

Mehanizmi sloma zidova od nabijene zemlje

Kraus, I.¹, Perić, A.² i Kraus, L.³

Sažetak

Zemljane kuće rješavaju pitanje stanovanja za 30% svjetske populacije. Hrvatske tradicijske zemljane kuće se svrstavaju u narodno bogatstvo. Međutim, takve kuće su u Hrvatskoj nerijetko napuštene i u vrlo lošem stanju. Razlog tome se može naći u nedostatnom znanju o građenju zemljom te nedostatku odgovarajućih normi za projektiranje. Kako bi razvoj normi za projektiranje kuća od nabijene zemlje bio moguć, potrebno je provesti opsežna istraživanja koja obuhvaćaju eksperimentalna ispitivanja i numeričke studije. U radu je dan pregled eksperimentalnih ispitivanja provedenih na zidovima od nabijene zemlje te karakterističnih mehanizama sloma. Svi radom obuhvaćeni zidovi su ravni i opterećeni u svojoj ravnini.

Ključne riječi: mehanizmi sloma, nestabilizirana nabijena zemlja, ravni zidovi, tradicijsko građenje, eksperimentalno ispitivanje, pukotine

¹ **Doc. dr. sc. Ivan Kraus, mag. ing. aedif.**, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Zavod za materijale i konstrukcije, Vladimira Preloga 3, 31000 Osijek, e-mail: ikraus@gfos.hr

² **Ana Perić, bacc. ing. aedif.**, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Zavod za materijale i konstrukcije, Vladimira Preloga 3, 31000 Osijek, e-mail: a.peric.296@gmail.com

³ **Lucija Kraus, mag. ing. arch.**, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Zavod za arhitekturu i urbanizam, Vladimira Preloga 3, 31000 Osijek, e-mail: lucija@gfos.hr

1 Uvod

Zemljane kuće rješavaju pitanje stanovanja za 30 % svjetske populacije [1]. Takve kuće su prisutne i u Hrvatskoj, no one su uglavnom napuštene, a kao domovi za moderno stanovanje se zaobilaze zbog povezivanja sa siromaštvom. Dostupni dokazi (npr. [2], [3]) ističu Baranjske zemljane kuće kao najbolja ostvarenja hrvatskog seljačkog graditeljstva, a hrvatske tradicijske zemljane kuće svrstavaju u narodno bogatstvo jer utjelovljuju autentičnost. Prve kuće od zemlje su se gradile ad hoc i primjenom materijala iz neposredne okolice kuće ili kopanjem podruma. Iskustveno stečeno znanje o građenju se prenosilo usmenom predajom s naraštaja na naraštaj, bez znanstvene potvrde nosivosti i otpornosti konstrukcijskih elemenata. S napretkom novih tehnologija i industrijalizacijom na scenu stupaju moderni materijali, a građenje se odvija u skladu s normama za projektiranje. Tako tradicijsko građenje temeljeno na iskustvu biva zamijenjeno građevinama čije se ponašanje programira računalnim simulacijama.

Hrvatska je smještena na trusnom području, gdje je nužno projektirati potresno otporne kuće. No, aktualne norme za projektiranje ne prepoznaju nabijenu zemlju kao nosivi element, a time ne podržavaju građenje novih ili rekonstrukcije postojećih zemljanih kuća. Kako bi se osiguralo potrebno znanje za stvaranje novih ili dopunu postojećih normi za projektiranje nosivih konstrukcija i elemenata od nabijene zemlje, potrebno je provesti ispitivanja kojima bi se utvrdilo ponašanje nabijene zemlje kao materijala, ali i konstrukcijskog elementa.

Do danas je u svijetu provedeno vrlo malo eksperimentalnih ispitivanja na zidovima od nabijene zemlje. Iz ukupnog fonda dostupne literature, objavljene u proteklih 20 godina, autori su pronašli svega 30 radova koji sadrže rezultate ispitivanja provedenih na zidovima i kućama od nabijene zemlje. No, između tih 30 radova, tek trećina radova obrađuje ponašanje nestabiliziranih tradicijskih zidova od nabijene zemlje, opterećenih simuliranim potresnim djelovanjem.

U narednom poglavlju je dan kratak pregled eksperimentalno ispitanih zidova od nestabilizirane nabijene zemlje te pripadajućih mehanizama sloma. Mehanizme sloma je važno poznavati jer pružaju temelj za razvoj analitičkih postupaka i sigurnih metoda za projektiranje. Osim toga, mehanizmi sloma određeni eksperimentalnim metodama omogućavaju i olakšavaju dodatnu provjeru valjanosti numeričkih modela.

2 Eksperimentalno ispitani zidovi od nabijene zemlje

Mehanizam sloma ponajprije ovisi o geometriji konstrukcijskog elementa, građevnom materijalu od kojega je element izrađen te vrsti i položaju opterećenja. Nabijena zemlja je građevinski materijal koji se sastoji od pora i šupljina. Pore i šupljine se s porastom opterećenja povećavaju po dužini i širini, raste im broj i međusobno se povezuju, što konačno rezultira slomom. Poznata su tri glavna oblika sloma koja se mogu pojaviti u zidovima opterećenim u svojoj ravnini: i) dijagonalno raspucavanje, ii) raspucavanje na spoju s temeljem (tj. odizanje pri monotono rastućem horizontalnom djelovanju ili ljuljanje pri dinamičkom djelovanju) te iii) posmični oblik sloma (tj. raspucavanje u horizontalnoj ravnini).

Zidovi obrađeni u radu su opisani u tablici 1. Svi obrađeni zidovi su ravni, izrađeni od nestabilizirane nabijene zemlje i opterećeni u svojoj ravnini. U tablici 1 H je visina zida, L dužina zida, B debljina zida, f_c tlačna čvrstoća te q_v vertikalni pritisak pri vrhu zida. Vrijednost međukatnog pomaka (tablica 1) je određena kao omjer horizontalnog pomaka pri vrhu zida u trenutku sloma i visine zida.

Tablica 1. Opis geometrije, mehaničkih svojstava i načina opterećivanja eksperimentalno ispitanih zidova od nabijene zemlje

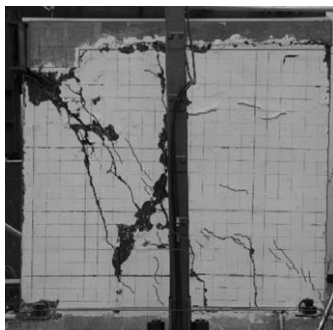
Izvor	H/L/B (cm)	Debljina sloja prije zbijanja (cm)	f_c (N/mm ²)	q_v (N/mm ²)	Horizontalno opterećenje	Međukatni pomak pri slomu (%)	Slika
[4]	150/150/20	15-20	1,47	-	reverzibilno cikličko	3,5	1
[5]	210/240/60	-	1,36	0,06 (konstantno)	monotono rastuće	2,7	2
[6]	150/150/25	10-15	1,05-2,20	0,30 (konstantno)	monotono rastuće	1,0	3
[7]	50/50/11	10-15	3,40-4,00	monotono rastuće	-	-	4
[8]	130/105/25	15	3,73	0,56 (konstantno)	reverzibilno cikličko	0,7	5

U laboratoriju u Turskoj je ispitano ponašanje nearmiranog zida od nabijene zemlje (slika 1). Zid je pobuđen samo reverzibilnom cikličkom horizontalnom silom, i to je jedini u ovom radu opisani zid koji nije opterećen dodatnim vertikalnim opterećenjem pri vrhu. Raspored pukotina pri slomu je za ovaj zid gotovo simetričan, a između slojeva nabijene zemlje su formirane izražene posmične plohe (slika 1).

Na sredini zida izrađenog u laboratoriju u Kini (slika 2) prije ispitivanja se pojavila vertikalna mikro pukotina uzrokovana skupljanjem prilikom sušenja [5]. Unos opterećenja je vršen u točki u gornjem lijevom uglu zida (slika 2). Oštećivanje zida je inicirano tek pri horizontalnom opterećenju od 40 kN, kada se vertikalna pukotina na sredini zida proširila, nakon čega je uslijedilo ljuštenje sloja u neposrednoj blizini pukotine [5]. Pri povećanju bočne sile za dodatnih 10 kN, u neposrednoj blizini mjesta unosa sile javlja se dijagonalna posmična pukotina, koja se širi u smjeru unosa sile prema podnožju zida [5]. Ova posmična pukotina se dijagonalno širi s povećanjem opterećenja sve do sloma zida. Prema opažanjima autora ispitivanja u slomu zida dominira posmični mehanizam sloma. Vršni horizontalni pomak zida je dosegnut pri vršnom opterećenju, nakon čega je uslijedio nagli slom.



Slika 1. Zid od nabijene zemlje ispitivan na horizontalno cikličko djelovanje [4] (uredili autori)

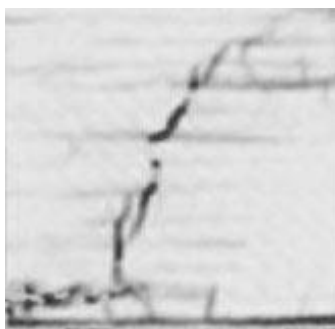


Slika 2. Uzorak pukotina u zidu od nabijene zemlje u trenutku sloma [5] (uredili autori)

Slika 3 prikazuje raspodjelu pukotina u zidu u trenutku otkazivanja nosivosti. Zid je ispitan u laboratoriju u Francuskoj i to na djelovanje postupno rastuće horizontalne sile koja je u zid unesena u gornjem desnom uglu (slika 3). Tijekom ispitivanja se u zidu formirala tlačna dijagonala, koja je uzrokovala vlačna naprezanja okomita na smjer svog protezanja [6]. Također, u ispitanome zidu prevladavaju kvazi-dijagonalne pukotine [6]. Međutim, moguće je uočiti i horizontalne pukotine između dva zbijena sloja zemlje. Također, na donjem lijevom dijelu zida prikazanog na slici 3 uočena je horizontalna pukotina na spoju dva sloja nabijene zemlje. Ova horizontalna pukotina se pojavila pri dosezanju 85 %-tne vrijednosti najvećeg horizontalnog opterećenja [6]. Ispitani zid je pokazao duktilno ponašanje, a nakon dovršetka ispitivanja je oštećeni zid, položen na betonskoj gredi, u cijelosti i bez urušavanja uspješno premješten viljuškarom [6].

Slika 4 prikazuje zid koji je doživio slom pri djelovanju postupno rastuće vertikalne sile. Zid je ispitan u laboratoriju u Njemačkoj. Na zidu su u trenutku sloma vidljive vertikalne i dijagonalne pukotine koje u gornjoj polovici zida tvore obrnuti stožac. Autori ispitivanja potvrđuju sličan obrazac pukotinama i na drugim ispitanim uzorcima iz istog seta. Slom zida je nakon dostizanja vršne vrijednosti vertikalne sile bio nagao [7].

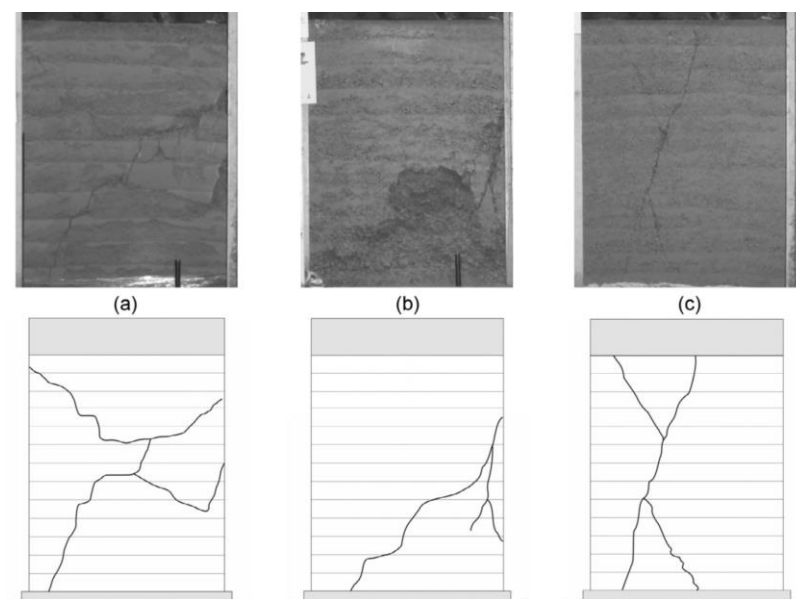
Na slici 5 su prikazana tri zida ispitana u laboratoriju u Njemačkoj. Na dva ispitana zida su se tijekom ispitivanja razvile dijagonalne pukotine, oblikujući slovo X, dok se na jednome zidu razvila samo jedna dijagonalna pukotina. Histerezne petlje dobivene mjerenjima na ovim zidovima su svojstvene posmičnom slomu uslijed klizanja slojeva nabijene zemlje [8].



Slika 3. Slika pukotina u zidu od nabijene zemlje u trenutku sloma [6] (uredili autori)



Slika 4. Uzorak pukotina zida opterećenog vertikalnim opterećenjem [7] (uredili autori)



Slika 5. Uzorci pukotina na tri zida izrađena od iste zemljane mješavine [8] (uredili autori)

3 Diskusija

Premda je zemlja superioran materijal za građenje u pogledu održivosti i ljudskog zdravlja, zemljin Kriptonit u kontekstu materijala za izvedbu nosivih konstrukcija u potresnim područjima su njena mala krutost i niska čvrstoća ([4] - [8]). Pregledom literature je ustanovljeno da nabijena zemlja ima približno 20 puta manju čvrstoću od betona ili opeke.

Svi zidovi navedeni u tablici 1 imaju vitkost manju od vrijednosti 2, te se sukladno HRN EN 1998-1 definiraju kao kratki zidovi. Pregledom tablice 1 je uočeno da veće vrijednosti međukatnog pomaka pri slomu mogu dosegnuti zidovi koji primaju manje vertikalno opterećenje.

Jasno je da na ponašanje i mehanizam sloma očvrslje nabijene zemlje utječe heterogenost materijala. Osim pijeska, gline i krupnijeg punila, očvrsla nabijena zemlja nerijetko sadrži pljevu i, primjerice, prirodna vlakna (npr. industrijsku konoplju ili slamu), što može utjecati na izgled

uzorka pukotina. Idealno, trajektorije naprezanja se kod homogenih materijala mogu opisati pravilnim krivuljama ili pravicima. Uz ovo, nameće se i pitanje koliki je utjecaj ljudskog faktora u mehanizmu sloma. Pregledom eksperimentalno ispitanih zidova od nabijene zemlje je u više slučajeva ustavnovljen posmični slom, i to na kontaktnoj plohi između dva zbijena sloja zemlje. Stoga se može i zapisati da je takva vrsta sloma nastupila na radnoj rešci.

4 Zaključak

U radu su razmatrani eksperimentalno ispitani zidovi od nestabilizirane nabijene zemlje opterećeni vertikalnim i horizontalnim opterećenima u svojoj ravnini. Svi ovdje promatrani zidovi su ravni i ispitani do sloma. Pregledom literature je ustanovljena potreba za provedbom dodatnih eksperimentalnih ispitivanja na zbijenom zemljanom materijalu i to naročito tradicijskim zemljanim mješavinama s područja Hrvatske, za kakve još uvijek nisu provedena istraživanja. Nadalje, potrebno je provesti istraživanje utjecaja vlažnosti nabijene zemlje, granulometrijskog sastava, načina zbijanja slojeva, udjela prirodnih vlakana te udjela gline i krupnozrnatog agregata u mješavini na mehanizam sloma. Svi ovi faktori određuju gustoću i poroznost zidova od nabijene zemlje, a time mogu utjecati na mehanizam sloma. Eksperimentalna ispitivanja obuhvaćena ovi istraživanjem upućuju da su kontaktne plohe između dva zbijena sloja zemlje i niska čvrstoća zemlje najslabe karike u nabijenim zidovima. Konačno, norme za izgradnju novih i obnovu postojećih kuća od nabijene zemlje zahtijevaju detaljnije istraživanje ponašanja materijala i konstrukcijskih elemenata od nabijene zemlje.

Literatura

- [1] Silva R.A. i suradnici; Conservation and New Construction Solutions in Rammed Earth; Structural Rehabilitation of Old Buildings; 2014; vol 2; 77-108
- [2] Živković, Z; Hrvatsko tradicijsko graditeljstvo; Zagreb; Ministarstvo kulture, Uprava za zaštitu kulturne baštine; 2013.
- [3] Lončar-Vicković, S. i Stober, D.; Tradicijska kuća Slavonije i Baranje - priručnik za obnovu; Zagreb, Ministarstvo turizma Republike Hrvatske i Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek; 2011.
- [4] Arslan, M. E., Emiroglu, M., Yalama, A.; Structural behavior of rammed earth walls under lateral cyclic loading: A comparative experimental study; Construction and Building Materials; 2017; 133; 433-442
- [5] Liu, K., Wang, M. i Wang, Y.; Seismic retrofitting of rural rammed earth buildings using externally bonded fibers; Construction and Building Materials; 2015; 100; 91-101
- [6] El-Nabouch, R. i suradnici; Assessing the in-plane seismic performance of rammed earth walls by using horizontal loading tests; Engineering Structures; 2017; 145; 153-161
- [7] Miccoli, L., Müller, U. i Fontana, P.; Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob; Construction and Building Materials; 2014; 61; 327-339
- [8] Miccoli, L., Drougkas, A. i Müller, U.; In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: Experimental testing and finite element modelling; Engineering Structures; 2016; 125; 144-152