

Primljen / Received: 24.6.2016.

Ispravljen / Corrected: 28.1.2017.

Prihvaćen / Accepted: 28.2.2017.

Dostupno online / Available online: 10.8.2017.

Numerička analiza ab zida s otvorom ojačanim CFRP-om podvrgnutim ekscentričnim opterećenjima

Autori:



Dr.sc. **Hussam K. Risan**, dipl.ing.građ.
Sveučilište AL-Nahrain
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
Bagdad, Irak
dr.hussamrisan@gmail.com



Dr.sc. **Ibrahim S. I. Harba**, dipl.ing.građ.
Sveučilište AL-Nahrain
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
Bagdad, Irak
ibraharba@yahoo.com



Dr.sc. **Abdulkhalik J. Abdulridha**, dipl.ing.građ.
Sveučilište AL-Nahrain
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
Bagdad, Irak
abdulkalikjabbar@yahoo.com

Pregledni rad

Hussam K. Risan, Ibrahim S. I. Harba, Abdulkhalik J. Abdulridha

Numerička analiza ab zida s otvorom ojačanim CFRP-om podvrgnutim ekscentričnim opterećenjima

U radu je provedeno numeričko ispitivanje središnjeg otvora u ab zidovima s CFRP ojačanjem i bez njega podvrgnutim ekscentričnom vertikalnom opterećenju s linearnim prirastom. Šest zidnih ploča u mjerilu 1 : 2 modelirane su u računalnom programu ABAQUS u svrhu procjene učinka ojačanja. Analiza je pokazala da na nosivost zida u smislu maksimalnog opterećenja utječe debljina CFRP-a. Utvrđeno je da varijacija debljine CFRP-a ima značajan utjecaj na krajnju nosivost, pojavu pukotina, glavnu plastičnu deformaciju betona i ekvivalentno naprezanje.

Ključne riječi:

zid nosiv u dva smjera, ab zid s otvorom, CFRP, model plastičnoga popuštanja (raspucavanja) betona

Subject review

Hussam K. Risan, Ibrahim S. I. Harba, Abdulkhalik J. Abdulridha

Numerical analysis of RC wall with opening strengthened by CFRP subjected to eccentric loads

Numerical analysis of the central hole in RC walls with and without CFRP, subjected to uniform eccentric vertical line load, is presented in this paper. Six half-scale wall panels were modelled using the ABAQUS software to estimate the strengthening effects. The analysis revealed that the load capacity of the wall in terms of maximum load carrying capacity is influenced by CFRP thickness. It was found that the variation of CFRP thickness greatly influences the ultimate load carrying capacity, crack patterns, principal plastic strain of concrete, and equivalent stress.

Key words:

RC wall with opening, CFRP, plastic damage (cracking) model for concrete

Übersichtsarbeit

Hussam K. Risan, Ibrahim S. I. Harba, Abdulkhalik J. Abdulridha

Numerische Analyse einer Stahlbetonwand mit einer CFRP-verstärkten Öffnung, die exzentrischen Belastungen ausgesetzt wird

In der Abhandlung wurde eine numerische Untersuchung der mittleren Öffnung in Stahlbetonwänden mit und ohne CFRP-Verstärkung durchgeführt, die einer exzentrischen vertikalen Belastung mit linearer Verstärkung unterzogen wurden. Sechs Wandplatten in einem Maßstab 1 : 2 wurden im Computerprogramm ABAQUS zum Zwecke der Einschätzung der Verstärkungswirkung modelliert. Die Analyse zeigte, dass die Tragfähigkeit der Wand im Sinne der maximalen Belastung die Stärke des CFRP beeinflusst. Festgestellt wurde, dass die Variation der Stärke des CFRP wesentlichen Einfluss auf die endgültige Tragfähigkeit, das Auftreten von Rissen, die plastische Hauptverformung des Betons und die Vergleichsspannung hat.

Schlüsselwörter:

Stahlbetonwand mit Öffnung, CFRP, Modell der plastischen Abspannung (Rissbildung) des Betons

1. Uvod

Zidovi se smatraju važnim građevinskim elementom koji podnose bočna opterećenja zbog velike krutosti u ravnini. U projektiranju konstrukcija uglavnom se zahtijevaju zidovi s otvorima. Općenito, područja diskontinuiteta u zidovima zbog otvora mogu biti izvor koncentracije naprezanja koji se ne mogu klasificirati kao glavni uzroci koji projektiranje čine jako složenim [1-3]. Zbog velike sposobnosti preraspodjele naprezanja u zidovima od armiranog betona, mali otvor nema značajan utjecaj na opće ponašanje zida. No, veliki otvori dovode do značajnog smanjenja krutosti i nosivosti zida [4]. U posljednje vrijeme, upotreba polimera armiranog karbonskim vlaknima (CFRP) povećava čvrstoću postojećih konstrukcija od armiranog betona zbog izvrsnih karakteristika, poput jednostavnosti ugradnje, visoke otpornosti, visokog omjera čvrstoće i težine te trajnosti [5, 6].

Norma Američkog instituta za beton ACI 318M-14 [7] predviđena je samo za nosive zidove od armiranog betona koji su pridržani na vrhu i na dnu (nosivi u jednom smjeru). Australaska norma AS3600-2009 [8] uključuje učinke bočnih pridržanja. Te norme ne sadrže učinke na nosivost zbog pridržanja na tri i četiri strane zida (nosivost u 2 smjera). Oni su također ograničeni na zidove od armiranog betona s koeficijentom vitkosti manjim od 30 i bez otvora.

U zadnjem desetljeću CFRP je korišten za ojačanje stupova i greda za savijanje, smicanje i torziju. Danas, kao rezultat visoke čvrstoće CFRP-a u odnosu na malu težinu, jednostavne montaže i visoke otpornosti na koroziju, upotreba CFRP-a pričvršćenog na zidove od armiranog betona s otvorom postala je popularna, budući da CFRP pomaže u sprječavanju krugog loma i smanjenju razvoja pukotina u uglovima otvora. Godine 1999., Lombard i suradnici [9] proučavali su valjanost pojačanja zidova od armiranog betona s tkaninama od vlakana ispitivanjem četiri zida pod nazovistalnim cikličkim opterećenjem sa CFRP pojačanjem koje se sastoji od tkanina od vlakana postavljenim na obje strane zidova u jednom ili dva smjera. Prema zabilježenim rezultatima eksperimenta, oni razvijaju teorijski model za određivanje nosivosti na savijanje neojačanih AB zidova i zidova koji su popravljani i pojačani CFRP-om. U 2000. godini, Sugiyama i sur. [10] proučavali su seizmičko ponašanje osam zidova od armiranog betona s otvorima pojačanim pomoću FRP tkanina koji su klasificirani kao nenosivi elementi. Zaključili su da čak i ako se povećala maksimalna nosivost zidova, njihovo cjelokupno ponašanje ostalo je jednako. Antoniadis i Kappos su 2003. godine proučavali metodu ojačanja zidova od armiranog betona s malim koeficijentom vitkosti. Zidovi su projektirani prema zahtjevima ACI norme. U tom istraživanju zidovi su bili izloženi cikličkom opterećenju do sloma u prvom koraku. U drugom koraku ispitani zidovi su popravljani i potom pojačani tkaninama od polimernih vlakana. Rezultati su pokazali da se pojačanjima zida tkaninama od vlakana čvrstoća zida povećala od 2 do 32 posto. U 2005. Li i sur. [12] proučavali su točnost numeričke metode za predviđanje ponašanja posmičnih elemenata nosivih u jednom smjeru, pojačanih CFRP-om. U tom

istraživanju model temeljen na modelu betona s mogućnosti oštećenja u plastičnom području korišten je za modeliranje ponašanja betona pri ponavljanoj opterećenju, a za modeliranje kompatibilnosti deformacija zbog polimera armiranog vlaknima korišten je element opruge (link, spring..). Usporedba računalnih i eksperimentalnih rezultata pokazala je da se ponašanje traka od vlakana za pojačanje AB posmičnih elemenata može predvidjeti pomoću metode konačnih elemenata.

U opsežnim istraživanjima 2002. Doh i sur. [13] Doh i Fragomeni [14] iz 2005. godine proučavali su ponašanje posmičnih elemenata nosivih u jednom i dva smjera s koeficijentom vitkosti između 25 i 40. Također su izveli proračunski izraz. Nastavak ovog istraživanja prezentiran je u izvještaju o ispitivanjima 12 uzoraka AB zidova s otvorima u mjerilu 1:2. U navedenom radu dane su pretpostavke eksperimenta, karakteristična slika pukotina, granična opterećenja te odgovarajući progibi. U 2013. godini, Mohammed i Ean proučavali su progibe armiranobetonskih posmičnih elemenata s otvorima ojačanim CFRP-om testiranjem zidne ploče pod jednakim aksijalnim ekscentričnim opterećenjem. Korištene su dvije konfiguracije CFRP ojačanja (uzduž stranica otvora i pod kutom od 45° prema otvoru). Uočili su da korištenje CFRP povećava maksimalnu nosivost AB zidova i predložili su empirijski izraz. 2014., Lima i suradnici [1] proučili su ponašanje AB zidova s otvorom. Ispitali su šest zidova u mjerilu 1:2 s koeficijentom vitkosti 30 pridržanim na dvije i tri strane podvrgnutim jednolikom uzdužnom ekscentričnom opterećenju i pojačanim dvjema konfiguracijama CFRP-a oko otvora. Zaključili su da CFRP povećava konačnu nosivost zidova pod različitim uvjetima opterećenja. Ovo ispitivanje je prvo istraživanje u vezi s korištenjem CFRP-a za pojačanje AB zidova s velikim koeficijentom vitkosti te pridržanjima s tri strane.

Dakle, daljnja ispitivanja su još uvijek potrebna kako bi se utvrdilo ponašanje AB zidova s otvorima pojačanim CFRP-om s različitim rubnim uvjetima. Također, većina ranijih istraživanja bila su samo eksperimentalna, bez trodimenzionalnih nelinearnih numeričkih analiza i modela. Stoga se u ovom ispitivanju proučava utjecaj primjene CFRP-a na ponašanje AB zidova s otvorima pod jednolikim linearnim ekscentričnim opterećenjem korištenjem računalne analize u računalnom programu ABAQUS. U ovom istraživanju numerički model potvrđen je eksperimentalnim podacima Lima i sur. [1]. Nakon toga proučavani su učinci varijacije debljine CFRP-a.

2. Pregled eksperimentalnog programa

Prema rezultatima Lima i sur. [1], eksperimentalno ispitani AB zidovi s otvorom pojačani CFRP-om i bez CFRP-a korišteni su u ovom radu radi kalibriranja rezultata proračuna i provjere njihove primjene. Ispitano je šest AB zidova pridržanih s dvije i tri strane (u mjerilu 1:2) s otvorom veličine 14 % površine zida. Svi zidovi imaju omjer širine (V/D), koeficijent vitkosti (V/t_w) i omjer debljine (D/t_w) od 1, 30 i 30. Zidovi su projektirani kao:

1. W1-T0, nosivi u jednom smjeru pridržani s dvije strane bez CFRP-a
2. W2-T1, nosivi u jednom smjeru pridržani s dvije strane sa CFRP trakama dijagonalno prema otvoru

3. W3-T1, nosivi u jednom smjeru pridržani s dvije strane sa CFRP trakama duž strana otvora
4. W4-T0, nosivi u dva smjera pridržani s tri strane bez CFRP-a
5. W5-T1, nosivi u dva smjera pridržani s tri strane sa CFRP trakama dijagonalno prema otvoru
6. W6-T1, nosivi u dva smjera pridržani s tri strane sa CFRP-om duž strana otvora.

Tablica 2. Dimenzije primijenjenih CFRP traka [1]

Duljina otvora [mm]	Širina otvora [mm]	Širina CFRP-a [mm]	Duljina CFRP-a [mm]
450	450	105	770 i 450

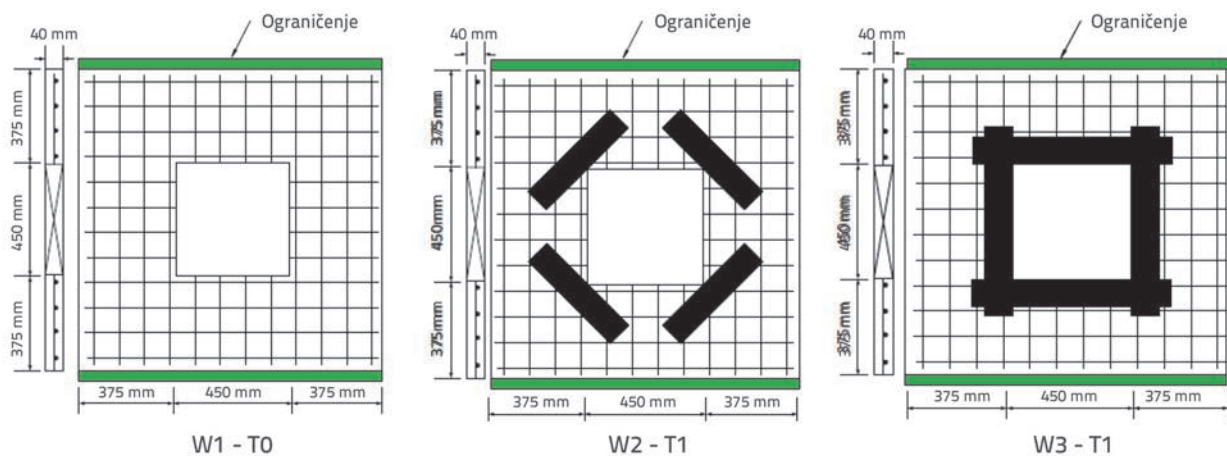
Svi zidovi bili su ispitani do sloma pod jednolikim uzdužnim opterećenjem s ekscentričnošću ($t_w/6$). Zabilježene su slike pukotina i nosivost. Omjer pojačanja bio je isti u svim uzorcima zidova (promjer 4 mm, razmak od 100 mm i $f_v = 450$ MPa) u oba smjera i smješten centralno u presjeku zida. Također, omjer pojačanja odgovara minimalnim standardnim zahtjevima. Svojstva CFRP-a i dimenzije navedeni su u tablicama 1. i 2., a slike 1. i 2. prikazuju uzorke zidova i konfiguraciju CFRP-a.

3. Metode i materijali

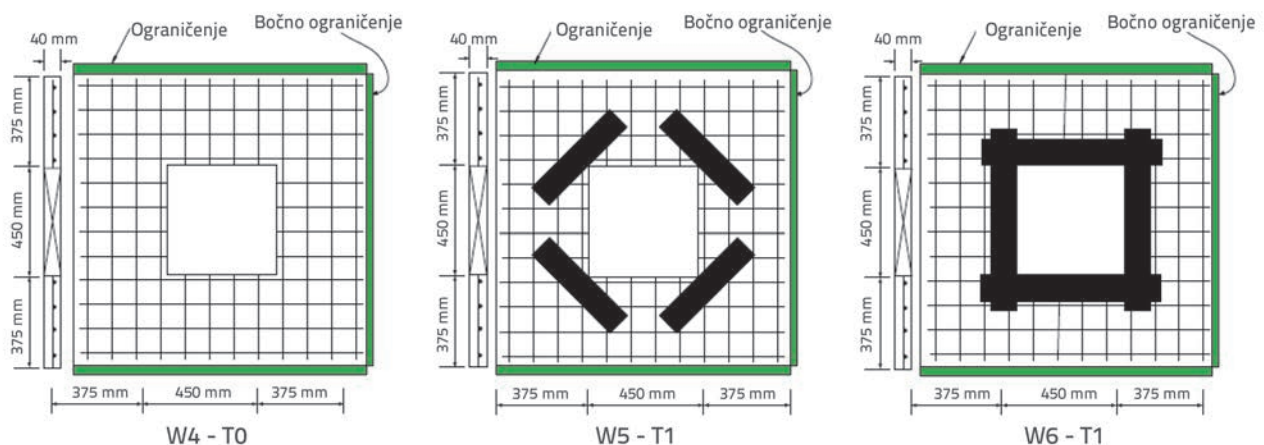
U ovom istraživanju nelinearna računalna analiza provedena je pomoću računalnog programa ABAQUS s konačnim elementima. Za modeliranje zida od armiranog betona korišteni su C3D4R (tetraedar s četiri čvora i volumni elementi koji u svakom čvoru imaju tri translacijska stupnja slobode. U betonskim elementima, postoje dvije metode za modeliranje pojačanja šipkama u ABAQUS-u. Armatura se može modelirati kao sloj unutar betonskog presjeka ili diskretno kao štapni element koji je ugrađen u beton. U ovom istraživanju armatura je modelirana u obliku štapnih elemenata (konačnih elemenata obostrano zglobnog štapa) (T3D2) ugrađenih u betonske prostorne elemente [16]. CFRP traka predstavljena je s 4-čvornim elementima ljuske. Treba napomenuti da su u ABAQUS-u korišteni Odabrani parametri

Tablica 1. Svojstva CFRP-a: Sika Wrap-23°C [1]

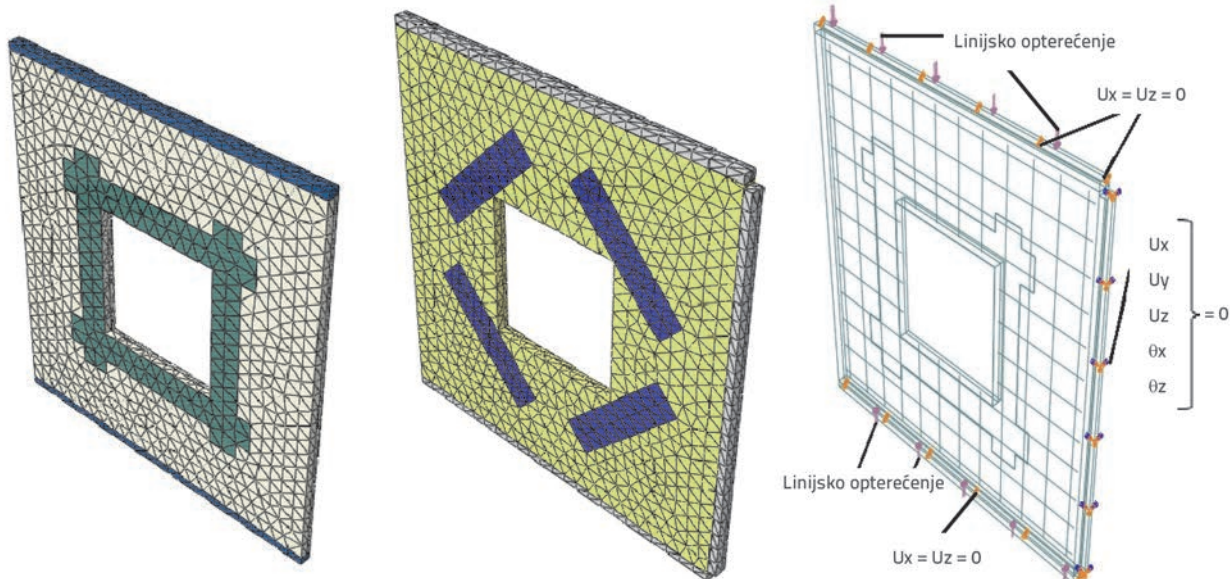
Površinska težina [g/m ²]	Debljina [mm]	Gustoća [g/cm ³]	Modul elastičnosti [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Istezanje pri lomu [%]
230	0,128	1,8	234000	4300	1,8



Slika 1. AB zidovi nosivi u jednom smjeru (s dva pridržanja) i konfiguracija CFRP-a [1]



Slika 2. AB zidovi nosivi u dva smjera (s tri pridržanja) i konfiguracija CFRP-a [1]



Slika 3. Mreža konačnih elemenata, opterećenja i rubni uvjeti

modela za provođenje analize (kut dilatacije, $\psi = 33$, vršno tlačna deformacija $\epsilon_c = 0,0002$, neelastična deformacija betona u tlaku $\epsilon_c^{in} = 0,00082$ do $0,0033$, deformacija betona pri pojavi pukotine u vlaknu $\epsilon_t^{ck} = 0,0002$, a ostali podaci potrebni za model betona s mogućnosti oštećenja (degradacije krutosti) u plastičnom području, u ABAQUS-u korišteni su sa zadanim vrijednostima). Rubni uvjeti zida na dnu su simulirani kao ekscentrični zglobovi ležajevi koji omogućuju rotaciju, a na vrhu su klizni ležajevi koji omogućuju vertikalni pomak i rotaciju. Nadalje, na vrhu zida primijenjeno je jednoliko ekscentrično vertikalno opterećenje kako bi se simuliralo opterećenje iz eksperimenta. Slika 3. prikazuje model konačnih elemenata, opterećenja i rubne uvjete.

Čelik se definira kao elastičan-idealno plastičan materijal dok je CFRP definiran kao linearno elastičan materijal. Beton je modeliran pomoću modela plastičnoga popuštanja (raspućavanja) betona (eng. *concrete damaged plasticity model* – CDP model). Ovaj model su razvili Lubliner i sur. [17] i dalje su ga nadograđivali Lee i Fenves [18]. U ovom modelu prirast naprezanja po plohi tečenja se kontrolira sa svojstvima betona u plastičnom području za vlačno i tlačno naprezanje, [19]. Radni dijagram betona u tlaku u ovom radu temelji se na

Hognestadovoj jednadžbi [20, 21]. Pretpostavlja se veza bez proklizavanja (kruta veza) između betona i CFRP-a [22].

4. Rezultati i rasprava

Provjerit će se valjanost i učinkovitost numeričkih rezultata za predložene modele materijala (betona, čelika i CFRP-a) usporedbom s eksperimentalnim rezultatima. Štoviše, provjere će se provesti uspoređivanjem slike pukotina, plastične deformacije betona i nosivosti dobivenih numerički s eksperimentalnim rezultatima od Lima i sur. [1].

Tablica 3. prikazuje nosivost dobivenu eksperimentalnom i numeričkom analizom. Primjećuje se da su prosječna nosivost kod numeričke analize povećana za 0,533 % u usporedbi s eksperimentalnim krajnjim opterećenjem (num. opterećenje / eksp. opterećenje) za zidove nosive u jednom smjeru, dok je nosivost dobivena numeričkim proračunom smanjena za 2,8 % u usporedbi s eksperimentalnim krajnjim opterećenjem za zidove nosive u dva smjera.

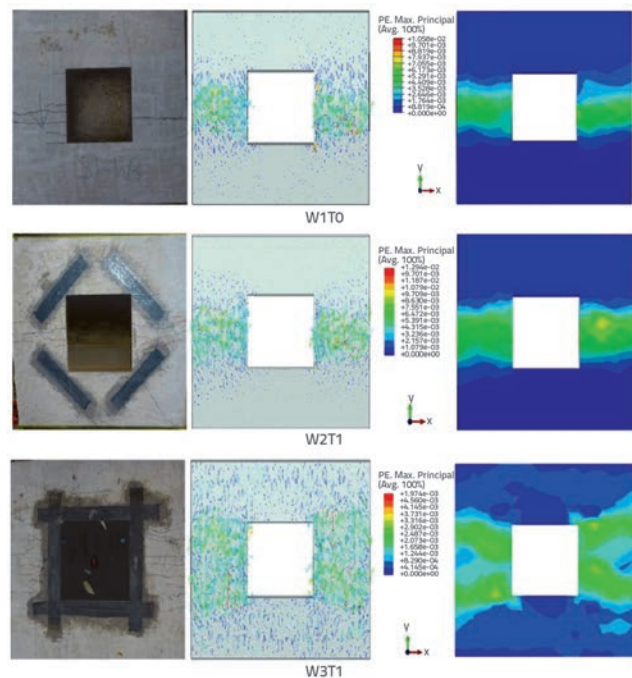
Slike 4. i 5. prikazuju eksperimentalne i numeričke slike pukotina i plastične deformacije betona u zidovima nosivim u jednom, odnosno dva smjera. Na slici 4, zabilježene slike

Tablica 3. Eksperimentalna i numerička nosivost

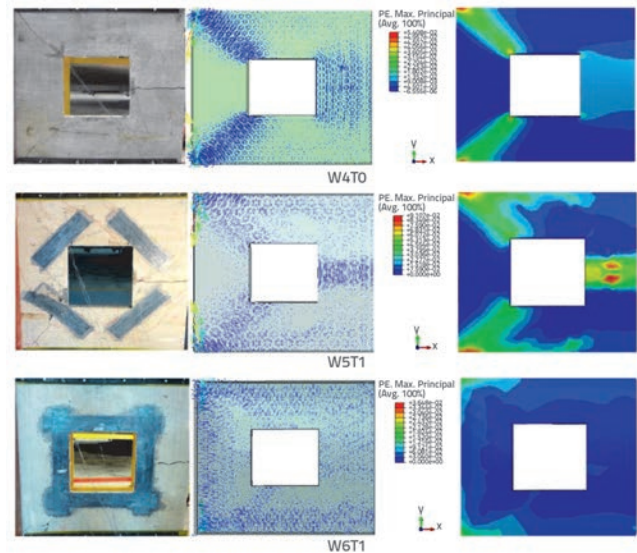
Oznaka zida	Konfiguracija CFRP-a	Debljina CFRP-a [mm]	Tip pridrzanja zida	Eksperimentalna analiza [kN]	Numerička analiza [kN]
W1-T0	-	-	s dvije strane	273,9	278,2
W2-T1	Nagnuto 45°	0,128	s dvije strane	315,2	314,9
W3-T1	Oko 90°	0,128	s dvije strane	348,5	349,3
W4-T0	-	-	s tri strane	450,0	448,2
W5-T1	Nagnuto 45°	0,128	s tri strane	699,0	682,7
W6-T1	Oko 90°	0,128	s tri strane	660,6	661,2

pukotina za eksperimentalnu i numeričku analizu pukotine su horizontalne (okomito na smjer opterećenja), pri čemu se slom dogodio približno u sredini zida, što označava lom od savijanja u zidovima nosivim u jednom smjeru. S druge strane, kao što je prikazano na slici 5., slike pukotina u zidovima nosivim u dva smjera imaju dvoosni karakter. Također, na uglovima zidova zabilježene su pukotine. Razvoj pukotina u numeričkom modelu dobro se slaže s eksperimentalnim podacima. Navedeni rezultati vezani uz izgled pukotina i nosivost upućuju na pouzdanost predložene numeričke metode. Varijacija debljine CFRP-a od 0,128 mm do 0,256, 0,348 i 0,512 mm za ispitivanje utjecaja CFRP-a na ponašanje AB zida s otvorima na modove sloma provedena je u smislu krajnjeg opterećenja, slike pukotina i glavnih plastičnih deformacija. U tablici 4. nosivost je prikazana za četiri vrijednosti debljine CFRP-a. Na temelju zabilježenih rezultata krajnjeg opterećenja može se primijetiti da debljina CFRP pojačanja od 0,348 mm daje veće konačno opterećenje za obje konfiguracije CFRP pojačanja zbog povećanja nosivosti na savijanje.

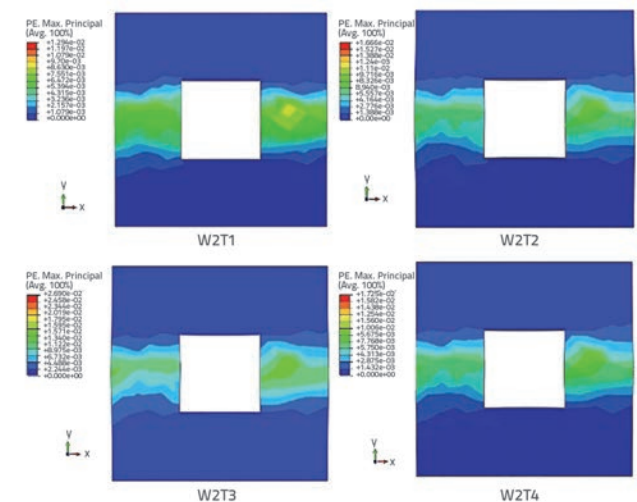
Slike 6. do 9. prikazuju najveće plastične deformacije betona. Iz tih je slika jasno da su opće ponašanje pukotina i plastičnih deformacija betona slični za AB zidove nosive u jednom i dva smjera, a s povećanjem debljine CFRP pojačanja od 0,128 mm do 0,512 mm, raspodjela pukotina postaje povoljnija. Von-Misesova napreznja u CFRP-u s različitim debljinama pri krajnjem opterećenju prikazana su na slikama 10. do 13. Zaključuje se da rješenje postaje učinkovito pri kritičnoj debljini CFRP-a jednako 0,348 mm. Ovo znači da je površina armature CFRP-a jednaka površini glavne armature koja je uklonjena zbog prodora (presječena je).



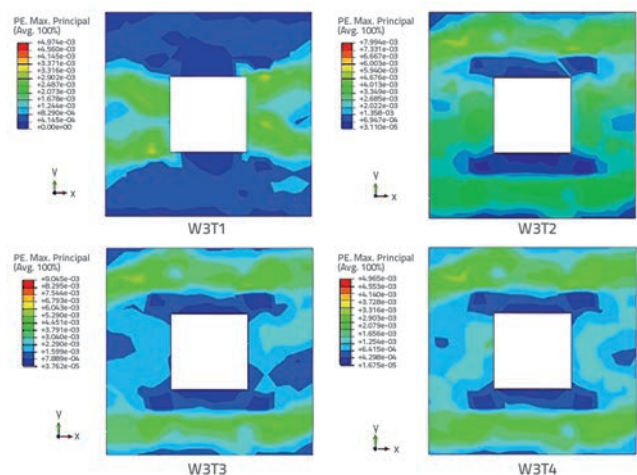
Slika 4. Eksperimentalne i numeričke slike pukotina i plastične deformacije betona kod zidova nosivih u jednom smjeru



Slika 5. Eksperimentalne i numeričke slike pukotina i plastične deformacije betona kod zidova nosivih u dva smjera



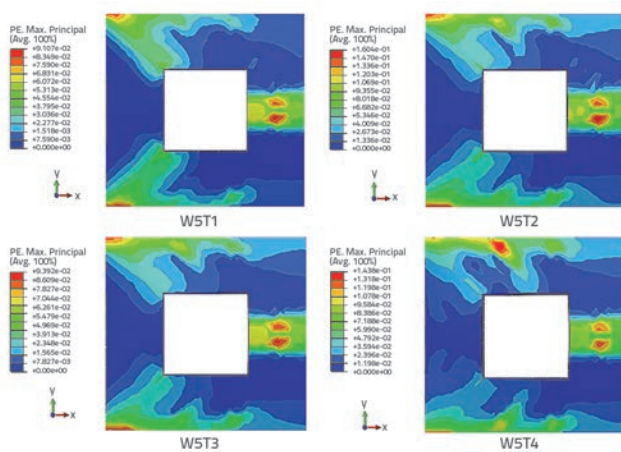
Slika 6. Maksimalne plastične deformacije zida nosivog u jednom smjeru i različitim debljinama CFRP-a s nagibom prema otvoru



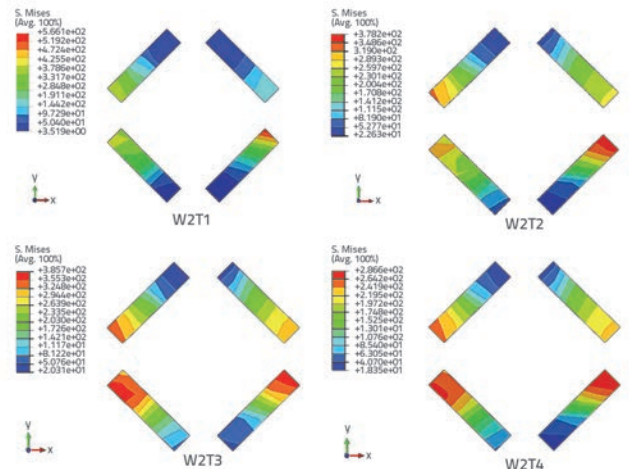
Slika 7. Maksimalne plastične deformacije zida nosivog u jednom smjeru i različitim debljinama CFRP-a koji okružuje otvor paralelno s njegovim stranama

Tablica 4. Krajnja opterećenja dobivena proračunom

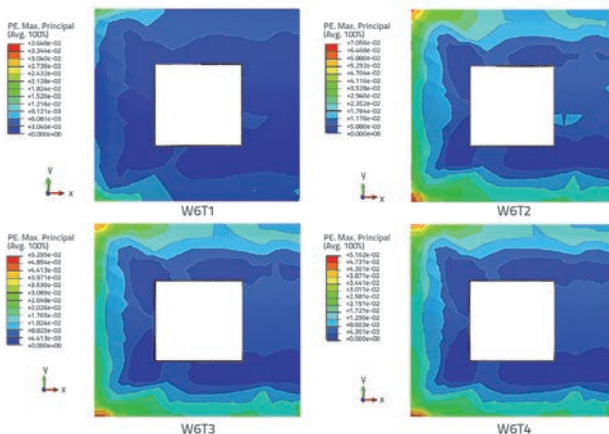
Oznaka zida	Konfiguracija CFRP-a	Debljina CFRP-a [mm]	Tip pridržanja zida	Numerička analiza [kN]
W2-T1	Nagnuto pod 45°	0,128	s 2 strane	314,9
W2-T2	Nagnuto pod 45°	0,256	s 2 strane	316,7
W2-T3	Nagnuto pod 45°	0,348	s 2 strane	335,6
W2-T4	Nagnuto pod 45°	0,512	s 2 strane	314,3
W3-T1	Okolo 90°	0,128	s 2 strane	349,3
W3-T2	Okolo 90°	0,256	s 2 strane	424,4
W3-T3	Okolo 90°	0,348	s 2 strane	433,8
W3-T4	Okolo 90°	0,512	s 2 strane	400,9
W5-T1	Nagnuto pod 45°	0,128	s 3 strane	682,7
W5-T2	Nagnuto pod 45°	0,256	s 3 strane	831,1
W5-T3	Nagnuto pod 45°	0,348	s 3 strane	832,7
W5-T4	Nagnuto pod 45°	0,512	s 3 strane	722,8
W6-T1	Okolo 90°	0,128	s 3 strane	661,2
W6-T2	Okolo 90°	0,256	s 3 strane	746,9
W6-T3	Okolo 90°	0,348	s 3 strane	826,2
W6-T4	Okolo 90°	0,512	s 3 strane	748,6



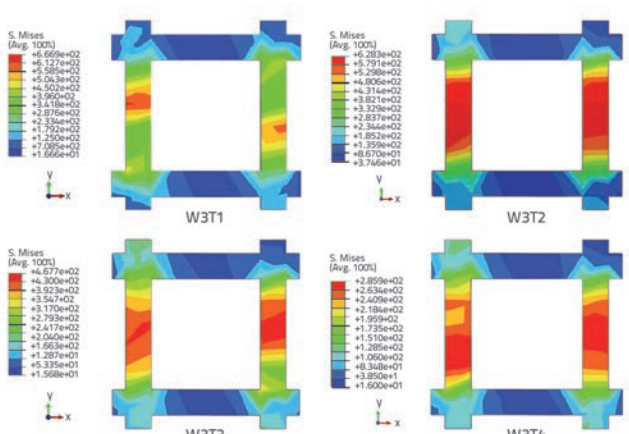
Slika 8. Maksimalne plastične deformacije zida nosivog u dva smjera i različitim debljinama CFRP-a s nagibom prema otvoru



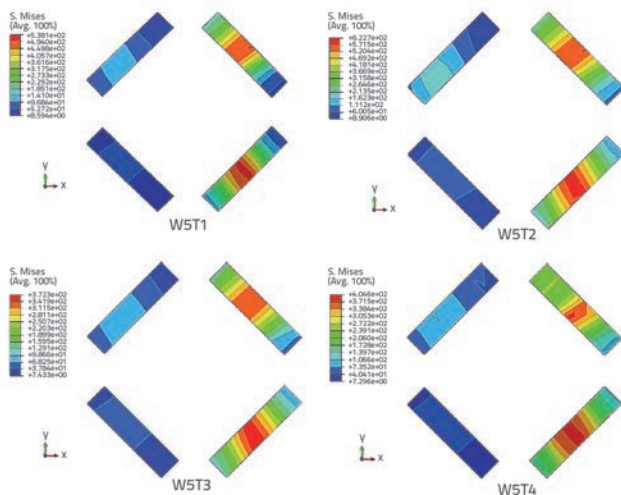
Slika 10. Von-Misesova naprezanja za zid nosiv u jednom smjeru i različitim debljinama CFRP-a s nagibom prema otvoru



Slika 9. Maksimalne plastične deformacije zida nosivog u dva smjera i različitim debljinama CFRP-a koji okružuje otvor paralelno s njegovim stranama



Slika 11. Von-Misesova naprezanja za zid nosiv u jednom smjeru i različitim debljinama CFRP-a koji okružuje otvor paralelno s njegovim stranama

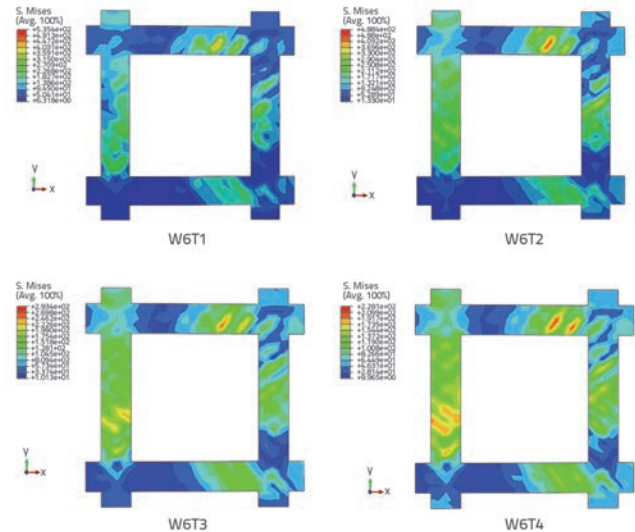


Slika 12. Von-Misesova naprezanja za zid nosiv u dva smjera i različitim debljinama CFRP-a s nagibom prema otvoru

5. Zaključak

Izrada numeričkog modela kalibriranog prema rezultatima eksperimentalnih istraživanja Lime i sur. [1] te numerička analiza učinaka povećanja debljine CFRP-a na ponašanje AB zidova s otvorima nosivih u jednom i dva smjera u vidu oblika sloma i položaja pukotina, oblika pukotina i nosivosti, dva su glavna cilja ovog rada. Na temelju provedene analize mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Usporedba numeričkih rezultata na temelju modela betona s mogućnosti oštećenja (degradacije krutosti) u plastičnom području i eksperimentalnih rezultata, i u smislu nosivosti i oblika pukotina, pokazuje na sposobnost predložene analize konačnim elementima vrlo dobrog



Slika 13. Von-Misesova naprezanja za zid nosiv u dva smjera i različitim debljinama CFRP-a koji okružuje otvor paralelno s njegovim stranama

predviđanja ponašanja AB zidova s otvorima pojačanih CFRP-om.

- Numerički rezultati vode do zaključka da varijacija debljine CFRP-a ima značajan utjecaj na nosivost, položaj pukotina, glavne plastične deformacije betona i ekvivalentno naprezanje u trakama CFRP-a. Kada se debljine CFRP-a povećaju na 0,348 mm, krajnja opterećenja se također povećavaju i raspodjela pukotina postaje povoljnija zbog povećanja nosivosti na savijanje AB zidova. Učinak ovog povećanja postaje stabilan oko kritične vrijednosti debljine CFRP-a koja je približno jednaka površini glavne armature za pojačanje u zidu zbog otvora.

LITERATURA

- [1] Lima, M.M., Doh, J.H., Miller, D.: Experimental Study of RC Walls with Opening Strengthened by CFRP, 23rd Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23), ed. Smith, S.T., Byron Bay, Australia, 9 – 12 December 2014.
- [2] Sas, G.: FRP Shear Strengthening of RC Beams and Walls, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Licentiate Thesis, 2008.
- [3] Bozdogan, K.B.: A method for free vibration analysis of stiffened multi-bay coupled shear walls, Asian Journal of Civil Engineering, 7 (2006) 6.
- [4] Elnashai, A., Sarno, L.: Fundamentals of Earthquake Engineering, John Wiley, New York, 2008, <https://doi.org/10.1002/9780470024867>
- [5] Bhinia, D., Prakash, V., Pandey, A.D.: A procedure for evaluation of coupling beam characteristics of coupled shear walls, Asian Journal of Civil Engineering, 8 (2007) 3.
- [6] Enochsson, O., Lundqvist, J., Taljsten, B., Rusinowski, P., Olofsson, T.: CFRP strengthened openings in two-way concrete slabs: an experimental and numerical study, Construction and Building Materials, 21 (2002) 4.
- [7] ACI 318M-14, Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Detroit, USA
- [8] AS3600-2009, Concrete Structures, Standards Australia, Sydney, Australia, 2009. Casadei, P., Ibell, T., and Nanni, A. (2003). "Experimental results of one-way slabs with openings strengthened with CFRP laminates." Fibre-reinforced polymer reinforcement for concrete structures FRPRCS6.
- [9] Lombard, J.: Seismic Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Shear Walls Using Externally Bonded Carbon Fibre Tow Sheets, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Master of Engineering thesis, 1999. (Cited in Ref. 1)

- [10] Sugiyama, T., Uemura, M., Fukuyama, H., Nakano, K., Matsuzaki, Y.: Experimental study on the performance of the RC frame in filled cast-in-place on-structural RC walls retrofitted by using carbon fibre sheets, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, Paper No. 2153, 2000.
- [11] Antoniadis, K.K., Salonikios, T.N., Kappos, A.J.: Cyclic tests on seismically damaged reinforced concrete walls strengthened using fibre -reinforced polymer reinforcement, ACI Structural Journal, 100 (2003) 4.
- [12] Li, Z.J., Balendra, K.H., Tan, K.H.: Finite Element Modeling of Cyclic Behaviour of Shear Wall Structure Retrofitted Using GFRP, ACI-SP, 2005.
- [13] Doh, J.H., Fragomeni, S., Loo, Y.C.: Evaluation of experimental behaviour of normal and high strength reinforced concrete walls in two-way action, Proceedings of the 17th Advanced in Mechanics of Structures and Materials, Gold Coast, Australia, June, (2002).
- [14] Doh, J.H., Fragomeni, S.: Evaluation of experimental work on concrete walls in one and two-way action, Australian Journal of Structural Engineering, 6 (2005) 1.
- [15] Mohammed, B.S., Ean Malek, L.: One way RC wall panels with openings Strengthened with CFRP, construction and building materials .
- [16] Kwak, H.G., Kim, D.Y.: Nonlinear analysis of RC shear walls considering tension stiffening effect, Computers and Structures, 79 (2001).
- [17] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Onˆate, E.: A plastic damage model for concrete, Int J Solids Struct, 25 (1989) 3, [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4)
- [18] Lee, J., Fenves, G.L.: "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures, J Eng Mech, 124 (1998) 8, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- [19] Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., ABAQUS theory manual, user manual and example manual, Version 6.8, Providence, RI, 2008.
- [20] Hognestad, E.: A study on combined bending and axial load in reinforced concrete members, University of Illinois Engineering Experiment Station, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, (1951).
- [21] Mostofi Nejad, D.: Reinforced Concrete Structures. Vol.1. 14th edition, Esfahan: Arkane Danesh, 2009.
- [22] ACI Committee 440.2R 2002., Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.