Seizmička analiza suho zidanih kamenih konstrukcija Kombiniranom metodom konačnih i diskretnih elemenata

Hrvoje Smoljanović

Hrvoje Smoljanović, dipl.ing.građ., Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu
Ante Munjiza, dipl.ing.građ., Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu
Željana Nikolić, dipl.ing.građ., Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu
Ivan Balić, dipl.ing.građ., Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu

1. Uvod

- Suho zidane kamene konstrukcije, koje su nastale slaganjem kamenih blokova jedan na drugi, su najstariji tipovi konstrukcija od kojih su mnoge sačuvane do danas.
- Kada se govori o suho zidanim kamenim konstrukcijama, tada treba razlikovati dva osnovna tipa takvih konstrukcija:

SUHOZIDANE KAMENE KONSTRUKCIJE OD NEPRAVILNIH KAMENIH BLOKOVA

Suhozidi

Podzid željezničke pruge

Sklonište u gomili

Vrtujak na Korčuli

Bunje u Dalmatinskom zaleđu

Kamena kućerica u Konavoskim brdima

1. Uvod

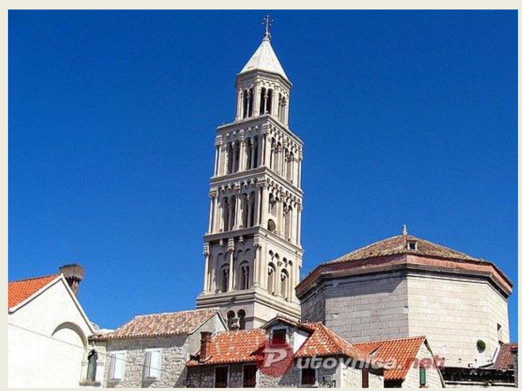
SUHOZIDANE KAMENE KONSTRUKCIJE OD PRAVILNIH KAMENIH BLOKOVA

Egipatske piramide

Partenon u Ateni

Koloseum u Rimu

Protiron u Splitu



Katedrala sv. Duje u Splitu

Stari most u Mostaru

1. Uvod

Glavne odlike suho zidanih kamenih konstrukcija

- Masivne konstrukcije
- Velika tlačna čvrstoća i uglavnom mala razina uporabnog tlačnog naprezanja
- Uglavnom bez morta u sljubnicama, a ako se i stavljao mort između kamenih blokova, to je uglavnom mort niskih čvrstoća koje je tokom vremena degradirao i izgubio svojstva tako da njegov utjecaj na mehaničku otpornost takvih konstrukcija možemo zanemariti
- Unutrašnje sile u konstrukciji prenose se preko kontaktnih tlačnih i posmičnih sila trenja među kamenim blokovima
- Slom uzrokovan gubitkom stabilnosti uslijed klizanja i rotacija blokova, rijetko kad prekoračenjem tlačne čvrstoće
- Za potrebe prenošenja vlačnih i dodatnih posmičnih sila među blokovima obično se upotrebljavaju metalne klamfe i trnovi

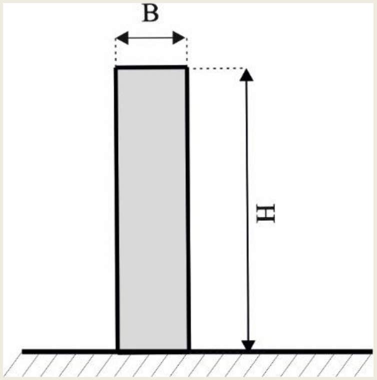
Metalne klamfe na konstrukcijui Protirona u Splitu

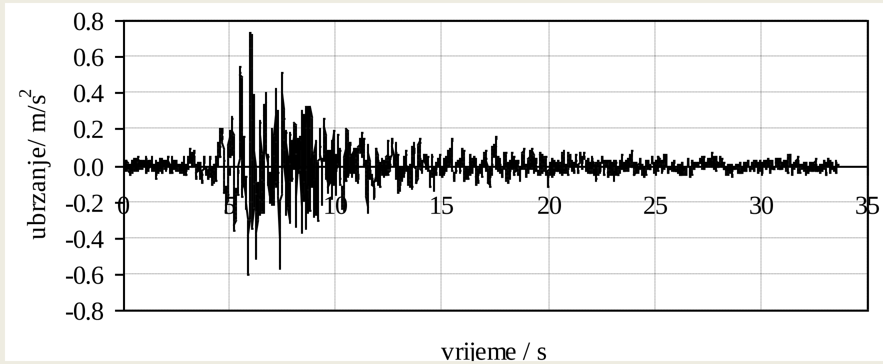
Čelični trnovi na konstrukciju Starog mosta u Mostaru

1. Uvod

Odabir numeričkog modela

Primjer: Stabilnost slobodno stojećeg kamenog stupa izloženog seizmičkom opterećenju





METODA KONAČNIH ELEMENATA (FEM)

Numerički model za simulaciju dinamičkog odgovora suho zidanih kamenih konstrukcija trebao bi obuhvatiti pojave vezane za:

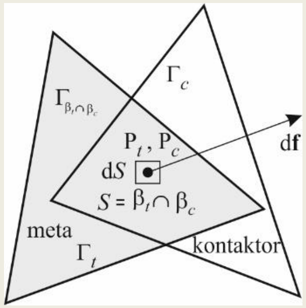
- Mehanizam prenošenja kontaktnih sila među kamenim blokovima koji obuhvaća normalne kontaktne sile kao posljedica normalne kontaktne interakcije i posmične kontaktne sile kao posljedica suhog trenja
- Mehanizam trošenja energije u suhom kontaktu
- Mogućnost pucanja kamenih blokova uslijed prekoračenja čvrstoće u vlaku i posmiku
- Deformabilnost kamenih blokova
- Mehanizam djelovanja klamfi i trnova
- Velike pomake i velike rotacije kamenih blokova

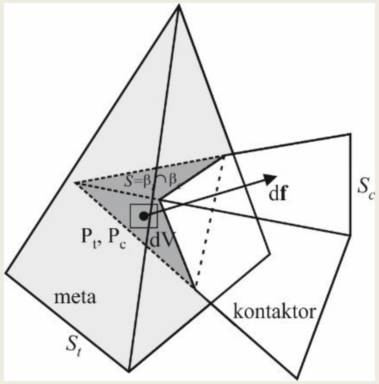
KOMBINIRANA METODA KONAČNIH I DISKRETNIH ELEMENATA (FEM/DEM)

2. Osnove kombinirane metode konačnih i diskretnih elemenata (FDEM)

- Kombinirana metoda konačnih i diskretnih elemenata, čiji je začetnik, prof. Ante Munjiza je namijenjena prvenstveno za simulaciju kontaktne interakcije među deformabilnim diskretnim elementima pri čemu od jednog diskretnog elementa kroz proces nastanka i širenja pukotina može nastati njih više

DETEKCIJA I INTERAKCIJA KONTAKTA



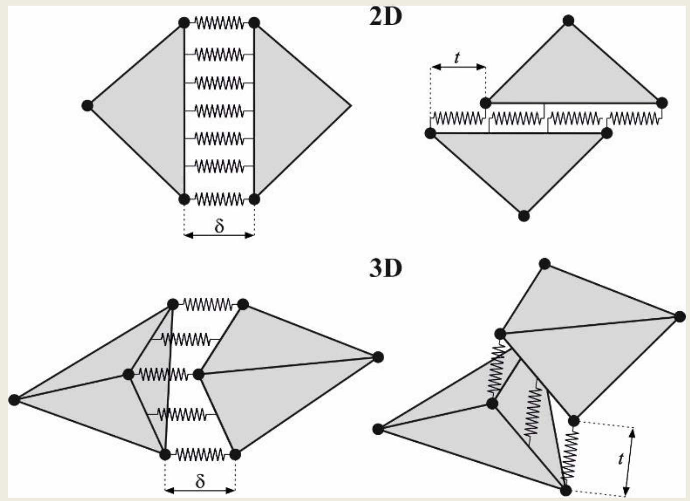


p_0 – penalty koeficijent

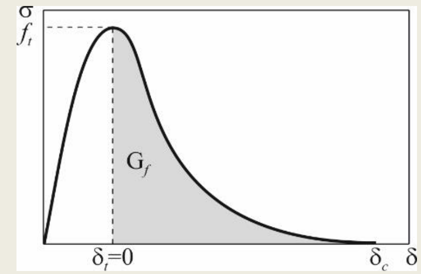
$\varphi(\mathrm{P})$ – polje potencijala

$$\mathbf{f}_c = \int_{V=\beta_t \cap \beta_c} \left(grad\varphi_c - grad\varphi_t \right) dV$$

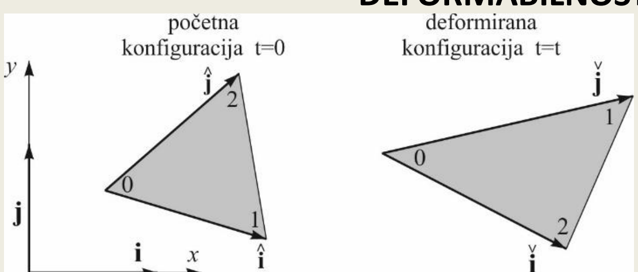
PRIJELAZ IZ KONTINUUMA U DISKONTINUUM



- Kontaktni element – materijalna nelinearnost
- Mogućnost sloma u vlaku i posmiku



DEFORMABILNOST KONAČNIH ELEMENATA



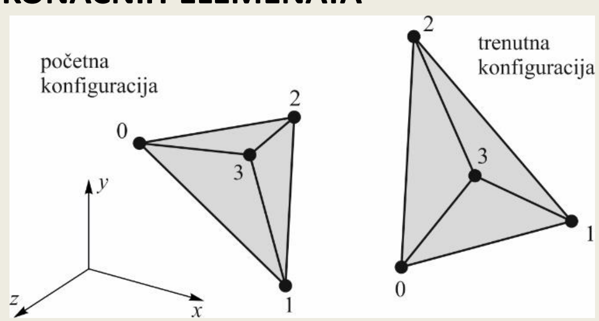
μ, χ -Lameove konstante

$\breve{\mathbf{E}}$ - Green – St – Venantov tenzor deformacija

ε_v -volumenska deformacija

$\bar{\mu}$ -koeficijent prigušenja

$\mathbf{D}$ -tenzor brzine deformiranja



$$\boldsymbol{\sigma} = 2\,\mu\,\breve{\mathbf{E}} + \lambda\,\varepsilon_v\,\mathbf{I} + \bar{\mu}\mathbf{D}$$

VREMENSKA DISKRETIZACIJA

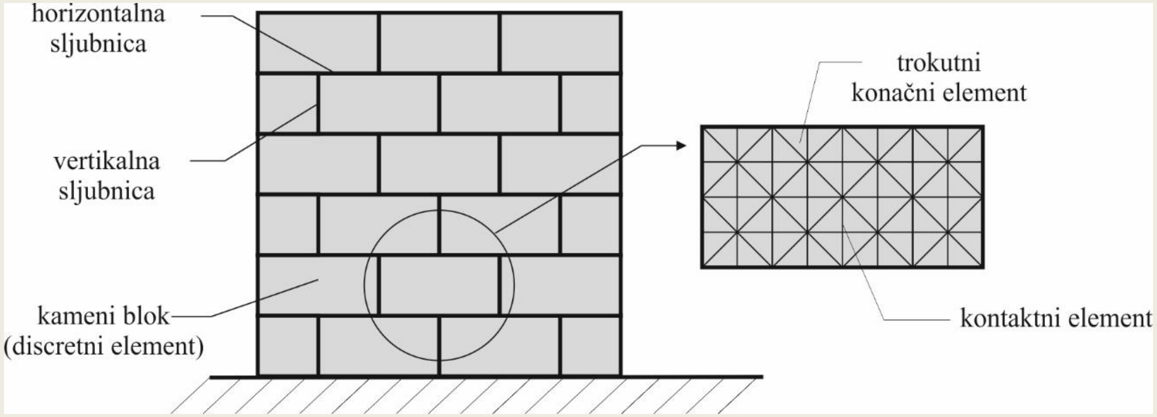
- Metoda konačnih razlika

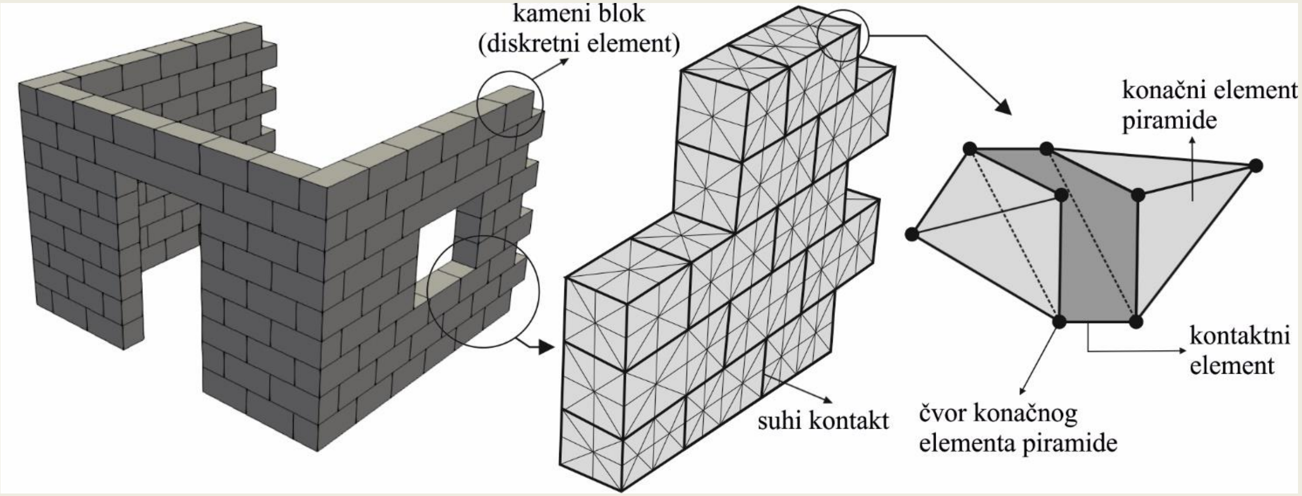
$$\mathbf{v}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{t-\Delta t/2} + \Delta t\ \mathbf{m}^{-1}\ \mathbf{f}_t$$

$$\mathbf{x}_{t+\Delta t} = \mathbf{x}_t + \Delta t\ \mathbf{v}_{t+\Delta t/2}$$

2. Osnove kombinirane metode konačnih i diskretnih elemenata (FDEM)

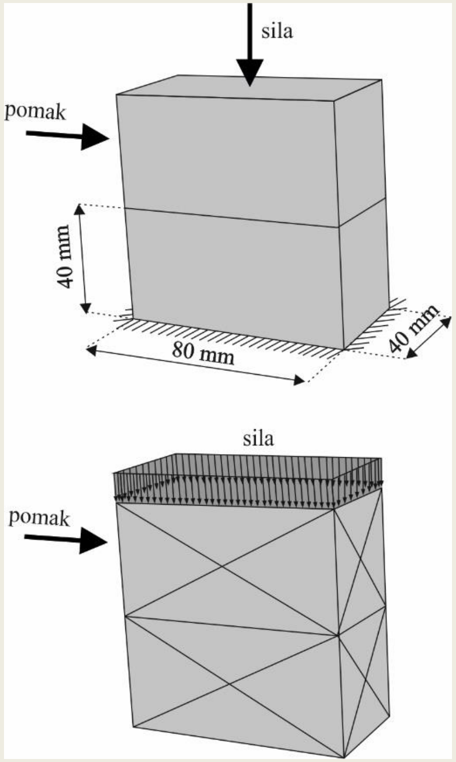
DISKRETIZACIJA KONSTRUKCIJE

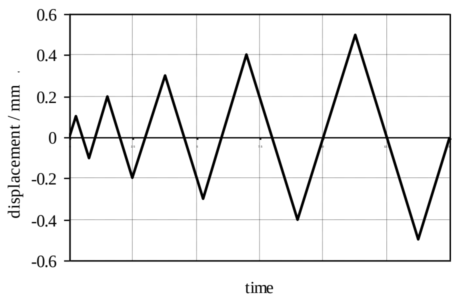


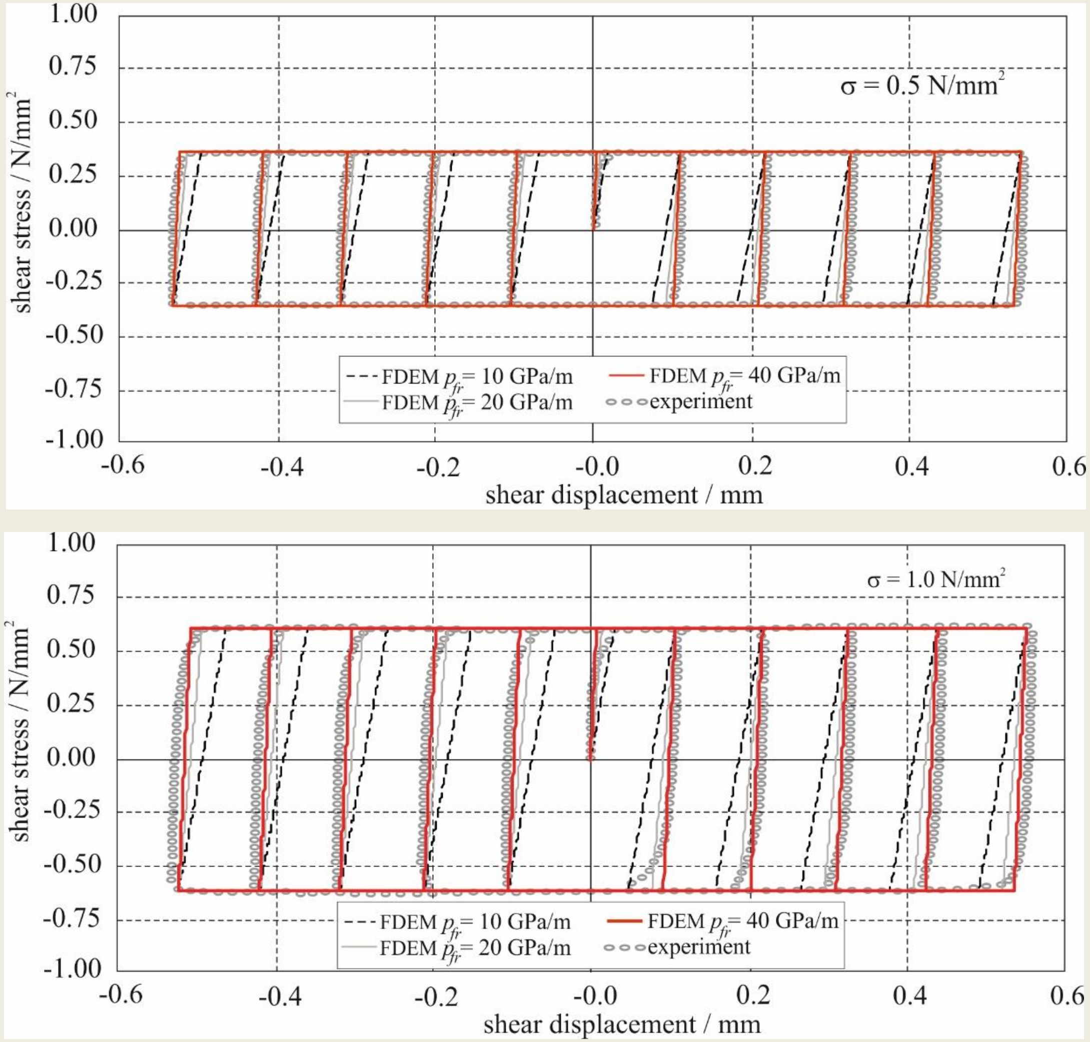


3. Numerički primjeri

Primjer 1. Ponašanje suhog kontakta između dvaju blokova

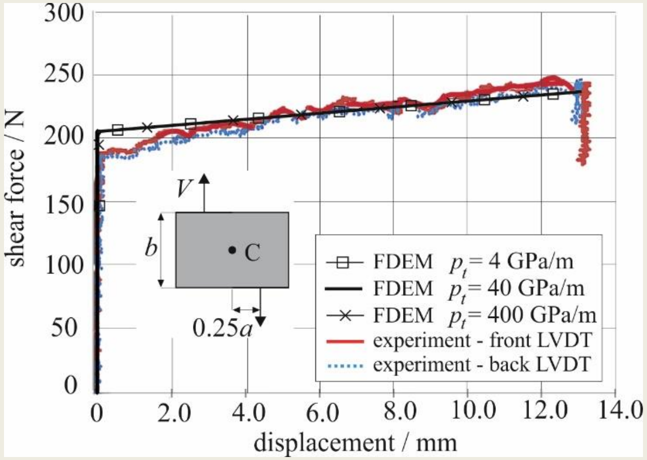


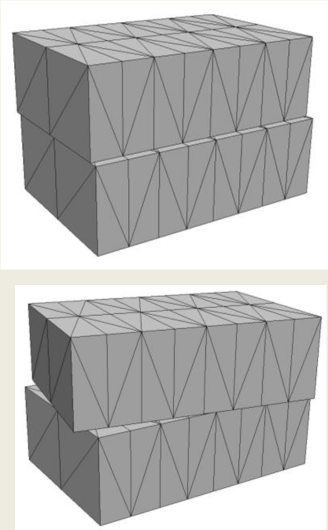


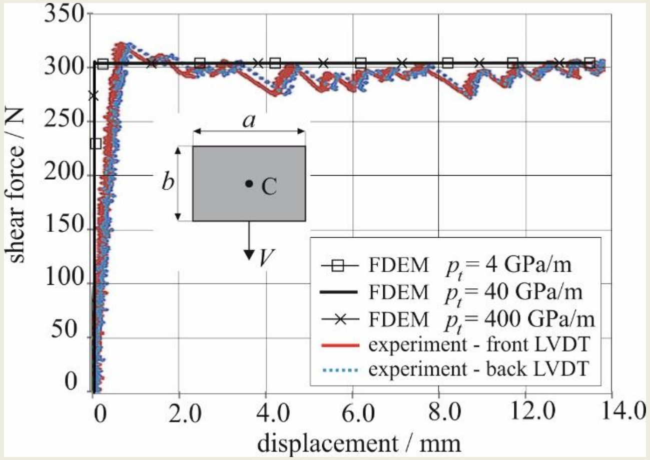


3. Numerički primjeri

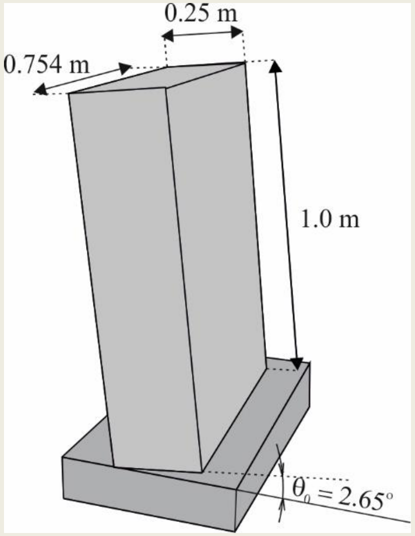
… Primjer 1. Ponašanje suhog kontakta između dvaju blokova

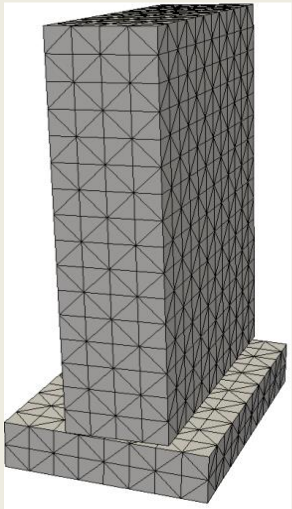


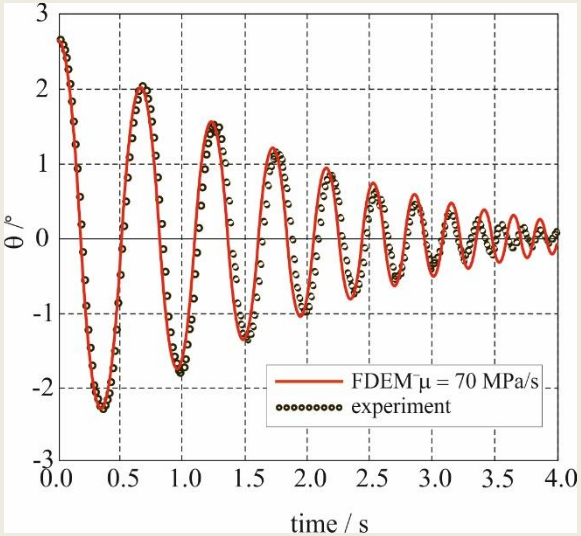




Primjer 2. Slobodno njihanje bloka na podlozi





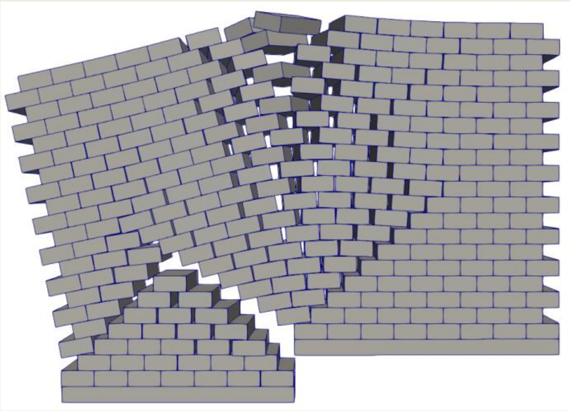


3. Numerički primjeri

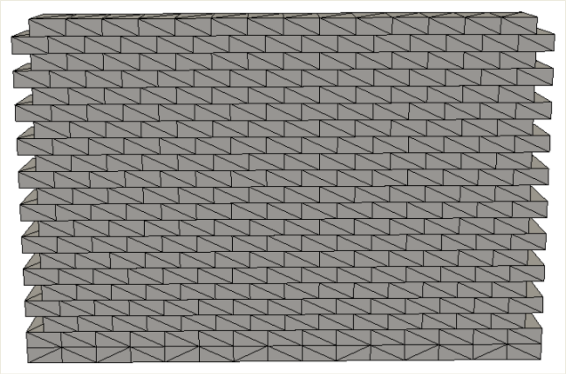
Primjer 3. Zid izložen slijeganju temelja

Konfiguracija eksperimenta

Eksperiment CL1 (T. T. Bui et al.)

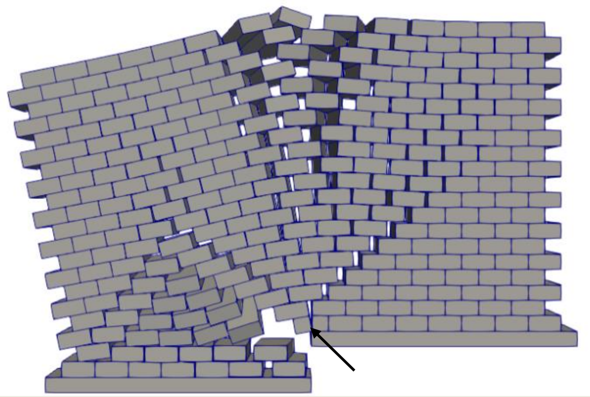


FDEM CL1



Diskretizacija konstrukcije

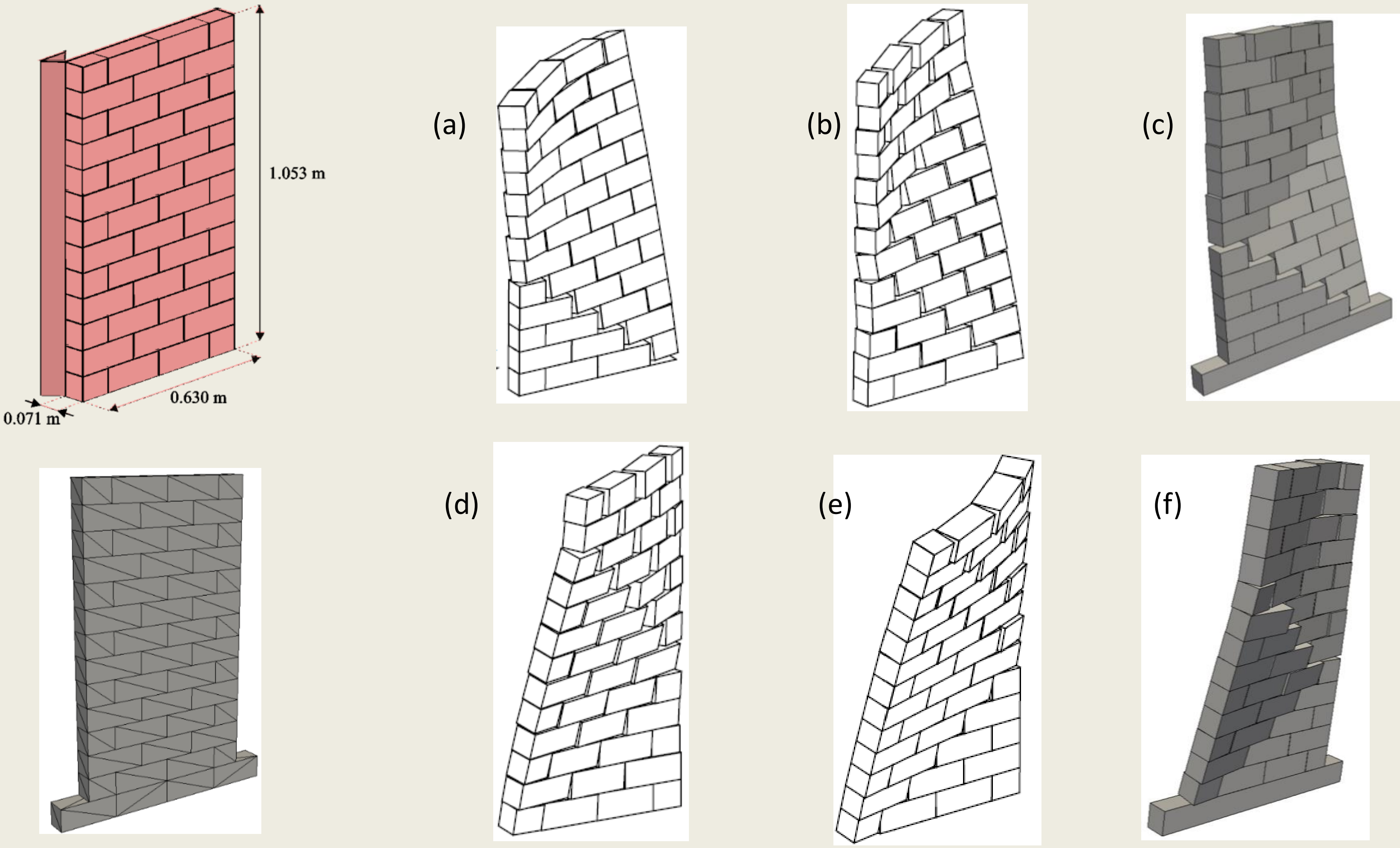
Eksperiment CL3 (T. T. Bui et al.)



FDEM CL3

3. Numerički primjeri

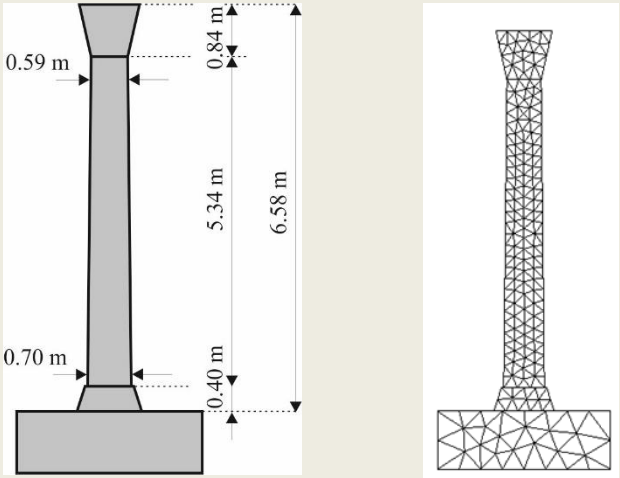
Primjer 4. Zid izložen horizontalnom ubrzanju izvan ravnine

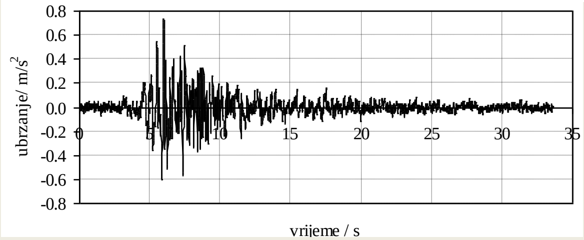


Mehanizam sloma za različite analize: (a, d) FEM, (b, e) metoda graničnih stanja i (c, f) FDEM

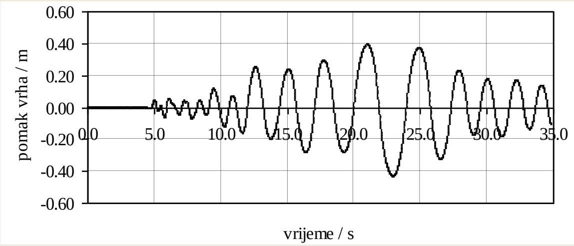
3. Numerički primjeri

Primjer 5. Slobodno stojeći stup izložen seizmičkoj pobudi

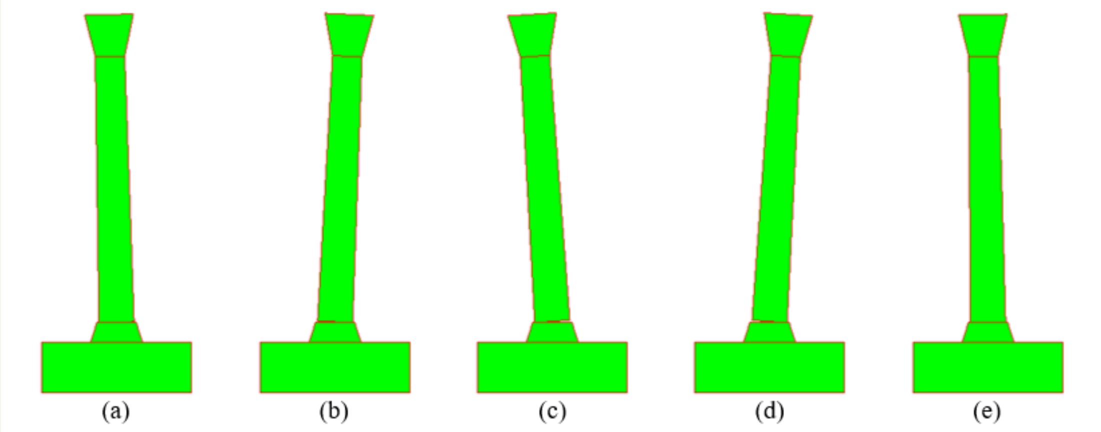




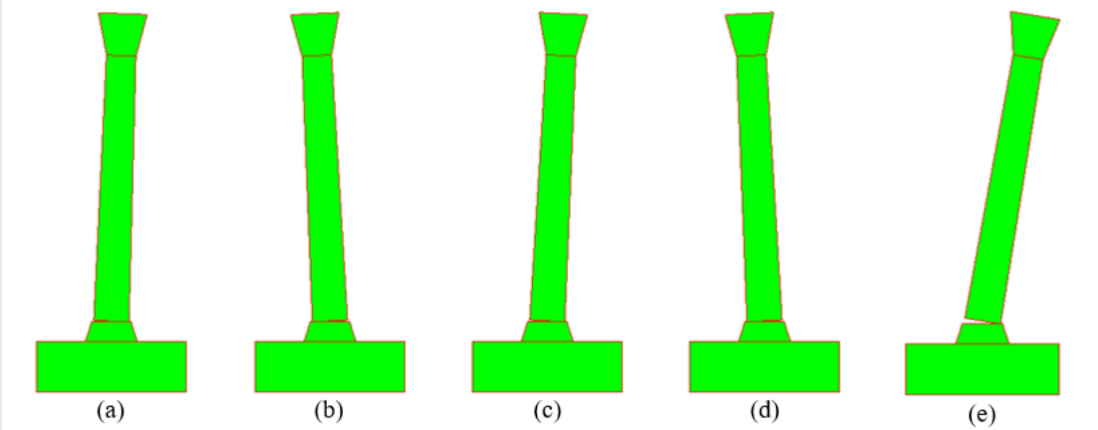
Vremenski zapis ubrzanja za vrijeme potresa u Petrovcu 1979.



Pomak vrha stupa za vršno ubrzanje 0.6 g



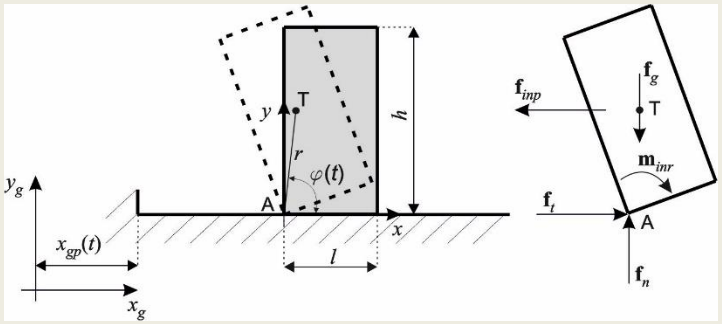
Kameni stup za vršno ubrzanje 0.6 g u vremenskim trenucima: (a) 11.7 s; (b) 17.9 s; (c) 23.2 s; (d) 25.0 s; (e) 33.4 s

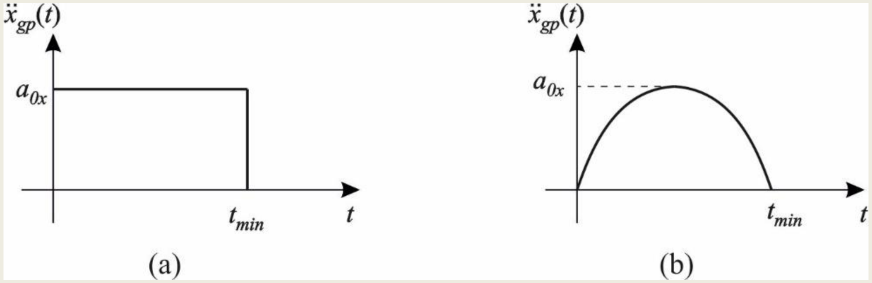


Kameni stup za vršno ubrzanje 0.7 g u vremenskim trenucima: (a) 7.3 s; (b) 9.0 s; (c) 10.8 s; (d) 13.4 s; (e) 17. 0 s

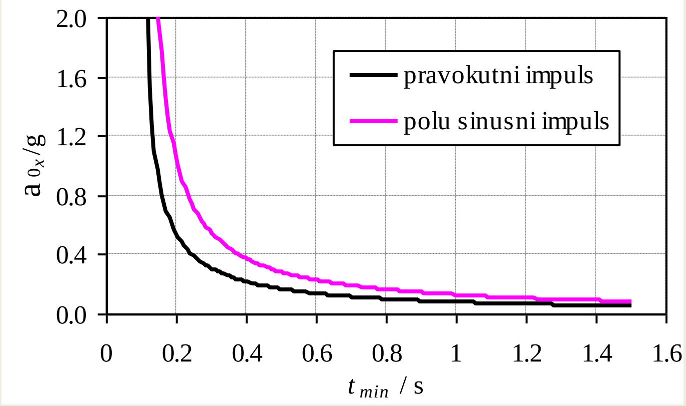
3. Numerički primjeri

Primjer 6. Vrijeme trajanja impulsa potrebnog da se prevrne slobodno stojeći stup





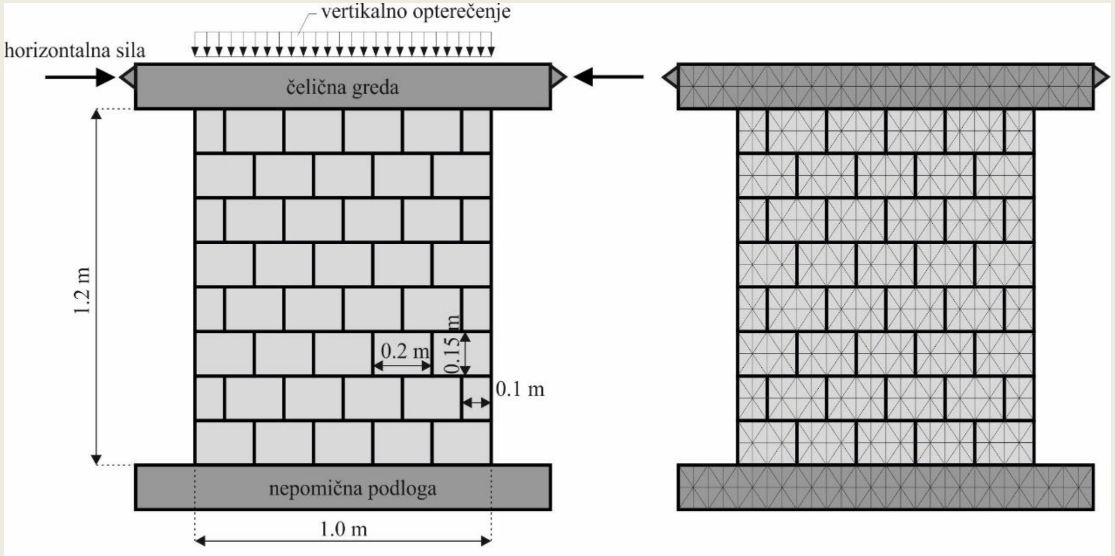
Ubrzanje podloge u obliku: (a) pravokutnog impulsa; (b) sinusnog polu vala



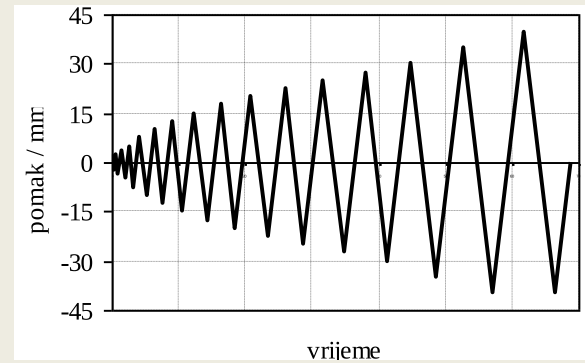
Vrijeme trajanja ubrzanja podloge u obliku pravokutnog impulsa i sinusnog poluvala potrebnog za prevrtanje stupa s dimenzijama: h/l=6.18 m / 0.7 m

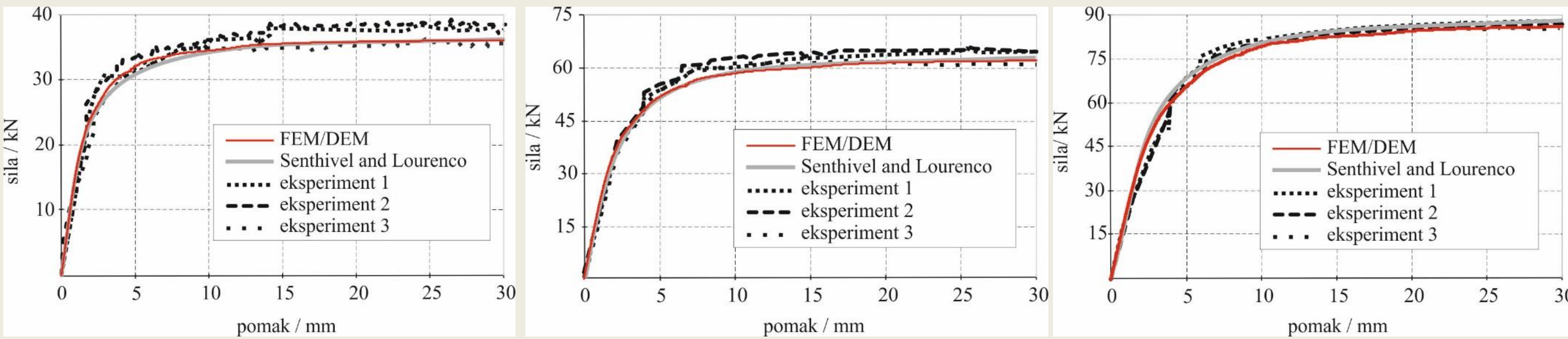
3. Numerički primjeri

Primjer 7. Monotono i cikličko ponašanje suho zidanog kamenog zida



- eksperiment je proveo Vasconcelos
- predtlačno naprezanje u iznosu od:
- 0.5 Mpa, 0.875 Mpa i 1.25 MPa



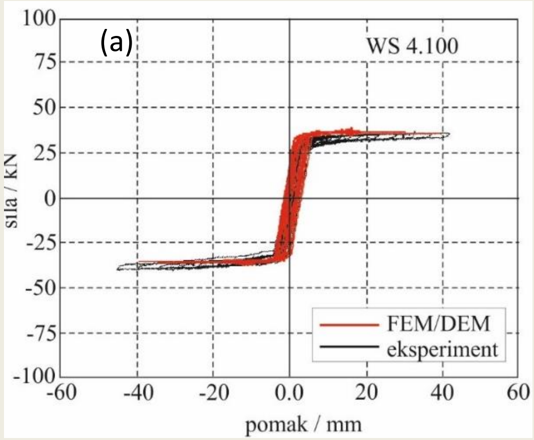


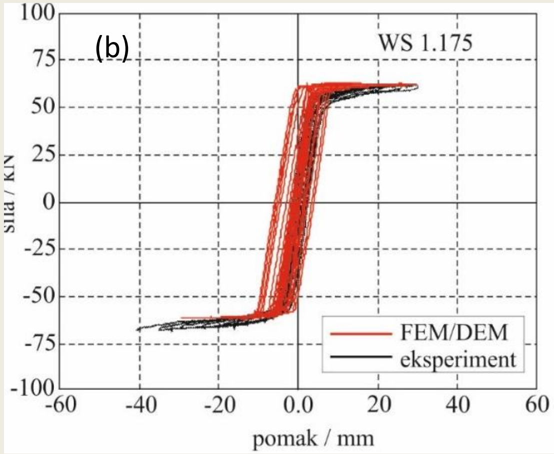
(a) (b) (c)

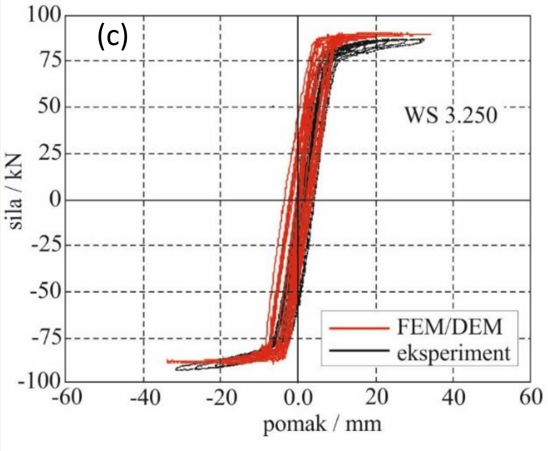
Dijagrami sila-pomak za predtlačna naprezanja od: (a) 0.5 MPa; (b) 0.875 MPa; (c) 1.25 MPa

3. Numerički primjeri

… Primjer 7. Monotono i cikličko ponašanje suho zidanog kamenog zida

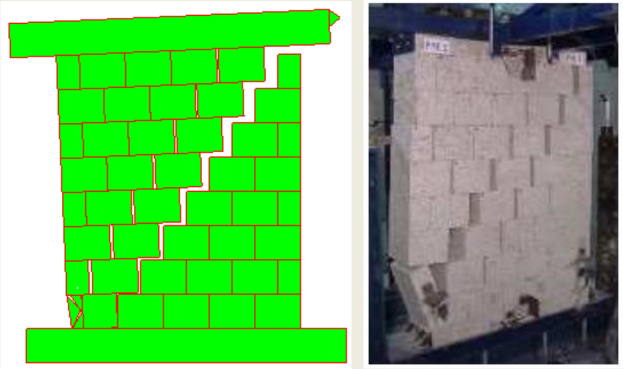




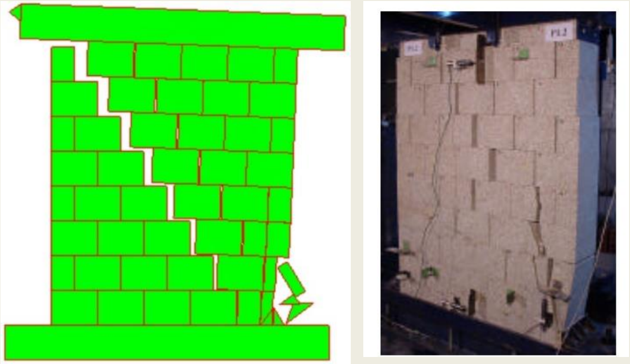


Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata za predtlačno naprezanje od: (a) 0.5 MPa; (b) 0.875 MPa; (c) 1.25 MPa

(a)



(b)

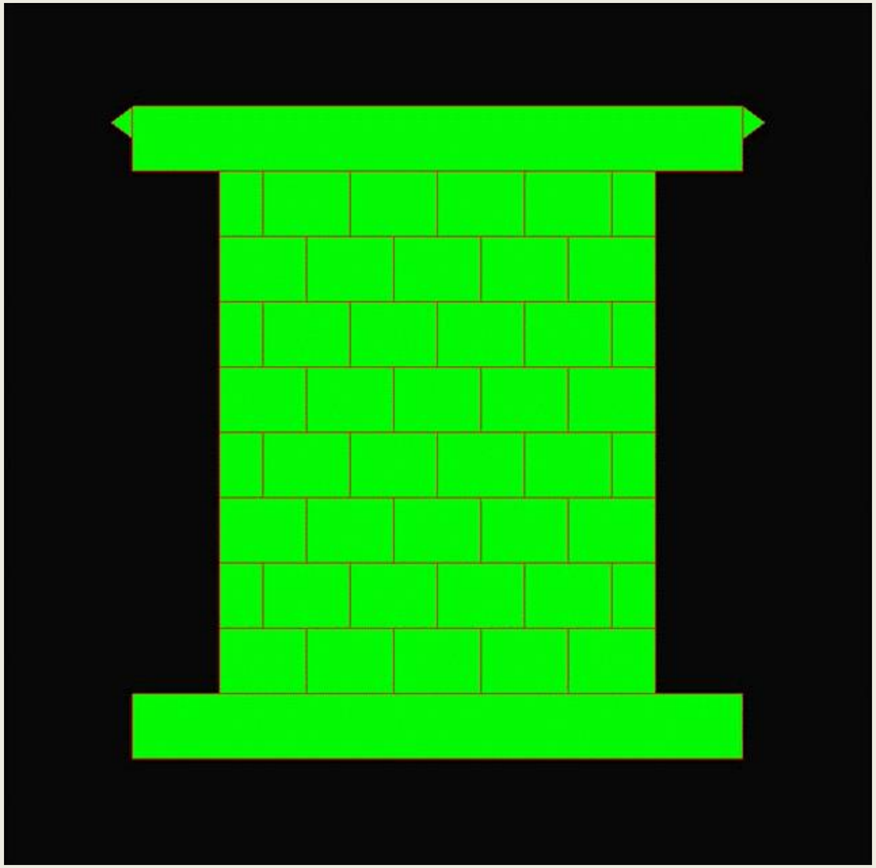


(c)

Usporedba numeričkog i eksperimentalnog mehanizma sloma za pred tlačno naprezanje od: (a) 0.5 Mpa; (a) 0.875 Mpa; (a) 1.25 Mpa

3. Numerički primjeri

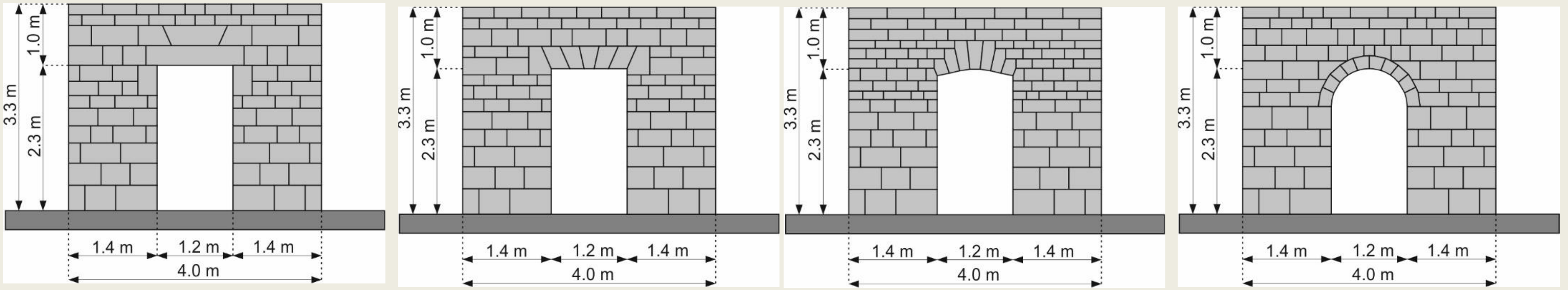
… **Primjer 7.** Monotono i cikličko ponašanje suho zidanog kamenog zida

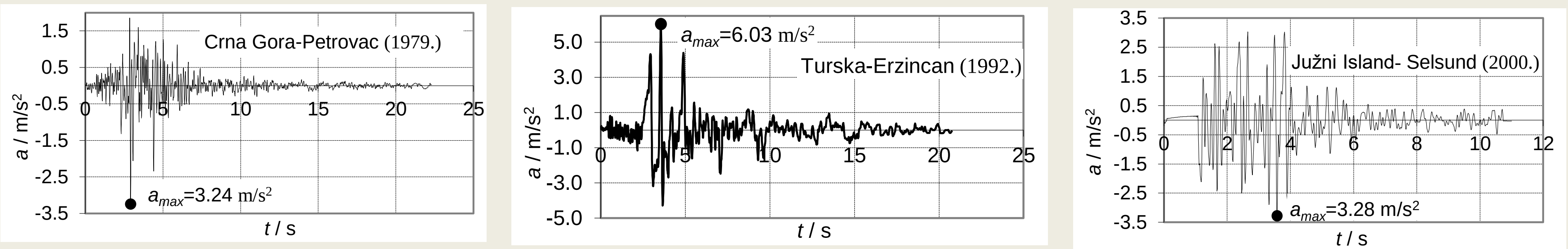


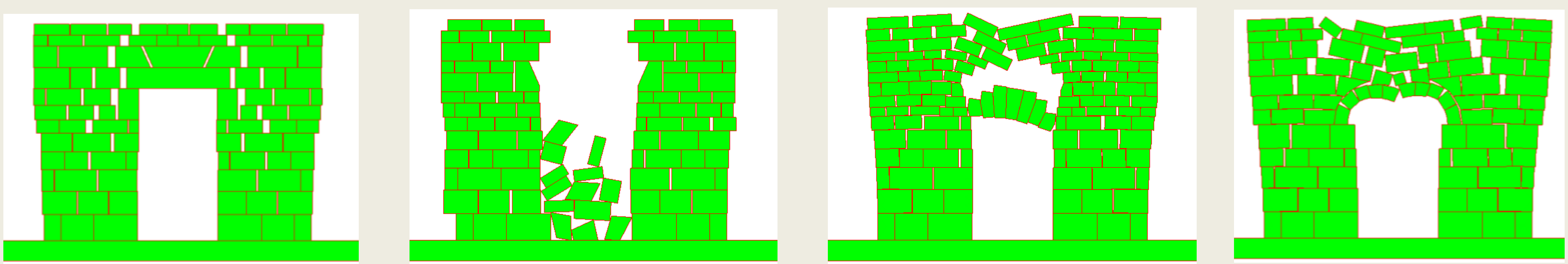
Numerički mehanizma sloma za predtlačno naprezanje od 0.5 Mpa

3. Numerički primjeri

Primjer 8. Suho zidani kameni nadvoji izloženi seizmičkom opterećenju



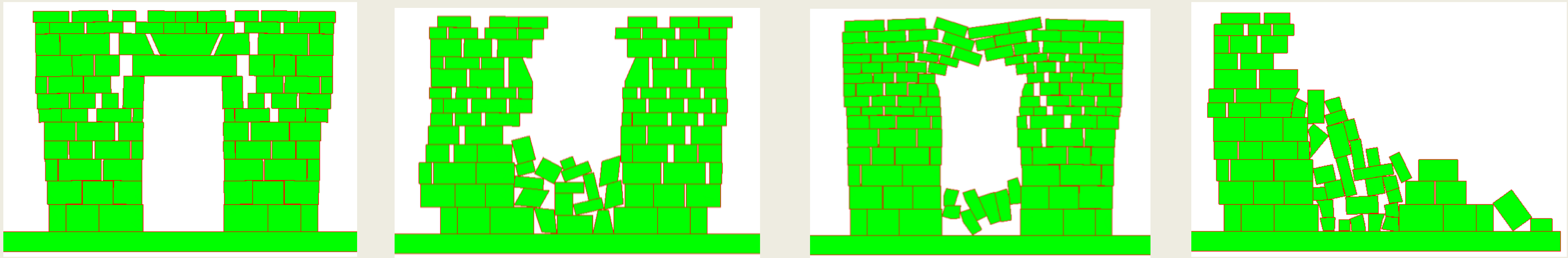




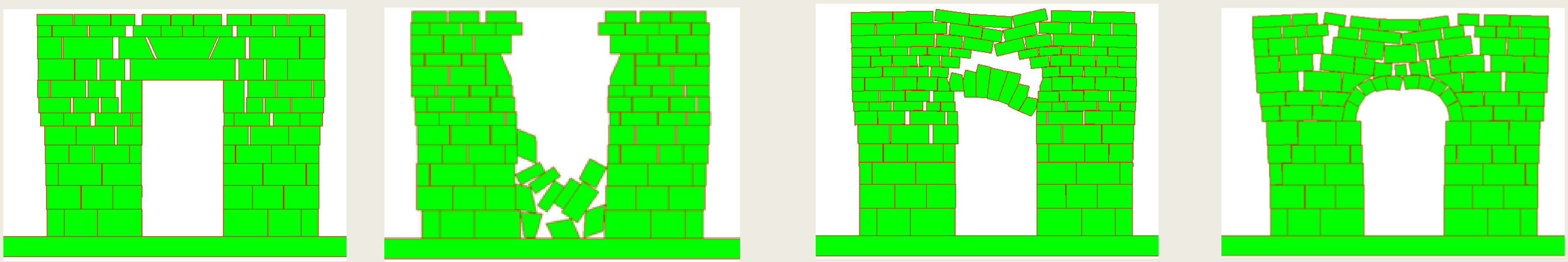
Stanje nakon djelovanja potresa Petrovac skaliranog na maksimalno vršno ubrzanje od 1.2 g

3. Numerički primjeri

… **Primjer 8.** Suho zidani kameni nadvoji izloženi seizmičkom opterećenju



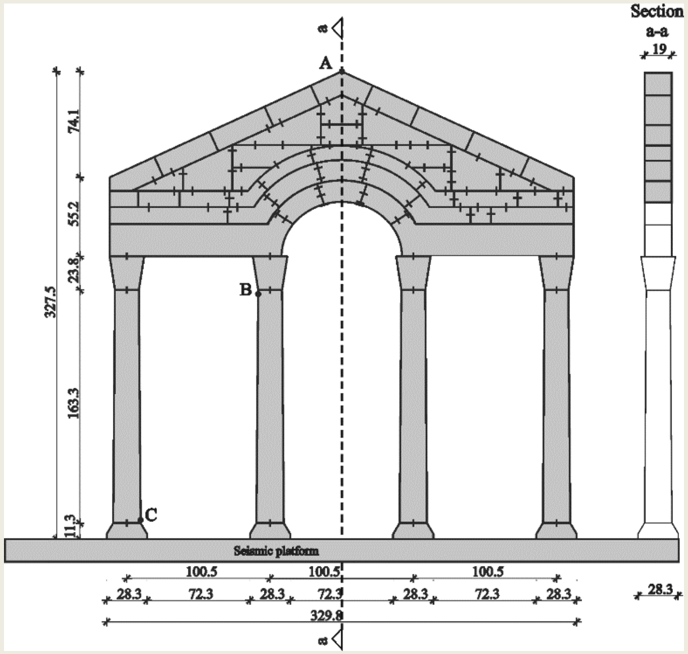
Stanje nakon djelovanja potresa Erzincan skaliranog na maksimalno vršno ubrzanje od 1.2 g



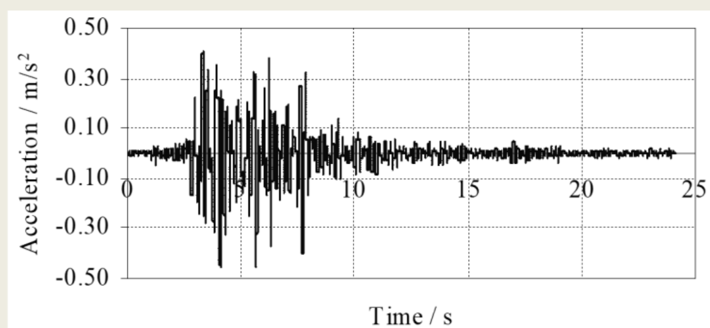
Stanje nakon djelovanja potresa Selsund skaliranog na maksimalno vršno ubrzanje od 1.2 g

3. Numerički primjeri

Primjer 9. Seizmička analiza konstrukcije Protiron u Splitu sa ugrađenim klamfama i trnovima



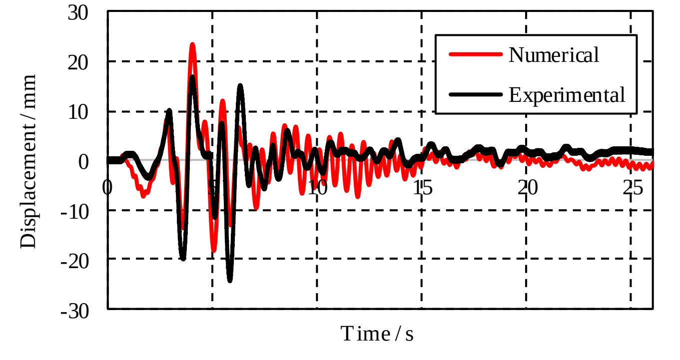
Model konstrukcije Protiron: (a) geometrijske karakteristike; (b) fizikalni model



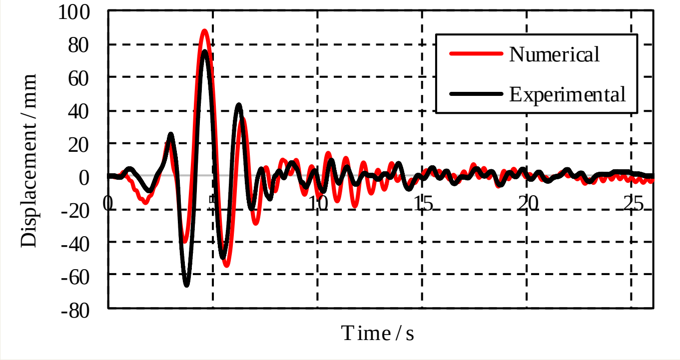
Skalirano vremensko ubrzanja u vremenu, N-S komponenta potresa u Petrovcu (Crna Gora) 1979. godine

3. Numerički primjeri

… Primjer 9. Seizmička analiza konstrukcije Protiron u Splitu sa ugrađenim klamfama i trnovima

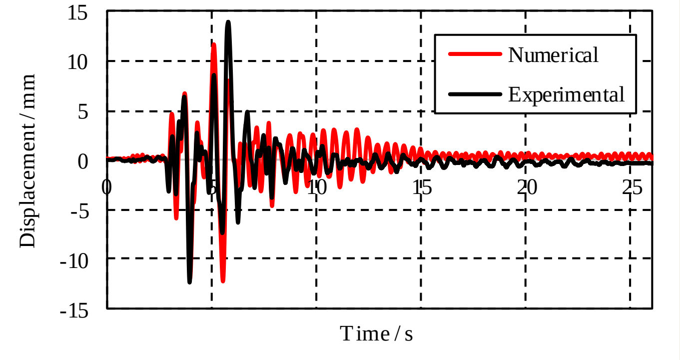


(a)

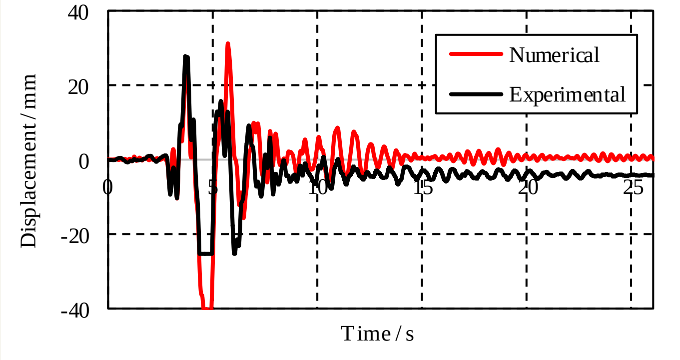


(b)

Horizontalni pomak točke A za vršno ubrzanje tla od: (a) a_g=0.47 g; (b) a_g=1.1 g



(a)

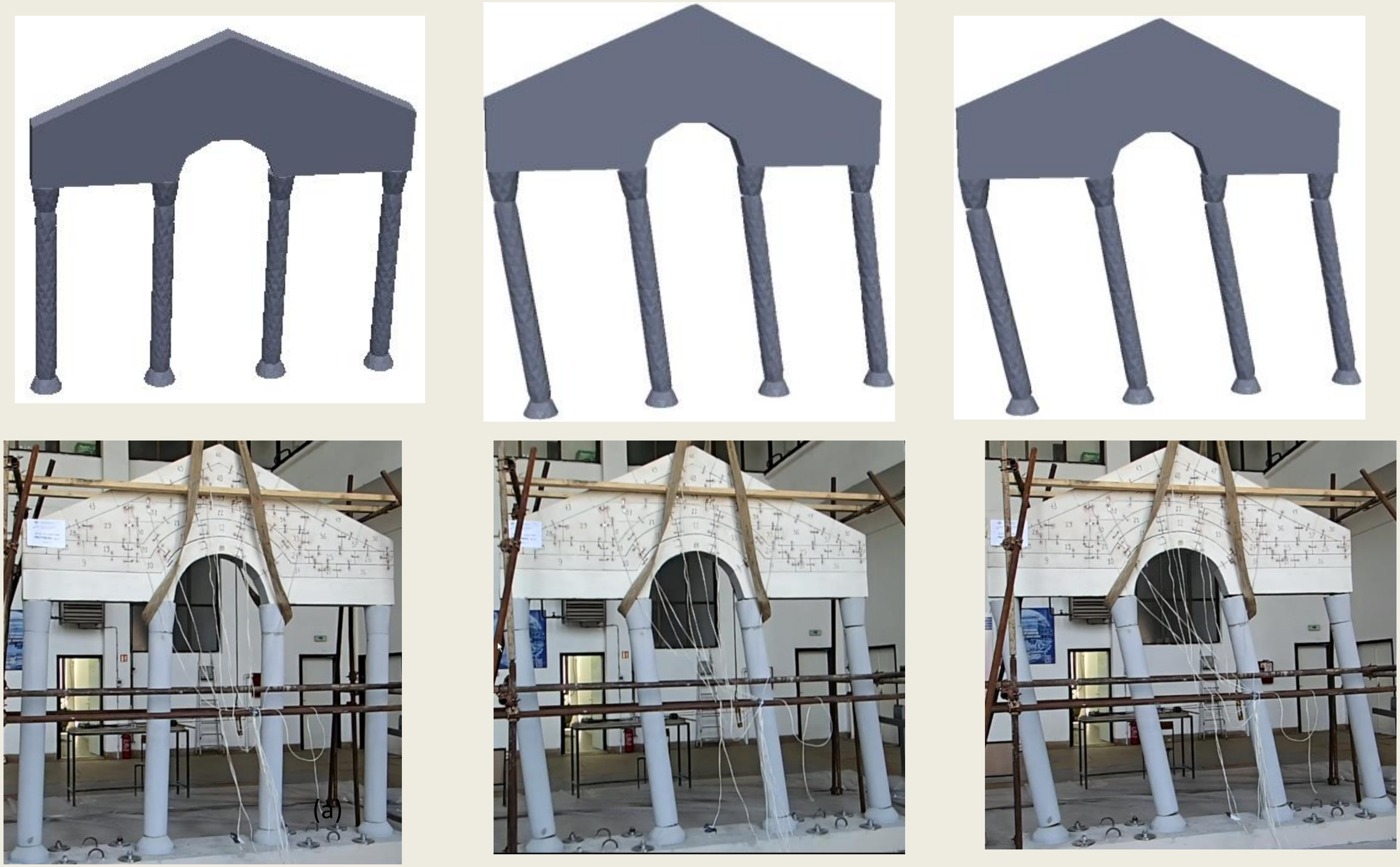


(b)

Dijagonalni pomak između točaka A i B za vršno ubrzanje tla od: (a) a_g=0.47 g; (b) a_g=1.1 g

3. Numerički primjeri

… **Primjer 9.** Seizmička analiza konstrukcije Protiron u Splitu sa ugrađenim klamfama i trnovima



(a) (b) (c)

Usporedba numeričkog i eksperimentalnog mehanizma sloma za a_g = 1.1 g u vremenu: (a) t = 3.2 s; (b) t = 3.8 s i (c) t = 4.3 s

4. Literatura

- Smoljanović, H.; Živaljić, N.; Nikolić, Ž.; Munjiza, A.: **„Numerical Simulation of the Ancient Protiron Structure Model Exposed to Seismic Loading“**, International Journal of Architectural Heritage 13 (2019), pp. 1-11.
- Nikolić, Ž.; Krstevska, L.; Smoljanović, H.; Živaljić, N.: **„Modelling of the Influence of Metal Connectors on the Resistance of Historical Dry-Stone Masonry Structures“**, International Journal of Architectural Heritage, 13 (2019), pp. 1-16.
- Nikolić, Ž.; Krstevska, L.; Marović, P.; Smoljanović, H.: **„Experimental investigation of seismic behaviour of the ancient Protiron monument model “**, Earthquake engineering & structural dynamics, 48 (2019), pp. 573-593.
- Smoljanović, H.; Živaljić, N.; Nikolić, Ž.; Munjiza, A.: „**Numerical analysis of 3D dry-stone masonry structures by combined finite-discrete element method**“, International journal of solids and structures 136-137 (2018), pp. 150-167.
- Balić, I.; Živaljić, N.; Smoljanović, H.; Trogrlić, B.: **„Seismic resistance of dry stone arches under in-plane seismic loading“**, Structural engineering and mechanics 58 (2) (2016), pp. 243-257.
- Smoljanović, H.; Nikolić, Ž.; Živaljić, N.; Balić, I.: **„Stability of rigid blocks exposed to single-pulse excitation“**, Acta mechanica 227 (6) (2016), pp. 1671-1684.
- Smoljanović, H.; Nikolić, Ž.; Živaljić, N.: „**A finite-discrete element model for dry stone masonry structures strengthened with steel clamps and bolts**“, Engineering structures 90 (2015), pp. 117-129.
- Smoljanović, H.; Balić, I.; Trogrlić, B.: **„Stability of regular stone walls under in-plane seismic loading “**, Acta mechanica, 226 (2015), 6; 1881-1896.
- Smoljanović, H.; Živaljić, N.; Nikolić, Ž.: **„A combined finite-discrete element analysis of dry stone masonry structures“**, Engineering structures 52 (2013), pp. 89-100.
- Smoljanović, H.; Živaljić, N.; Nikolić, Ž.: **„Pregled metoda za modeliranje povijesnih zidanih konstrukcija“**, Građevinar 65 (7) (2013), str. 603-618.

HVALA NA PAŽNJI