



Danijel Kirn, mag. inž. grad.
danijelkirn@gmail.com



asist. Nemanja Krtinić, mag. inž. grad.
nkrtnic@fgg.uni-lj.si



izr. prof. dr. Matija Gams, univ. dipl. inž. grad.
mgams@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija



Znanstveni članek
UDK/UDC 519.62:691:666.97

NUMERIČNA ANALIZA POTRESNEGA OBNAŠANJA ZIDOVJA, UTRJENEGA Z MALTNIMI OBLOGAMI IN MREŽAMI IZ STEKLENIH VLAKEN

NUMERICAL ANALYSIS OF SEISMIC BEHAVIOUR OF MASONRY STRENGTHENED BY MORTAR COATING AND GFRP MESH

Povzetek

Cilj raziskave je preučiti učinkovitost potresnega utrjevanja zidanih konstrukcij z maltnimi oblogami, armiranimi z mrežami iz steklenih vlaken, in preveriti ustreznost metodologije projektiranja, ki je bila razvita v projektu PRO-SIS. Iz projekta CONSTRAIN smo imeli podatke o osmih cikličnih strižnih testih slopov in sedmih testih nadokenskih zidov. Na podlagi teh eksperimentov smo razvili in validirali homogeni nelinearni numerični model v programu Abaqus. Numerični model uporablja enake materialne parametre za vseh 15 eksperimentov, kar daje tej raziskavi in razvitemu modelu večjo vrednost. Poleg tega ocenjujemo, da je model primeren za parametrično analizo, ki smo jo naredili v nadaljevanju in s katero smo podrobneje preučili učinkovitost prej opisanega načina utrjevanja zidov. Rezultati potrjujejo učinkovitost enostranskega utrjevanja, ki je pomembno zaradi lažje izvedbe utrjevanja potresno ogroženih stanovanjskih in drugih stavb, med katerimi so tudi spomeniško zaščitene. Dodatno rezultati analiz potrjujejo, da je postopek projektiranja, razvit v projektu PRO-SIS, ustrezen, z možnostjo izboljšave nekaterih analitičnih izrazov.

Ključne besede: potres, utrjevanje, odpornost, zidovje, Abaqus, validacija

Summary

The main goal of the research was to study the effectiveness of seismic strengthening of masonry structural elements (piers and spandrels) with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) mesh-reinforced lime-based mortar overlays. As a part of the PRO-SIS project, we developed a homogeneous nonlinear numerical model in Abaqus, which we validated using eight experimental tests on masonry piers and seven tests on masonry spandrels conducted within the CONSTRAIN project. The numerical model uses the same material parameters for all fifteen experiments, which adds greater value to this research and the developed model. We also believe that the model is suitable for the parametric analysis conducted later in the study, where we examined in detail the effectiveness of the described strengthening method. The results confirm the effectiveness of one-sided strengthening, which is paramount for the easier execution of strengthening of seismically vulnerable residential and other buildings, including heritage-protected ones. Additionally, the analysis results confirm that the design procedure developed in the PRO-SIS project is appropriate, with potential for refining certain analytical expressions.

Key words: earthquake, reinforcing, resistance, masonry, Abaqus, validation

1 UVOD

V Sloveniji je 42 % vseh stavb (332 tisoč) zgrajenih iz zidovja (kamnitega ali opečnega), v njih živi 60 % vseh prebivalcev [1]. Precejšen delež teh stavb (vsaj 19 % oz. 63 tisoč) je po oceni iz stresnega testa zaradi relativno visoke potresne nevarnosti v Sloveniji treba utrditi [1]. Utrjevanje zidanih stavb ima zato pomembno vlogo pri zagotavljanju potresne odpornosti stavbnega fonda v Sloveniji, vsak napredek ali izboljšava na tem področju pa ima potencialno velik vpliv tako na individualni kot na državni ravni.

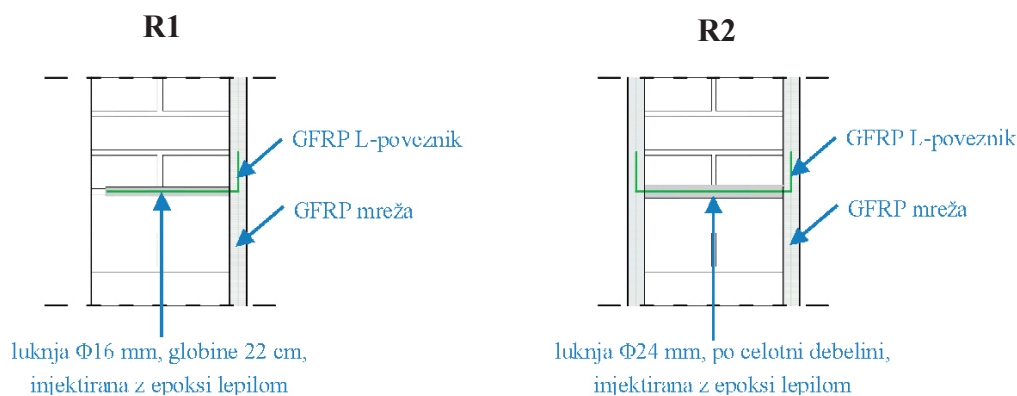
V raziskavi smo preučevali odziv zidanih sten, utrjenih z maltnimi oblogami in mrežami iz steklenih vlaken, in poskušali ugotoviti, koliko utrditev izboljša potresni odziv in kako bi lahko utrjevanja najbolj ustrezno projektirali z orodji, ki se uporabljajo v inženirski praksi. Da bi dosegli zadane cilje, smo najprej na podlagi eksperimentalnih rezultatov iz projekta CONSTRAIN [2] razvili 3D-model v programu Abaqus, s katerim smo nato naredili razširjeno parametrično analizo, s katero smo preučevali izbrani sistem utrjevanja zidanih sten. Na koncu smo na podlagi analiz in eksperimentalnih podatkov preverili natančnost analitičnih izrazov, ki se v projektantski praksi uporabljajo, za napovedovanje togosti, odpornosti in duktilnosti zidanih sten.

Ključna prednost obravnavanega načina utrjevanja je, da je učinkovito tudi, kadar je zid utrjen z le ene strani [3], [4]. To pomeni, da se v primeru stavbne dediščine (zunanje fasade, freske ipd.) lahko utrjuje le druga stran.

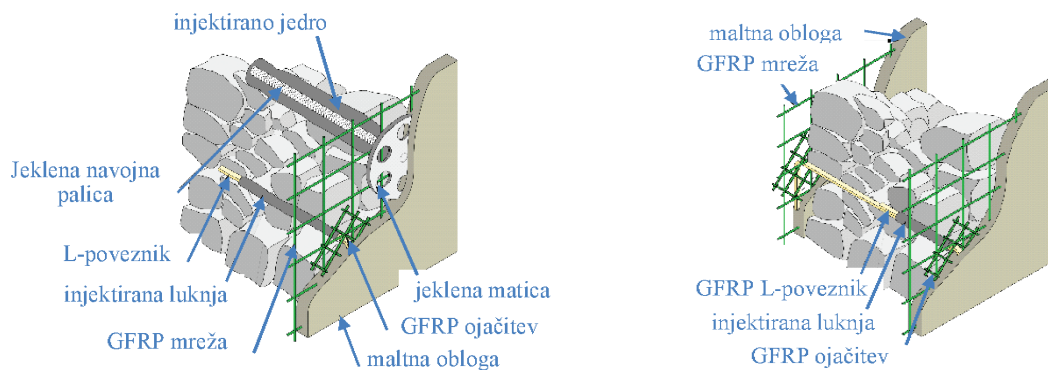
V primeru stanovanjskih stavb pa enostransko utrjevanje poteka na zunanji strani, kar za stanovalce pomeni nemoteno bivanje. Zaradi tega so manjši tudi stroški in stres zaradi začasne izselitve ali sobivanja v prostorih, kjer bi sicer potekala gradbena dela.

2 METODA UTRJEVANJA

Sistem utrjevanja se izvaja tako, da z ene ali obeh strani zidu pritrdimo mreže iz steklenih vlaken preko L-sider z gostoto 6 kos/m² (primarno sidranje), z dimenzijami prereza 10 x 7 mm in natezno trdnostjo 380 MPa. Mrežo nato omečemo s posebno malto na osnovi hidravličnega apna v debelini ca. 3 cm. Maltna mešanica, debelina maltne sloja in sidranje zagotavljajo primerljivo togost z osnovnim zidovjem, zaradi česar obloga in zid učinkovito sodelujeta pri prevzemanju potresne obtežbe do porušitve. Debeline maltne sloja ne prilagajamo zidovju, ker je sistem preverjen za debelino 3 cm. V primerih, ko imamo zid iz več slojev, ki med seboj niso ustrezno povezani, dodamo še jeklene navojne palice M16 iz nerjavečega jekla z maticami, ki so injektirane z injekcijsko maso z gostoto 2 kos/m² (sekundarno sidranje za zagotovitev povezanosti slojev zidu). Karakteristike malte in mreže za utrjevanje so zbrane v preglednicah 1 in 2.



Slika 1. Prečni prezek enostransko (levo) in dvostransko (desno) utrjenega opečnega zidu



Slika 2. 3D-prerez enostranskega (levo) in dvostranskega (desno) utrjevanja dvoslojnega kamnitega zidu



Slika 3. Izvedba primarnega sidranja v zid z L-povezniki (levo) ter sekundarnega sidranja z navojnimi palicami in sidrnimi glavami (desno)

	Število vzorcev	Starost vzorca [dni]	Mehanske lastnosti	
			Upogibna trdnost [MPa] (CoV [%])	Tlačna trdnost [MPa] (CoV [%])
Malta za utrjevanje	6	35	3,0 (10 %)	30,1 (4%)

Preglednica 1. Izmerjene materialne karakteristike malte za utrjevanje

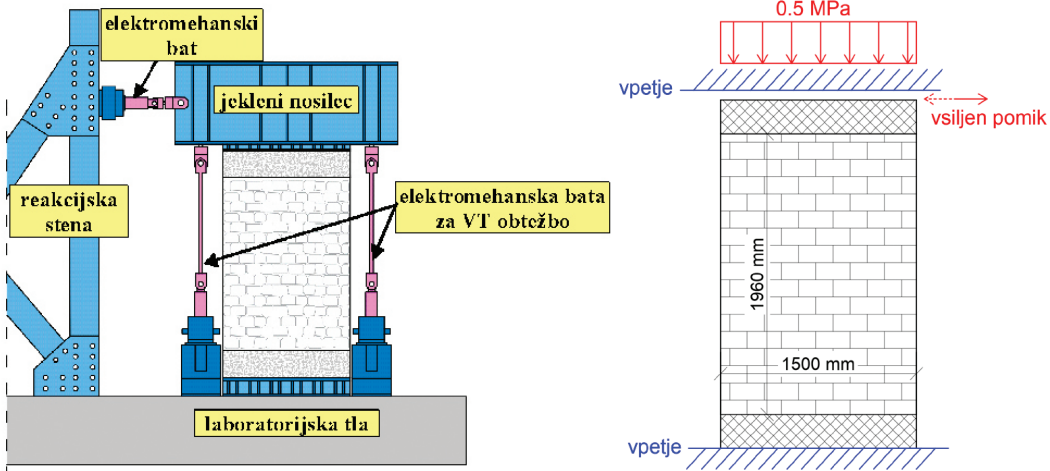
	Module elastičnosti [GPa]	Povprečna natezna trdnost [MPa]	Karakteristična natezna trdnost [MPa]	Povprečna deformacija pri pretrgu [%]
Tehnični list	25000	490	375	1.8
Zvita vlakna	3.32·10 ⁴	611	-	1.85*
Ravna vlakna	3.64·10 ⁴	883	-	2.50

Preglednica 2. Izmerjene materialne karakteristike mreže za utrjevanje

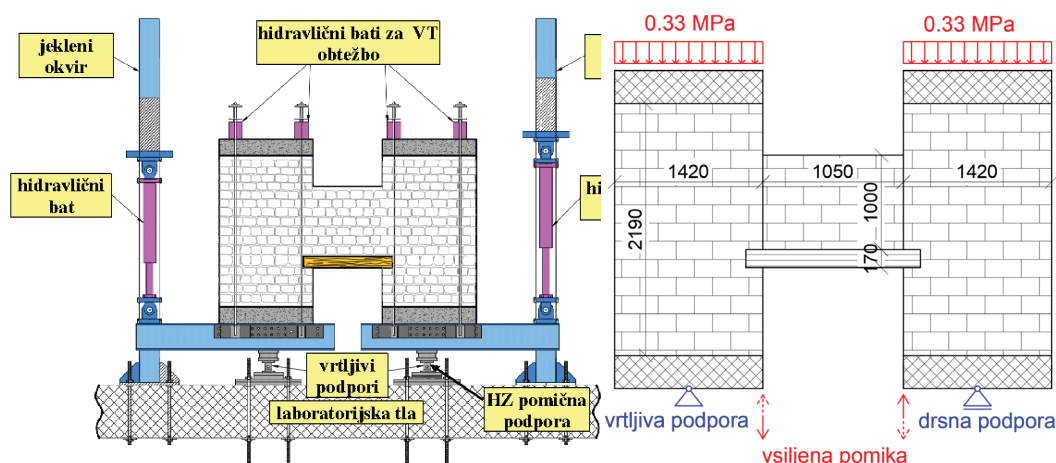
3 EKSPERIMENTALNI PODATKI

V sklopu projekta CONSTRAIN [2] so bili med drugim eksperimentalno preizkušeni slopi (Slika 4) in nadokenski (prekladni) zidovi (Slika 5). Preizkušanci so bili zgrajeni tako, da so predstavljali staro gradnjo, ki je potrebna utrditve in je tipična za Slovenijo in severno Italijo. Konfiguracije oz. dimenzije se reprezentativne za take elemente, pred preizkušanjem pa so bili preizkušanci ustrezno starani. Slopi so v nadaljevanju označeni s črko P (iz angleške besede pier), nadokenski zidovi pa s črko S (iz angleške besede spandrel). Obe vrsti preizkušancev sta bili lahko iz dvoslojnega kamnitega (S2) oz. eno- ali dvosloj-

nega opečnega zidovja (B1/B2), ki po karakteristikah ustreza staremu zidovju. Preizkušanci so bili neutrjeni (U), utrjeni z ene (R1) ali obeh strani (R2). Matrika obravnavanih preizkušancev in oznake so prikazane v tabelah 1 in 2.



Slika 4. Postavitev eksperimenta slopov (levo) s prikazano obremenitveno shemo (desno)



Slika 5. Preizkuševališče za nadokenske dele zidov

P-S2-U (dvoslojni kamniti neutrjeni zid)			
P-S2-R1 (dvoslojni kamniti enostransko utrjeni zid)			
P-S2-R2 (dvoslojni kamniti dvostransko utrjeni zid)			
P-B1-U (enoslojni opečni neutrjeni zid)			
P-B1-R1 (enoslojni opečni enostransko utrjeni zid)			
P-B2-U (dvoslojni opečni neutrjeni zid)			
P-B2-R1 (dvoslojni opečni enostransko utrjeni zid)			
P-B2-R2 (dvoslojni opečni dvostransko utrjeni zid)			

Preglednica 2. Izmerjene materialne karakteristike mreže za utrjevanje

S-S2-U (dvoslojni kamniti neutrjeni zid)			
S-S2-R1 (dvoslojni kamniti enostransko utrjeni zid)			
S-S2-R2 (dvoslojni kamniti dvostransko utrjeni zid)			
S-B1-U (enoslojni opečni neutrjeni zid)			
S-B1-R1 (enoslojni opečni enostransko utrjeni zid)			
S-B2-U (dvoslojni opečni neutrjeni zid)			
S-B2-R1 (dvoslojni opečni enostransko utrjeni zid)			

Preglednica 2. Izmerjene materialne karakteristike mreže za utrjevanje

4 NUMERIČNI MODEL

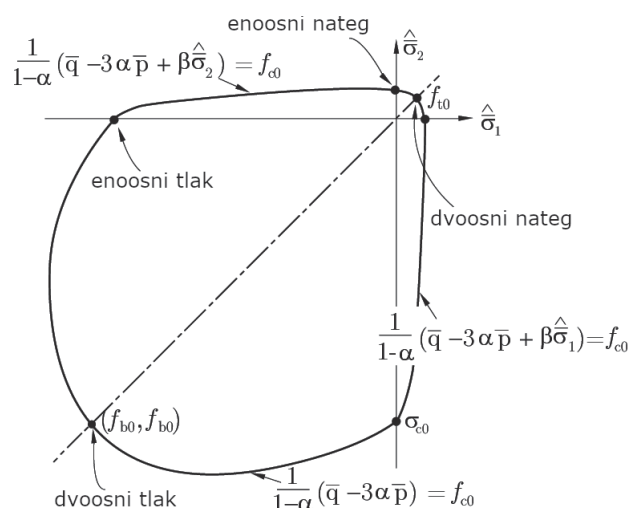
Za vse numerične analize je bil uporabljen program Abaqus podjetja Dassault Systèmes.

4.1 Materialni modeli

Za materialni model smo izbrali CDP (angl. concrete damaged plasticity), ki se pogosto uporablja za krhke materiale, kot sta

beton in zidovje [5]. CDP-model na podlagi delovnega diagrama materiala v tlaku in nategu generira funkcijo plastičnega tečenja po aproksimaciji naprednega Drucker-Prägerja [6], kot je prikazano na sliki 6.

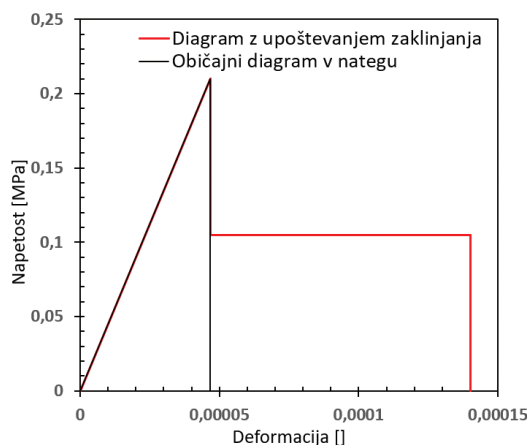
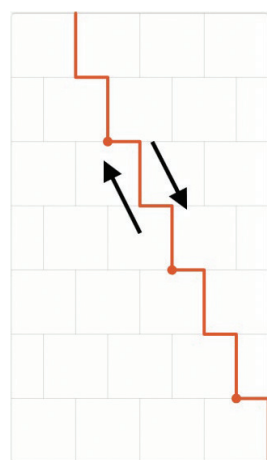
Za delovni diagram zidovja v tlaku uporabimo eksperimentalne podatke iz tlačnih preizkusov, v katerih se testira manjši zid in sam po sebi predstavlja odziv zidovja (kot kompozita) [2]. Ker je bil med preizkusi merjen odnos sila-pomik oz. nape-



Slika 6. Porušna ovojnica dvoosnega napetostnega stanja materiala CDP (slika povzeta iz [6])

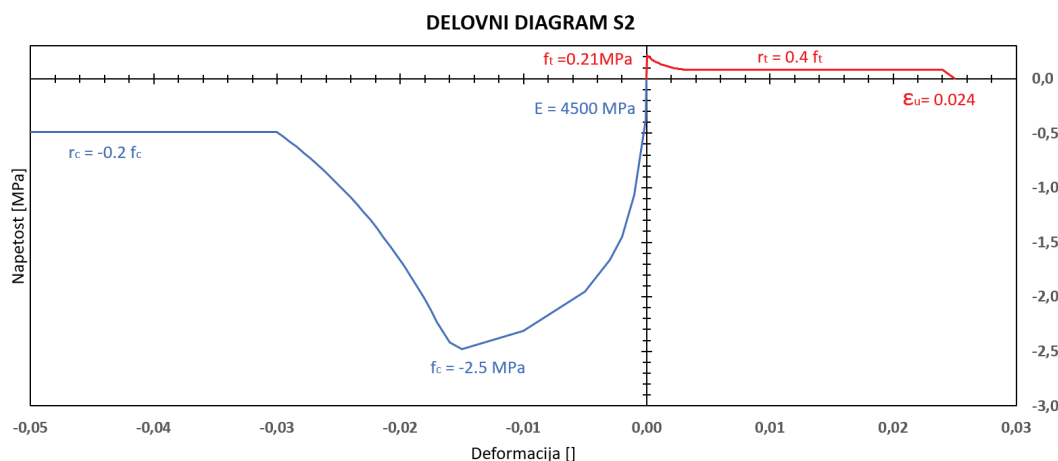
tost-deformacija le do maksimalne napetosti, do te vrednosti uporabimo eksperimentalne podatke, v območju mehčanja pa uveljavljeno formulacijo za zidovje na podlagi eksperimentov po Stavridis & Shing [23].

Za delovni diagram zidovja v nategu uporabimo natezno trdnost, ki jo prilagajamo tako, da dobimo najboljše ujemanje neutrjenih modelov slopov in nadokenskih elementov v območju od začetka utrjevanja do maksimalne odpornosti. V zidovju po nastanku prve razpoke ne pride do nenadne krhke porušitve, temveč zid še nekaj časa obdrži del nosilnosti. To se zgodi, ker se gradniki (kamni/zidaki) v zidovju prekrivajo, razpoka pa se mora oblikovati/formirati preko ali okoli njih. Dodatno je v razpokah v zidovju prisotno precejšnje trenje zaradi hrapave površine in tlačne obremenitve, ki pomaga prenašati določeno vodoravno silo po nastanku poškodb (Slika 7). Ta učinek medsebojnega zaklinjanja se v angleški literaturi imenuje interlocking effect. Ključni izziv v modeliranju je bilo ravno upoštevanje tega učinka – modelirali smo ga z modificiranim delovnim diagramom zidovja v nategu, ki vključuje plato rezidualne natezne trdnosti.

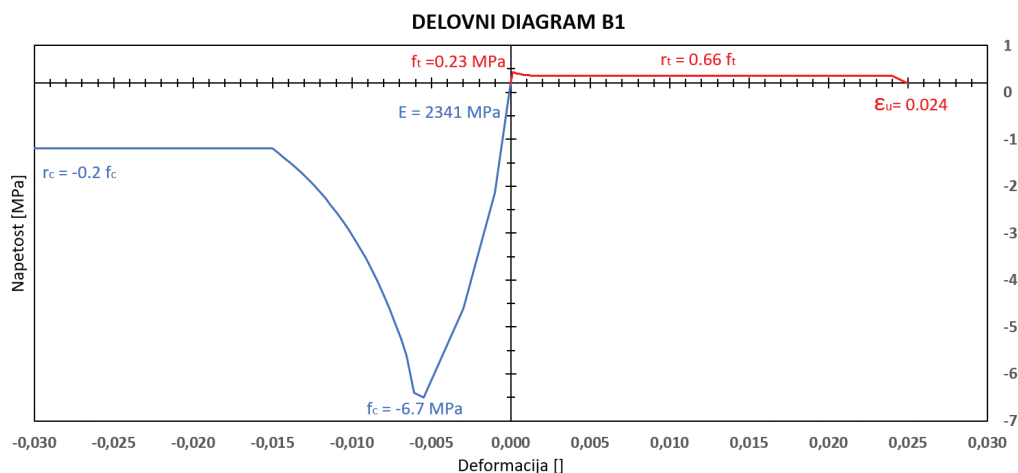


Slika 7. Levo prikaz odpornosti dejanskega elementa po nastanku diagonalnih razpok. Zid nudi odpornost v HZ-smeri tudi po nastanku razpok zaradi učinka medsebojnega zaklinjanja gradnikov zidu. Desno je prikaz upoštevanja nosilnosti po razpokanju

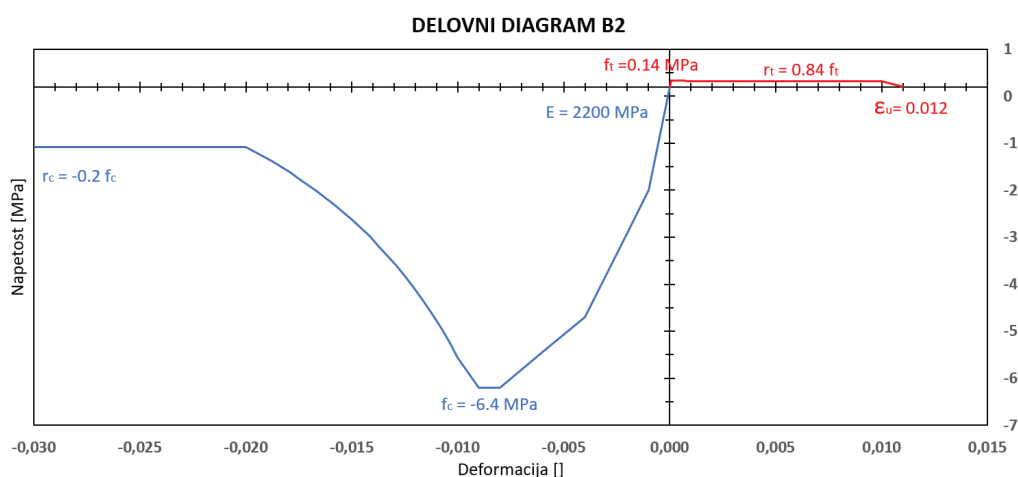
Na naslednjih slikah so prikazani delovni diagrami vseh materialov.



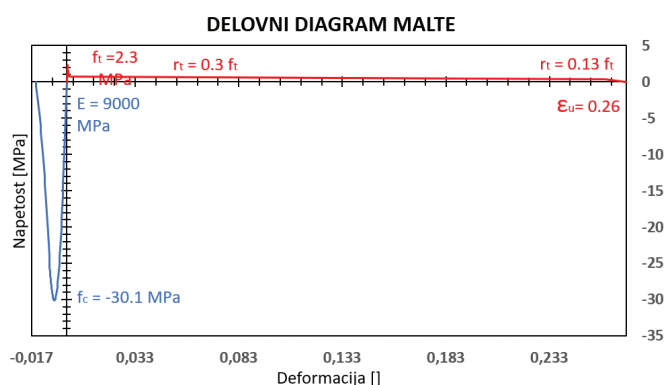
Slika 8. Delovni diagram dvoslojnega zidovja iz kamna



Slika 9. Delovni diagram dvoslojnega zidovja iz opeke

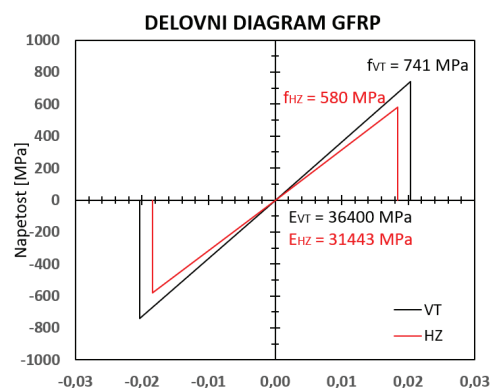


Slika 10. Delovni diagram enoslojnega zidovja iz opeke



Slika 11. Celoten delovni diagram utrjevalne malte

Delovni diagram steklenih vlaken je bil določen na podlagi preizkusov natezne trdnosti vertikalnih in horizontalnih vlaken mreže. Izmerjena maksimalna napetost v vodoravni smeri je znašala 580 MPa, v navpični smeri pa 741 MPa [2].



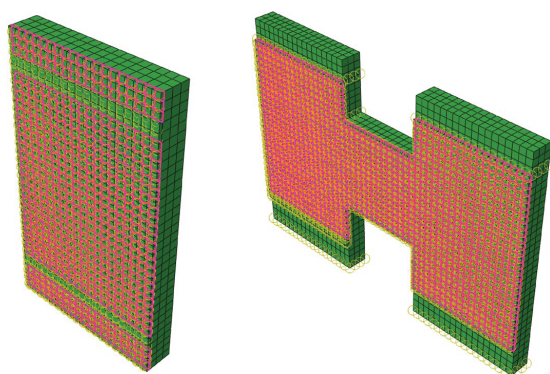
Slika 12. Celoten delovni diagram steklenih vlaken. Črna črta prikazuje navpična, rdeča pa vodoravna vlakna

Za delovni diagram steklenih vlaken v tlaku in nategu smo predpostavili linearno formulacijo do maksimalne napetosti (trdnosti), kateri sledi krhek pretrg. Elastična modula posameznih vlaken sta izračunana iz razmerja trdnosti in deformacije pri pretrgu.

4.2 Geometrija in kontakti

Slopi in nadokenski elementi so bili modelirani z volumetričnimi 3D-elementi (C3D8R), enako tudi maltna obloga, ki je bila modelirana kot ločena plast s prilagojenim delovnim diagramom. Mreža iz steklenih vlaken je bila modelirana z linijskimi paličnimi elementi (T3D2). Kontakt med zidom in maltno oblogo je bil modeliran z delno togim trenjskim kontaktom, ki simulira delaminacijo obloge pri velikih pomikih. Kontakt maltna obloga-mreža je bil tog. Kontakt slopa z AB-nosilci je bil normalni kontakt s trenjem.

Posebna pozornost je bila namenjena modeliranju robnih pogojev slopov: togost podpor pri eksperimentih je bila simulirana z vzmetmi, katerih togosti so bile kalibrirane glede na izmerjene vertikalne pomike temelja. Ta podrobnost je bila ključna za pravilno simulacijo deformacijske oblike in potisne krivulje. Podrobnosti so predstavljene v magistrski nalogi [8].



Slika 13. Numerični model slopa (levo) in nadokenskega elementa (desno) v programu Abaqus

4.3 Parametri numerične analize

Čeprav so bili eksperimenti izvedeni s ciklično in postopno povečujočo obtežbo, smo v numeričnih simulacijah uporabljali monotono potisno analizo, ker nas je zanimala le ovojnica odziva (največji pomik, odpornost in pomik pri porušitvi). Za reševanje je bila uporabljena metoda eksplcitne dinamike z dušenjem, ki je bila edina izvedljiva pri tako kompleksnih modelih. Velikost mreže KE je bila določena z občutljivostno analizo;

izbrana je bila velikost 80 mm za vse modele, da so rezultati medsebojno čim bolj primerljivi. Za zmanjšanje računskega časa je bilo uporabljeno skaliranje mase z minimalnim časovnim korakom $dt = 0,0001$ s. Podatki o numerični analizi in utemeljitev so podrobno predstavljeni v magistrski nalogi [8].

5 REZULTATI – PRIMERJAVA Z EKSPERIMENTI

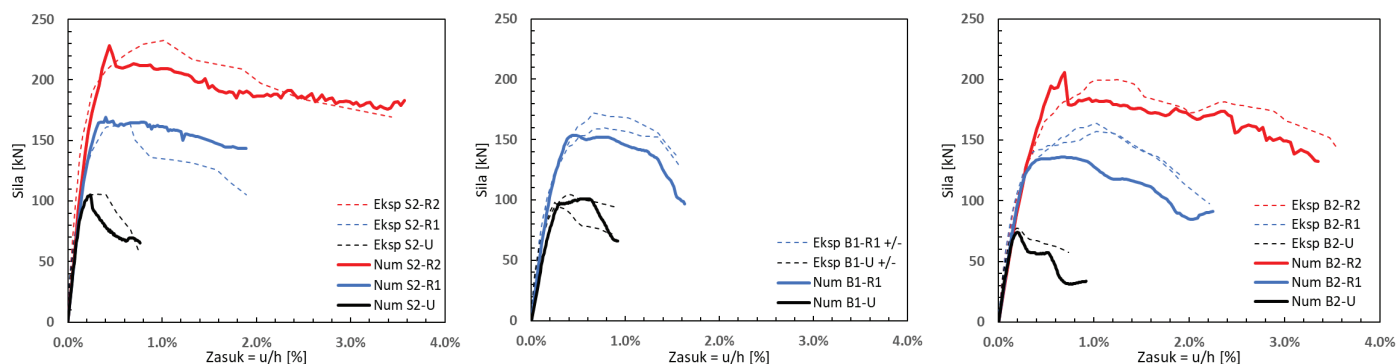
5.1 Slopi

Potisne krivulje numeričnih simulacij slopov kažejo razmeroma dobro ujemanje z eksperimenti (Slika 14). Modeli natančno simulirajo začetno togost in maksimalno odpornost (povprečno odstopanje 6,2 %). Mehčanje je prav tako razmeroma dobro zajeto, medtem ko je ujemanje končnega pomika slabše – numerični modeli v splošnem podcenijo končni pomik pri porušitvi. Deformacije in porušni mehanizmi numeričnih modelov izkazujejo precej natančno ujemanje. To je razvidno s Slike 15, na kateri so ena ob drugi prikazane glavne deformacije iz simulacije in poškodbe, dobljene z optičnim sistemom med preiskavo. Primerjava neutrjenih, enostransko utrjenih in dvostransko utrjenih slopov pokaže, da se mehanizem s stopnjo utrjevanja spreminja iz strižnega proti upogibnemu. Rezultati kažejo še, da enostransko utrjevanje poveča maksimalno odpornost za 60 % in mejni pomik za 150 %, dvostransko pa za 120 % in 300 %. Ker se prispevek utrjevanja iz enostranskega v dvostranskega ravno podvoji, lahko sklepamo, da je že pri enostranskem utrjevanju polno izkoriščena maltna obloga.

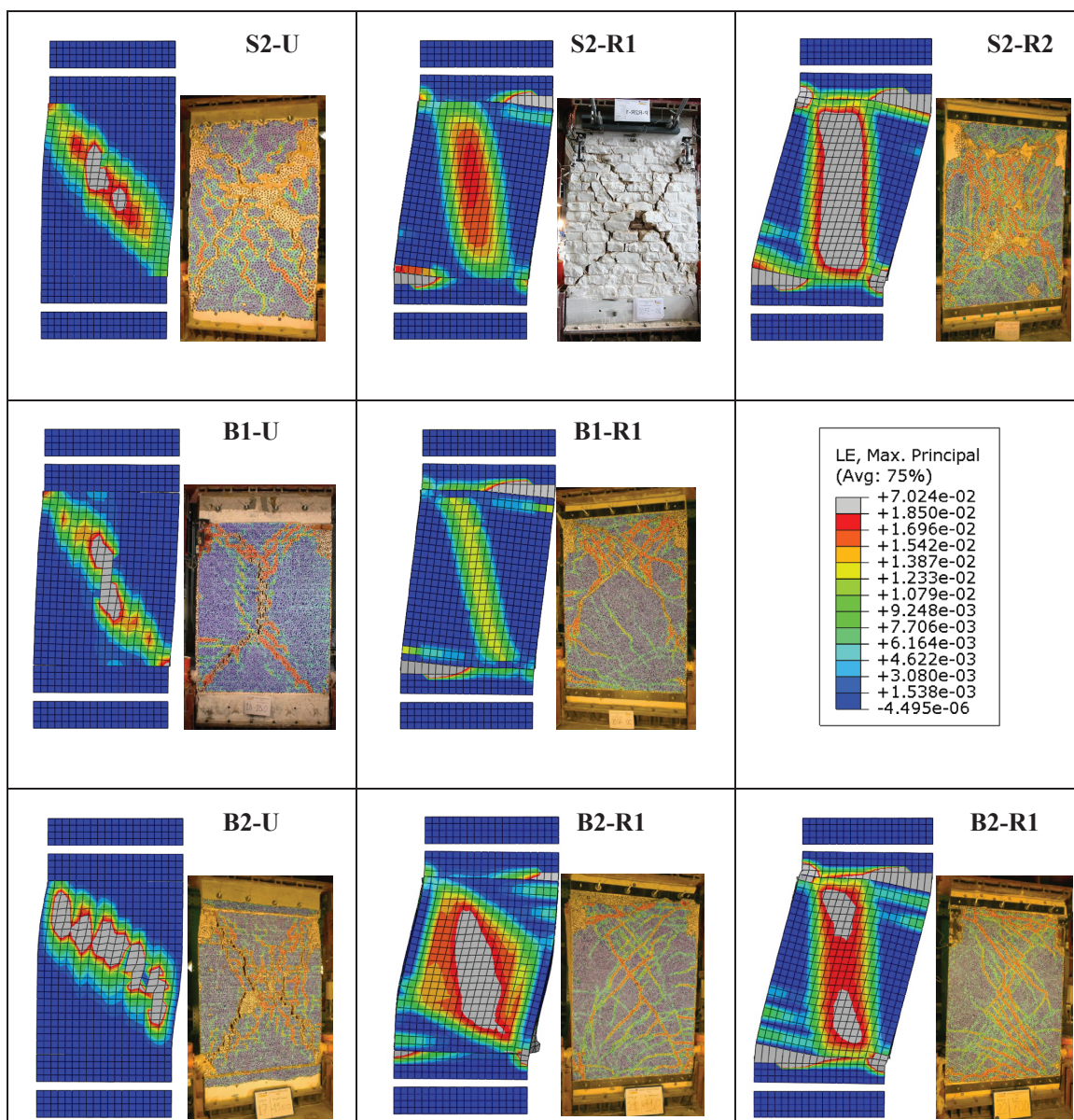
5.2 Nadokenski elementi

Potisne krivulje nadokenskih elementov kažejo sprejemljivo ujemanje z eksperimenti, a z nekoliko večjim povprečnim odstopanjem pri maksimalni odpornosti (13,1 %). Numerični modeli v splošnem precenijo maksimalno odpornost nadokenskih elementov, a dobro zajamejo končni pomik.

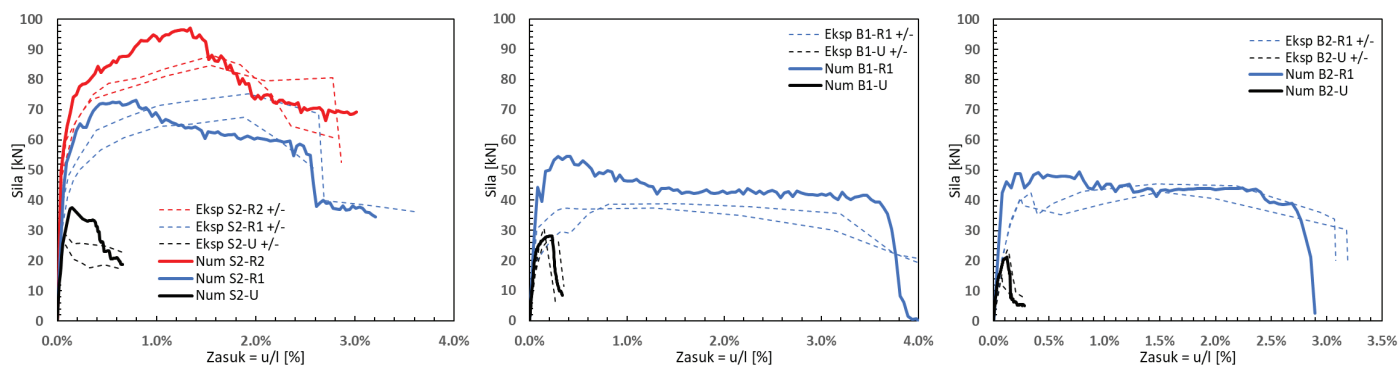
Vzorci poškodb pri nadokenskih elementih kažejo tendenco k upogibni porušitvi – razvoj vertikalnih razpok ob stiku nadokenskega elementa s slopom. Vodoravna vlakna mreže iz steklenih vlaken se pretrgajo po vertikalni razpoki ob slopu, kar se ujema z eksperimentalnimi opažanji. To je razvidno s Slike 17, na kateri so ena ob drugi prikazane glavne deformacije iz simulacije in poškodbe, dobljene z optičnim sistemom med preiskavo.



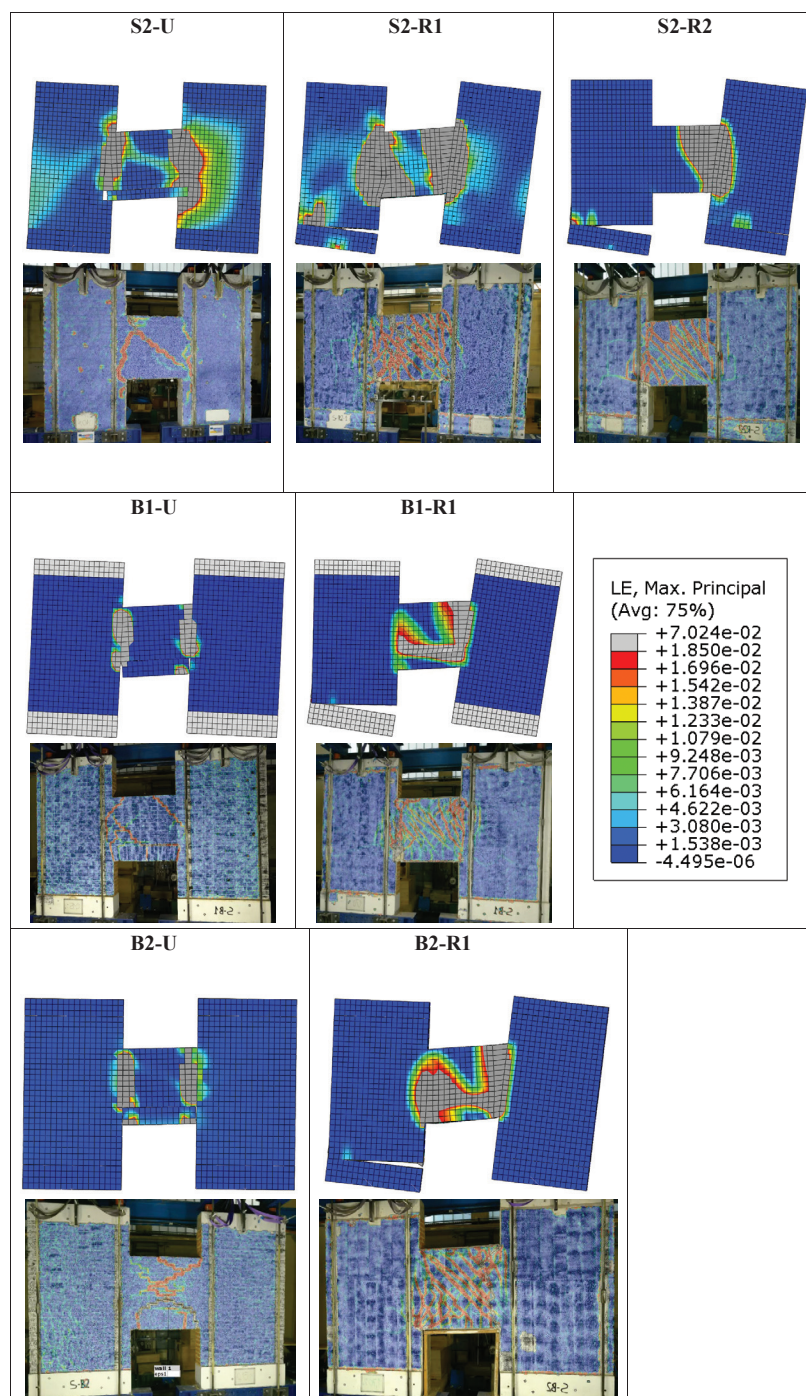
Slika 14. Primerjava ovojnic odziva iz eksperimentov (črtkane črte) in potisnih krivulj iz numeričnih simulacij (polne črte) za zidne slope. Levo so dvoslojni kamniti zidovi, na sredini enoslojni opečni zidovi in desno dvoslojni opečni zidovi



Slika 15. Primerjava glavnih deformacij iz numeričnih simulacij in vzorcev razpok med eksperimenti, dobljenih z optičnim sistemom (rezultati za zidne sipe)



Slika 16. Primerjava ovojnic odziva iz eksperimentov (črtkane črte) in potisnih krivulj iz numeričnih simulacij (polne črte) za nadokenske zidove. Levo so dvoslojni kamniti zidovi, na sredini enoslojni opečni zidovi in desno dvoslojni opečni zidovi



Slika 17. Primerjava glavnih deformacij iz numeričnih simulacij in vzorcev razpok med eksperimenti, dobljenih z optičnim sistemom (rezultati za nadokenske zidove)

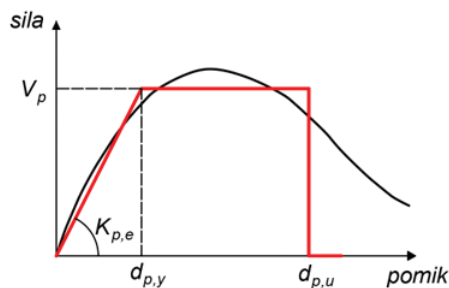
6 VALIDACIJA ENAČB ZA PROJEKTIRANJE

6.1 Bilinearni odziv elementov v projektiranju

Za vrednotenje potresne odpornosti zidanih elementov (oz. stavb) se v praksi uporabljata modalna analiza s spektri odziva

ali nelinearna potisna analiza (metoda N2). V obeh pristopih je odziv zidanih slopov in nadokenskih elementov opisan z ustrezno togostjo K_e in nosilnostjo na strižno silo V . V primeru metode N2 pa je treba določiti tudi elastični mejni pomik d_e in maksimalni (mejni) pomik d_u .

Postopek projektiranja, razvit v sklopu projekta PRO-SIS [9], predvideva analitične enačbe za določitev vsakega od teh štirih parametrov za utrjene elemente. Togost utrjenega slopa



Slika 18. Na sliki je s črno krivuljo prikazan povprečni odziv slopov, z rdečo pa bilinearno idealiziran odziv. Indeks p nakazuje, da gre za slope

(K_e) se izračuna z upoštevanjem kompozitnega prereza zidu in maltne obloge, kjer se elastični in strižni modul normalizirata na izhodiščno debelino zidu (enačbe (1)-(1.3)). Maksimalna odpornost (V_{CRM}) je seštevek odpornosti neutrenjenega elementa in prispevka vlaken, pri čemer se prispevek malte zanemari, saj razpoka preden element kot celota doseže maksimalno odpornost (enačbe (2)-(2.3.1)). Elastični pomik (d_e) se določi iz

nosilnosti in togosti (enačba (3)), mejni pomik ($d_{u,URM}$ za neutreno zidovje in $d_{u,CRM}$ za utrjeno) pa je predpisani delež višine zidu in je odvisen od vrste porušitve (enačbe (4.1)-(4.2)).

$$K_e = \frac{1}{\frac{h^3}{\eta EI} + \frac{h}{GA_s}} \quad (1)$$

$$E_{CRM} = \frac{t_m E_m + t_c E_c}{t_m} \quad (1.1)$$

$$G_{CRM} = \frac{t_m G_m + t_c G_c}{t_m} \quad (1.2)$$

$$V_{CRM} = \min(V_{c,CRM}; V_{s,CRM}; V_{f,CRM}) \quad (2)$$

$$V_{c,CRM} \leq 0.25 l t f_{cd} \quad (2.1)$$

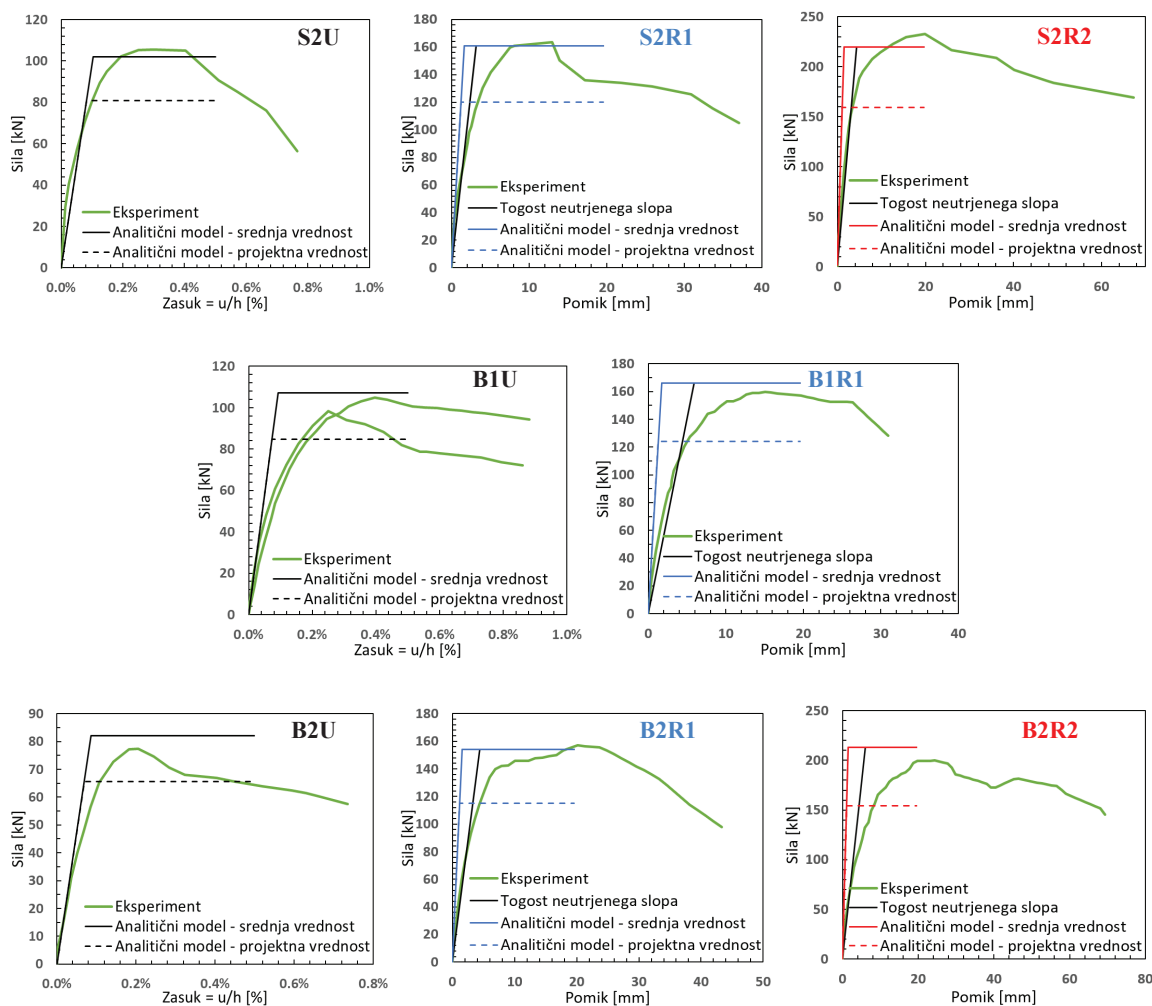
$$V_{s,CRM} = V_{s,URM} + V_{s,Fib} \quad (2.2)$$

$$V_{s,URM} = \frac{f_{td}}{\beta} l t \sqrt{1 + \frac{\sigma_o}{f_{td}}} \quad (2.2.1)$$

$$V_{s,Fib} = \frac{1}{2} \chi A_{Fib,HZ} l \alpha_t f_{td,Fib,HZ}, \quad (2.2.2)$$

$$V_{f,CRM} = \frac{\alpha M_{Rd,CRM}}{h} \quad (2.3)$$

$M_{Rd,CRM}$... določen s programom za analizo prerezov (2.3.1)



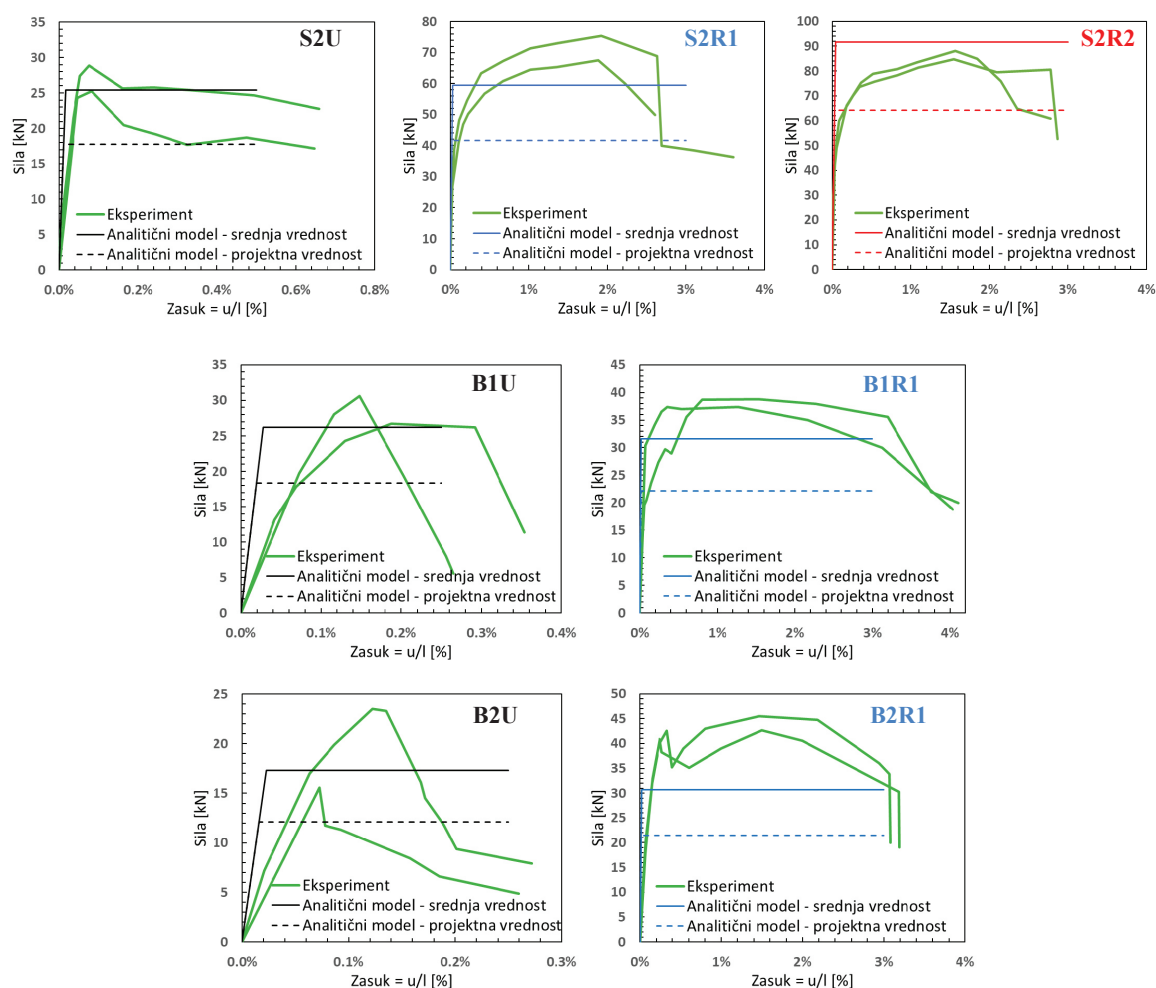
Slika 19. Primerjava analitičnih in eksperimentalnih odzivov vseh osem preizkušancev slopov. Pri utrjenih vzorcih je s črno prikazana še togost neutrenjenih slopov, ki se bolje ujema z eksperimenti

- $d_y = \frac{V}{K_e}$
- $d_{u,URM} = \{0,005 h, \text{strižna porušitev } 0,01 h, \text{upogibna porušitev} \}$ (4.1)
- $d_{u,CRM} = \{0,01 h, \text{strižna porušitev } 0,02 h, \text{upogibna porušitev} \}$ (4.2)
- K_e ...elastična (začetna) togost elementa
- E_m, G_m, t_m ...elastični modul,strižni modul in debelina zidovja
- E_G, G_G, t_G ...elastični modul,strižni modul in debelina utrjevalnega sloja
- h ...višina elementa
- η ...faktor vpliva robnih pogojev vpetja
- V_{CRM} ...odpornost utrjenega elementa na strižno silo
- $V_{c,CRM}$...tlačna odpornost utrjenega elementa na strižno silo
- l ...dolžina elementa
- t ...višina elementa
- f_{cd} ...projektna tlačna trdnost zidovja
- $V_{s,CRM}$...strižna odpornost utrjenega elementa na strižno silo
- $V_{s,URM}$...strižna odpornost neutrjenega elementa na strižno silo
- $V_{s,Fib}$...strižna odpornost utrjevalnega sloja na strižno silo
- (3) f_{td} ...projektna natezna trdnost zidovja pri diagonalni porušitvi
- β ...geometrijsko razmerje elementa
- σ_0 ...normalna tlačna napetost elementa
- χ ...koeficient učinkovitosti utrjevalnega sloja
- $A_{Fib,HZ}$...skupna površina vseh vlaken,ki potekajo vzporedno s silo
- $f_{td,Fib,HZ}$...natezna trdnost vlaken
- α_t ...koeficient redukcije natezne trdnosti zaradi delovanja sile pod kotom
- α ...koeficient vpliva robnih pogojev vpetja

6.2 Primerjava z eksperimenti – slopi

Primerjava analitičnih izrazov z eksperimenti kaže, da je togost utrjenih slopov z analitičnimi izrazi precejšnja. Razlog je predpostavka o popolnoma togi zvezi med zidom in oblogo. Primernejši izraz za togost utrjenega elementa upošteva le togost osnovnega neutrjenega elementa (glej primerjavo na sliki 19).

Maksimalna odpornost slopov je z analitičnimi izrazi ocenjena precej natančno v primerjavi z eksperimenti. To sicer velja le za geometrijske konfiguracije slopov, kjer je razmerje med



Slika 20. Primerjava analitičnih in eksperimentalnih odzivov vseh sedmih preizkušancev nadokenskih elementov

višino (h) in dolžino (l) $h/l = \beta \geq 1,0$ (glej v nadaljevanju), kar ustreza vsem izvedenim eksperimentom. Mejni pomik je tako pri enostranskem (R1) kot pri dvostranskem (R2) utrjevanju podcenjen. Opravljene analize in eksperimenti kažejo, da bi lahko bili mejni pomiki 1 % višine za strižno in 2 % višine za upogibno porušitev.

6.3 Primerjava z eksperimenti – nadokenski elementi

Togost nadokenskih elementov je z analitičnimi izrazi v vseh primerih nekoliko precenjena, podobno kot pri slopih. Maksimalna odpornost je ocenjena s sprejemljivo natančnostjo, mejni pomik pa se tako pri enostranskem kot pri dvostranskem utrjevanju dobro ujema z eksperimenti.

6.4 Primerjava z rezultati parametrične analize

Numerični model iz Abaqusa smo uporabili, da smo analizirali učinek utrditve na zidove (slope) različnih dolžin (pri konstantni višini smo povečevali dolžino). Ta analiza je razkrila, da se s povečevanjem dolžine slopov pri strižnem porušnem mehanizmu linearno povečuje prispevek utrjevalnega sloja. To je v skladu z enačbo analitičnega modela, ki predpostavlja maksimalni naklon diagonalne razpoke 45° (merjeno od horizontale).

Rezultati za neutrene slope z razmerjem $\beta < 1,0$ pa kažejo, da analitični model podceni odpornost, kar je sicer konservativno za posamezen element, a na nivoju celotne etaže vodi do prevelikih sil na vitkejšje slope, prehitre porušitve daljših slopov

in nepravilen razpored sil med zidovi v nelinearnem območju. Do bolj natančnega izraza za strižno odpornost nismo prišli, je pa zaenkrat največje ujemanje z eksperimenti kazal analitični izraz (enačba 2.2.1a), ki je izpeljan z regresijo na podlagi trenjskega modela.

Da bi izboljšali odziv čokatih zidov, ki so bistveno bolj dolgi kot visoki, smo naredili numerično parametrično analizo s približno 150 primeri, v kateri smo spreminjali razmerje višine proti dolžini (β), stopnjo tlačne napetosti in materialne karakteristike zidovja. Na podlagi teh analiz smo empirično določili model nosilnosti čokatih slopov, za katerega smo nato regresijsko določili ustrezne parametre. Izboljšani model daje bistveno boljše napovedi za čokate zidove, kot je razvidno s Slike 23, kjer so rezultati izboljšanega modela prikazani z rdečo krivuljo.

Izboljšan analitični izraz za strižno odpornost neutrenih slopov:

$$V_{s,URM} = (f_{v0} + \sigma_0 (1 - \sin \alpha) \cdot \cos \alpha \cdot \mu) l t \quad (2.2.1a)$$

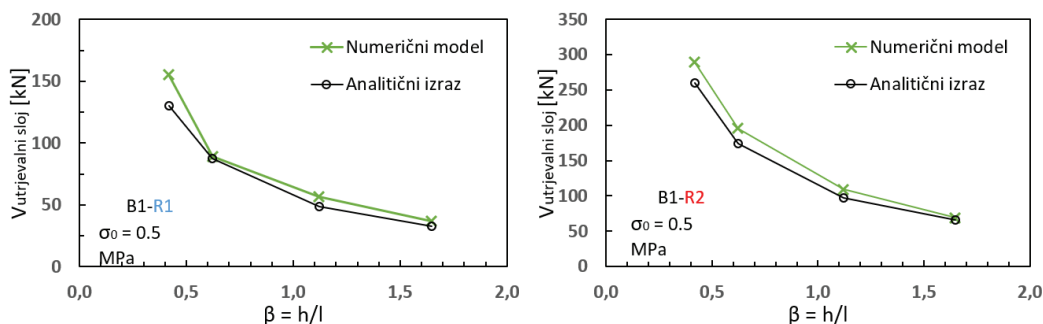
$f_{v0} = 0,42 f_t^{0,8} f_c^{0,2} \dots$ modificirana začetna strižna trdnost

$\alpha = \arctan\left(\frac{h}{l}\right) \dots$ kot diagonale

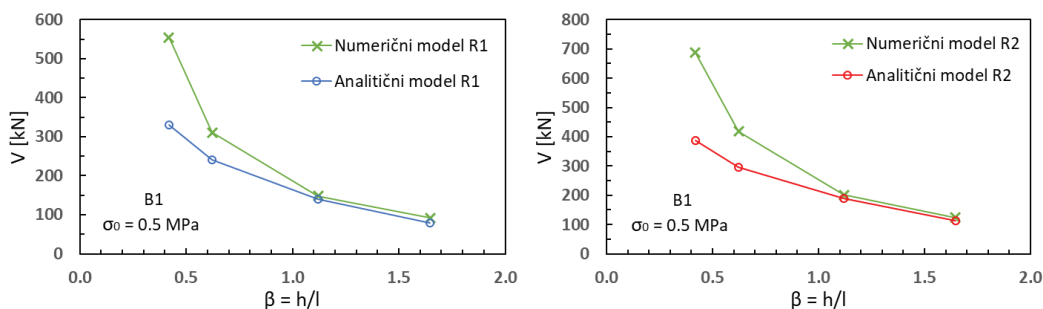
$(1 - \sin \alpha) \dots$ transformacija za račun napetosti pravokotno na razpoko

$\cos \alpha \cdot \mu \dots$ empirično modificirani koeficient notranjega trenja materiala

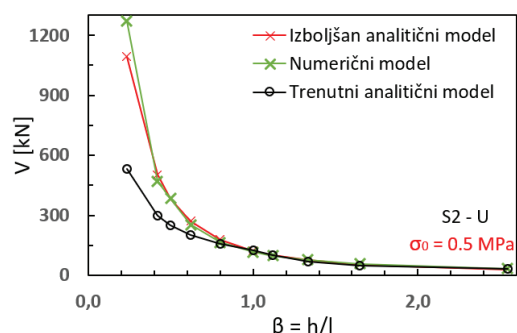
Območje veljavnosti izboljšanega modela je $0 < \frac{f_t}{f_c} < 0,2$, izpolnjeno mora biti tudi, da ima material zadostni dilatacijski kot ψ ,



Slika 21. Primerjava analitične in numerične odpornosti utrjevalnega sloja pri slopih, utrjenih z ene in dveh strani pri normalni napetosti 0,5 MPa in različnih geometrijskih razmerjih



Slika 22. Primerjava analitične in numerične odpornosti opečnih slopov, utrjenih z ene in dveh strani pri normalni napetosti 0,5 MPa in različnih geometrijskih razmerjih, kaže na neujemanje odpornosti neutrenih slopov, saj se prispevek utrjevalnega sloja ujema z numeričnimi analizami – glej prejšnjo sliko



Slika 23. Primerjava strižne odpornosti neutrjenih kamnitih slopov različnih geometrij pri konstantni napetosti 0,5 MPa kaže vidno odstopanje trenutnega analitičnega modela od numeričnega modela ter boljše ujemanje izboljšanega analitičnega izraza

da se lahko vzpostavi diagonalna razpoka namesto horizontalne, kar je v zidovju običajno izpolnjeno.

f_{v0} in μ sta bila določena z regresijo, ki je dala najboljše ujemanje, če sta bila $f_{v0}=0,42 f_c^{0,8} f_c^{0,2}$ in $\mu=1$.

Model je izpeljan izključno z uporabo numeričnih simulacij, zato bi bilo treba njegovo veljavnost za čokate zidove potrditi z eksperimentalnimi testi.

7 SKLEP

Analizirali smo potresni odziv zidovja, utrjenega z maltnimi oblogami, armiranega z mrežami iz steklenih vlaken. Razvit je bil nelinearen numerični model v programu Abaqus, validiran na 15 eksperimentih iz projekta CONSTRAIN. Numerični model smo uporabili za parametrično analizo za validacijo obstoječih postopkov projektiranja in podrobnejše analize obnašanja pri potresu. Glavne ugotovitve so:

- Metoda utrjevanja je učinkovita za oba tipa elementov. Pri slopih z razmerjem $h/l \approx 1,3$ enostransko utrjevanje poveča maksimalno odpornost za 60 % in mejni pomik za 150 %, dvostransko pa za 120 % in 300 %.
- Razviti numerični model daje zadovoljivo ujemanje za slope (povprečno odstopanje pri maksimalni odpornosti 6,2 %) in za nadokenske elemente (13,1 %). Enotni materialni parametri za vse eksperimente dajejo modelu večjo splošno veljavnost.
- Parametrična analiza je pokazala, da se z višjo stopnjo utrjevanja pri slopih porušni mehanizem nagiba k upogibu, pri nadokenskih elementih pa k strigu. Dvostransko utrjevanje poveča odpornost neutrjenih zidov dvakrat toliko kot enostransko utrjevanje, kar pomeni, da že enostransko utrjevanje zagotavlja polni izkoristek in sodelovanje z zidom.
- Analitični izraz za togost utrjenih elementov se lahko izboljša tako, da se tudi pri utrjenih elementih računa togost osnovnega neutrjenega elementa brez prispevka utrditvenega sloja.
- Analitični izrazi za projektiranje iz projekta PRO-SIS so ustrezni za razmerje $\beta \geq 1,0$.
- Analitični izraz za strižno odpornost utrjevalnega sloja so ustrezni in izkazujejo (dovolj) veliko natančnost.

- Pri čokatih slopih z razmerjem višine proti dolžini $\beta < 1,0$ so nekateri analitični izrazi nenatančni:

- Izraz za strižno odpornost neutrjenih elementov (enačba (2.2.1)) neproporcionalno zajema vpliv tlačne sile in geometrije sloja. Simulacije kažejo, da linearno povečevanje tlačne sile v čokatih zidovih linearno povečuje strižno odpornost, česar trenutni analitični izraz ne izkazuje, ker je izpeljan s predpostavko o napetostnem stanju kot v nosilcih. Za take zidove največjo odpornost natančneje opisujejo izrazi, ki temeljijo na modificiranem trenjskem modelu iz enačbe 2.1.1a.
- Mejni pomiki utrjenih slopov so po veljavnih predpisih podcenjeni: raziskave kažejo vrednosti 1 % višine za strižno in 2 % višine za upogibno porušitev (namesto trenutnih 0,8 % in 1,6 %).

8 LITERATURA

- [1] Dolšek, M., Žižmond, J., Babič, A., Lazar Sinkovič, N., Jamšek, A., Gams, M., Isakovič, T. 2020. Seizmični stresni test stavbnega fonda Republike Slovenije (2020-2050): strokovne podlage za pripravo "Resolucije o programu krepitve potresne varnosti". Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo.
- [2] Projekt CONSTRAIN. 2020. The Experimental Campaign and Numerical Simulations of the CONSTRAIN Project. https://2014-2020.ita-slo.eu/sites/default/files/progetti/CONSTRAIN_Technical%20report_Experimental%20Campaign%20and%20Numerical%20simulations_Part1_7.pdf (Dostopno dne 21. julij 2025).
- [3] Gattesco, N., Boem, I. 2017. Characterization tests of GFRM coating as a strengthening technique for masonry buildings. *Composite Structures* 165: 209-222. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.043>
- [4] Gattesco, N., Boem, I. 2015. Experimental and analytical study to evaluate the effectiveness of an in-plane reinforcement for masonry walls using GFRP meshes. *Construction and Building Materials* 88: 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.014>
- [5] L. S. Rainone, V. Tateo, S. Casolo, in G. Uva. 2023. About the Use of Concrete Damage Plasticity for Modeling Masonry Post-Elastic Behavior. *Buildings*, let. 13, št. 8, str. 1915. <https://doi.org/10.3390/buildings13081915>
- [6] Dassault Systèmes. 2025. ABAQUS Analysis User's Manual (v6.6). <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?start=t-pt05ch18s05abm36.html> (Dostopno dne 27. avgust 2025).
- [7] A. Page. 1981. The biaxial compressive strength of brick masonry. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, let. 71, št. 3, str. 893-906. <https://doi.org/10.1680/jicep.1981.1825>
- [8] Kirn, D., 2025. Numerična analiza potresnega obnašanja zidovja utrjenega z maltnimi oblogami in mrežami iz steklenih vlaken. Magistrsko delo. Ljubljana: D. Kirn. Dostopno: <https://repositorij.uni-lj.si/lzpis/Gradiva.php?lang=slv&id=173721>
- [9] Gattesco, N., Boem, I., Rizzi, E., Gams, M., 2025. PRO-SIS_Report 1.1_Analytic model for dimensioning (D1.1.1). Dostopno: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20339331>