

Primljen / Received: 23.1.2021.

Ispravljen / Corrected: 10.5.2020.

Prihvaćen / Accepted: 24.6.2020.

Dostupno online / Available online: 10.10.2025.

Istraživanje potresnog ponašanja okvirnih konstrukcija s vanjskim vezovima fraktalne dimenzije sa spriječenim izvijanjem

Autori:



Mr.sc. **Yubo Ren**, dipl.ing.građ.
2483558012@qq.com



Dr.sc. **Xiaobo Luo**, dipl.ing.građ.
lutlxb123@163.com

Autor za korespondenciju



Mr.sc. **Luchao Ma**, dipl.ing.građ.
2918001838@qq.com

Sveučilište Qinghai, Kina

Građevinski fakultet

Glavni laboratorij za energetske i sigurnost inženjerskih konstrukcija u Qinghaiju, Kina

Prethodno priopćenje

Yubo Ren, Xiaobo Luo, Luchao Ma

Istraživanje potresnog ponašanja okvirnih konstrukcija s vanjskim vezovima fraktalne dimenzije sa spriječenim izvijanjem

Cilj ovog istraživanja bio je smanjiti pomake i deformacije izazvane potresom u armiranobetonskim okvirnim konstrukcijama kako bi se umanjila oštećenja uslijed potresa i povećala njihova potresna otpornost. Za potrebe vanjskog ojačanja okvirnih konstrukcija primijenjen je novi vez fraktalne dimenzije sa spriječenim izvijanjem (engl. fractal dimension – buckling restrained brace, FD-BRB), razvijen u MATLAB-u na temelju fraktalne geometrije inspirirane Mandelbrotovim skupom. Učinak poboljšanja ponašanja u potresu ocijenjen je simulacijama u ABAQUS-u, usporedbom ponašanja konstrukcije prije ojačanja i nakon njega. Dobiveni rezultati pokazuju da vanjski FD-BRB vezovi učinkovito ublažavaju lokalna oštećenja u armiranobetonskim okvirnim konstrukcijama pri djelovanju potresnog opterećenja, čime se smanjuju deformacije i torzija. Takva intervencija poboljšava potresno ponašanje i nosivost konstrukcije, produljuje vijek trajanja, smanjuje troškove održavanja te predstavlja učinkovito rješenje za konstrukcijsku sanaciju koje doprinosi razvoju inovativnih sustava otpornih na potres.

Ključne riječi:

armiranobetonska okvirna konstrukcija, fraktalna dimenzija, vez sa spriječenim izvijanjem dijagonala, potresna svojstva, vanjsko ojačanje

Research Paper

Yubo Ren, Xiaobo Luo, Luchao Ma

Research on the seismic performance of frame structures with external fractal dimension-buckling restrained braces

This study aimed to mitigate seismically induced displacement and deformation in reinforced concrete frame structures, thereby reducing earthquake-related damage and enhancing their structural seismic resilience. A novel fractal dimension-buckling restrained brace (FD-BRB), designed using MATLAB and Mandelbrot-derived fractal geometry, was applied for external frame retrofitting, and its seismic performance enhancement was quantified through ABAQUS simulations by comparing the structural behaviour before and after strengthening. This results demonstrate that externally applied FD-BRBs effectively mitigate localised damage in reinforced concrete frame structures under seismic loading, thereby reducing deformation and torsion. This intervention enhances the seismic performance and load capacity, extends the service life, lowers maintenance costs, and provides an efficient structural retrofitting solution that advances innovation in seismic-resistant systems.

Key words:

reinforced concrete frame structure, fractal dimension, buckling restrained brace, seismic performance, external reinforcement

1. Uvod

S obzirom na sve veću učestalost potresa i nedovoljnu potresnu otpornost postojećih konstrukcija, potresna prilagodba postala je ključna strategija za smanjenje potresnog rizika i osiguranje konstrukcijske sigurnosti. Općenito, metode ojačanja postojećih konstrukcija mogu se podijeliti na metode ojačanja na razini konstrukcije i na razini pojedinih elemenata. U suvremenoj praksi i istraživanjima vezovi sa spriječenim izvijanjem dijagonala (eng. *buckling restrained brace* - BRB) često se primjenjuju kao rješenje za konstruktivno ojačanje postojećih zgrada.

Sarno i sur. [1] proveli su kvazistatička ispitivanja armiranobetonskih (AB) okvirnih konstrukcija u prirodnoj veličini te su potvrdili da ugradnja BRB vezova povećava sposobnost disipacije energije za više od 60 %, znatno poboljšavajući duktilnost i mehanizme disipacije energije okvirnih sustava. Hamdy i sur. [2] primijenili su jednostruke dijagonalne BRB vezove za ojačanje šesterokatne AB zgrade, pri čemu je posmična nosivost povećana za 150 %, čime je potvrđena primjenjivost BRB sustava u visokim zgradama. Mirtaheri i sur. [3, 4] proveli su analize vremenskog odziva (eng. *response history analyses* - RHA) na dvodimenzionalnim (2D) okvirnim sustavima s BRB vezovima različitih duljina na različitim visinama te su predložili formulu za proračun optimalne duljine čelične jezgre BRB vezova. Bai i sur. [5] predložili su AB okvir s BRB vezovima koji uzima u obzir ponašanje nakon popuštanja materijala te razvili postupak potresnog proračuna dualnog sustava za različite konfiguracije BRB vezova (uključujući jednostruke, V i obrnute V-oblike), omogućujući zajedničku disipaciju energije između BRB vezova i AB okvira. Li i sur. [6] proveli su ispitivanja na cikličko opterećenje AB okvira s dvije etaže i tri raspona, opremljenog BRB vezovima K-oblika te utvrdili da se nosivost konstrukcije povećala za 80 %, a sposobnost disipacije energije za 50 %, pri čemu su dali preporuke za projektiranje u cilju poboljšanja duktilnosti i disipacije energije AB okvira. Khelfi i sur. [7] kvantificirali su doprinos zidanih ispuna AB okvirima primjenom modela ekvivalentne dijagonale i metode pokazatelja učinkovitosti (eng. *indices of performance* - IP), pri čemu su pokazali da zakošeni spojevi greda i stupova povećavaju sudjelovanje ispuna u nosivosti za 86,2 %, znatno poboljšavajući sinergiju u disipaciji energije. Valarmathi i sur. [8] poboljšali su materijale za okvire primjenom betona ojačanog bazaltnim vlaknima (eng. *basalt fiber reinforced concrete* - BFRC), pri čemu je udio vlakana od 0,25 % povećao ukupnu disipaciju energije za 28,2 % te smanjio širinu pukotina. Koman i sur. [9] razvili su blokove bez morta s fleksibilnim polimernim spojevima, koji su ostvarili 17 % veću nosivost u odnosu na klasične ispunje, uz gotovo neizmijenjenu početnu krutost samog okvira i granični pomak od 86 mm, sprječavajući mehanizme otkazivanja izvan ravnine. Kallioras i sur. [10] upotrijebili su tekstilom ojačani mort (eng. *Textile Reinforced Mortar* - TRM) integriran s toplinskom izolacijom kako bi istodobno poboljšali potresnu otpornost i energetske učinkovitost AB konstrukcija. Potresna ispitivanja u prirodnoj veličini pokazala su minimalna oštećenja konstrukcije pri vršnome ubrzanju tla od 0,40 g, dok su stope infiltracije zraka smanjene za 69 % do 78 %.

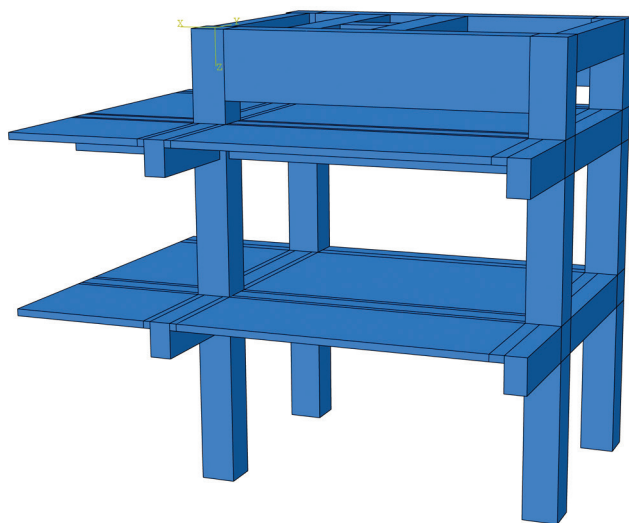
Unatoč tim znatnim napredcima, prethodno navedena istraživanja bila su usmjerena na metode unutarnjeg ojačanja koje zahtijevaju zahvate unutar prostora zgrade tijekom izvođenja, što može utjecati na postojeće funkcije. Osim toga izravno povezivanje BRB vezova može uzrokovati koncentrirana oštećenja u slabim spojevima greda i stupova armiranobetonskih konstrukcija [11–16]. Nasuprot tomu, metode vanjskog ojačanja mogu ublažiti navedene probleme [17–20]. Bergami [21] je bio pionir u tome pristupu razvojem dodatne disipativne konstrukcije (eng. *Additional Dissipative Structure* - ADS), primjenom samostojećega vanjskog tornja za disipaciju energije kojim se potresne sile preusmjeravaju na nove temelje primjenom iterativnog projektiranja temeljenog na pomacima. Taj je sustav pokazao smanjenje prvotne posmične sile u temeljima za 28 %, uz potpuno izbjegavanje unutarnjih smetnji. Olivo i sur. [22] primijenili su optimiranje pomoću genetskog algoritma za čelične egzoskelete, pri čemu su sinergijski određeni broj elemenata, prostorna konfiguracija i dimenzioniranje radi smanjenja potrošnje čelika. Projekt je uključivao ograničenje međukatnog pomaka ($h/600$) te provjeru nosivosti u skladu s normom EC3, pri čemu je postignut prijenos posmične sile od 40 do 60 % i do 65 % ujednačenje smanjenje međukatnog pomaka. Međutim, većina postojećih vanjskih vezova primjenjuje jednostavne geometrijske oblike, pri čemu nagle promjene krutosti mogu lako uzrokovati lokalnu koncentraciju oštećenja.

U skladu s time u ovom se radu predlaže vanjski vez fraktalne dimenzije sa spriječenim izvijanjem (eng. *fractal dimension - buckling restrained brace*, FD-BRB) za cjelokupno ojačanje ojačanih okvirnih konstrukcija [23]. U ovom su istraživanju postignuta dva velika pomaka uvođenjem višerazinske razgranate strukture oblikovane prema načelima fraktalne geometrije. Prvo, fraktalna struktura raspršuje energiju potresa postupnim popuštanjem sekundarnih grana, čime se učinkovito izbjegavaju lokalna oštećenja karakteristična za konvencionalne vanjske vezove te se znatno poboljšava globalno ponašanje konstrukcije u potresu. Drugo, višerazinske značajke fraktalne strukture omogućuju prilagodbu raspodjeli krutosti izvorne konstrukcije. Višerazinskom regulacijom deformacija međukatni pomaci raspoređuju se ravnomjernije, čime se smanjuju nagle lokalne promjene te poboljšava ukupna stabilnost i sigurnost konstrukcije.

2. Numerička simulacija potkonstrukcije

Autori su u prethodnim istraživanjima eksperimentalno ispitali čeličnu okvirnu konstrukciju s jednim oknom, tri kata i dva raspona, pri čemu je dokazana visoka učinkovitost predloženog ojačanja [24–26]. Na temelju tih rezultata projektirana je armiranobetonska okvirna konstrukcija s dva kata i četiri stupa radi procjene učinka vanjskog ojačanja. Ključni pokazatelji, uključujući međukatni pomak, razvoj oštećenja u betonu, raspodjelu naprezanja u čeliku i sposobnost disipacije energije, analizirani su prije ojačanja i nakon njega. Ta skalirana konfiguracija odabrana je uzimajući u obzir složenost modeliranja solidima, periodičnost testiranja i ograničenja

lokacije. Geometrija konstrukcije prikazana je na slici 1., a detaljne dimenzije dane su u poglavlju 3.2.

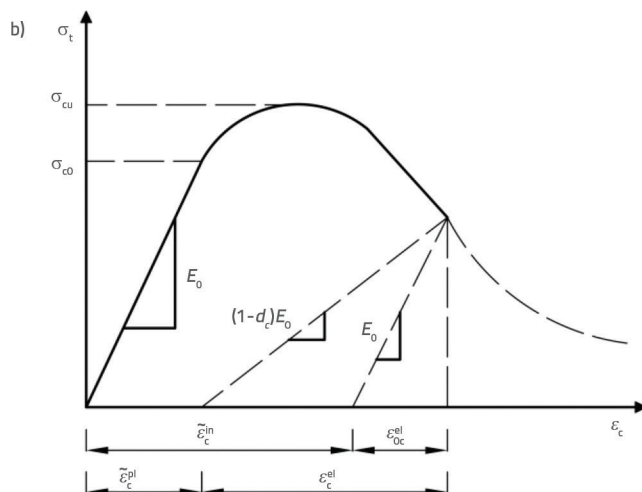
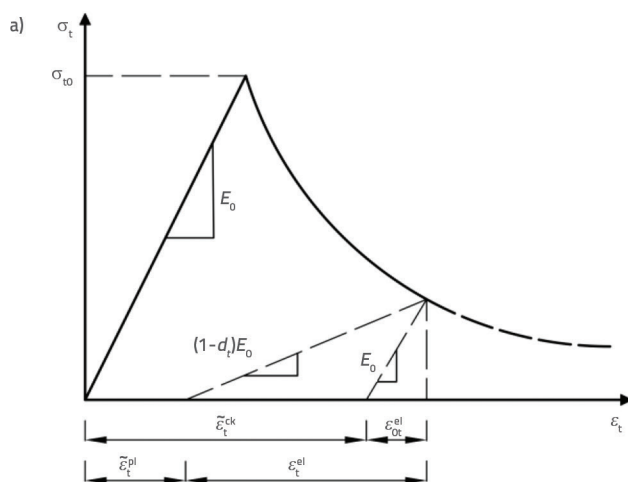


Slika 1. Geometrija AB okvirne konstrukcije analizirane u ovome istraživanju

2.1. Konstitutivni modeli za čelik i beton

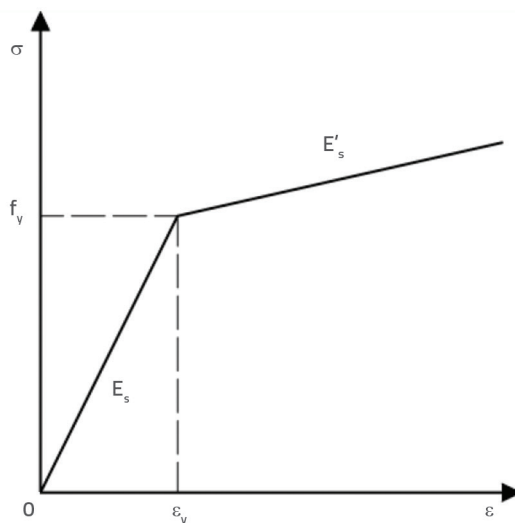
U skladu s Pravilnikom za projektiranje betonskih konstrukcija [27] za prostorno modeliranje primijenjen je model oštećenja betona pri plastifikaciji (engl. *concrete damage plasticity* – CDP; slika 2.). Oznake na slici 2. su slijedeće:

- σ_{t0} – maksimalno vlačno naprezanje u elastičnom području
- $\varepsilon_{0t}^{el}, \varepsilon_t^{el}$ – elastična vlačna deformacija bez oštećenja i s oštećenjem
- $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ – plastična i neelastična vlačna naprezanja
- σ_{co}, σ_{cu} – maksimalna tlačna naprezanja u elastičnome području i betonu
- $\varepsilon_{0c}^{el}, \varepsilon_c^{el}$ – elastična tlačna deformacija bez oštećenja i s oštećenjem
- $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \tilde{\varepsilon}_c^{in}$ – plastične i neelastične tlačne deformacije.



Slika 2. Odnosi naprezanja i deformacije betona: a) vlačno naprezanje; b) tlačno naprezanje

Za čelik je primijenjen bilinearni model kinematičkog očvršćenja koji uzima u obzir Bauschingerov efekt (slika 3.). Kako bi se što vjernije prikazali stvarni inženjerski uvjeti, kao početni nedostatak u simulacijama primijenjen je faktor imperfekcije u iznosu od 0,4 ‰ duljine temeljnog elementa. Koeficijent trenja postavljen je na 0,1, a primijenjen je model okvira u mjerilu 1 : 2.

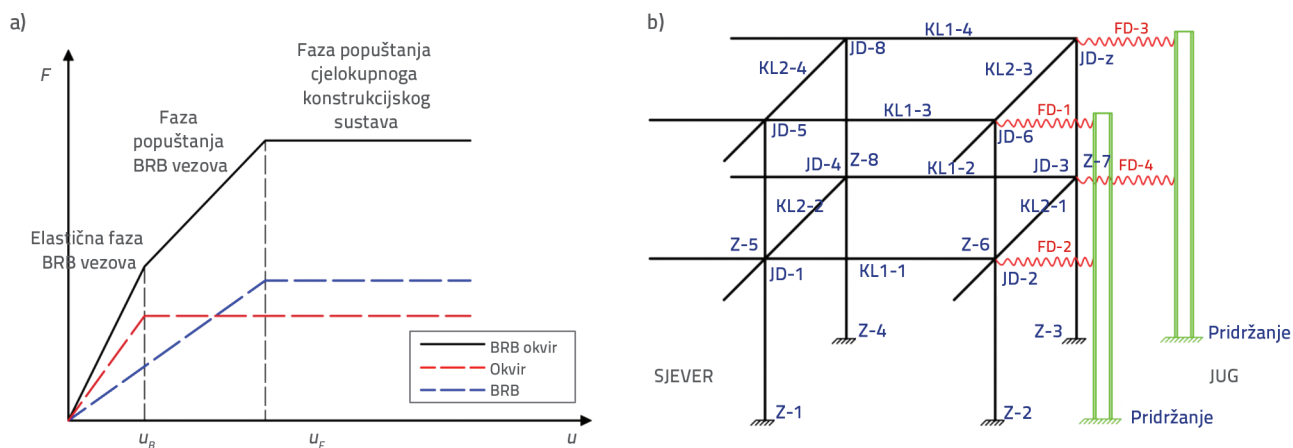


Slika 3. Odnos naprezanja i deformacije čelika

2.2. Omjer poprečne krutosti

U sustavu armiranobetonske okvirne konstrukcije s FD-BRB vezovima horizontalne sile raspodjeljuju se na okvir i vezove, što upućuje na to da se poprečna nosivost može odrediti superpozicijom prikazanom na slici 4.a [28, 29].

Prethodna istraživanja [24] potvrdila su da konvencionalni sustavi vezova omogućuju ograničeno zajedničko preuzimanje horizontalnih sila s okvirom. U elastičnome području takvi vezovi pružaju dodatnu poprečnu krutost, no u fazi neelastičnog ponašanja dolazi do minimalne preraspodjele sila, pri čemu okviri preuzimaju većinu potresnog opterećenja. Suprotno



Slika 4. Konstrukcijski sustav okvira s BRB vezovima: a) Mehanički model; b) Sastav i numeriranje komponenti, Oznake: F – horizontalna sila; u – horizontalni pomak; u_B – granica popuštanja FD-BRB vezova; u_F – granica popuštanja okvirnih konstrukcija

tomu sustav s FD-BRB vezovima fundamentalno mijenja putove prijenosa opterećenja. U elastičnome području povećava poprečnu krutost, dok u neelastičnoj fazi postupno preuzima znatan udio u prenošenju sila. Takvo ponašanje štiti primarne okvire i potvrđuje primjenjivost modela.

Na slici 4.a može se uočiti da se mehanički model okvirne konstrukcije s BRB vezovima pod djelovanjem poprečne sile može pojednostaviti u trilinearni model. Kako se poprečna sila povećava, tako konstrukcijski sustav prolazi kroz tri uzastopne faze: elastičnu fazu BRB vezova i okvirne konstrukcije, fazu popuštanja BRB vezova dok okvir ostaje elastičan te fazu popuštanja cjelokupnoga konstrukcijskog sustava.

Daljnijim porastom horizontalne potresne sile nastavlja se razvoj plastičnih deformacija, poprečna krutost konstrukcije postupno se smanjuje, a pojedini elementi popuštaju uzastopno. Vezovi su projektirani tako da popuste prije glavne okvirne konstrukcije, što zahtijeva da se bočna krutost BRB vezova tijekom preliminarnog projektiranja održava unutar određenog raspona. Zato je racionalna raspodjela poprečne krutosti između vezova i okvirne konstrukcije ključna za minimiziranje potresnog odziva ojačanog sustava. Sastavni dijelovi ojačanog sustava primijenjenog u eksperimentalnim simulacijama prikazani su na slici 4.b.

Odgovarajući raspon omjera poprečne krutosti k za FD-BRB vezove unutar ojačanog okvira izračunan je kako slijedi:

$$k = k_d/k_f \quad (1)$$

gdje su k_d i k_f poprečne krutosti FD-BRB vezova i okvirne konstrukcije.

U okvirnoj konstrukciji poprečna krutost svake etaže može se odrediti pomoću metode D-vrijednosti kako slijedi:

$$D = \sum_{i=1}^n \alpha \frac{12k_c}{h^2} \quad (2)$$

gdje su D poprečna krutost etaže, α koeficijent utjecaja rotacije čvora okvira na poprečnu krutost stupa, n broj stupova po etaži, k_c linearna krutost stupa, a h visina etaže.

Nakon što je određena poprečna krutost svake etaže okvira, k je postavljen na 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 i 4,0. Primjenom formule za omjer poprečne krutosti u izrazu (1) izračunana je odgovarajuća krutost BRB vezova. Nakon toga, primjenom formule za horizontalnu poprečnu krutost BRB vezova u izrazu (3), određena je površina ekvivalentnoga poprečnog presjeka BRB vezova.

Na kraju su, prema izračunanim dimenzijama, izrađeni uzorci za vanjsko ojačanje okvirne konstrukcije. Taj postupak osigurava da BRB vezovi pruže željeni doprinos poprečnoj krutosti, čime se općenito poboljšava potresno ponašanje ojačanog okvira, prema izrazu (3).

$$k_d = 2E_e A_e \cos^2 \theta / L \quad (3)$$

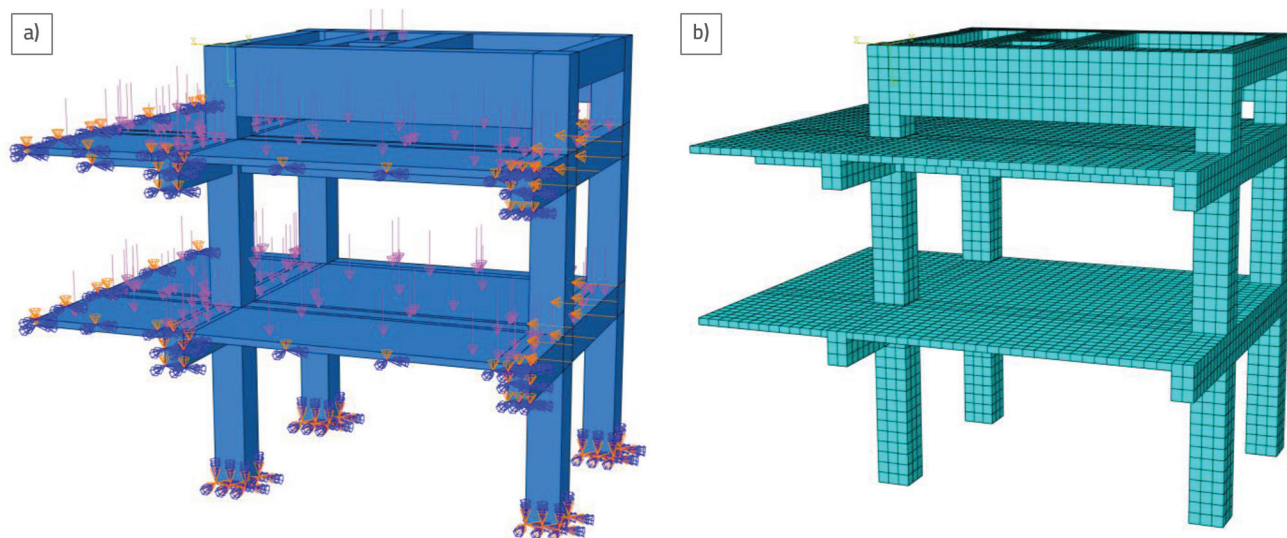
gdje je E_e ekvivalentni modul elastičnosti, A_e ekvivalentna površina poprečnog presjeka vezova, θ kut između vezova i horizontalne ravnine, a L ukupna duljina vezova.

3. Eksperimentalni okvir za analizu simulacije niskocikličkog opterećenja prije ojačanja

3.1. Uspostava modela

Tijekom odabira elemenata modela pretpostavljeno je da BRB vezovi prenose uzdužne sile pod niskim cikličkim opterećenjem, dok su okvirna konstrukcija i potporni stup bili izloženi tlačnim silama i savijanju. Za analizu stanja naprezanja okvirne konstrukcije s vanjski postavljenim FD-BRB vezovima odabrani su:

- za betonske konstrukcije, BRB vezove i čelik H-presjeka elementi tipa C3D8R
- za armaturu elementi tipa T3D2.



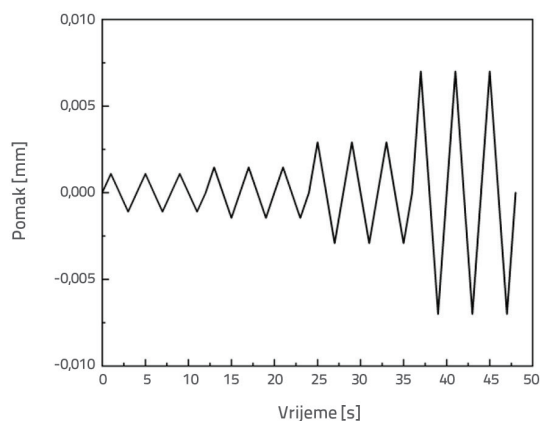
Slika 5. Proces modeliranja testnog okvira prije ojačanja: a) Ležajevi i primijenjena opterećenja; b) Diskretizacija mrežom

Uvjeti opterećenja uključuju sljedeće:

- Vertikalno opterećenje od 660 kN primijenjeno je na gornju gredu.
- Jednolika raspodjela opterećenja od 37 kN primijenjena je na prvu i drugu etažu.
- Upeti spoj primijenjen je u temeljima svih četiriju stupova.
- Na nepotpunim spojevima greda i ploča primijenjeni su ZSYMM rubni uvjeti ($U_3 = UR_1 = UR_2 = 0$).

Za diskretizaciju mreže različite veličine mreže dodijeljene su prema dimenzijama pojedinih konstruktivnih elemenata kako slijedi: grede i stupovi: 100 mm i ploče: 30 mm.

Postupak pripreme modela prikazan je na slici 5. Popuštanje betona simulirano je primjenom CDP modela, a da bi se uzeli u obzir utjecaji mreže konačnih elemenata na rezultate, trebalo je provesti analizu osjetljivosti mreže. Izradom mreža različitih gustoća i promatranjem trendova ključnih rezultata, uključujući vršno opterećenje, glavna naprezanja i kritični pomak, dobivena je mreža s relativno stabilnim rezultatima, čime je osigurana točnost rezultata simulacije. Sustav opterećenja prikazan je na slici 6.



Slika 6. Sustav opterećenja

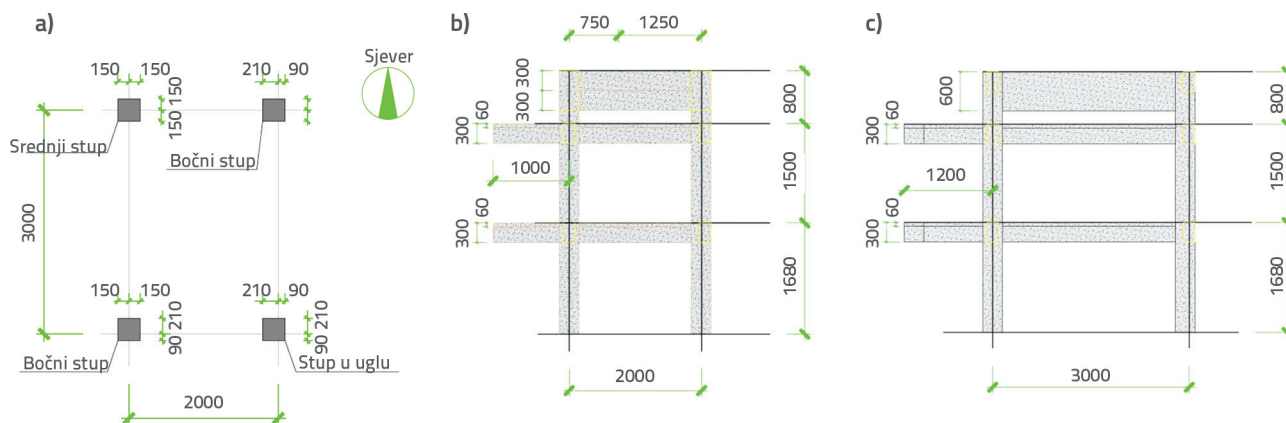
3.2. Naprezanje i pomak armature

U ovom je istraživanju uzdužna armatura bila tercijarna, a poprečna armatura primarna. Veličina sustava stupova (slika 7.a) bila je 2000×3000 mm, 90 mm istočno od uzdužne udaljenosti i 90 mm južno od uzdužne udaljenosti. Presjek stupa iznosio je 300×300 mm, s armaturom od $4\phi 12$ i poprečnom armaturom od $\phi 6$ na razmaku 75 do 150 mm.

Veličina poprečnog presjeka (slike 7.b i 7.c) greda u prizemlju i na prvome katu iznosila je 180×300 mm, gornja i donja armatura bile su $2\phi 12$, a poprečna armatura $\phi 6$ na razmaku 75 do 150. Veličina poprečnog presjeka greda gornjeg kata bila je 300×600 mm, gornja tlačna armatura bila je $2\phi 20$, donja vlačna armatura $5\phi 20$, a poprečna armatura $\phi 6$ na razmaku 75 do 150 mm. Debljina ploče iznosila je 60 mm, armatura ploče $\phi 6$ na razmaku 120 mm, a konfiguracija ploče bila je dvosmjerna. Visina prizemlja iznosila je 1680 mm, visina drugoga kata 1500 mm, dok je najviša etaža, zamišljena kao opterećena etaža bez stropne ploče, bila visoka 800 mm. U pogledu s bočne strane lijeva konzola izbočena je 1000 mm izvan osi, dok konzola na lijevoj strani pogleda, s prednje strane prelazi os za 1200 mm. Poprečna armatura iznosila je $\phi 6$ na razmaku 75 do 150 mm.

Analizirane su raspodjele naprezanja i pomaka armature u okvirnoj konstrukciji prije ojačanja (slika 8.). Prostorni prikaz stanja naprezanja (slika 8.a.) pokazuje izražene koncentracije naprezanja u podnožjima stupova i spojevima greda i stupova pri niskocikličkome opterećenju. Umjerene koncentracije naprezanja prisutne su u donjoj ploči, dok ostali dijelovi konstrukcije pokazuju relativno niske razine naprezanja. Takva raspodjela upućuje na to da su temelji stupova i spojevi greda i stupova kritične zone potresne oštećljivosti najizloženije cikličkome oštećenju.

Prostorni prikaz stanja pomaka (slika 8.b) pokazuje da najveće deformacije nastaju na gredi pri vrhu konstrukcije, na koju je



Slika 7. Sheme modela: a) Mreža stupova; b) Pogled s bočne strane; c) Pogled s prednje strane

primijenjeno vertikalno opterećenje. Međutim, najveći pomak (16,8 mm) lokaliziran je u blizini spojeva grede i stupova na drugome katu i susjednim pločama u području srednjih stupova, što je rezultat ekscentričnosti vertikalnog opterećenja gornje

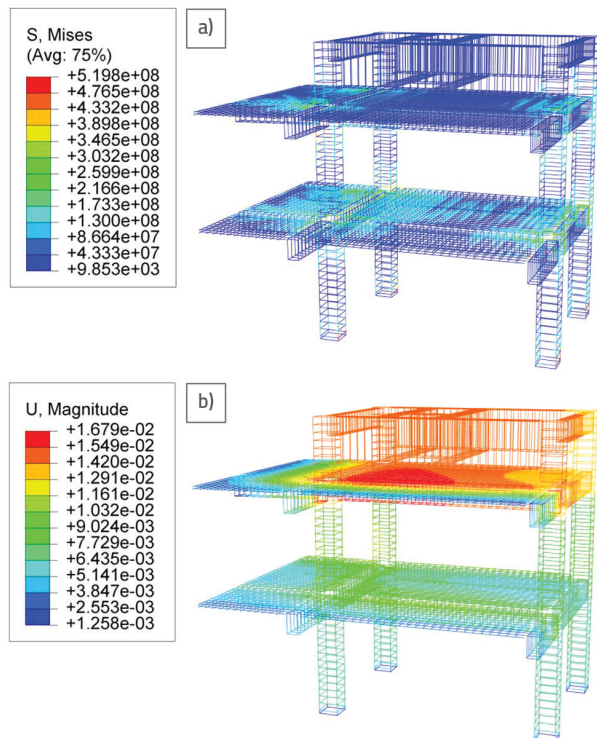
razine. Znatni pomaci također se razvijaju u gredama drugoga kata, u blizini točaka primjene horizontalnog opterećenja. Suprotno tome minimalni pomak pojavljuje se u rubnim pločama i stupovima. Pomaci u podnožjima stupova zanemarivi su zbog fiksnih ležajeva.

Na slici 9. prikazana je raspodjela naprezanja i pomaka u nekoliko okvirnih konstrukcija prvoga kata.

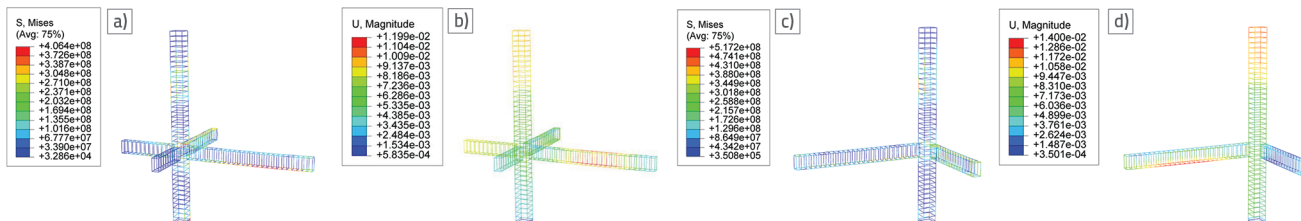
Za središnji stup Z-1 (slika 9.a) koncentracije naprezanja pojavljuju se u gornjem spoju, u podnožju stupa te na srednjemu rasponu grede KL1-1. Maksimalna nosivost u tim dijelovima iznosi 45,9 kN. Zahvaljujući fiksnim ležajevima u podnožju stupa, pomaci u spoju ostaju zanemarivi (slika 9.b). Najveći zabilježeni pomak iznosi 0,012 mm i pojavljuje se na sredini raspona grede KL1-1.

Kod ugaonog stupa Z-3 (slika 9.c) maksimalno naprezanje lokalizirano je u podnožju stupa, dok su sekundarne koncentracije naprezanja prisutne u spoju i na sredini raspona grede. Greda KL1-2 (slika 9.d) pokazuje najveći pomak (0,014 mm) u donjoj zoni sredine raspona.

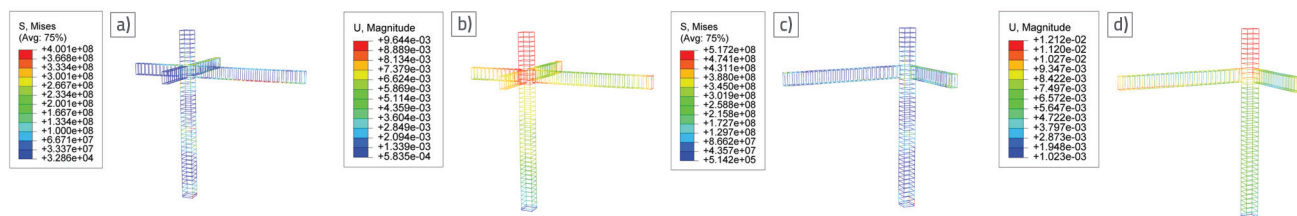
Slično tome na slici 10. prikazani su odzivi odabranih elemenata na drugoj etaži. Izražene koncentracije naprezanja pojavljuju se u spoju Z-5 i na srednjemu rasponu grede KL1-3 (slika 10.a), dok greda KL2-4 pokazuje znatno niža naprezanja. Uočeni su izraženi pomaci u spoju Z-5, susjednim gredama te na konzolnim krajevima greda KL1-3 i KL2-4 (slika 10.b). Takav odziv upućuje na složeno višesmjerno opterećenje u području Z-5, koje uzrokuje torzijsko ponašanje tog stupa. To torzijsko ponašanje rezultat je kombiniranog djelovanja vertikalne ekscentričnosti i horizontalnih sila.



Slika 8. Prostorni prikaz stanja armature okvira prije ojačanja: a) naprezanje; b) pomak



Slika 9. Prostorni prikazi stanja naprezanja armature u gredama, stupovima i spojevima na prvoj etaži: a) Z-1 i pripadajuća naprezanja elemenata; b) Z-1 i pripadajući pomaci elemenata; c) Z-3 i pripadajuća naprezanja elemenata; d) Z-3 i pripadajući pomaci elemenata



Slika 10. Prostorni prikazi stanja naprezanja armature u gredama, stupovima i spojevima drugog kata: a) Z-5 i pripadajuća naprezanja elemenata; b) Z-5 i pripadajući pomaci elemenata; c) Z-7 i pripadajuća naprezanja elemenata; d) Z-7 i pripadajući pomaci elemenata

Za ugaoni stup Z-7 (slika 10.c) maksimalno naprezanje lokalizirano je u spoju i donjem dijelu stupa koji je s njim povezan, a zatim u gredi KL1-4 i pripadajućem spoju. Međutim, stup i KL2-3 relativno su mali, što potvrđuje da su spojevi kritična područja prijenosa opterećenja. Najveći pomak pojavljuje se u spoju ugaonog stupa i gornjem dijelu pripadajućeg stupa (slika 10.d), a zatim u području vlačnog naprezanja KL1-4. Minimalni pomak pojavljuje se kod KL2-3 i stupa. Međutim, u usporedbi sa središnjim stupom prikazanim na slici 10.b, ugaoni stup pokazuje veće naprezanja i pomake, pri čemu su uvjeti opterećenja složeniji. Pomak u podnožju stupa i dalje je minimalan zbog prisutnih ležajeva.

3.3. Ekvivalentna plastična deformacija i pomak okvira

Prostorni prikazi ekvivalentne plastične deformacije i pomaka betonske konstrukcije prije ojačanja prikazani su na slici 11. Znatna oštećenja betona (slika 11.a) uočena su u spojevima okvirne konstrukcije, pri čemu su oštećenja na prvome katu izraženija nego na drugome. Osim toga plastična oštećenja stupova na obje etaže uglavnom su mala, dok su oštećenja greda i ploča relativno niska. Među svim gredama one od KL1-1 do KL1-4 na prvoj etaži pokazuju veća oštećenja u odnosu na grede od KL2-1 do KL2-4 na drugome katu. Prostorni prikaz pomaka (slika 11.b) pokazuje da su obrasci pomaka na prvoj i drugoj etaži u skladu s promjenama uočenima na slici 8.b. Maksimalni pomak (17,2 mm) pojavljuje

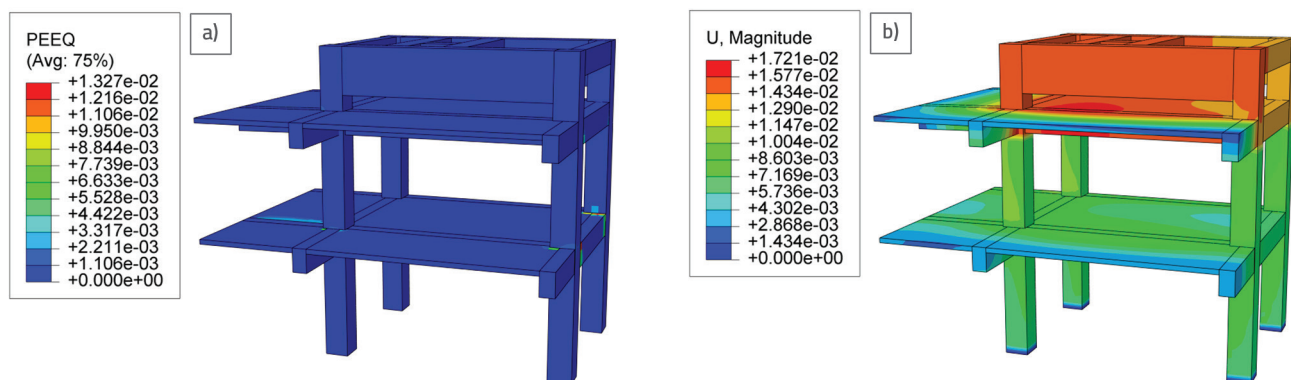
se u blizini središnjeg stupa na drugome katu, što upućuje na usklađeno djelovanje armature i betona te potvrđuje izvedivost simuliranog međudjelovanja tih dvaju materijala.

4. Eksperimentalni okvir za analizu simulacije niskocikličkog opterećenja nakon ojačanja

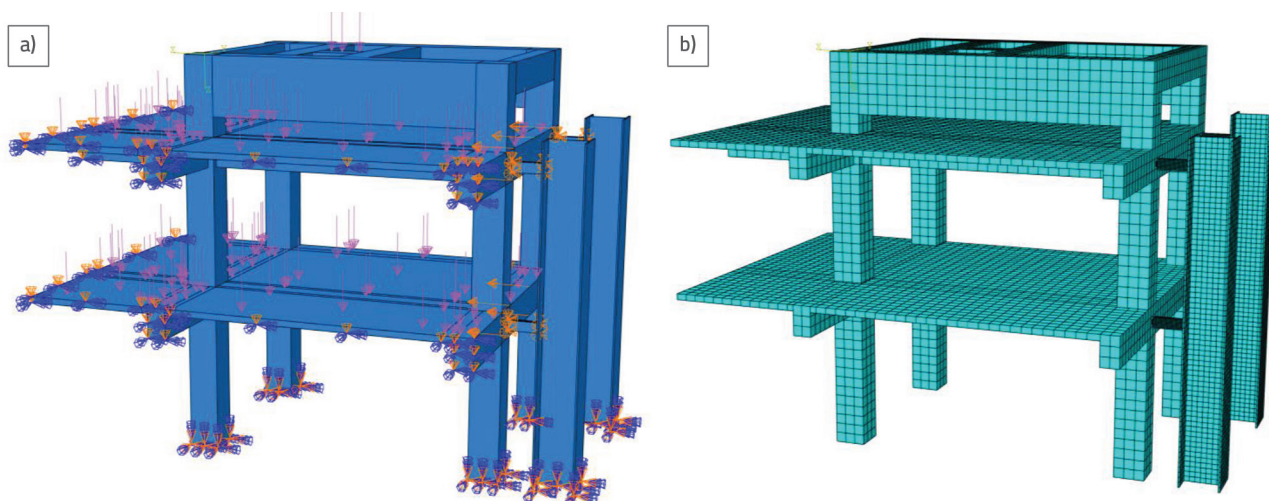
4.1. Uspostava modela

Na neojačanu konstrukciju dodana su četiri FD-BRB elementa (slika 12.) koja su spojena na potporne stupove, čime je formiran kompozitni sustav ojačanja. Parametarskom analizom opisanom u odjeljku 2.2. ispitan je omjer krutosti u rasponu od 0,0 do 4,0, pri čemu je utvrđeno da taj parametar znatno utječe na raspodjelu posmičnih sila između BRB vezova i okvirne konstrukcije. Kako bi se postigla optimalna sinergija u disipaciji energije, omjer posmičnih sila mora se održavati unutar određenog raspona [30]. Komparativna analiza utvrdila je $k = 4$ kao optimalnu konfiguraciju, pri čemu je postignut stabilan omjer posmičnih sila od 0,8. Takvo stanje istodobno maksimira sposobnost disipacije energije BRB vezova i sprječava degradaciju nosivosti elemenata okvira, zbog čega je na kraju odabrano za projektiranje ojačanja. Uvjeti kontakta bili su sljedeći:

- Za kontakt između jezgre i vanjskih pridržajnih elemenata BRB vezova definiran je uvjet "tvrdog kontakta" (engl. *hard contact*) s tangencijalnim ponašanjem bez trenja.
- Spojni segmenti na oba kraja BRB vezova povezani su sa spojem grede i stupa okvira te pojasnicom potpornog stupa krutim spojem.



Slika 11. Prostorni prikaz stanja okvira prije ojačanja: a) ekvivalentna plastična deformacija; b) pomak



Slika 12. Postupak modeliranja za ispitni okvir nakon naknadne ugradnje: a) ograničenja i primijenjena opterećenja; b) diskretizacija mrežom

Rubni uvjeti i uvjeti opterećenja određeni su kao u modelu bez ojačanja, s ograničenjem ($U_x = U_y = U_z = U_{rx} = U_{ry} = U_{rz} = 0$) primijenjenim na temelje potpornih stupova. Podjela mreže bila je sljedeća:

- Potporni stup diskretiziran je mrežom s osnovnom veličinom elementa od 30 mm.
- Jezgre i vanjski ograničavajući elementi BRB vezova diskretizirani su mrežom s osnovnom veličinom elementa od 2 mm.

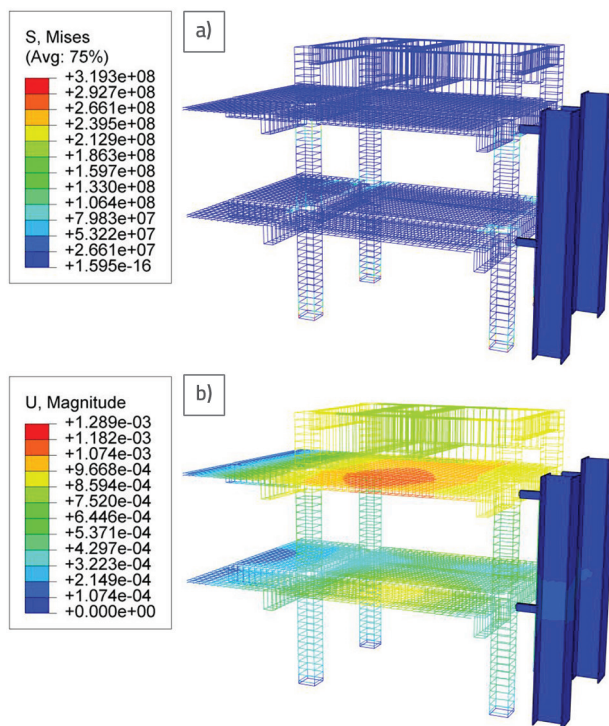
4.2. Naprezanje i pomak armature

Nakon vanjskog ojačanja FD-BRB vezovima s potpornim stupovima, na slici 13. prikazane su raspodjele naprezanja i pomaka u sustavu armature. Koncentracije naprezanja i dalje postoje u spojevima okvira i podnožjima stupova (slika 13.a), ali su u odnosu na stanje prije ojačanja (slika 8.a) smanjene za maksimalno 38,57 %, uz znatno ujednačeniju raspodjelu. To potvrđuje učinkovitost sustava s FD-BRB vezovima u smislu disipacije energije potresa i poboljšanja odziva konstrukcije. Pomaci (slika 13.b) postižu vršne vrijednosti u području središnjih stupova drugoga kata, dok su sekundarne koncentracije prisutne na najvišoj opterećenoj etaži te u ploči prvoga kata. U ostalim područjima zabilježeni su minimalni pomaci.

Ograničavajući elementi BRB vezova i potporni stupovi pokazuju zanemarive pomake, iako se manji tlačni pomaci pojavljuju na sučeljima između vezova i potpornih stupova. U usporedbi sa stanjem prije ojačanja (slika 8.b), sustav je postigao smanjenje maksimalnog pomaka od 91,72 % te poboljšanu ujednačenost raspodjele pomaka.

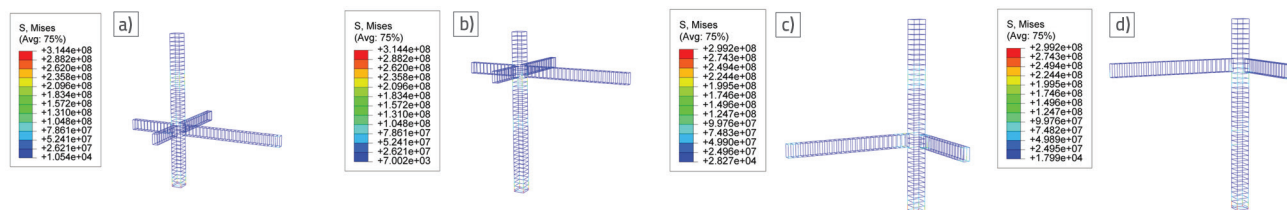
Prostorni prikazi stanja naprezanja greda, stupova i spojeva prikazani su na slici 14. Najveća naprezanja koncentrirana su u podnožjima stupova, dok se sekundarne koncentracije naprezanja pojavljuju u spojevima i susjednim dijelovima.

Preostale grede i stupovi pokazuju ravnomjerno raspodijeljena naprezanja nižeg intenziteta.

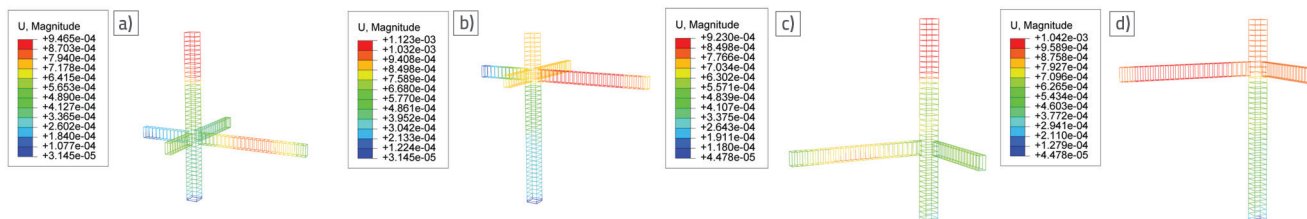


Slika 13. Prostorni prikazi stanja naprezanja armature u okviru nakon ojačanja: a) naprezanje; b) pomak

Takav hijerarhijski obrazac odgovara raspodjeli naprezanja u konstrukciji prije ojačanja (slike 4. i 5.), ali uz smanjenu ukupnu razinu naprezanja. Sustav ojačanja omogućuje učinkovitiju preraspodjelu naprezanja, čime se postiže bolje ponašanje u potresu kroz modificirane mehanizme prijenosa opterećenja.



Slika 14. Prostorni prikazi stanja naprezanja armature u spojevima greda i stupova: a) Z-1 i pripadajući elementi; b) Z-5 i pripadajući elementi; c) Z-3 i pripadajući elementi; d) Z-7 i pripadajući elementi



Slika 15. Prostorni prikazi stanja pomaka armature u spojevima greda i stupova: a) Z-1 i pripadajući elementi; b) Z-5 i pripadajući elementi; c) Z-3 i pripadajući elementi; d) Z-7 i pripadajući elementi

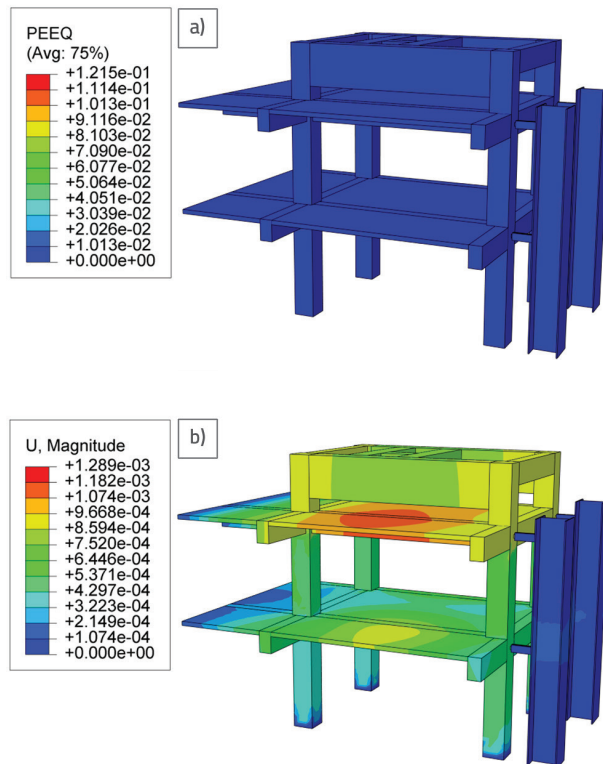
Raspodjela pomaka odabranih strukturnih komponenti prikazana je na slici 15. Spojevi JD1 i JD3 na prvoj etaži pokazuju manje pomake u odnosu na spojeve JD5 i JD7 na drugoj etaži. Ta hijerarhija pomaka pripisuje se (1) blizini vertikalnog opterećenja okvira na drugoj etaži i (2) većim intenzitetima horizontalnog opterećenja na razini druge etaže.

Kod spojeva na drugoj etaži varijacije u položaju uzrokuju razlike u pomacima, a najveći pomaci pojavljuju se u kutnome spoju stupa JD7, zatim u spoju srednjeg stupa JD5, dok su najmanji pomaci zabilježeni u bočnim spojevima stupova. U vertikalnim ravninama pomaci greda na drugoj etaži veći su od pomaka greda na prvoj etaži, što je u skladu s obrascem raspodjele vertikalnog opterećenja. U usporedbi sa stanjem prije ojačanja (slike 4. i 5.), u cijeloj je konstrukciji postignuto smanjenje pomaka. Pod djelovanjem niskocikličkoga naizmjeničnog opterećenja vanjski sustav ukrućenja mijenja mehanizme odziva konstrukcije, pri čemu se disipacija energije pretežno događa unutar dodatnoga prigušnog sustava, a ne u primarnoj okvirnoj konstrukciji. Ta preraspodjela energije štiti konstrukciju ograničavanjem neelastičnih deformacija u kritičnim elementima.

4.3. Ekvivalentna plastična deformacija i pomak betona

Ekvivalentne raspodjele plastične deformacije i pomaka za ojačanu AB okvirnu konstrukciju prikazane su na slici 16. Prevladavajuća plava boja u prikazu ekvivalentne plastične deformacije (slika 16.a) upućuje na minimalna oštećenja betona u cijelome sustavu okvira. U usporedbi sa stanjem prije ojačanja (slika 11.a), plastična oštećenja u spojevima greda i stupova znatno su smanjena pod istim uvjetima cikličkog opterećenja. To smanjenje oštećenja pokazuje poboljšano ponašanje konstrukcije ojačane FD-BRB vezovima. Rezultati analize potvrđuju da je plastična deformacija u kritičnim područjima znatno smanjena, što upućuje na učinkovitu zaštitu konstrukcije pri cikličkome opterećenju.

Analiza prostornog prikaza pomaka (slika 16.b) pokazuje znatno smanjenje ukupnih pomaka u odnosu na stanje prije ojačanja. Minimalni pomaci uočeni su u podnožjima stupova zahvaljujući primjeni ležajeva. Iako obrazac pomaka podsjeća na raspodjelu prije ojačanja prikazanu na slici 11.b, uočava se jasna razlika: nakon ojačanja pomaci u spojevima i susjednim elementima raspoređeni su ravnomjernije.

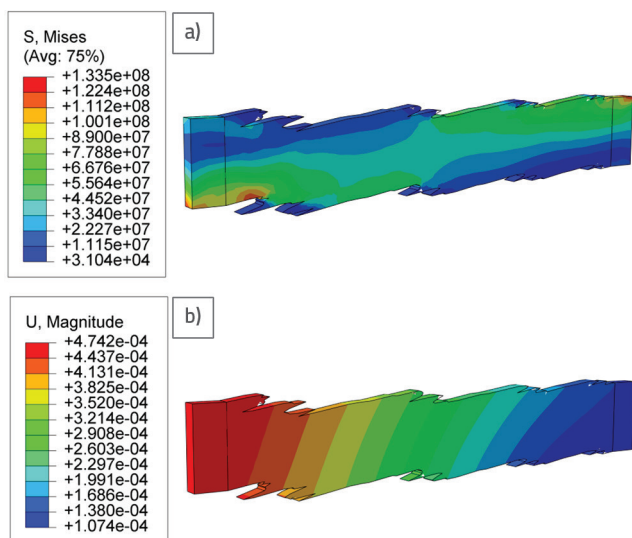


Slika 16. Prostorni prikazi stanja okvirne betonske konstrukcije nakon ojačanja: a) ekvivalentna plastična deformacija; b) pomak

4.4. Analiza ponašanja FD-BRB vezova i potpornog stupa

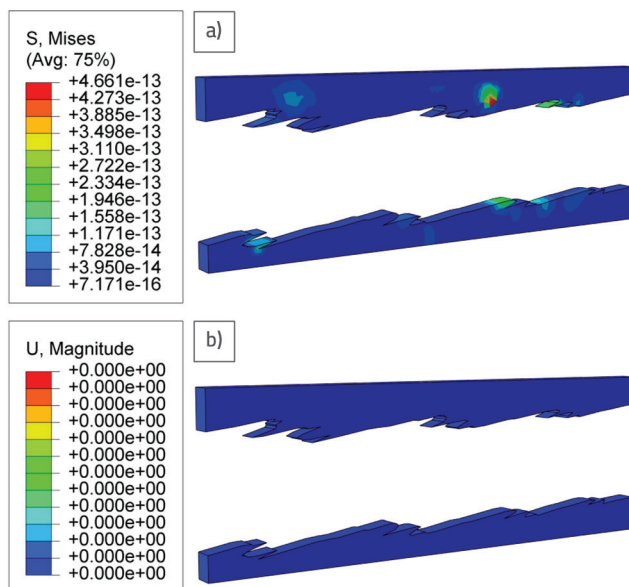
Prototip FD-BRB vezova razvijen je primjenom geometrijske krivulje izvedene iz Mandelbrotove fraktalne strukture, a njezin 2D profil nacrtan je u programu AutoCAD te izvezen kao DXF datoteka za uvoz u ABAQUS. Trodimenzionalni prostorni model zatim je izrađen primjenom C3D8R elemenata kako bi se precizno obuhvatila složena stanja naprezanja tijekom ciklusa vlačno-tlačnog naprezanja. Materijali su dodijeljeni na sljedeći način: vanjski ograničavajući elementi modelirani su kao pravokutne ploče od čelika Q345, s označenom glavnom (engl. *master*) površinom na unutarnjim stranicama ($E = 206 \text{ GPa}$; $\nu = 0,3$), dok su jezgre izrađene od čelika Q235, s označenom podređenom (engl. *slave*) površinom na vanjskim stranicama ($E = 206 \text{ GPa}$; $\nu = 0,3$). Potporni stupovi modelirani su kao elementi H-presjeka (duljina: 4000 mm; poprečni presjek: $400 \times 400 \text{ mm}$; debljina pojasnice: 15 mm; debljina hrpta: 10 mm) upotrebom čelika klase Q345. Početne geometrijske imperfekcije u iznosu od 0,1 % duljine vezova uvedene su u model kako bi se uzela u obzir odstupanja u proizvodnji.

Raspodjele naprezanja i pomaka unutar jezgre FD-BRB vezova prikazane su na slici 17. Analiza prostornog prikaza naprezanja pokazuje izražene koncentracije naprezanja duž osi opterećenja. Povećana naprezanja uočena su na krajevima vezova te na pojedinim nazubljenim fraktalnim segmentima, no granične vrijednosti za popuštanje materijala nisu prekoračene. Polje pomaka pokazuje najveće deformacije u blizini sučelja spojeva s okvirom, s postupnim smanjenjem prema spojevima s potpornim stupovima. Taj gradijent pomaka pripisuje se akumuliranome oštećenju u zonama početka opterećenja tijekom niskocikličnoga naizmjeničnog opterećenja. Zato se za eksperimentalnu provedbu i primjenu na terenu preporučuje povećanje pouzdanosti spojeva kako bi se smanjila progresivna deformacija.

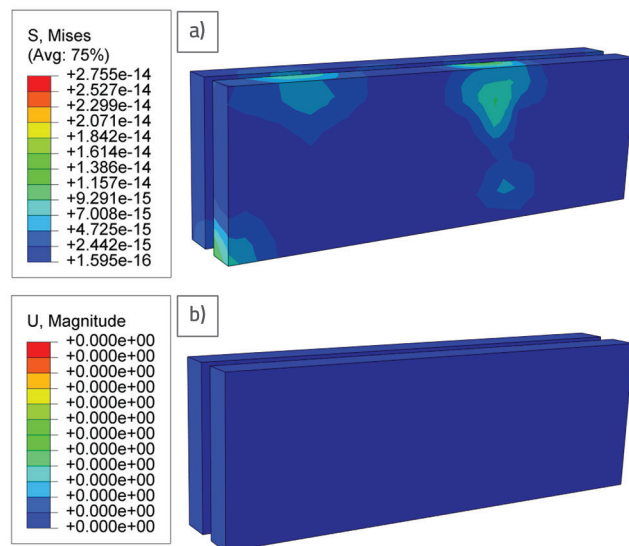


Slika 17. Prikazi prostornog stanja jezgre: a) naprezanje; b) pomak

Raspodjele naprezanja i pomaka u gornjim i donjim vanjskim ograničavajućim elementima prikazane su na slici 18. Povišene koncentracije naprezanja uočene su na fraktalnim nazubljenjima duž graničnog sučelja, što upućuje na lokaliziranu preraspodjelu naprezanja uslijed geometrijskih diskontinuiteta. Taj mehanizam disipacije naprezanja poboljšava disipaciju energije unutar jezgre. Minimalna naprezanja uočena su u najudaljenijim zonama ležajeva, što potvrđuje dovoljnu krutost za učinkovito omeđenje jezgre. Analiza pomaka pokazuje zanemarive deformacije u cijelome području ležajeva, čime se potvrđuju ispravnost odabira materijala i usklađenost fraktalnog ruba s konstrukcijskim zahtjevima.



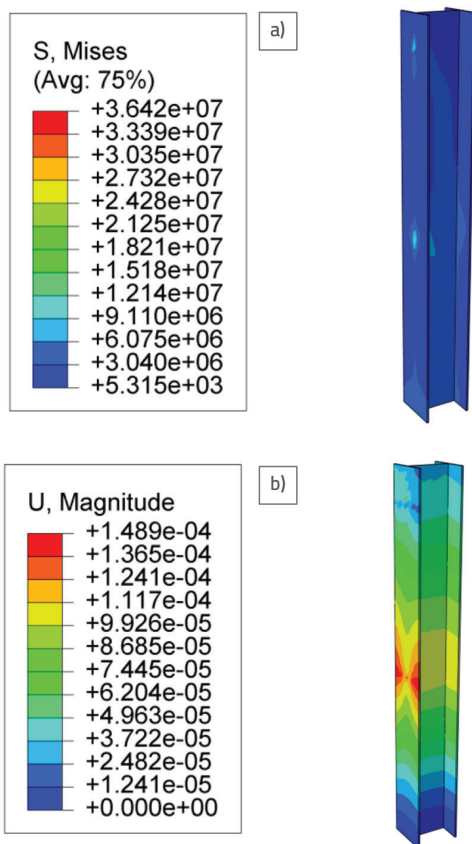
Slika 18. Strukturni prikaz stanja gornjih i donjih vanjskih potpornih elemenata FD-BRB vezova: a) naprezanje; b) pomak



Slika 19. Prostorni prikazi stanja naprezanja i pomaka u lijevim i desnim vanjskim pridržajnim elementima FD-BRB vezova: a) naprezanje; b) pomak

Raspodjele naprezanja i pomaka u bočnim vanjskim pridržajnim elementima prikazane su na slici 19. Znatne koncentracije naprezanja uočene su u gotovo simetričnim područjima obje čelične ploče (slika 19.a), osobito uz izrazito oslabljene nazubljene rubove. Takav obrazac naprezanja upućuje na lokalizirane mehanizme proklizavanja trenjem na sučelju između jezgre i ležaja. Zbog namjerno oslabljene stabilnosti jezgre u slabijoj osi primijenjene su konfiguracije različitih debljina: bočne ploče imale su veću debljinu od gornjih i donjih pridržajnih ploča. Posljedično, u smjeru jake osi zabilježena su znatno niža naprezanja u odnosu na ona prikazana na slici 19.a. Analiza pomaka (slika 19.b) pokazuje zanemarive deformacije u svim pridržajnim elementima, čime se potvrđuje usklađenost s projektnim zahtjevima u pogledu čvrstoće i krutosti.

Raspodjele naprezanja i pomaka u potpornim stupovima povezanim FD-BRB vezovima prikazane su na slici 20. Povišene koncentracije naprezanja uočene su na sučeljima spojeva s vezovima (slika 20.a), no njihove vrijednosti ostaju ispod granica popuštanja. To potvrđuje dovoljnu krutost i usklađenost s projektnim zahtjevima. Sekundarno povećanje naprezanja pojavljuje se na krutim spojevima u podnožju zbog cikličkih pomaka konstrukcije, iako su vrijednosti tih naprezanja manje u usporedbi s onima na sučeljima spojeva s vezovima. Zato se za eksperimentalnu i terensku primjenu preporučuje povećanje pouzdanosti spojeva na sučelju spoja s podlogom.



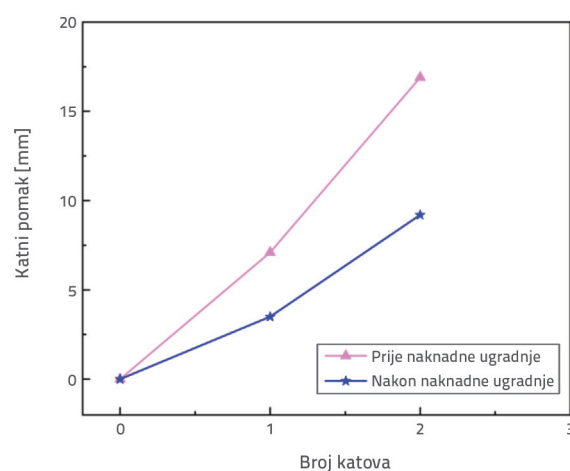
Slika 20. Prostorni prikaz stanja potpornog stupa: a) naprezanje; b) pomak

Analiza pomaka (slika 20.b) pokazuje najveće deformacije u području spoja vezova i potpornog stupa na prvoj etaži, uz postupno smanjenje deformacija prema oba kraja elementa. Taj gradijent pomaka upućuje na kumulativne učinke deformacija na spojevima. Minimalni pomaci uočeni su u području fiksiranih podnožja potpornih stupova, što potvrđuje učinkovitu primjenu rubnih uvjeta. Slijedom toga neophodno je osigurati pouzdano projektiranje spojeva na krajevima vezova kako bi se umanjio utjecaj vanjskih čimbenika na ponašanje konstrukcije.

5. Rezultati prije ojačanja i nakon njega

5.1. Rezultati numeričke simulacije prije ojačanja i nakon njega

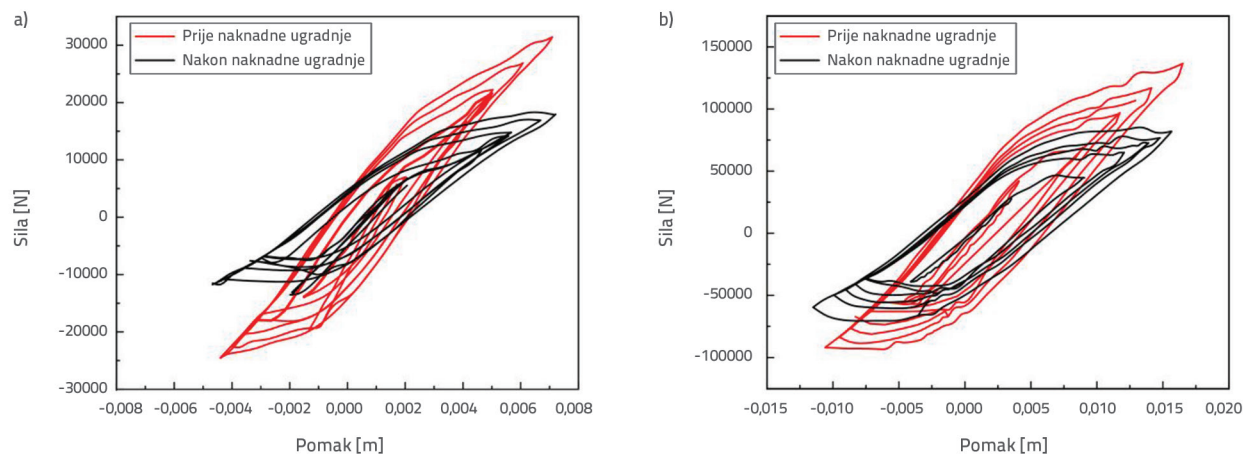
Metodom konačnih elemenata uspoređeni su međukatni pomaci AB okvirne konstrukcije prije ojačanja i nakon njega (slika 21.). Najveći pomaci na prvoj i drugoj etaži smanjeni su s 7,1 mm i 16,9 mm (prije ojačanja) na 3,5 mm i 9,2 mm nakon ugradnje FD-BRB vezova, što predstavlja smanjenja od 50,7 % odnosno 45,6 %. To znatno smanjenje pomaka potvrđuje da sustav s FD-BRB vezovima i potpornim stupovima istodobno povećava krutost konstrukcije i omogućuje učinkovitu disipaciju energije potresa.



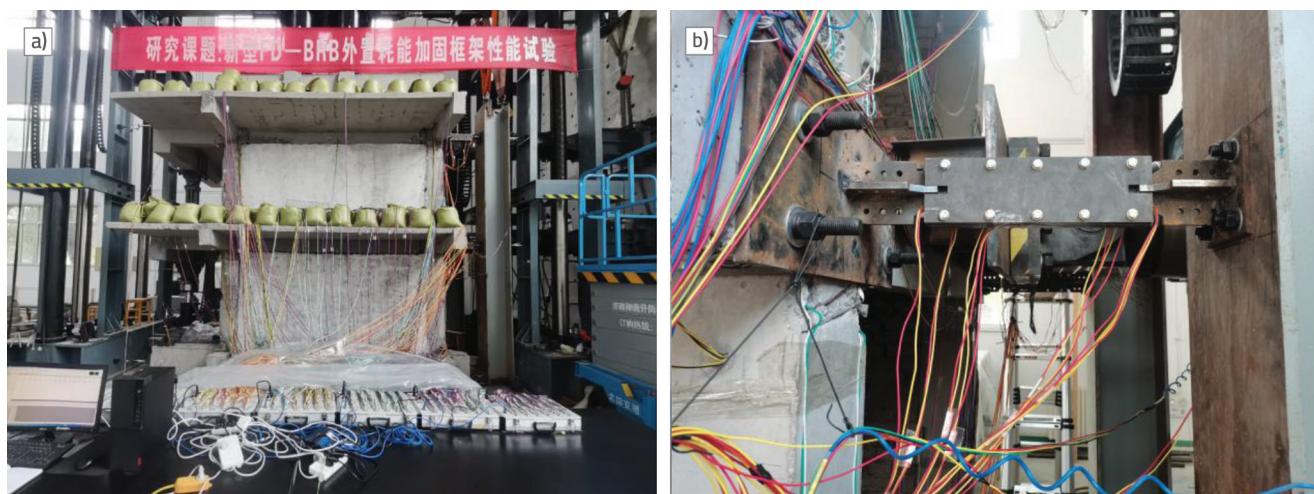
Slika 21. Međukatni pomak prije ponovne ugradnje i nakon nje

Analizirane su histerezne krivulje za prvu i drugu etažu (slika 22.) kako bi se procijenila učinkovitost disipacije energije prije ojačanja i nakon njega. Okvirna konstrukcija prije ojačanja pokazuje početnu krutost nižu od krutosti ojačanog sustava (slika 22.a). Postupno povećanje opterećenja dovodi do znatnog smanjenja krutosti izvorne konstrukcije i smanjuje njezinu sposobnost disipacije energije.

Nakon ugradnje FD-BRB vezova, u početnim fazama opterećenja histerezno ponašanje slično je onome prije ojačanja, što potvrđuje da vezovi u toj fazi uglavnom pružaju dodatnu krutost, ali ne sudjeluju znatno u disipaciji energije. Tijekom



Slika 22. Histerezne krivulje prije ojačanja i nakon njega: a) prva etaža; b) druga etaža



Slika 23. Fotografije s terenskih ispitivanja: a) prikupljanje podataka; b) ugradnja FD-BRB vezova

faze srednjeg opterećenja ojačani sustav pokazuje veću krutost i punije histerezne petlje, što upućuje na istodobnu disipaciju energije i povećanje krutosti. U kasnijim fazama opterećenja postupno se smanjuje krutost i pojavljuju vretenaste histerezne petlje, što upućuje na trajnu sposobnost disipacije energije u uvjetima cikličkog opterećenja. To potvrđuje da sustav s FD-BRB vezovima poboljšava otpornost konstrukcije i ublažava degradaciju izvorne okvirne konstrukcije.

Histerezne krivulje druge etaže (slika 22.b) odražavaju ponašanje prve etaže s dosljednim oblicima petlji, iako različitih intenziteta. Ta konzistentnost među etažama potvrđuje očuvano zajedničko djelovanje sustava te znatno poboljšava ukupnu sposobnost disipacije energije unutar ojačane konstrukcije.

5.2. Usporedba eksperimentalnih rezultata prije ojačanja i nakon njega

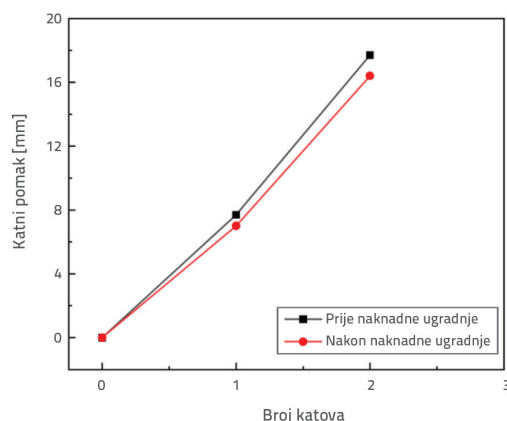
S obzirom na ograničenja u duljini teksta, eksperimentalni postupci nisu prikazani detaljno, već sažeto. Ključni rezultati ispitivanja i fotografije s terena prikazani su na slici 23.

Usporedna analiza međukatnih pomaka (slika 24.) pokazuje da su maksimalni pomaci prije ojačanja iznosili 7,7 mm na prvoj etaži i 17,7 mm na dugoj etaži. Izmjereni pomaci nakon ojačanja smanjili su se na 7,0 odnosno 16,4 mm, što predstavlja smanjenje od 9,1 % odnosno 7,3 %. To mjerljivo smanjenje pomaka potvrđuje poboljšano ponašanje u potresu postignuto vanjskim ojačanjem pomoću FD-BRB vezova.

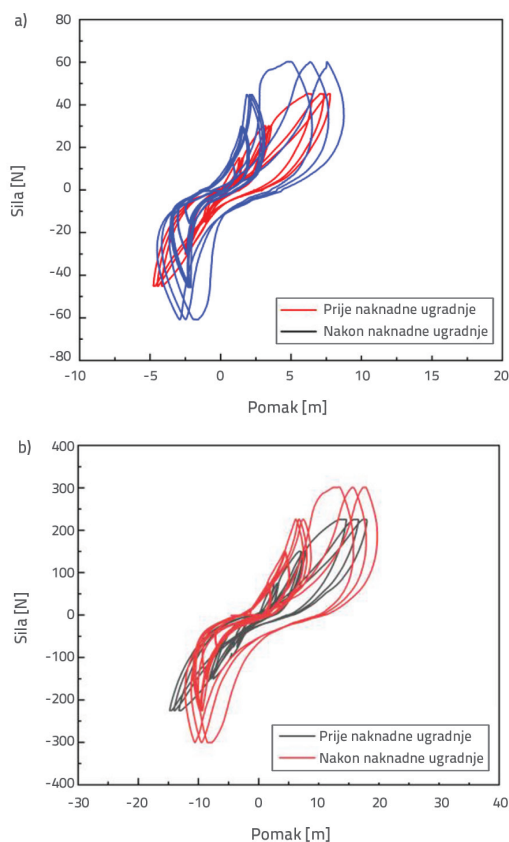
Histerezne krivulje za prvu i drugu etažu AB okvirne konstrukcije prikazane su na slici 25. Za prvu etažu (slika 25.a) uzorak prije ojačanja pokazao je maksimalne vlačne i tlačne pomake od 7,7 mm i 4,7 mm pri opterećenju od 45 kN. Ojačana okvirna konstrukcija pokazala je znatno poboljšano histerezno ponašanje pri istovjetnome opterećenju, s pomacima od 7,0 mm (vlak) i 3,9 mm (tlak), čime je potvrđena povećana sposobnost disipacije energije.

Odzivi na drugoj etaži (slika 25.b) pokazuju slično ponašanje. Histerezne petlje prije ojačanja ostale su male i lučnog oblika tijekom elastičnih faza, a s porastom opterećenja prelazile su u šire petlje uslijed postupnog popuštanja. Učinci cikličkog opterećenja smanjuju horizontalnu krutost zbog suženja petlji (engl. *pinching*), što posljedično umanjuje sposobnost disipacije

energije. Pri opterećenju od 225 kN vlačni i tlačni pomaci konstrukcije prije ojačanja iznosili su 17,7 mm i 14,5 mm. Pomaci nakon ojačanja smanjili su se na 16,4 (vlak) i 11,9 mm (tlak), što pokazuje smanjenje pomaka i povećanu nosivost.



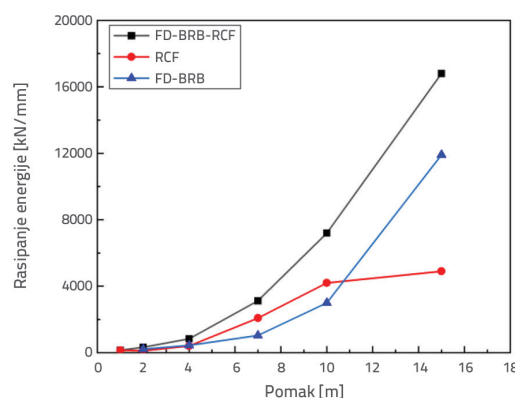
Slika 24. Usporedba međukatnih pomaka



Slika 25. Histerezne krivulje prije ojačanja AB okvirne konstrukcije i nakon njega: a) prva; b) druga etaža

Eksperimentalno je analizirana sposobnost disipacije energije AB okvirne konstrukcije ojačane sustavom FD-BRB vezova (slika 26.). FD-BRB vezovi u početku su djelovali unutar linearno-elastičnog područja, a njihov udio u ukupnoj disipaciji energije rastao je s povećanjem amplitude pomaka. Pri pomaku od 4 mm

vezovi su doprinijeli s 50 % ukupne disipacije energije sustava. Pri pomaku od 10 mm sposobnost disipacije energije osnovne AB okvirne konstrukcije stabilizirala se, dok su pri pomaku od 15 mm FD-BRB vezovi činili 70,8 % ukupne disipacije energije sustava. To upućuje na to da FD-BRB vezovi imaju ulogu primarnog mehanizma zaštite, preuzimajući dominantnu ulogu u disipaciji energije pri djelovanju jačih potresnih opterećenja.



Slika 26. Odnos disipacije energije i pomaka

6. Zaključak

Nakon naknadne ugradnje FD-BRB vezova konstrukcijski elementi (grede, stupovi i spojevi) postigli su ujednačeniju raspodjelu naprezanja uz maksimalno smanjenje naprezanja od 38,57 %. To znatno smanjenje naprezanja potvrđuje sposobnost sustava s FD-BRB vezovima za učinkovitu disipaciju energije. Istodobno su pomaci smanjeni za čak 91,72 % u odnosu na konstrukciju bez ojačanja, što upućuje na iznimnu kontrolu deformacija.

Ojačani sustav pokazao je znatno poboljšano histerežno ponašanje, što se očituje u punijim histereznim petljama. To poboljšanje istodobno je povećalo nosivost konstrukcije na poprečnu silu za 28 % te zadržalo maksimalne međukatne kutove pomaka ispod praga $\theta < 1/50$. Modificirani mehanizmi prijenosa opterećenja uočeni u sustavu pružaju ključne podatke za daljnji razvoj računalnih mehaničkih modela AB okvirnih konstrukcija s vanjskim ojačanjima.

Uočena su odstupanja između rezultata numeričke simulacije i eksperimentalnih mjerenja. Ta su odstupanja ponajprije posljedica neophodnih pojednostavljenja primijenjenih u numeričkome modeliranju, osobito idealiziranih zakona ponašanja i rubnih uvjeta, koji pojednostavljaju složene fizičke procese, ali istodobno ublažavaju utjecaj čimbenika poput varijabilnosti okoliša ili mjernih pogrešaka. Zato bi se analiza metodom konačnih elemenata trebala primjenjivati kao komplementarna metodologija uz eksperimentalna ispitivanja i usporednu validaciju, a u cilju povećanja razine pouzdanosti ocjene ponašanja konstrukcije.

Zahvala

Ovaj rad je podržao Projekt znanstvenog i tehnološkog plana provincije Qinghai (br. 2024-ZJ-975).

LITERATURA

- [1] Sarno, L., Manfredi, G.: Experimental tests on full-scale RC unretrofitted frame and retrofitted with buckling-restrained braces, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41 (2012) 2, pp. 315–333, <https://doi.org/10.1002/eqe.1131>
- [2] Abou-Elfath, H., Ramadan, M., Alkanai, F.: Upgrading the seismic capacity of existing RC buildings using buckling restrained braces, *Alexandria Engineering Journal*, 56 (2017) 2, pp. 251–262, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.11.018>
- [3] Mirtaheiri, M., Sehat, S., Nazeryan, M.: Improving the behavior of buckling restrained braces through obtaining optimum steel core length, *Structural Engineering and Mechanics*, 65 (2018) 4, pp. 401–408, <https://doi.org/10.12989/sem.2018.65.4.401>
- [4] Mirtaheiri, M., Gheidi, A., Zandi, A., et al.: Experimental optimization studies on steel core lengths in buckling restrained braces, *Journal of constructional steel research*, 67 (2011) 8, pp. 1244–1253, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.03.004>
- [5] Bai, J., Cheng, F., Jin, S., et al.: Assessing and quantifying the earthquake response of reinforced concrete buckling-restrained brace frame structures, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17 (2019), pp. 3847–3871, <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00633-0>
- [6] Li, G., Li, J., Fang, C., et al.: Seismic performance of two-story three-bay reinforced concrete frame equipped with K-configured buckling restrained braces, *Journal of Building Engineering*, 74 (2023), 106904, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106904>
- [7] Mebarek, K., Bourahla, N., Remki, M.: Performance evaluation of masonry infilled RC frame structures under lateral loads, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 3, pp. 219–234, <https://doi.org/10.14256/JCE.2647.2019>
- [8] Valarmathi Moorthy, G., Thangaraj, P., Gobi Shanmugam, T.: Structural behavior of a single bay two-story basalt fiber reinforced concrete frame, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 12, pp. 1085–1092, <https://doi.org/10.14256/JCE.3550.2022>
- [9] Koman, H., Nohutcu, H., Kılıç, G., et al.: Poboljšanje ponašanja AB okvira s blokovima bez morta pri potresu, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 3, pp. 219–236, <https://doi.org/10.14256/JCE.3920.2023>
- [10] Kallioras, S., Bournas, D., Koutas, L., et al.: Integrated seismic and energy retrofitting of masonry-infilled RC buildings with textile-reinforced mortar and thermal insulation: Full-scale tests on a five-story prototype, *Journal of Building Engineering*, 98 (2024), 111006, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111006>
- [11] Yooprasertchai, E., Warnitchai, P.: Seismic retrofitting of low-rise nonductile reinforced concrete buildings by buckling-restrained braces, *Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, 2008.
- [12] Dinu, F., Bordea, S., Dubina, D.: Strengthening of non-seismic reinforced concrete frames of buckling restrained steel braces, *Behaviour of steel structures in seismic areas*, eds. F. Mazzolani, R. Herrera, London, pp. 1085–1090, 2012.
- [13] Mahrenholtz, C., Lin, P., Wu, A., et al.: Retrofit of reinforced concrete frames with buckling-restrained braces, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44 (2015) 1, pp. 59–78, <https://doi.org/10.1002/eqe.2458>
- [14] Ozcelik, R., Erdil, E.: Pseudodynamic test of a deficient RC frame strengthened with buckling restrained braces, *Earthquake Spectra*, 35 (2019) 3, pp. 1163–1187, <https://doi.org/10.1193/122317EQS263M>
- [15] Tsai, K., Hsiao, P., Wang, K., et al.: Pseudo-dynamic tests of a full-scale CFT/BRB frame—Part I: Specimen design, experiment and analysis, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37 (2008) 7, pp. 1081–1098, <https://doi.org/10.1002/eqe.804>
- [16] Corte, G., D’Aniello, M., Landolfo, R.: Field testing of all-steel buckling-restrained braces applied to a damaged reinforced concrete building, *Journal of structural engineering*, 141 (2015) 1, D4014004, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001080](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001080)
- [17] Islam, S., Huang, S., Skokan, M., et al.: Performance based seismic retrofit of a high-rise tower using buckling restrained braced frames, 8th US National conference on earthquake engineering, San Francisco, California, USA, 2006.
- [18] Cao, X., Feng, D., Wu, G.: Seismic performance upgrade of RC frame buildings using precast bolt-connected steel-plate reinforced concrete frame-braces, *Engineering Structures*, 195 (2019), pp. 382–399, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.06.007>
- [19] Cao, X., Feng, D., Wu, G.: Pushover-based probabilistic seismic capacity assessment of RCFs retrofitted with PBSPC BRBF sub-structures, *Engineering Structures*, 234 (2021), 111919, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111919>
- [20] Sutcu, F., Bal, A., Fujishita, K., et al.: Experimental and analytical studies of sub-standard RC frames retrofitted with buckling-restrained braces and steel frames, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18 (2020), pp. 2389–2410, <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00785-4>
- [21] Bergami, A.: Design of Additional Dissipative Structures for Seismic Retrofitting of Existing Buildings, *Applied Sciences*, 14 (2024) 6, 2477, <https://doi.org/10.3390/app14062477>
- [22] Olivo, J., Cucuzza, R., Bertagnoli, G., et al.: Optimal design of steel exoskeleton for the retrofitting of RC buildings via genetic algorithm, *Computers & Structures*, 299 (2024), 107396, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107396>
- [23] Luo, X., Song, Y., Wang, T., et al.: Parameter design and mechanical performance of a new type of fractal buckling restrained brace, *Journal of Jilin University*, 52 (2022) 7, pp. 1607–1619 (in Chinese), <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20210031>
- [24] Jin, Z.: Study on seismic performance of external F-D buckling-restrained brace, *Lanzhou University of Technology* (in Chinese), <https://doi.org/10.27206/d.cnki.gsgsu.2020.001457>, 2020.
- [25] Ma, L., Luo, X., Ren, Y.: Design and performance study of diamond-shaped opening structure of fractal buckling restrained brace core unit, *Journal of Qinghai University*, 42 (2024) 5, pp. 78–85 (in Chinese), <https://doi.org/10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2024.05.011>
- [26] Ren, Y., Ma, L., Luo, X.: Study on the performance of different parameters of fractal dimension- buckling restrained brace based on core elements weakening, *Building Science*, 40 (2024) 11, pp. 101–112 (in Chinese), <https://doi.org/10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2024.11.013>
- [27] GB50010-2021, Code for design of concrete structures, China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [28] Wang, Y., Song, H.: Working mechanism study on buckling-restrained brace in displacement mode, *Journal of Henan Polytechnic University*, 32 (2013) 5, pp. 631–638 (in Chinese), <https://doi.org/10.16186/j.cnki.1673-9787.2013.05.014>
- [29] Wang, Y.: Research on seismic performance and design method of buckling-restrained brace and brace-frame structure, *China University of Mining and Technology* (in Chinese), 2014.
- [30] Kou, H.: Research on influence of high-rise concrete frame shear structure characteristics with BRB seismic reduction and reinforcement, *Lanzhou University of Technology* (in Chinese), <https://doi.org/10.27206/d.cnki.gsgsu.2020.000891>, 2020.
- [31] Wu, C.: Study on seismic behavior of a new type of replaceable energy-consuming coupling beam, *Hebei University of Engineering* (in Chinese), <https://doi.org/10.27104/d.cnki.ghbjy.2020.000281>, 2020.