seizmički aktivnim područjima. Kod nearmiranog zida nosivost na tlačna naprezanja je relativno povoljno s obzirom na njihovu debljinu, ali je otpornost takvog zida na vlačna i posmična djelovanja mala, pa se tijekom djelovanja potresa često razvijaju mehanizmi oštećenja i gubitka nosivosti [1, 2]. Posebno su osjetljive zgrade projektirane i izvedene prije suvremenih protupotresnih propisa jer njihov konstruktivni sustav, nedovoljna povezanost zidova i stropova te stanje samog građevnog sredstva jednostavno ne može zadovoljiti današnje zahtjeve važećih propisa na seizmičko djelovanje [3, 4].

U povijesnim gradskim cjelinama problem otpornosti na seizmičko djelovanje dodatno se preklapa s potrebom očuvanja arhitektonskog identiteta i s energetsom obnovom ovojnice. Primjer zagrebačkih donjogradskih blokova pokazuje velik udio zidanih zgrada s punom opekom, vapnenim ili vapneno-cementnim mortom te drvenim međukatnim konstrukcijama [5]. Intervencije na pročeljima na takvim zgradama zahtijevaju oprez jer se moraju uravnotežiti zahtjevi za smanjenje potrošnje energije, podići energetska učinkovitost, te također očuvati povijesno oblikovni detalji i osigurati propisana uporabljivost građevine [6]. Istraživački problem doktorskog rada jest pojačanje fasadnih zidanih zidova s otvorima na način koji je konstrukcijski učinkovit, minimalno invazivan prema pročelju i izvediv u sklopu energetske obnove ovojnice. Cilj je eksperimentalno i numerički odrediti doprinos čeličnih okvira u zoni postojećih otvora, s naglaskom na utjecaj krutosti okvira, načina sidrenja i povezivanja susjednih otvora zategama, budući da je dosad istražen samo doprinos okvira ugrađenog nakon izvedbe novog otvora u zidu [31].



Slika 1. Razdoblja izgradnje građevnog fonda u Povijesnoj urbanoj cjelini Grada Zagreba [5]

2 Problematika fasadnih zidova s otvorima

Tipični konstruktivni sustav zgrada u donjogradskom bloku jest da su glavne nosive osi u uzdužnom smjeru postavljene uglavnom u tri osi, središnjeg dijela i vanjskih obodnih koju čine fasadni zidovi. U poprečnom smjeru to su uglavnom zabatni zidovi puno manjih dimenzija i krutosti. Fasadni zidovi povijesnih zidanih zgrada rijetko su puni zidni paneli, jer prema uličnoj strani imaju veliki broj otvora. Otvori za prozore i vrata dijele ih na međuprozorske stupce i nadvoje, pa seizmički odgovor ovisi o lokalnoj nosivosti tih elemenata i o njihovoj međusobnoj povezanosti. Kod djelovanja horizontalne sile od potresa u ravnini zida, takvi zidovi mogu otkazati savijanjem (prevrtanje), tlačnim drobljenjem, klizanjem po sljubnici ili dijagonalnim vlačnim slomom. Kod nepovoljnog omjera visine i širine međuprozorskog dijela, niske tlačne sile ili lošeg vezivnog sredstva (morta), posmični slom i dijagonalne vlačne pukotine mogu se razviti naglo, uz ograničenu duktilnost i malu sposobnost disipacije energije [7, 10, 12].

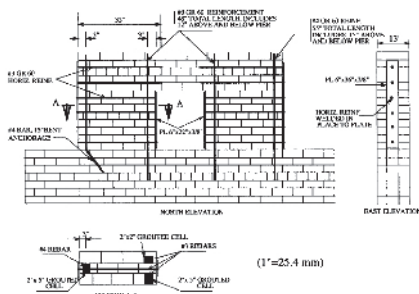
Ponašanje zidanog pročelja s otvorima stoga se ne može promatrati samo kao problem globalne nosivosti zgrade. Lokalni gubitak nosivosti međuprozorskog zida može promijeniti raspodjelu sila, dovesti do oštećenja nadvoja i ugroziti vezu pročelja s poprečnim zidovima ili stropovima. U zgradama s fleksibilnim drvenim stropovima dodatno je važno osigurati prijenos horizontalnih sila i smanjiti mogućnost izbacivanja zidova izvan ravnine [2, 9]. Za građevine kulturne baštine i za reprezentativna pročelja prednost imaju mjere koje povećavaju cjelovitost i nosivost, ali ne uvode nepotrebnu masu i ne mijenjaju bitno izgled građevine [8].

3 Pregled tehnika pojačanja zidanih zidova

Prva konkretnija pravila za obnovu i pojačanje zidanih zgrada nastajala su nakon velikih potresa u Italiji, osobito nakon događaja u Friuliju i Campaniji/Basilicatu. Primjenjivale su se metode injektiranja i zapunjavanja šupljina, armiranobetonske obloge (torkreti) i okviri, ojačanja čeličnim trakama, nove međukatne ploče i različiti oblici povezivanja zidova [11]. Iskustvo je pokazalo da učinkovitost pojačanja ne ovisi samo o povećanju proračunske otpornosti, nego i o kompatibilnosti materijala, reverzibilnosti i mogućnosti kontrole izvedbe.

Danas se za pojačanje zida koriste tradicionalne i suvremene metode. Injektiranje i ponovno fugiranje mogu poboljšati homogenost zida i posmičnu otpornost, ali njihova učinkovitost ovisi o vrsti zida, volumenu šupljina, kvaliteti pripreme i dubini zahvata [13, 19]. Armiranobetonske ili cementne obloge (torkreti) mogu znatno povećati nosivost i krutost, ali su invazivne, povećavaju masu, mijenjaju paropropusnost i često nisu prikladne za pročelja koja treba očuvati te imaju problem ovijanja i korozije [15, 24]. Kompozitni sustavi, primjerice FRP, FRCM, TRM

i SRG, omogućuju laku primjenu i ne mijenjaju ponašanje zida i masu značajno, no razlikuju se prema kompatibilnosti s podlogom, ponašanju spoja i zahtjevima za izvedbu [18, 20, 21, 26]. Dodatno se istražuju naknadno napinjanje, SFRM obloge, izolacija temelja i sustavi s čeličnim trakama, pri čemu svaka metoda ima ograničenja vezana uz cijenu, dostupnost, razinu intervencije i primjenjivost na vrijednim pročeljima [22, 23, 25, 27].



Slika 2. Primjer pojačanja zidanog zida s otvorom ugrađenim čeličnim šipkama i pločama [13]

Za fasadne zidove s otvorima posebno su važna pojačanja međuprozorskih dijelova i zona oko otvora. Ispitivanja pojačanih zidanih stupaca pokazala su da pravilno uvedena horizontalna i vertikalna armatura može povećati posmičnu nosivost i deformacijsku sposobnost, ali i promijeniti oblik sloma [12, 13]. Abrams i suradnici usporedili su više tehnika sanacije međuprozorskih dijelova i napomenuli da neojačano ziđe u određenim uvjetima može imati stabilno savijanje i znatnu deformacijsku sposobnost [17].

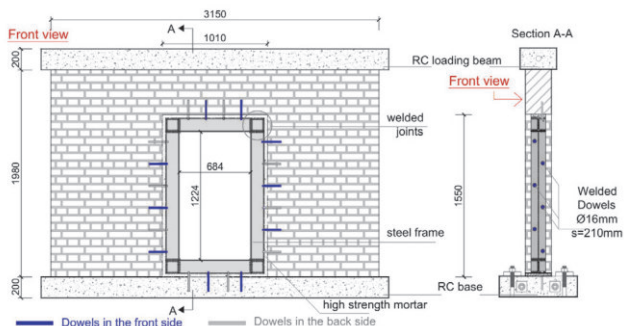
4 Pojačanje čeličnim elementima i čeličnim okvirima

Čelik je za pojačanje zidanih zidova zanimljiv zbog velike vlačne nosivosti, relativno male dodane mase, mogućnosti mehaničkog sidrenja i potencijalne reverzibilnosti. U zidovima s otvorima čelični elementi mogu djelovati kao rubna pojačanja, spregnuti okviri, zatege ili veze između lica zida, pri čemu preuzimaju vlačne sile koje ziđe ne može preuzeti i ograničavaju otvaranje glavnih pukotina. Mjerodavan pritom nije samo kapacitet čeličnog profila, nego i stvarna krutost spoja čelik-ziđe, lokalna nosivost sidara, posmični prijenos na kontaktu [14, 15, 16, 31].

Čelični prstenasti okvir oko otvora predstavlja jasno definiranu varijantu ovog pristupa. Oña Vera i suradnici ispitali su zid od pune opeke s novim izvedenim otvorom ojačanim zatvorenim čeličnim okvirom od četiri zavarena HEA140 profila, uz sidrenje glatkim moždanicima Ø16 mm u okolno ziđe i zapunjavanje razmaka visokokvalitetnim mortom [31]. Kvazistatičko cikličko ispitivanje i numerička

analiza pokazali su da takav sustav može vratiti posmičnu nosivost i duktilnost razine punog zida, ali ne i početnu bočnu krutost. Pritom je dosad ispitana samo jedna konfiguracija okvira, i to isključivo kao kompenzacija naknadno izvedenog otvora u punom zidu; doprinos okvira različite krutosti i okvira međusobno povezanih zategama u dostupnoj literaturi nije analiziran.

U nastavku doktorskog istraživanja stoga će se novo ispitivati: utjecaj krutosti čeličnog okvira (izbora profila i detalja spojeva) na nosivost, krutost i mehanizam sloma zida s otvorom; način sidrenja okvira u okolno zide i njegov utjecaj na prijenos sila, lokalno drobljenje opeke i morta te klizanje po sljubnicama; učinak povezivanja susjednih otvora pasivnim čeličnim zategama na preraspodjelu sila između međuprozorskih stupaca; numeričko modeliranje sustava zide-okvir-sidra kalibrirano na eksperimentalnim rezultatima [28, 29, 30]; te usporedba različitih varijanti pojačanja (neojačani zid s otvorom, prstenasti okvir, okviri različite krutosti, okviri povezani zategama). Očekivani izvorni doprinos jest kvantificiranje utjecaja navedenih parametara i izrada smjernica za projektiranje čeličnih okvira kao pojačanja fasadnih zidanih zidova.



Slika 3. Shematski prikaz čeličnog prstenastog okvira po opsegu novog otvora, sa zavarenim HEA profilima i moždanicima Ø16 mm [31]

5 Zaključak

Seizmička obnova povijesnih zidanih zgrada zahtijeva rješenja koja povećavaju nosivost, duktilnost i cjelovitost konstrukcije, ali pritom poštuju ograničenja zaštite pročelja i zahtjeve energetske obnove. Pregled literature pokazuje da postoje brojne učinkovite metode pojačanja nearmiranog zida, no velik dio njih uvodi znatnu promjenu mase, krutosti, paropropusnosti ili izgleda građevine. Čelični elementi predstavljaju povoljnu skupinu rješenja jer mogu preuzeti vlačna naprezanja, stabilizirati međuprozorske dijelove i kontrolirati mehanizme raspucavanja uz relativno malu dodanu masu.

Rezultati ispitivanja čeličnog prstenastog okvira pokazuju da zatvoreni okvir oko otvora može obnoviti nosivost i duktilnost, ali da krutost sustava ostaje osjetljiva na profil, sidrenje i stvarni kontakt s okolnim zidom [31]. Zbog toga je pojačanje čeličnim okvirima vrijedno daljnje provjere: može se uklopiti u zonu otvora, povezati sa zahvatima na stolariji i ovojnici te ostati gotovo nevidljivo na pročelju. Dok je ponašanje prstenastog okvira oko novoizvedenog otvora poznato [31], utjecaj krutosti okvira, načina sidrenja i povezivanja susjednih otvora zategama dosad nije istražen; sustavna eksperimentalna i numerička usporedba tih varijanti činit će izvorni doprinos nastavka istraživanja i podlogu za smjernice za primjenu u obnovi fasadnih zidanih zidova.

Literatura

- [1] S. Bhattacharya, S. Nayak, i S. C. Dutta, "A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, sv. 7, str. 51-67, 2014.
- [2] M. Tomažević, "Protupotresna obnova postojećih zidanih građevina", *Građevinar*, sv. 52, izd. 11, str. 683-693, 2000.
- [3] M. Tomažević, *Earthquake-resistant design of masonry buildings*. River Edge, NJ: Imperial College Press, 1999.
- [4] HRN EN 1998-3: Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 3. dio: Ocjenjivanje i obnova zgrada. Hrvatski zavod za norme, 2011.
- [5] Z. Veršić, I. Muraj, i M. Binički, "Model ugrađene najamne zgrade zagrebačkog donjogradskog bloka", *Prostor*, sv. 23, izd. 2, str. 236-249, 2015.
- [6] A. L. Webb, "Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 77, str. 748-759, 2017.
- [7] M. Tomažević, "Seismic design of masonry structures", *Progress in Structural Engineering and Materials*, sv. 1, izd. 1, str. 88-95, 1997.
- [8] A. Borri i M. Corradi, "Architectural Heritage: A Discussion on Conservation and Safety", *Heritage*, sv. 2, izd. 1, str. 631-647, 2019.
- [9] I. N. Psycharis, S. J. Pantazopoulou, i M. Papadrakakis, ur., *Seismic Assessment, Behavior and Retrofit of Heritage Buildings and Monuments*, sv. 37. Cham: Springer, 2015.
- [10] D. F. D'Ayala i S. Paganoni, "Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic city centre after 6th April 2009", *Bulletin of Earthquake Engineering*, sv. 9, izd. 1, str. 81-104, 2011.

- [11] C. Modena, "Repair and Upgrading Techniques of Unreinforced Masonry Structures Utilized after the Friuli and Campania/Basilicata Earthquakes", *Earthquake Spectra*, sv. 10, izd. 1, str. 171-185, 1994.
- [12] H. Sucuoglu i H. D. McNiven, "Seismic Shear Capacity of Reinforced Masonry Piers", *Journal of Structural Engineering*, sv. 117, izd. 7, str. 2166-2185, 1991.
- [13] T. Manzouri, M. P. Schuller, P. B. Shing, i B. Amadei, "Repair and Retrofit of Unreinforced Masonry Structures", *Earthquake Spectra*, sv. 12, izd. 4, str. 903-922, 1996.
- [14] D. C. Rai i S. C. Goel, "Seismic Strengthening of Unreinforced Masonry Piers with Steel Elements", *Earthquake Spectra*, sv. 12, izd. 4, str. 845-862, 1996.
- [15] A. Borri, M. Corradi, G. Castori, i A. Molinari, "Stainless steel strip - A proposed shear reinforcement for masonry wall panels", *Construction and Building Materials*, sv. 211, str. 594-604, 2019.
- [16] J. Lee, K. Kim, H. Kim, J. Kim, S. Oh, i S. Lee, "Seismic Retrofitting Effects of Retrofitted Unreinforced Masonry Walls Using Metal Laths and Steel Plates", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, sv. 14, izd. 3, str. 63-70, 2014.
- [17] D. Abrams, T. Smith, J. Lynch, i S. Franklin, "Effectiveness of Rehabilitation on Seismic Behavior of Masonry Piers", *Journal of Structural Engineering*, sv. 133, izd. 1, str. 32-43, 2007.
- [18] F. Parisi, C. Menna, i A. Prota, "Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) composites", u *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, str. 199-227, 2019.
- [19] M. Gams, M. Tomažević, i A. Kwiecień, "Strengthening Brick Masonry by Repointing - An Experimental Study", *Key Engineering Materials*, sv. 624, str. 444-452, 2014.
- [20] S. De Santis i G. de Felice, "Steel reinforced grout systems for the strengthening of masonry structures", *Composite Structures*, sv. 134, str. 533-548, 2015.
- [21] L. A. S. Kouris i T. C. Triantafillou, "State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM)", *Construction and Building Materials*, sv. 188, str. 1221-1233, 2018.
- [22] J. R. Bean Popehn, A. E. Schultz, i C. R. Drake, "Behavior of Slender, Posttensioned Masonry Walls under Transverse Loading", *Journal of Structural Engineering*, sv. 133, izd. 11, str. 1541-1550, 2007.
- [23] L. Facconi, A. Conforti, F. Minelli, i G. A. Plizzari, "Improving shear strength of unreinforced masonry walls by nano-reinforced fibrous mortar coating", *Materials and Structures*, sv. 48, izd. 8, str. 2557-2574, 2015.
- [24] M. Shabdin, N. K. A. Attari, i M. Zargaran, "Experimental study on seismic behavior of Un-Reinforced Masonry (URM) brick walls strengthened with shotcrete", *Bulletin of Earthquake Engineering*, sv. 16, izd. 9, str. 3931-3956, 2018.

- [25] C. Wang, V. Sarhosis, i N. Nikitas, "Strengthening/Retrofitting Techniques on Unreinforced Masonry Structure/Element Subjected to Seismic Loads: A Literature Review", *The Open Construction and Building Technology Journal*, sv. 12, izd. 1, str. 251-268, 2018.
- [26] J. Galič, "Ojačanje zidanih stupova i zidova uporabom polimera armiranih vlaknima", doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, 2011.
- [27] M. Corradi, A. Di Schino, A. Borri, i R. Rufini, "A review of the use of stainless steel for masonry repair and reinforcement", *Construction and Building Materials*, sv. 181, str. 335-346, 2018.
- [28] G. M. A. Schreppers, A. Garofano, F. Messali, i J. G. Rots, "DIANA Validation report for Masonry modelling". DIANA FEA B.V., 2016.
- [29] M. Kržan, S. Gostič, S. Cattari, i V. Bosiljkov, "Acquiring reference parameters of masonry for the structural performance analysis of historical buildings", *Bulletin of Earthquake Engineering*, sv. 13, izd. 1, str. 203-236, 2015.
- [30] L. Albanesi, P. Morandi, F. Graziotti, T. L. Piani, A. Penna, i G. Magenes, "Lateral Strength of URM Piers: Comparison Between Codified Criteria and In-Plane Test Results", u *Proceedings of the International Masonry Society Conferences*, str. 1656-1667, 2018.
- [31] M. Y. Oña Vera, G. Metelli, J. A. O. Barros, i G. A. Plizzari, "Effectiveness of a steel ring-frame for the seismic strengthening of masonry walls with new openings", *Engineering Structures*, sv. 226, 111341, 2021.