

# Seizmička analiza istočne kolonade Peristila u Splitu

---

**Bajić, Antonijo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:144267>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Antonijo Bajić**

**Split, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Antonijo Bajić**

**Seizmička analiza istočne kolonade Peristila u  
Splitu**

**Diplomski rad**

**Split, 2024.**

# **Seizmička analiza istočne kolonade Peristila u Splitu**

## **Sažetak:**

Cilj ovog rada je seizmička analiza istočne kolonade na Peristilu u svrhu zaštite kulturne baštine, ali prije svega ljudskih života tijekom potresa. Konstrukcija je izložena djelovanju tri razorna potresa koja su se dogodila kroz povijest: Petrovac 1979., Campano Lucano 1980. i South Iceland 2000. Za proračun zidane građevine korišten je Y2D numerički model koji se temelji na kombiniranoj metodi konačnih i diskretnih elemenata. Rezultati analize uključuju grafičke prikaze i stanja kolonade u odnosu na vršno ubrzanje i pomake konstrukcije tijekom svakog potresa.

## **Ključne riječi:**

Istočna kolonada, FEM/DEM, seizmička analiza, vršno ubrzanje tla, pomak, potres, zidane konstrukcije, kameni blokovi, diskretni elementi, numerički model

# **Seismic analysis of the eastern colonnade of the Peristyle in Split**

## **Abstract:**

The aim of this study is the seismic analysis of the eastern colonnade at Peristil for the purpose of protecting cultural heritage, but above all human lives during earthquakes. The structure was exposed to the effects of three devastating earthquakes that occurred throughout history: Petrovac in 1979, Campano Lucano in 1980, and South Iceland in 2000. The Y2D numerical model based on the combined method of finite and discrete elements was used for the calculation of the masonry structure. The results of the analysis include graphical representations and the condition of the colonnade in relation to peak acceleration and displacements of the structure during each earthquake.

## **Keywords:**

Eastern colonnade, FEM/DEM, seismic analysis, peak ground acceleration, displacement, earthquake, masonry structures, stone blocks, discrete elements, numerical model



STUDIJ: SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ GRAĐEVINARSTVO

KANDIDAT: Antonijo Bajić

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083224870

KATEDRA: Katedra za teoriju konstrukcija

KOLEGIJ: Dinamika konstrukcija i potresno inženjerstvo

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

**Tema:** Seizmička analiza istočne kolonade Peristila u Splitu

**Opis zadatka:** Za konstrukciju istočne kolonade Peristila u Splitu potrebno je izraditi model te provesti numeričku analizu seizmičke otpornosti predmetne građevine primjenom kombinirane metode konačnih i diskretnih elemenata (FEM/DEM). Seizmičku analizu provesti za tri potresa: Campano Lucano, Petrovac i South Iceland a zatim detaljno analizirati dobivene rezultate i donijeti zaključke o ponašanju i otpornosti konstrukcije izložene seizmičkom opterećenju.

U Splitu, ožujak 2024.

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Nikolina Živaljić  
Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Smoljanović

Predsjednik Povjerenstva za završne  
i diplomske ispite studija Građevinarstvo:

izv. prof. dr. sc. Ivan Balić

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
1.1. Istočna kolonada na Peristilu.....	2
1.2. Modeliranje zidanih konstrukcija pod utjecajem seizmičkog opterećenja .....	4
1.3. Kombinirana metoda konačnih i diskretnih elemenata.....	7
<b>2. PRORAČUNSKI MODEL KONSTRUKCIJE</b> .....	10
2.1. Diskretizacija i geometrijske karakteristike kolonade .....	10
2.2. Karakteristike materijala .....	11
2.3. Seizmička djelovanja na konstrukciju.....	13
<b>3. REZULTATI SEIZMIČKE ANALIZE</b> .....	15
3.1. Analiza konstrukcije uslijed potresa Petrovac.....	15
3.2. Analiza konstrukcije uslijed potresa Campano Lucano .....	19
3.3. Analiza konstrukcije uslijed potresa South Iceland .....	22
<b>4. SINTEZA I USPOREDBA REZULTATA</b> .....	28
4.1. Zaključak .....	29
<b>5. LITERATURA</b> .....	30

## 1. UVOD

Zidanje je jedna od osnovnih tehnika građenja koja seže u davnu prošlost ljudske civilizacije. Ova tehnika, koja podrazumijeva slaganje kamenih blokova jedan na drugi, često uz korištenje morta za njihovo povezivanje, ostala je prisutna sve do danas. Počevši od primitivnih gomila prirodnog kamena vidimo kako su se zidane konstrukcije tijekom vremena sve više razvijale. Evolucijom ljudskih vještina i alata, kameni blokovi su postali sve pravilnijeg oblika. Paralelno s time, počelo se koristiti ukalupljeno blato ili glina kao vezni materijal, koji je kasnije bio pečen u posebnim pećima kako bi se postigla veća čvrstoća i trajnost konstrukcije.

Tijekom povijesti, razvijali su se različiti oblici zidanih konstrukcija kako bi se zadovoljile svakojake potrebe i zahtjevi. Stupovi su se koristili za postizanje visine, dok su grede, lukovi, svodovi i kupole omogućili premošćivanje velikih raspona i stvaranje impresivnih arhitektonskih cjelina. Jednostavnost i dugovječnost zidanih konstrukcija odražavaju se u njihovoj prisutnosti diljem svijeta, u mnogim građevinama koje su preživjele stoljeća ili čak tisućljeća. Egipatske piramide, Partenon u Grčkoj, Kineski zid i rimski Koloseum samo su neki od najpoznatijih primjera koji u postali simboli različitih kultura i civilizacija.

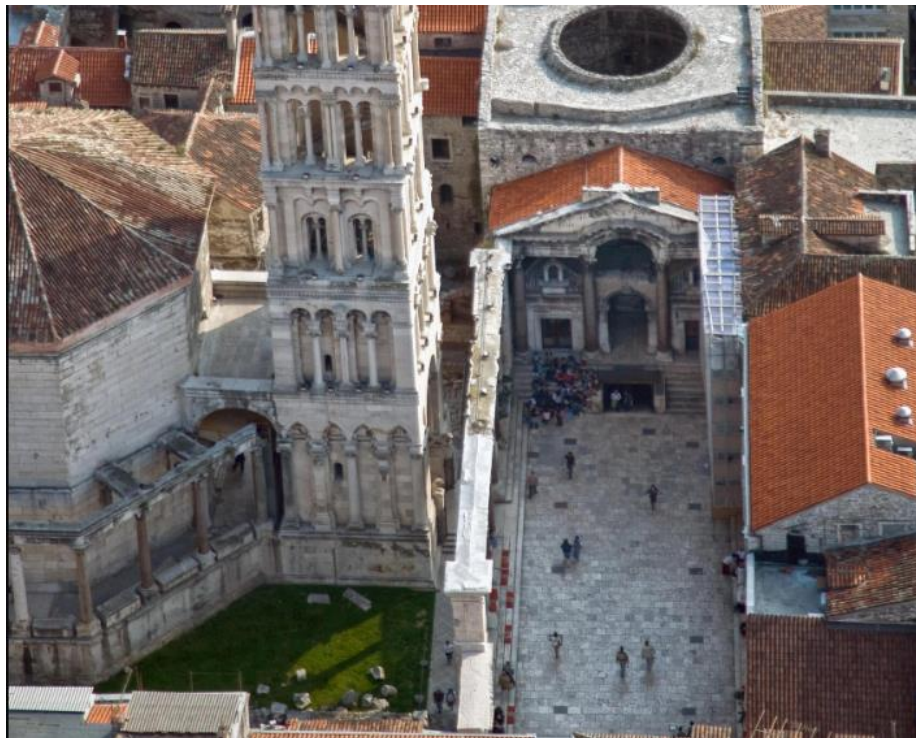
Unatoč dugoj tradiciji i širokoj primjeni zidanja, razumijevanje ponašanja zidanih konstrukcija u uvjetima seizmičkog opterećenja i dalje predstavlja izazov. Zbog prisutnosti sljubnica između blokova ovakve konstrukcije pokazuju kompleksno i izrazito nelinearno ponašanje tijekom potresa. U tim seizmički aktivnim područjima, zidane konstrukcije često stradavaju, uključujući i kulturnu baštinu i suvremene građevine. Stoga je ključno razviti numeričke modele koji će omogućiti simulaciju ponašanja zidanih konstrukcija pod seizmičkim opterećenjem. Ovi modeli mogu pružiti bolji uvid u seizmičku otpornost postojećih konstrukcija te olakšati donošenje odluka o potrebnim poboljšanjima radi smanjenja rizika od oštećenje i žrtava

U ovom radu bit će predstavljen jedan od takvih numeričkih modela, fokusiran na kombiniranu metodu konačnih i diskretnih elemenata (FEM/DEM). Korištenjem računalnog programa Y-2D, koja se temelji na ovoj kombiniranoj metodi, moguće je analizirati i simulirati ponašanje zidanih konstrukcija pod seizmičkim opterećenjem s ciljem poboljšanja njihove

otpornosti i sigurnosti. [1]

## 1.1 Istočna kolonada na peristilu

Peristil, centralni trg Dioklecijanove palače u Splitu, jedan je od najvažnijih spomenika antičke arhitekture na Mediteranu. Ova veličanstvena građevina, izgrađena u 3. stoljeću pod vladavinom rimskog cara Dioklecijana, simbolizira bogatu povijest i kulturno nasljeđe grada Splita te je pod zaštitom UNESCO-a kao dio svjetske kulturne baštine. Jedna od glavnih funkcija arhitekture palače bila je impresionirati posjetitelja veličinom i bogatom dekoracijom, pri čemu je Peristil, zamišljen kao otvorena dvorana između hramova, mauzoleja i carskih odaja. Na ovom mjestu se car pojavljivao pred svojim podanicima pod središnjim lukom Protirona. Nakon Dioklecijanove smrti, palača se postupno mijenjala, a s dolaskom novog stanovništva, posebno nakon pada Salone, započela je transformacija u grad. Srednjovjekovne građevine dale su Palači gradsku strukturu koja je sačuvana do danas. Iako su rekonstrukcije doticale i kolonade Peristila, većina njih je zadržala svoj izvorni oblik. Arhitektura Peristila, s ružičastim granitnim i mramornim stupovima te karakterističnim zabatom Protirona, pokazuje sirijski utjecaj. Slika 1. prikazuje položaj kolonade na Peristilu iz tlocrta.



*Slika 1. Tlocrtni prikaz istočne kolonade [2]*



Tijekom srednjeg vijeka, Peristil je postao katedralni trg, a prostor ispred Protirona postao je pozornica gradskog života, često korištena za kazališne predstave. U 16. i 17. stoljeću Peristil je obogaćen kapelicama renesansnog stila. U srednjem vijeku, pod najsjevernijim lukom istočne kolonade nalazila se grobnica, dok su dva susjedna interkolumnija bila zazidana. Početkom 16. stoljeća, na spoju decumanusa i sjeveroistočnog ugla Peristila sagrađena je crkva sv. Roka, a u 17. stoljeću pročelje crkve sv. Barbare ugrađeno je u antički luk sjeveroistočnog pilona Peristila. Godine 1805., unutar istočne kolonade, izgrađena je jednokatnica koja je služila kao kavana "Al Tempio", no ona je zajedno s crkvom sv. Barbare srušena 1876. godine. Temeljita rekonstrukcija istočne kolonade Peristila uslijedila je 1907. godine, kada su rekonstruirana podnožja i dijelovi baza stupova, te je pločnik spušten na pretpostavljenu izvornu razinu. Najljepša i najveća sfinga, koju je Dioklecijan donio iz Egipta kao ukras za svoju palaču, nalazi se pod južnim lukom istočne kolonade i postala je prepoznatljiv simbol Peristila i Splita.

Opsežni radovi na obnovi Peristila započeli su 2004. godine i zbog složenosti arhitektonskog sklopa podijeljeni su u nekoliko faza. Na istočnoj kolonadi Peristila uklonjene su cementne zakrpe iz prethodnih restauracija, kao i metalni elementi ugrađeni u kamen. Slijedilo je lasersko čišćenje tamnih naslaga s površine kamena, fugiranje, sanacija pukotina, injektiranje, učvršćivanje nestabilnih dijelova kamena, te izrada rekonstrukcija u umjetnom i prirodnom kamenu. Osim injektiranja, konstrukcija je ojačana postavljanjem klamfi od nehrđajućeg čelika umjesto željeznih na vrhu istočne kolonade. Najznačajnije rekonstrukcije u kamenu izvedene su na sredini istočne kolonade s njezine vanjske strane, gdje je nedostajao veliki kamen iz vijenca.

U kontekstu očuvanja kulturnih spomenika, važno je ne samo očuvati izvorni izgled Peristila, već i osigurati njegovu stabilnost i sigurnost, posebno zbog potencijalnih seizmičkih aktivnosti karakterističnih za područje Mediterana. Stoga je predmet ovog rada seizmička analiza istočne kolonade Peristila (slika 2.), s ciljem procjene stabilnosti i otpornosti na moguće seizmičke utjecaje. [3],[4]



*Slika 2. Istočna kolonada na Peristilu*

## **1.2. Modeliranje zidanih konstrukcija pod utjecajem seizmičkog opterećenja**

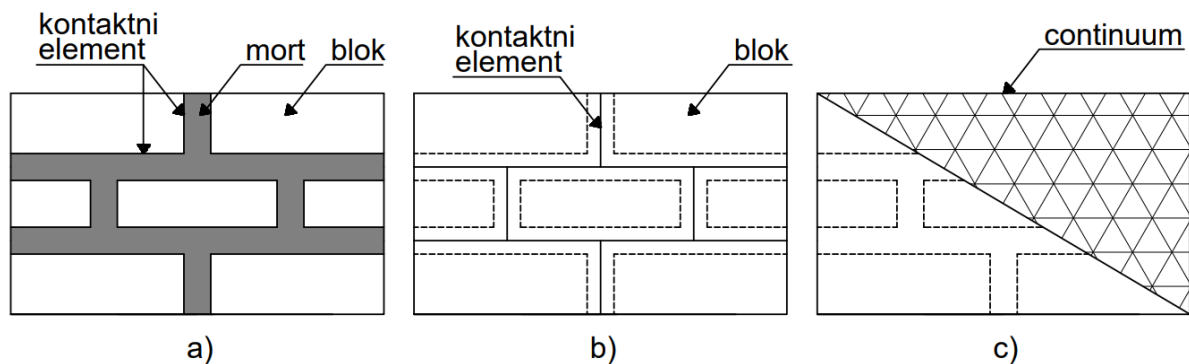
Glavna karakteristika zidanih konstrukcija je njihova kompozitna struktura, koja se sastoji od pojedinačnih blokova razdvojenih sljubnicama, koje mogu, ali ne moraju biti ispunjene mortom. Sljubnice su glavni uzrok složenog i nelinearnog ponašanja ovih konstrukcija, što predstavlja izazov u numeričkom modeliranju. Zbog toga postoji mnogo numeričkih modela i metoda za proračun zidanih konstrukcija, koje se razlikuju po točnosti, veličini ulaznih podataka i stupnju složenosti. Izbor najbolje metode ovisi o specifičnostima konstrukcije, dostupnim ulaznim parametrima, željenom rezultatu te iskustvu i kvalifikacijama projektanta. Najbolja metoda je ona koja pruža potrebne informacije na najbrži način s prihvatljivim razinama pogrešaka.

Numeričko modeliranje zidanih konstrukcija može se podijeliti na dva osnovna pristupa: idealizaciju uz pomoć kontinuuma i diskontinuuma. Idealizacija pomoću kontinuuma pretpostavlja da su deformacije i naprezanja opisani konstitutivnim funkcijama kroz cijeli promatrani volumen, a veza između deformacija i naprezanja prikazana je konstitutivnim zakonom materijala. Kombinacijom jednadžbi ravnoteže i konstitutivnog zakona dobivaju se diferencijalne jednadžbe koje rješavaju problem naprezanja i pomaka. Budući da je analitičko

rješenje ovih jednadžbi nepoznato, one se prevode u varijacijski problem pomoću zakona očuvanja energije, što omogućava rješavanje numeričkim postupcima poput metode konačnih elemenata. Prednost ove metode je u tome što se kontaktne elementi mogu integrirati između mreže konačnih elemenata.

S druge strane, hipoteza o diskontinuumu tretira konstrukciju kao skup diskretnih elemenata koji se mogu slobodno gibati i ponovno stupiti u međusobnu interakciju. Ovi diskretni elementi se obično promatraju kao apsolutno kruti, a njihovo gibanje se numerički integrira u vremenu eksplicitnim postupcima. Metode koje koriste ovaj pristup poznate su kao metode diskretnih elemenata, a njihova prednost leži u tome što svaki diskretni element može biti diskretiziran vlastitom mrežom konačnih elemenata, omogućavajući sagledavanje deformabilnosti elementa.

Uzimajući u obzir točnost i razinu složenosti, razlikujemo makro modeliranje, mikro modeliranje i pojednostavljeno mikro modeliranje (slika 3.). U makro modeliranju, svaka točka konstrukcije ima jednaka svojstva, pa su svojstva blokova i morta ravnomjerno raspoređena, te se konstrukcija promatra kao anizotropni homogeni kontinuum. Ovaj pristup je računski manje zahtjevan i koristi se za veće konstrukcije. Mikro modeliranje se primjenjuje kada je promatrani volumen reda veličine jednog bloka ili manji, pri čemu se mort i blok diskretiziraju s konačnim elementima, a konstitutivni zakoni promatraju se odvojeno. Ova metoda je prikladna za manje konstrukcijske detalje, ali ne i za cijele konstrukcije. Pojednostavljeno mikro modeliranje koristi konačne elemente za prošireni blok, dok je veza bloka i morta prikazana kontaktnim elementima koji označavaju mjesta eventualnih pukotina, ali zbog izostavljanja Poissonovog koeficijenta morta, dolazi do gubitka točnosti.



Slika 3. Modeliranje zidanih konstrukcija: a) Mikro modeliranje; b) Pojednostavljeno mikro modeliranje; c) Makro modeliranje

Metode za seizmičku analizu zidanih konstrukcija dijele se na linearne, poput modalne analize i pojednostavljene ekvivalentne statičke analize, te nelinearne, kao što su metoda odgovora u vremenu i statička metoda postupnog guranja. Jedna od često korištenih metoda je dinamička analitička metoda, koja analitičkim putem predviđa odgovor konstrukcije na dinamičku pobudu ili određuje najmanju vrijednost horizontalnog ubrzanja podloge pri kojoj dolazi do sloma konstrukcije. Metoda graničnih stanja temelji se na pretpostavkama koje je postavio Couplet, a to su: klizanje se ne može pojaviti među sljubnicama, zidane konstrukcije imaju beskonačnu tlačnu čvrstoću i nemaju čvrstoću u vlaku. Usvajanje ovih pretpostavki omogućava primjenu statičkog i kinematičkog teorema plastičnosti. Prema statičkom teoremu, konstrukcija je stabilna ako se za dano vanjsko opterećenje može pronaći polje unutrašnjih sila koje je statički povoljno, dok kinematički teorem ukazuje na nestabilnost konstrukcije ako je rad vanjskih sila veći ili jednak nuli. Koeficijent sigurnosti dobiven kinematičkim i statičkim pristupom mora biti isti.

Metoda konačnih elemenata najčešće se koristi za proračun zidanih konstrukcija zbog svoje dugotrajne primjene. Postoji mnogo numeričkih modela temeljenih na ovoj metodi, koji se razlikuju prema konstitutivnom zakonu ponašanja materijala (linearan ili nelinearan) i vrsti konačnih elemenata korištenih za diskretizaciju konstrukcije. Linearna analiza nije prihvatljiva za modeliranje zidanih konstrukcija jer one pokazuju izrazito nelinearno ponašanje zbog niske vlačne čvrstoće. Svi efekti u zidanoj konstrukciji, od pojave i razvoja pukotina do konačnog sloma, mogu se prikazati samo nelinearnom analizom. Nelinearni makromodeli za analizu zidanih konstrukcija uzimaju u obzir različite čvrstoće u tlaku i vlaku te različita elastična i neelastična svojstva duž materijalnih osi, promatrajući konstrukciju kao homogeni ortotropni kontinuum. Eksperimentalnim ispitivanjima u homogenom stanju određuju se elastični i neelastični parametri takvog kontinuuma. Alternativno, mogu se odrediti pojedinačna svojstva komponenti zidane konstrukcije (blokova i morta), koji se koriste kao ulazni podaci za tehnike numeričke homogenizacije. Najčešće korištene teorije za definiranje nelinearnog konstitutivnog zakona ponašanja materijala su mehanika oštećenja i teorija plastičnosti.

Začetnik metode diskretnih elemenata bio je Cundall, koji je razvio DEM (Discrete Element Method) za simuliranje klizanja i razdvajanja stijenske mase duž određenih diskontinuiteta. Ključna karakteristika metode diskretnih elemenata je prikaz konstrukcije kao skupa zasebnih blokova povezanih kontaktnim elementima, što je omogućilo njenu primjenu

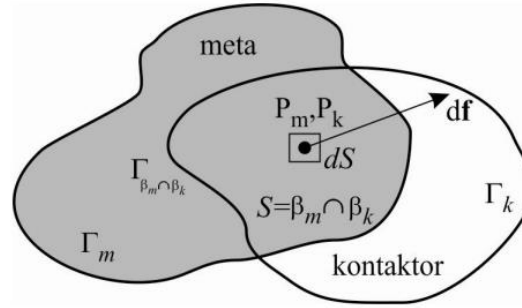
u analizi zidanih konstrukcija. Ovaj pristup omogućava simulaciju kolapsa konstrukcije uslijed udarnog opterećenja, klizanja među sljubnicama i rotacije. Metoda diskretnih elemenata pogodna je za modele zidanih konstrukcija na pojednostavljenoj mikrorazini, gdje su blokovi predstavljeni kao diskretni elementi povezani kontaktnim elementima koji simuliraju prisustvo morta. Kod modeliranja na stvarnoj mikrorazini, blokovi i mort se diskretiziraju nizom manjih elemenata, pri čemu se različita svojstva dodjeljuju kontaktnim elementima u mortu, blokovima i između bloka i morta.

Profesor Munjiza je razvio kombiniranu metodu konačnih i diskretnih elemenata (FEM/DEM) kako bi maksimalno iskoristio prednosti obje metode. Unutar ove metode, ponašanje materijala se modelira metodom konačnih elemenata (FEM) sve dok se ne pojavi pukotina. Kada materijal prekorači svoju vlačnu čvrstoću, javlja se diskretna pukotina, karakteristična za metodu diskretnih elemenata (DEM). FEM dio metode koristi se za modeliranje kontinuiranog ponašanja materijala i predviđanje nastanka pukotina na temelju mehaničkih svojstava i djelujućih opterećenja. DEM dio metode primjenjuje se za fazu diskontinuiteta, odnosno za stvaranje pukotina. Kad materijal prekorači svoju čvrstoću u vlak, nastaje diskretna pukotina koja razbija materijal na diskretne elemente, omogućujući simulaciju fragmentacije i daljnje ponašanje konstrukcije nakon pojave pukotine. Kontaktni elementi omogućuju modeliranje interakcija između fragmentiranih dijelova materijala, što omogućuje prijenos deformacija i sila tijekom daljnjeg rušenja konstrukcije. Ovom metodom izvršit će se numerička analiza kolonade pod seizmičkim djelovanjem. Za konkretnu numeričku analizu korišten je program Y-2D kako bi se iskoristile sve prednosti FEM/DEM metode

### **1.3. Kombinirana metoda konačnih i diskretnih elemenata**

FEM/DEM simulacije koriste veliki broj diskretnih elemenata, što značajno otežava detekciju kontakta među njima. Profesor Munjiza koristi algoritam za identifikaciju elemenata koji su dovoljno blizu da bi došli u kontakt. Ovaj pristup dijeli prostor na ćelije jednake veličine, pri čemu svaka ćelija predstavlja jedan element. Algoritam značajno smanjuje složenost operacija s  $N^2$  na  $N$ , gde je  $N$  broj diskretnih elemenata. Kada dva elementa dođu u kontakt, između njih se pojavljuju kontaktne sile, pri čemu se jedan element definira kao kontaktor, a drugi kao meta. Površina  $S$  označava preklapanje kontaktora i mete kada su u

kontakta, kao što se vidi na slici 4.



Slika 4. Diferencijalna sila uslijed kontakta u okolini točkaka  $P_m$  i  $P_k$  [5]

Na kontaktoru i meti nalaze se potencijalna polja  $\varphi_k$  i  $\varphi_m$ , pri čemu potencijal opada od središta prema rubovima tih elemenata. Prema teoriji potencijala, sila kojom meta djeluje na diferencijalno malu površinu  $dS_k$  u blizini točke  $P_k$  na kontaktoru izražava se kao

$$-grad\varphi_k(P_k)dS_k \quad (1)$$

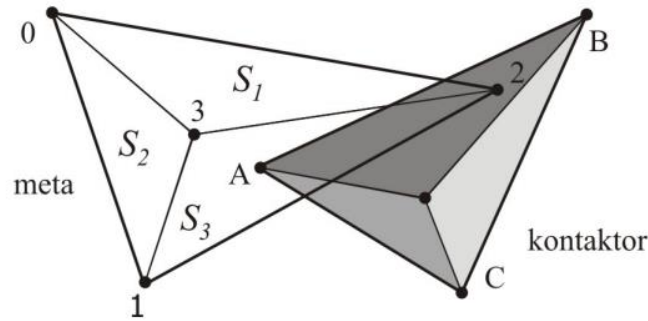
Isto tako, prodorom mete u kontaktor, prema zakonu akcije i reakcije, sila kojom točka  $P_m$  djeluje na točku  $P_k$  jednaka je

$$-grad\varphi_m(P_m)dS_m \quad (2)$$

Integracijom ovog izraza preko cijele preklapajuće površine  $S$  dobiva se ukupna kontaktna sila na kontaktor, izražena kao

$$f_k = \int [grad\varphi_k - grad\varphi_m]dS, \quad S = \beta_m \cap \beta_k \quad (3)$$

Ovo pokazuje da je polje kontaktnih sila konzervativno, jer su sile definirane kao gradijent potencijalne funkcije. U slučaju bez gubitaka energije uslijed kontakta, prema zakonu očuvanja energije, ukupna energija sustava ostaje jednaka prije i poslije kontakta. U FEM/DEM metodi, broj diskretnih elemenata koji su u kontaktu je velik, a svaki element je diskretiziran u više konačnih elemenata. To predstavlja izazov u pronalaženju kontaktnih sila koje se moraju izračunati na razini konačnih elemenata. Zbog velikog broja mogućih kontakata među konačnim elementima, izabran je najjednostavniji konačni element u ravni, tročvorni trokutni element, kako bi proračun kontaktnih sila bio što brži. Na slici 5. prikazan je kontakt dva trokutna konačna elementa.



Slika 5. Dva trokutna konačna elementa u kontaktu [1]

Položaj i oblik svakog diskretnog elementa u prostoru opisuju se trenutnim koordinatama čvorova konačnih elemenata. U trenutku analize, stvarne prostorne pozicije elemenata predstavljaju trenutne koordinate čvorova

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_i \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdje  $n$  označava ukupan broj stupnjeva slobode sustava.

Na diskretnim elementima javljaju se inercijalne sile, koje su opisane masom diskretiziranom kao i diskretni elementi. Model koncentrirane mase, gdje je masa koncentrirana u čvorovima, najjednostavniji je način prikaza mase u kombiniranoj FEM/DEM metodi. To dovodi do dijagonalne matrice masa koja se prikazuje kao masa povezana sa svakim stupnjem slobode. Osnovna postavka metode konačnih razlika prikazana je formulom:

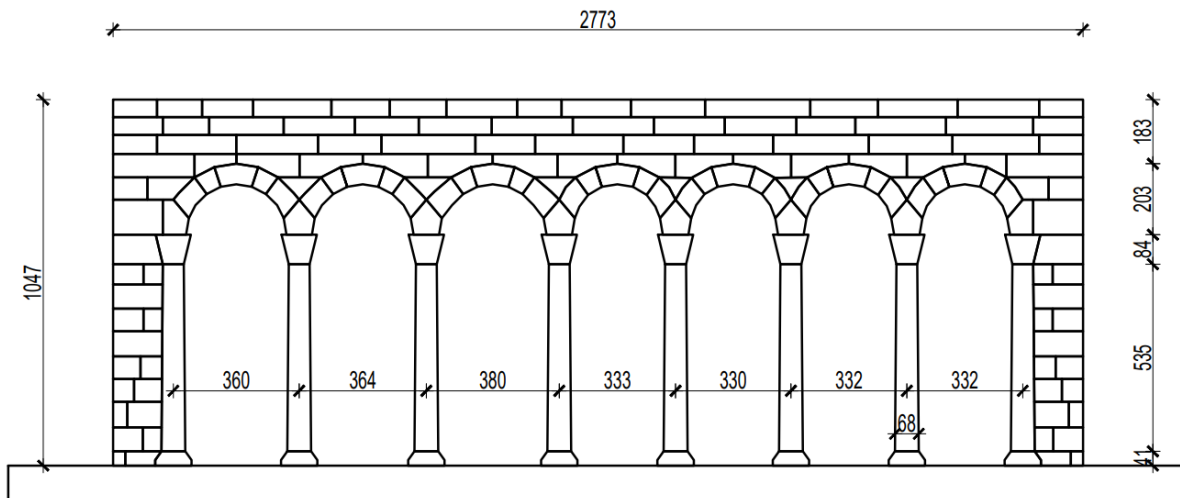
$$\begin{aligned} a_n &= \frac{f_n}{m} \\ v_{n+1} + 1 &= v_n + a_n h \\ x_{n+1} &= x_n + v_{n+1} h \end{aligned} \quad (5)$$

gdje  $f_n$  označava sumu sila interakcije između dva ili više elemenata u kontaktu, prigušnih sila, vanjskih sila i sila uslijed deformacije konačnog elementa,  $m$  predstavlja mase povezane sa svakim stupnjem slobode, a  $h$  je konstantna veličina vremenskog koraka. [1],[5]

## 2. PRORAČUNSKI MODEL KONSTRUKCIJE

### 2.1. Diskretizacija i geometrijske karakteristike kolonade

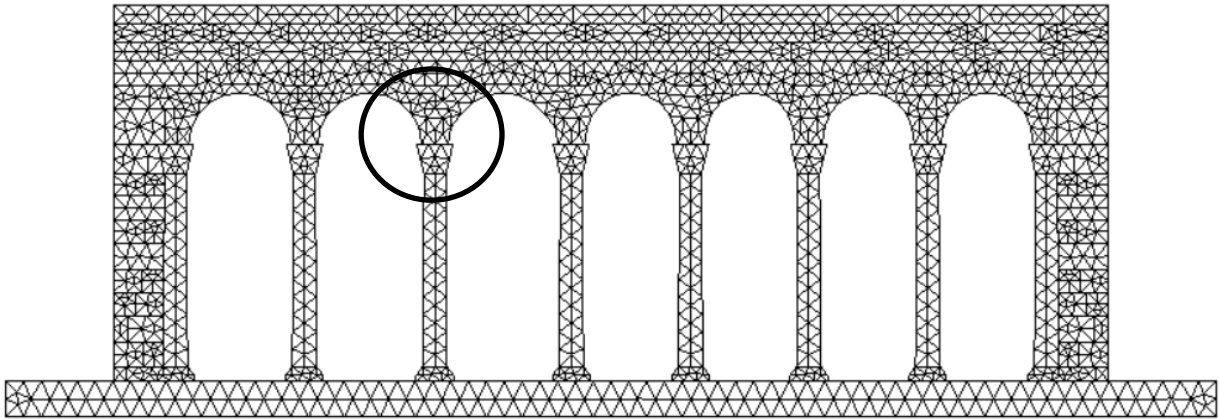
Geometrija kolonade obuhvaća sedam lukova koji su preko kapitela oslonjeni na stupove, a cijela konstrukcija je povezana zidanim zidom. Tlocrtna dimenzija građevine su 27,73 x 1,0 metara, dok visina kolonade iznosi 10,47 metara. Geometrija kolonade prikazana je na slici 6.



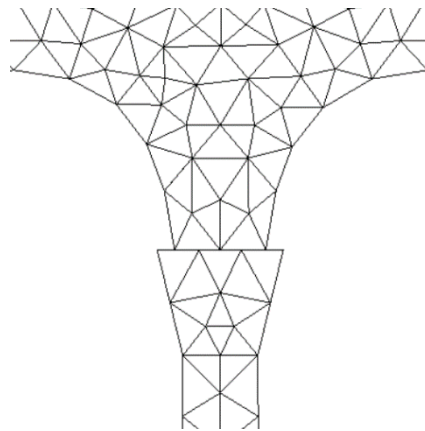
Slika 6. Geometrija kolonade

U FEM/DEM metodi, kolonada se promatra kao skup diskretnih elemenata ili kamenih blokova. Svaki od tih elemenata je diskretiziran zasebnom mrežom trokutastih konačnih elemenata, među kojima su ugrađeni kontaktni elementi na mjestima mogućih pukotina. Diskretizacija konstrukcije provedena je računalnim programom Gmash u kojem je geometrija kolonade zadana u dxf formatu, pri čemu je model opisan pomoću 3031 trokutna konačna elementa. Svaki od tih elemenata sastoji se od tri čvora, a svaki čvor ima dva stupnja slobode, što ukupno daje 2650 čvorova. Slike 7. i 8. prikazuju diskretizirani model kolonade s mrežom konačnih elemenata. [6]





*Slika 7. Diskretizacija modela kolonade*



*Slika 8. Diskretizirani detalj spoja luka s kapitelom stupa*

## **2.2. Karakteristike materijala**

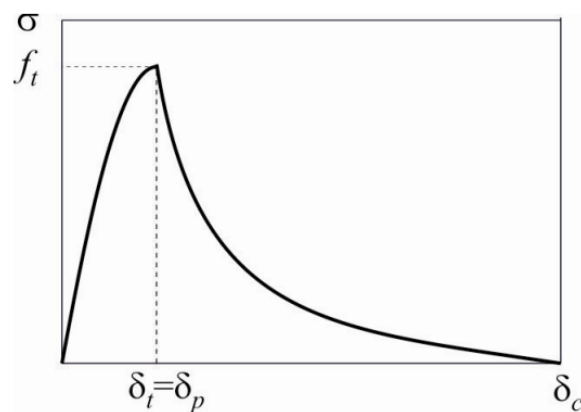
U FEM/DEM metodi, prijelaz iz kontinuuma u diskontinuum dešava se putem procesa fragmentacije i loma. Pukotine se obično javljaju nakon sloma mikrostrukturnih elemenata materijala, oštećenja ili popuštanja. Ovaj model zavisi od svojstava materijala i temelji se na aproksimaciji eksperimentalnih krivulja koje prikazuju odnos između napreznja i deformacije pri direktnom vlaku.

Mehanička svojstva kamena korištena u numeričkoj analizi uključuju nekoliko ključnih parametara koji određuju kako će materijal reagirati na različita opterećenja i uvjete. Neka od tih svojstava su prikazana u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva materijala

Svojstva materijala	
Gustoća, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2700
Statički koeficijent trenja, $\mu_{st}$	0.60
Dinamički koeficijent trenja, $\mu_{din}$	0.60
Modul elastičnosti, $E$ [MPa]	48400
Koeficijent prigušenja, $\mu$	$4.5 \cdot 10^6$

Rad potreban za stvaranje pukotine jedinične površine, odnosno energija loma, izračunava se kao integral krivulje naprezanje - pomak. Ovaj integral se izvodi od trenutka kada se pojavi pukotina  $\delta_t$  do trenutka kada naprezanje postane jednako nuli  $\delta_c$ . Ova energija loma predstavlja ukupni rad koji je materijal apsorbirao tijekom procesa pucanja, što je ključno za razumijevanje i predviđanje ponašanja materijala pod opterećenjem u modelima koji koriste FEM/DEM metodu. Vlačno omekšanje u relaciji naprezanje - pomak opisuje kako materijal gubi čvrstoću na vlak nakon što dostigne svoju maksimalnu nosivost te je prikazano na slici 9.



Slika 9. Dijagram naprezanje – pomak [1]

Pri analizi seizmičkog utjecaja na konstrukciju, ključno je razumjeti stvarni izgled konstrukcije kako bi numerički model bio što precizniji. Numerički model treba uključivati vezu između konstrukcije i seizmičkih utjecaja. Efekt prigušenja na kolonadi postaje očit kada kolonada, nakon što je podvrgnuta seizmičkoj pobudi, zavibrira, ali s vremenom

titranje potpuno prestane. Tokom vibracija, amplituda titranja se smanjuje, što dovodi do rasipanja energije u sustavu.

Prigušenje u kolonadi izazivaju različiti faktori, a najznačajniji su:

- a) **Utjecaji topline:** Toplina utječe na trenje unutar materijala, što doprinosi prigušenju vibracija.
- b) **Pukotine i oštećenja:** Pukotine i oštećenja mijenjaju dinamičko ponašanje materijala, smanjujući njegovu sposobnost da prenosi vibracije.
- c) **Karakteristike materijala:** Gustoća i modul elastičnosti materijala značajno utječu na prigušenje. Materijali s različitim svojstvima rasipaju energiju na različite načine.
- d) **Vanjski utjecaji:** Razni vanjski faktori, kao što su vlažnost, temperatura, i drugi okolišni uvjeti, također mogu utjecati na prigušenje vibracija.

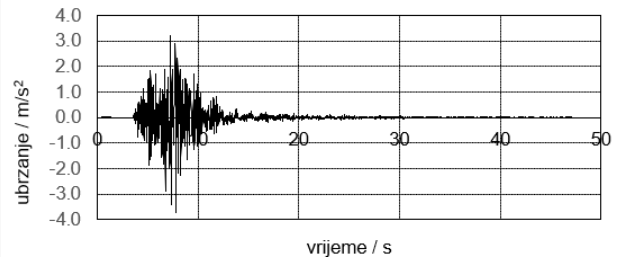
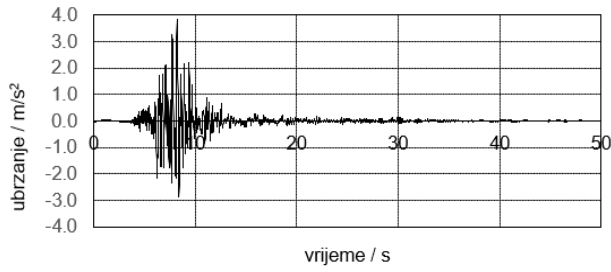
Razumijevanje i precizno modeliranje ovih faktora omogućava realističniju simulaciju seizmičkog ponašanja konstrukcije i pomaže u procjeni njene otpornosti na potrese. [1]

### 2.3. Seizmička djelovanja na konstrukciju

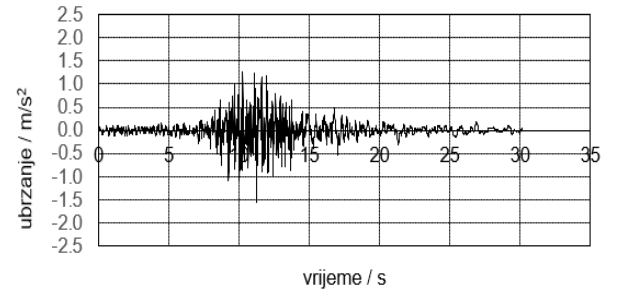
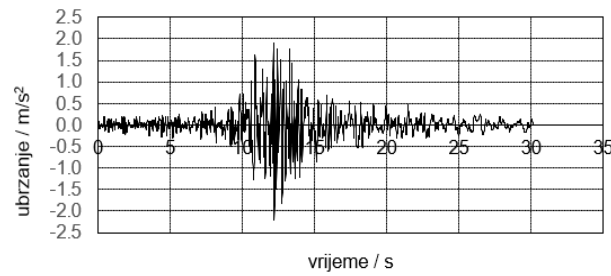
Petrovac 1979 (Crna Gora), Campano Lucano 1980 (Italija), i South Iceland 2000 (Island) spadaju među najsnažnije potrese u povijesti koji su prouzročili velike štete. Zbog svog intenziteta, ovi potresi su vrlo korisni za analize koje istražuju reakciju modela na snažne seizmičke aktivnosti.

Kolonada je proučavana koristeći metodu inkrementalne dinamičke analize, koja se primjenjuje za ispitivanje reakcije građevina na potresna opterećenja. Ova metoda se temelji na postepenom povećavanju amplitude stvarnih potresa, što omogućuje praćenje ponašanja kolonade pod seizmičkim opterećenjem sve do njenog sloma. Ovom analizom se može utvrditi način na koji dolazi do sloma konstrukcije te procijeniti nosivost kolonade.

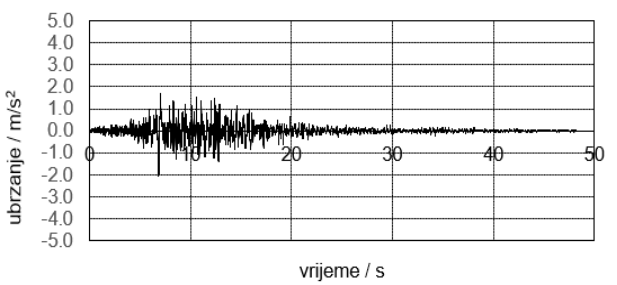
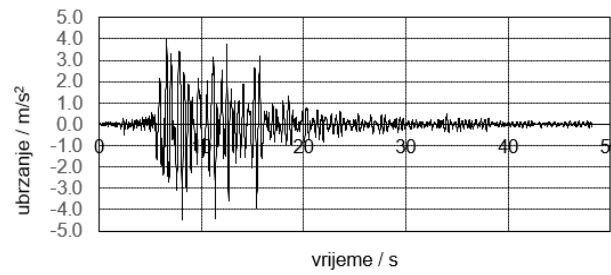
Slika 10. prikazuje zapise ubrzanja tla u horizontalnom i vertikalnom smjeru za potrese Petrovac, Campano Lucano i South Iceland. [7]



South Iceland



Campano Lucano



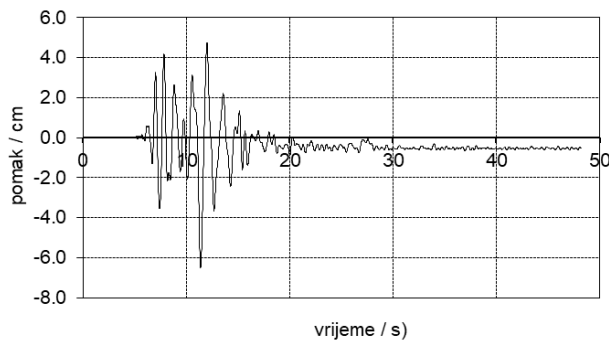
Petrovac

Slika 10. Zapisi ubrzanja tla – lijevo horizontalna, desno vertikalna komponenta

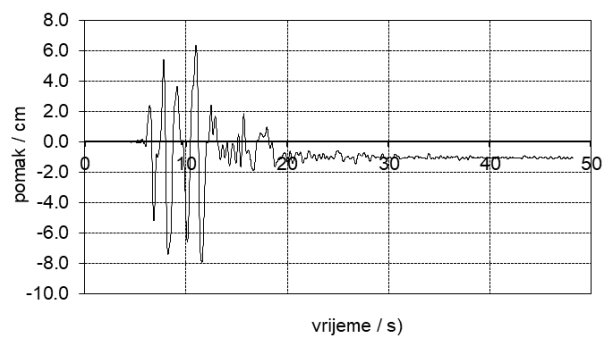
### 3. REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA

U ovom dijelu predstavljene su rezultati numeričke analize kolonade podvrgnute horizontalnom ubrzanju koje se postepeno linearno povećava. Ubrzanje se kontinuirano povećava sve dok konstrukcija ne dosegne svoj krajnji slom. Također su prikazane simulacije koje ilustriraju odvajanje blokova, kao i konačni kolaps kolonade pri svakom analiziranom potresu.

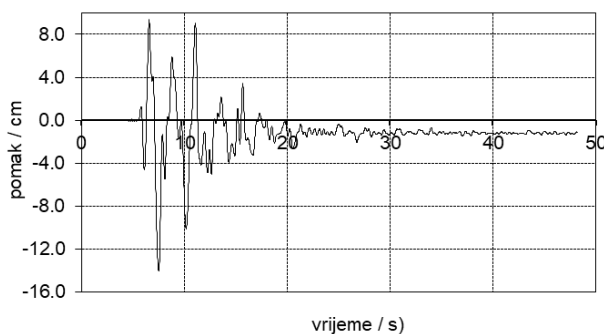
#### 3.1. Analiza konstrukcije uslijed potresa Petrovac



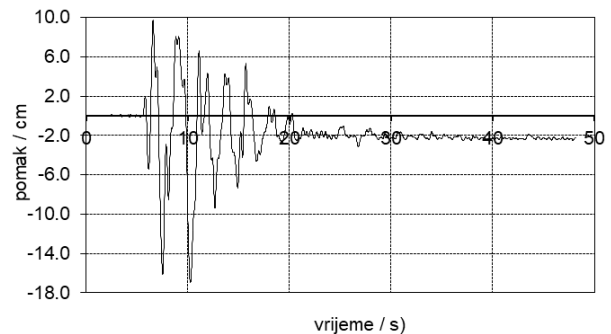
a) vršno ubrzanje 0.22 g



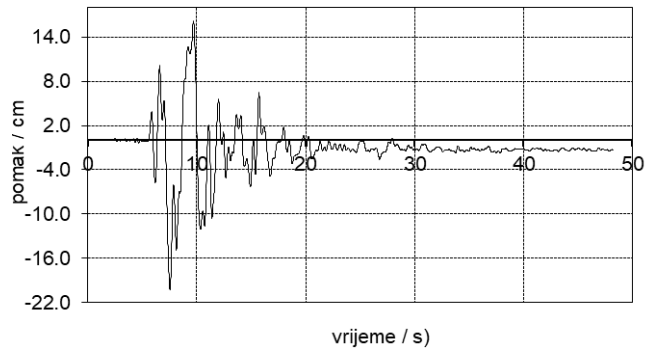
b) vršno ubrzanje 0.30 g



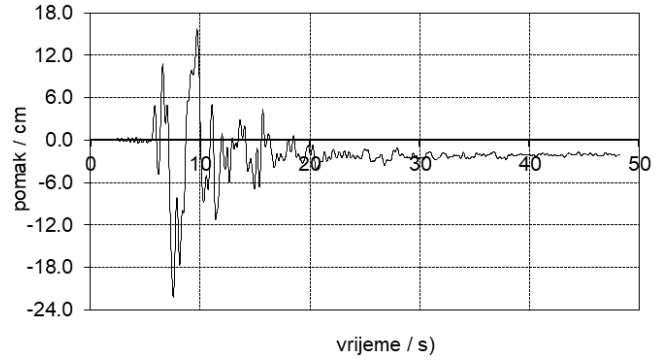
c) vršno ubrzanje 0.50 g



d) vršno ubrzanje 0.60 g



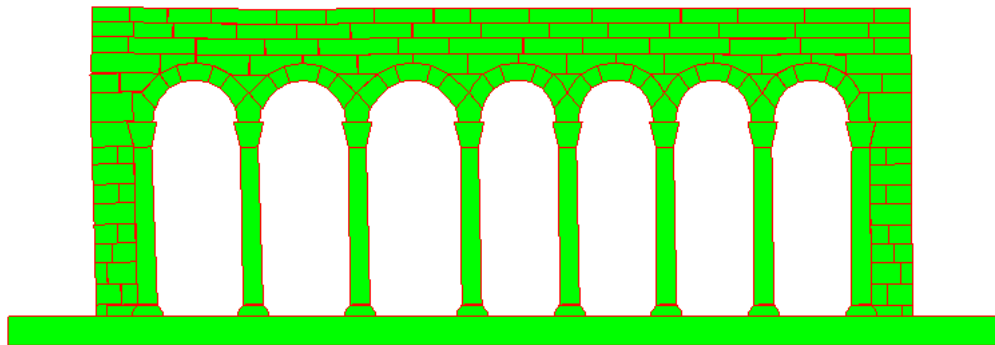
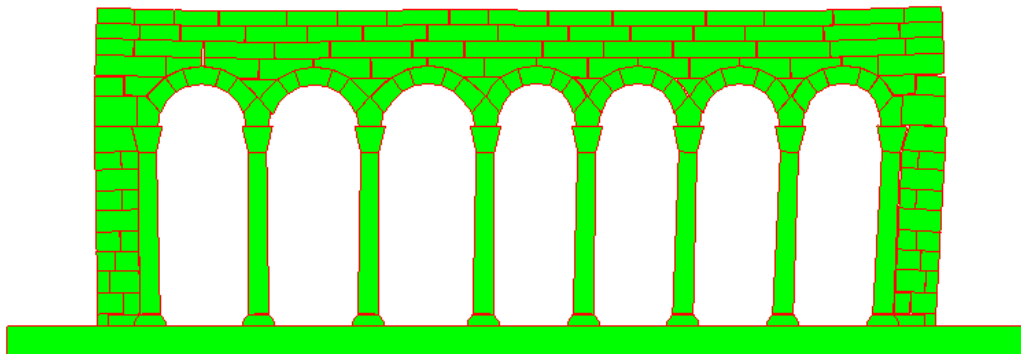
e) vršno ubrzanje 0.80 g

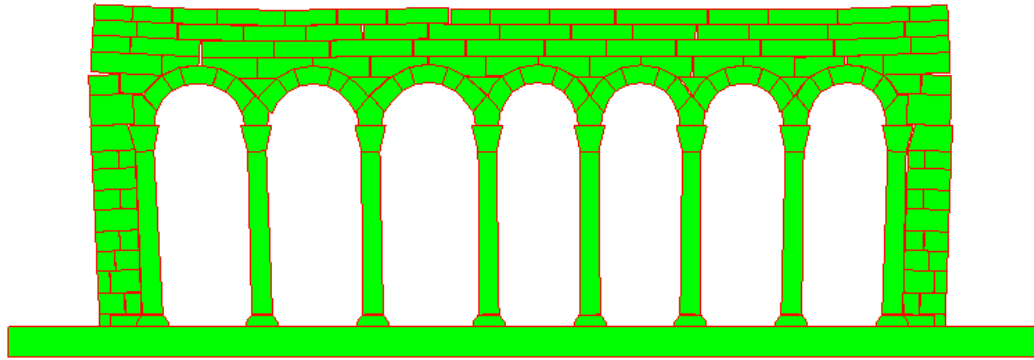


f) vršno ubrzanje 0.85 g

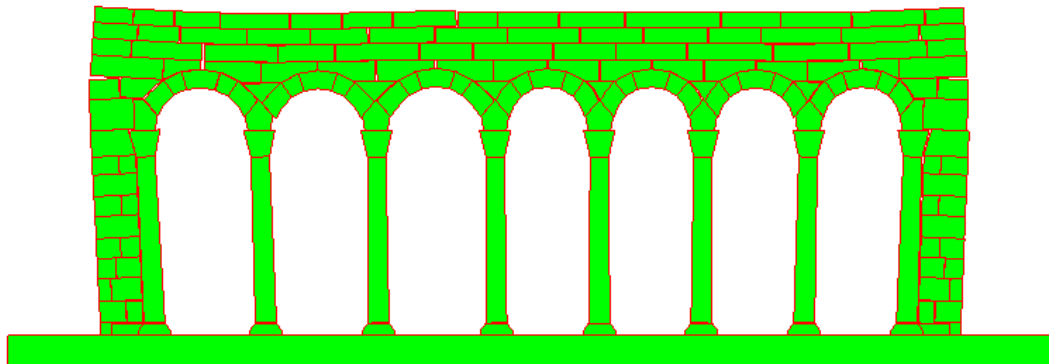
Pri vršnom ubrzanju tla od 0.90 g kolonada se urušila.

Slika 11. Pomaci vrha kolonade pri različitim vršnim ubrzanjima tla - Petrovac

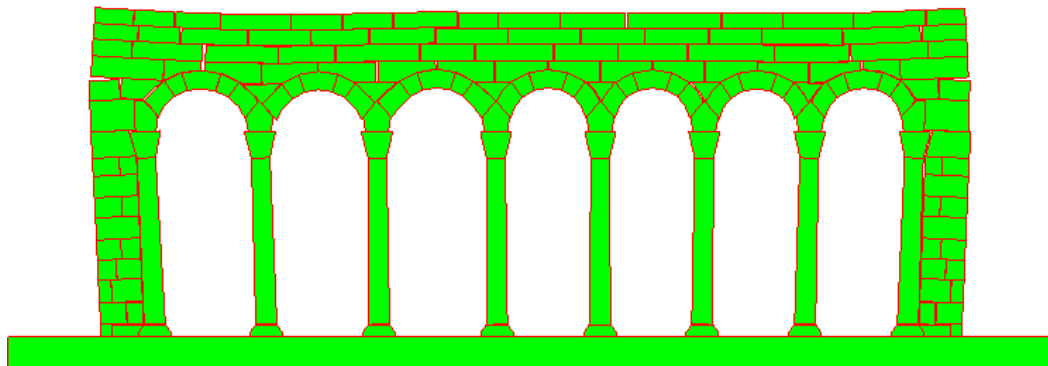
a)  $t=7.25$  sb)  $t=9.50$  s



c)  $t=12.25$  s

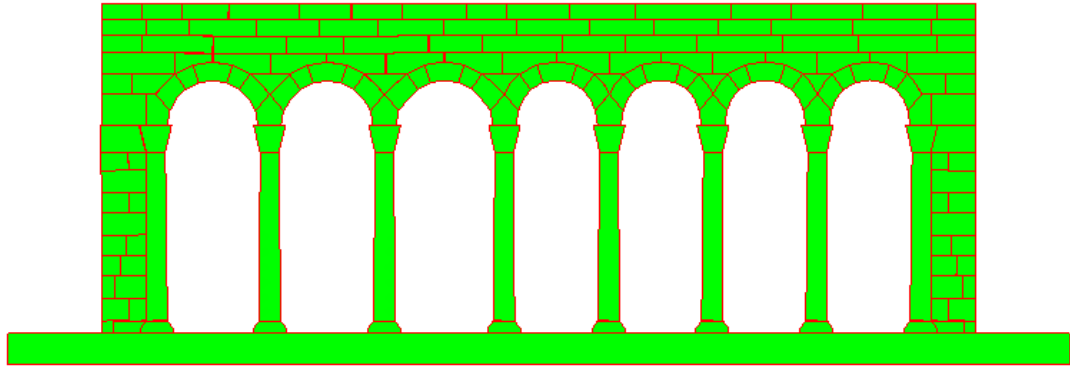


d)  $t=20.90$  s

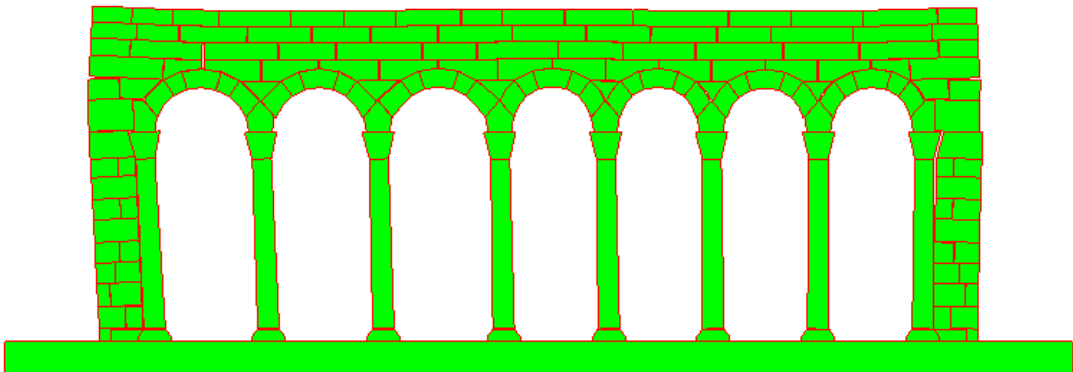


e)  $t=48.20$  s

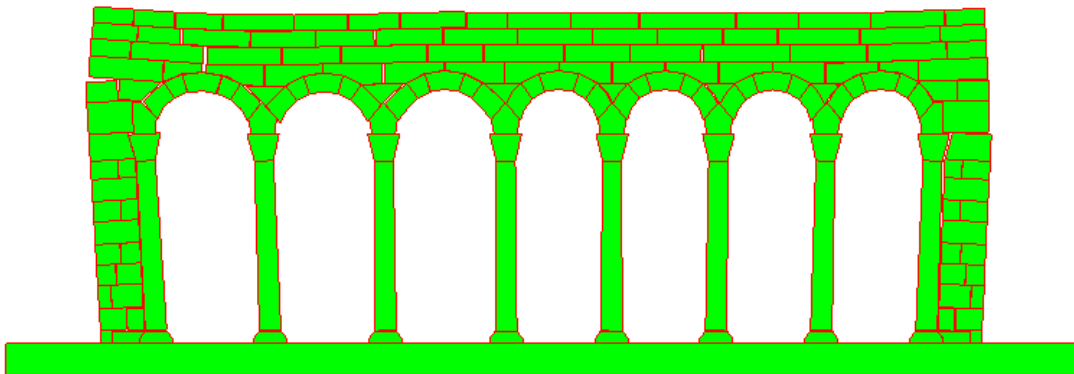
Slika 12. Prikaz odvajanja blokova kolonade za ubrzanje tla  $0.85$  g



a)  $t=6.00$  s

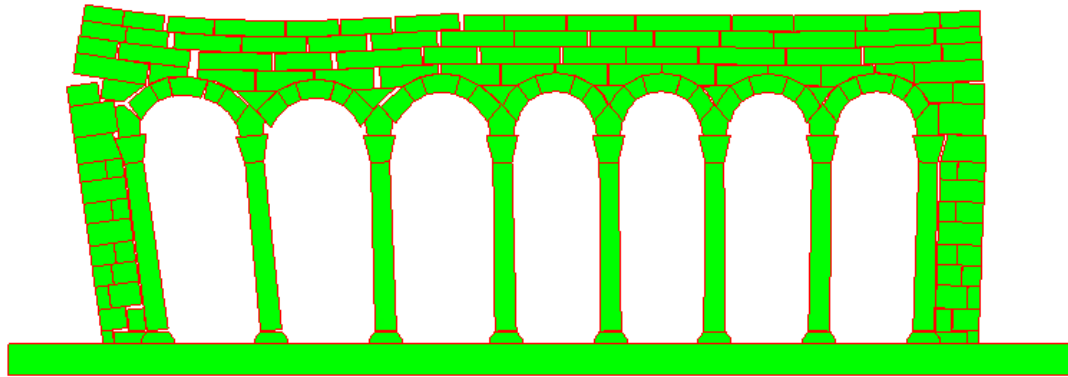
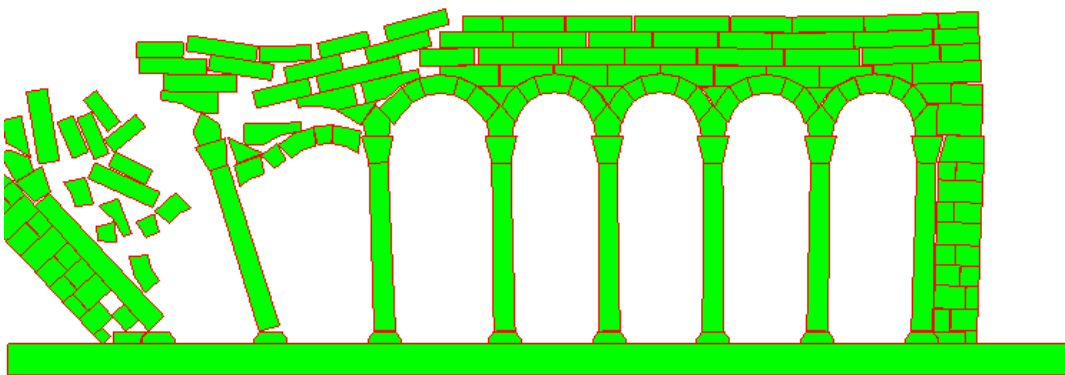


b)  $t=8.00$  s



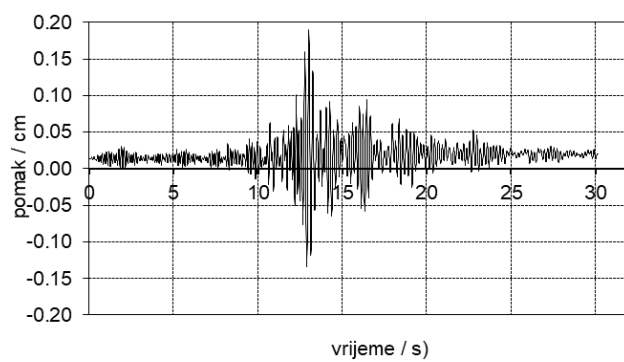
c)  $t=12.00$  s



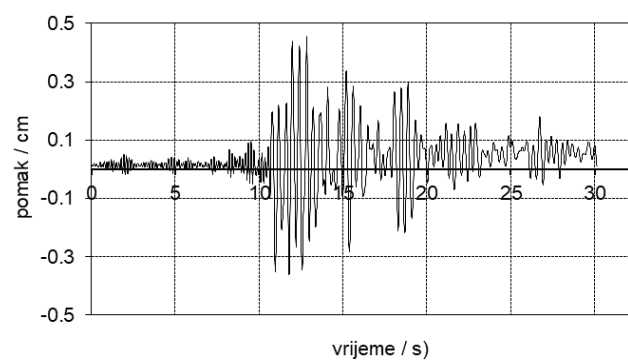
d)  $t=19.50$  se)  $t=21.50$  s

Slika 13. Prikaz odvajanja blokova i slom kolonade za ubrzanje tla 0.90 g

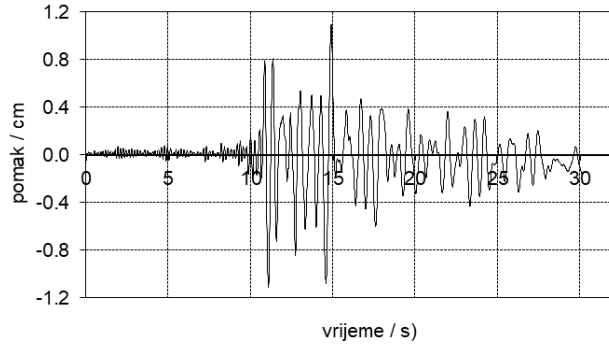
### 3.2. Analiza konstrukcije uslijed potresa Campano Lucano



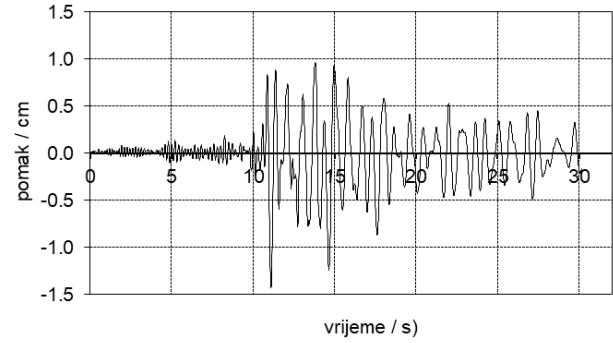
a) vršno ubrzanje 0.22 g



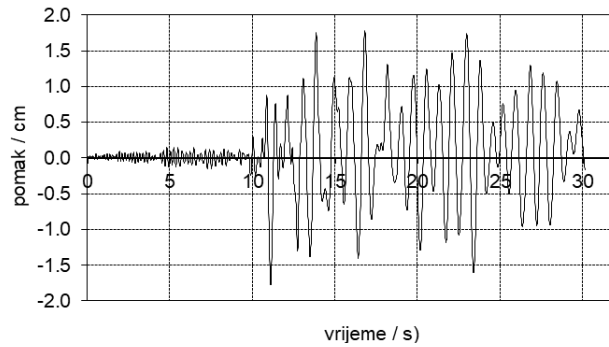
b) vršno ubrzanje 0.50 g



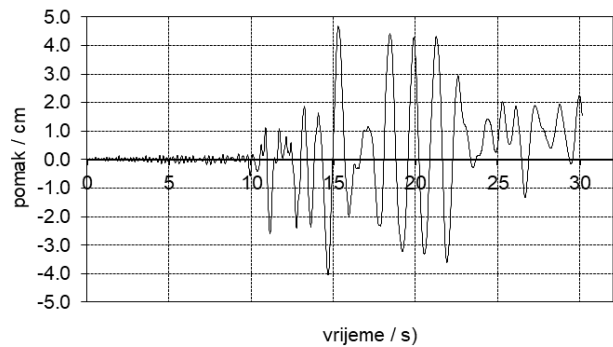
c) vršno ubrzanje 0.80 g



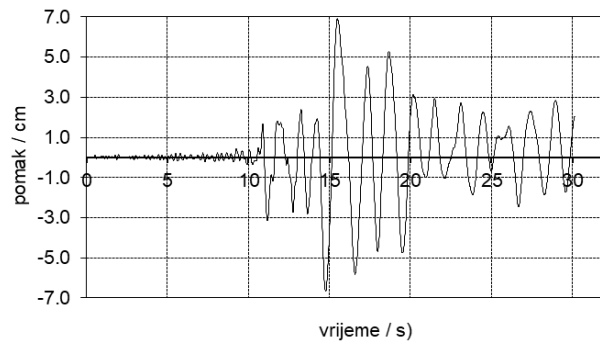
d) vršno ubrzanje 1.00 g



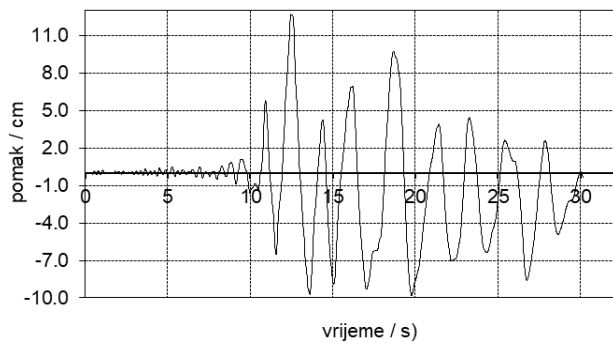
e) vršno ubrzanje 1.20 g



f) vršno ubrzanje 1.60 g

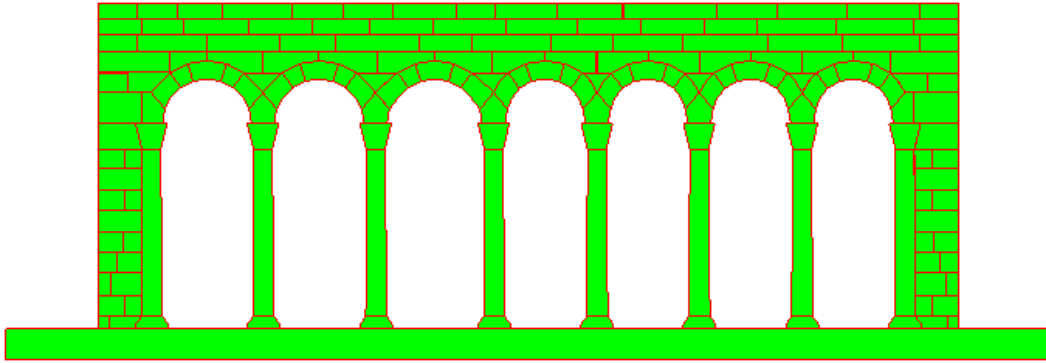


g) vršno ubrzanje 2.00 g

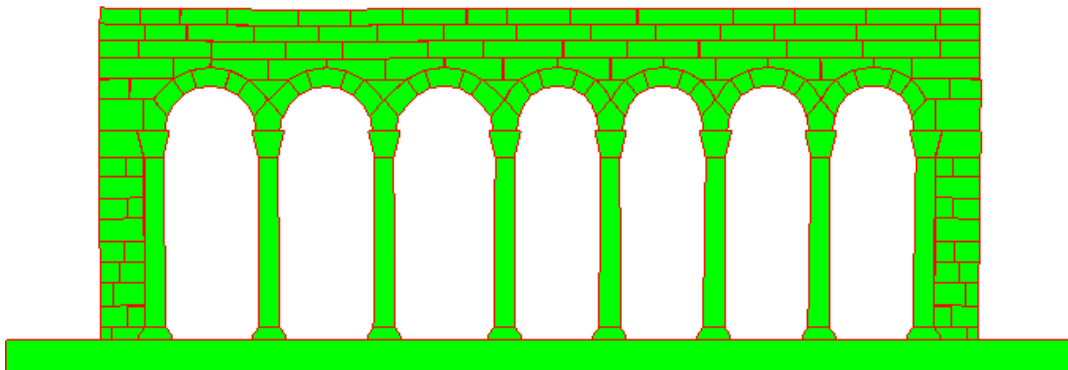


h) vršno ubrzanje 3.00 g

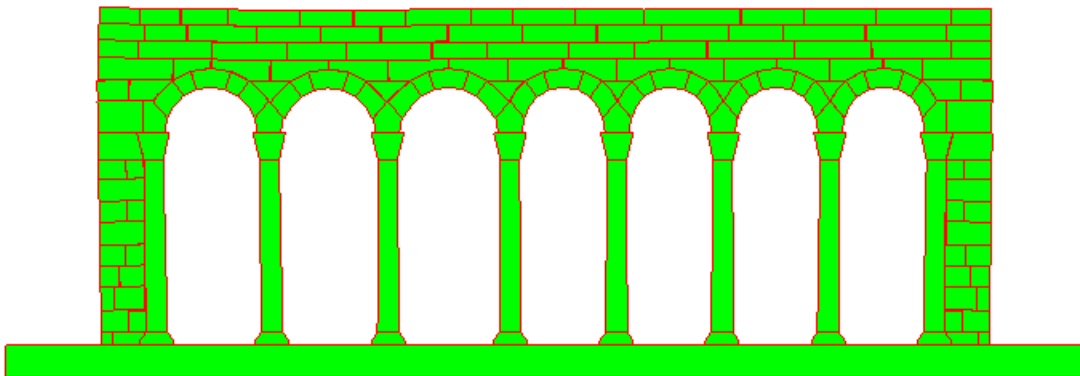
Slika 14. Pomaci vrha kolonade pri različitim vršnim ubrzanjima tla – Campano Lucano



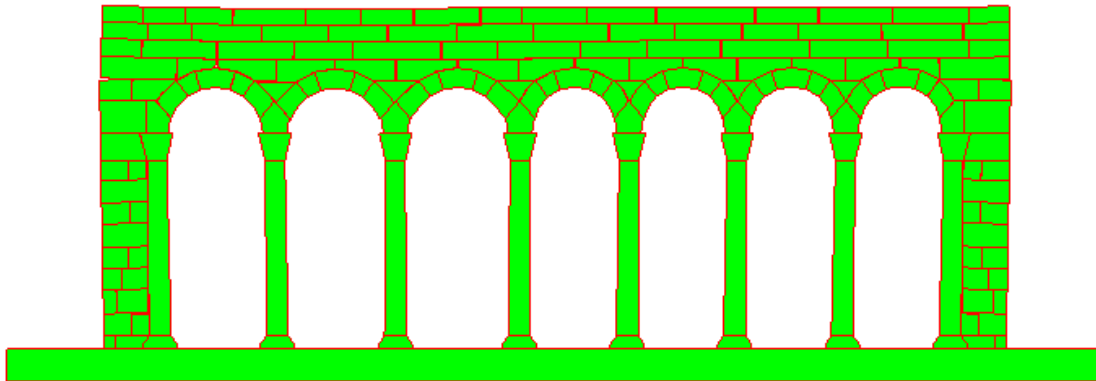
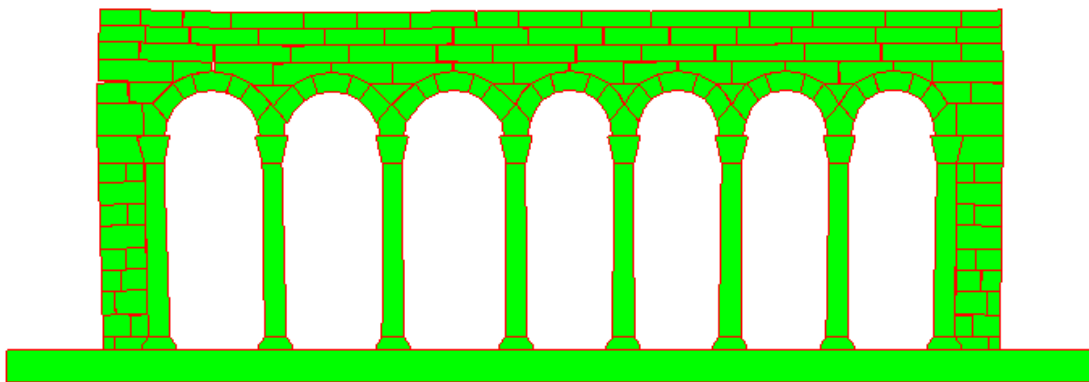
a)  $t=10.50$  s



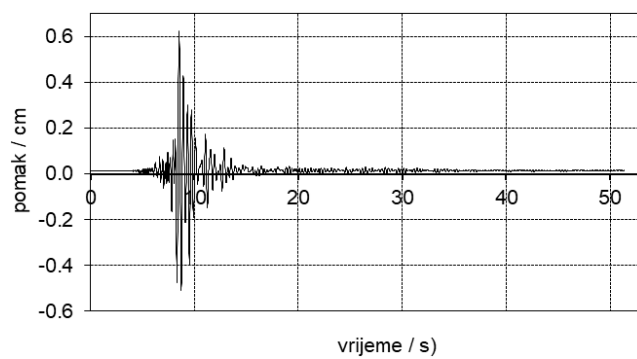
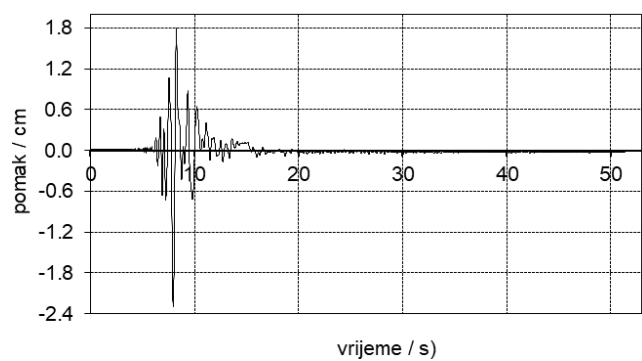
b)  $t=12.00$  s

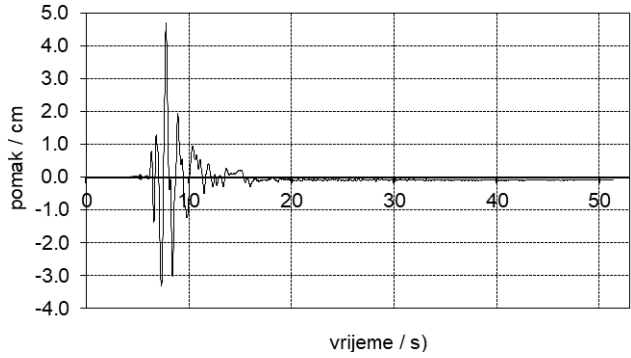


c)  $t=13.00$  s

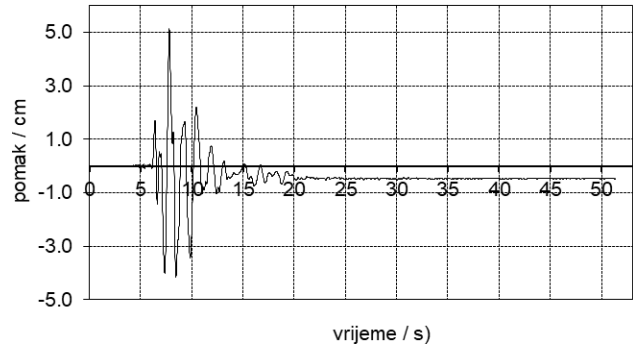
d)  $t=14.50$  se)  $t=30.15$  sSlika 15. Prikaz odvajanja blokova za ubrzanje tla  $3.00$  g

### 3.3. Analiza konstrukcije uslijed potresa South Iceland

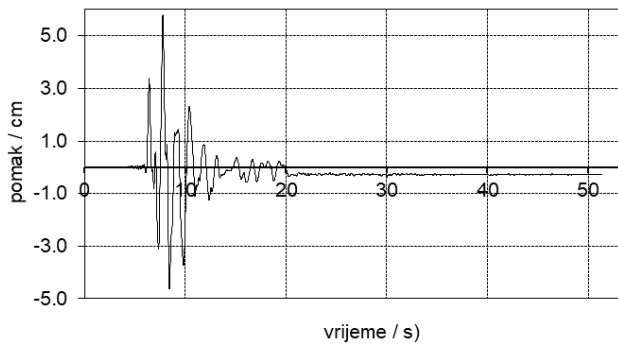
a) vršno ubrzanje  $0.22$  gb) vršno ubrzanje  $0.50$  g



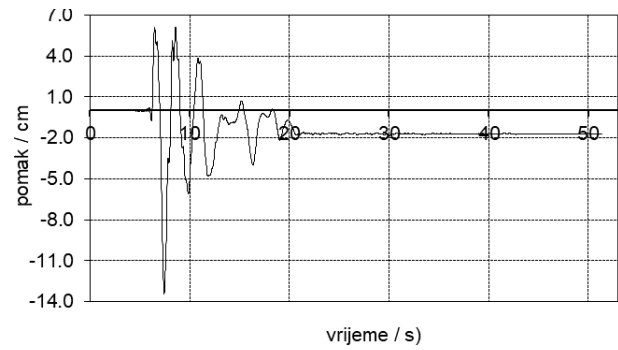
c) vršno ubrzanje 0.80 g



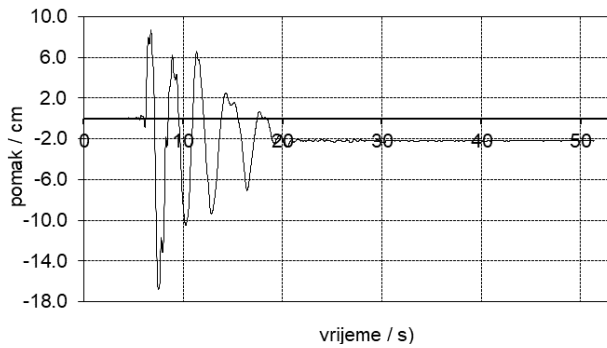
d) vršno ubrzanje 1.00 g



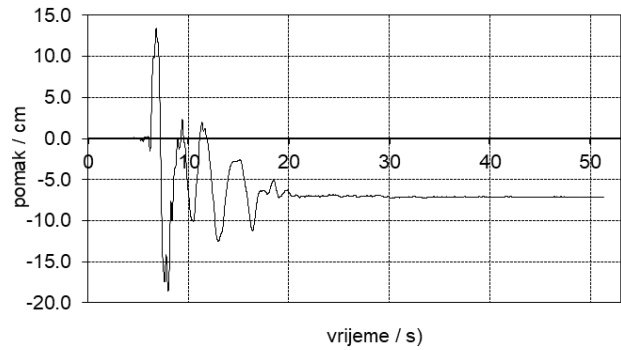
e) vršno ubrzanje 1.20 g



f) vršno ubrzanje 1.60 g



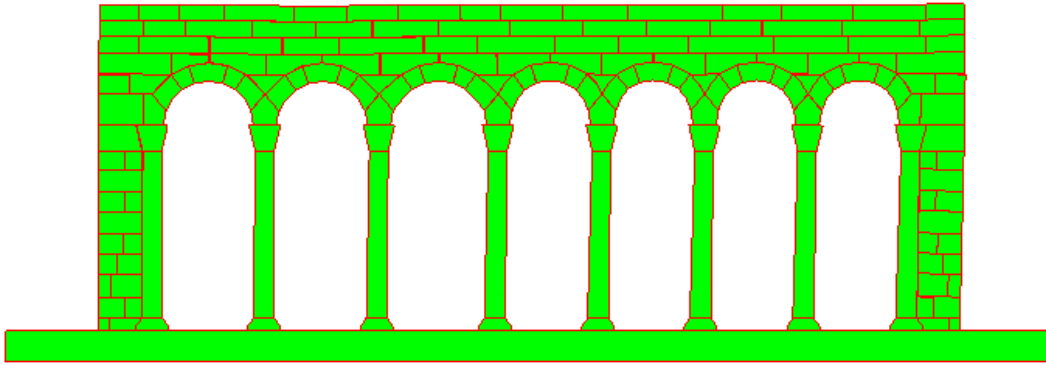
g) vršno ubrzanje 2.00 g



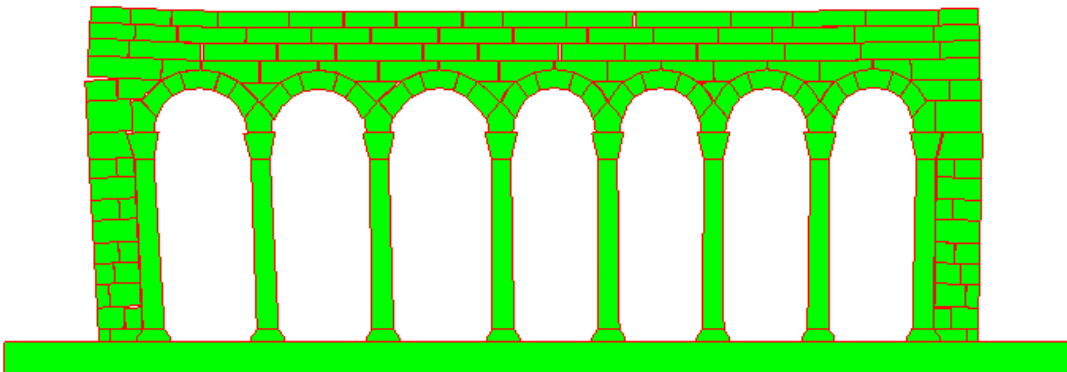
h) vršno ubrzanje 2.50 g

Pri vršnom ubrzanju tla od 2.60 g kolonada se urušila.

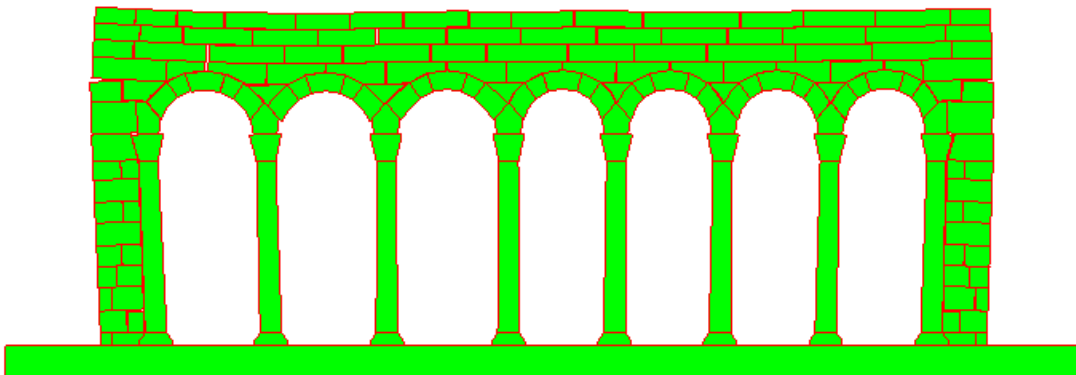
Slika 16. Pomaci vrha kolonade pri različitim vršnim ubrzanjima tla – South Iceland



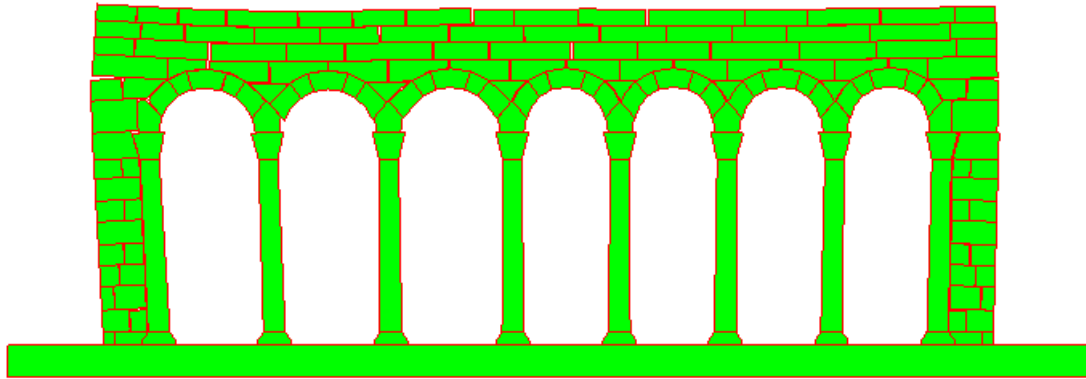
a)  $t=7.00$  s



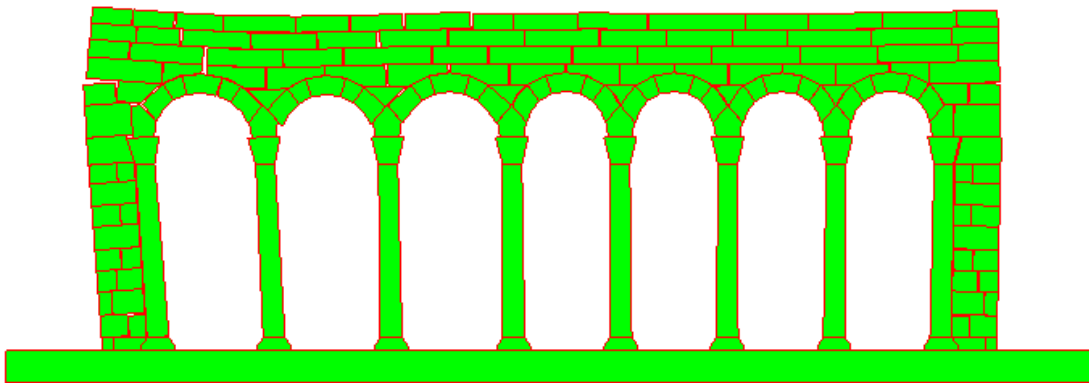
b)  $t=8.25$  s



c)  $t=9.50$  s

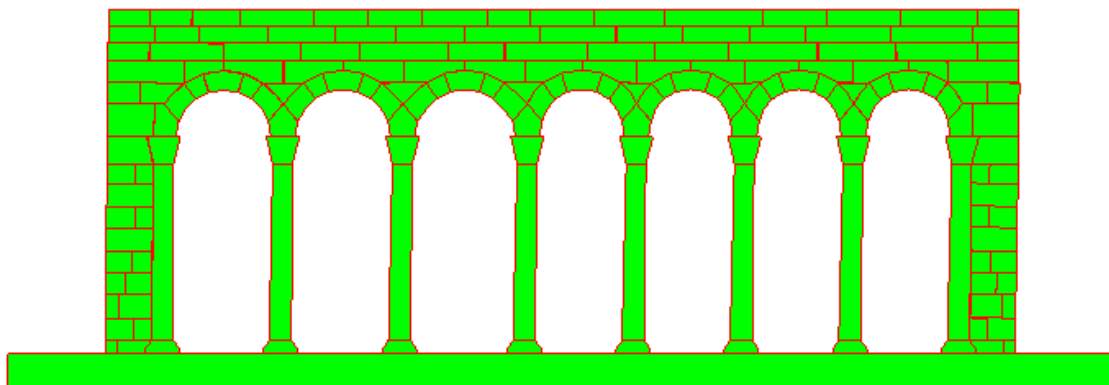


d)  $t=11.00$  s

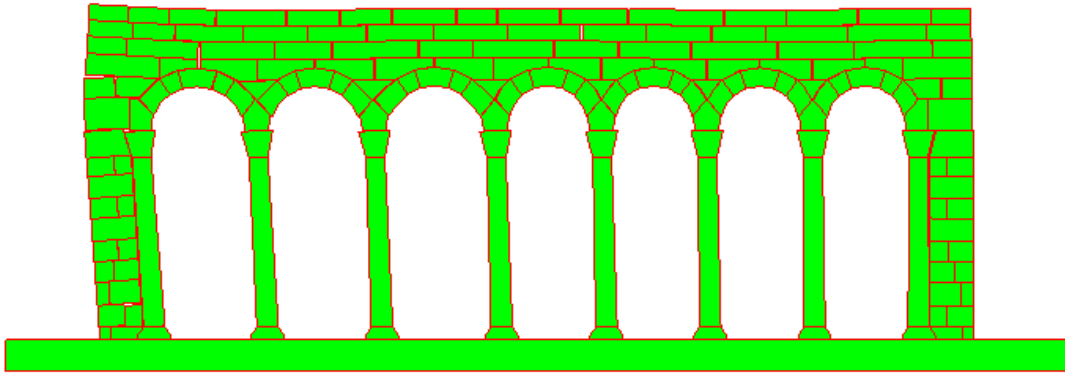


e)  $t=51.35$  s

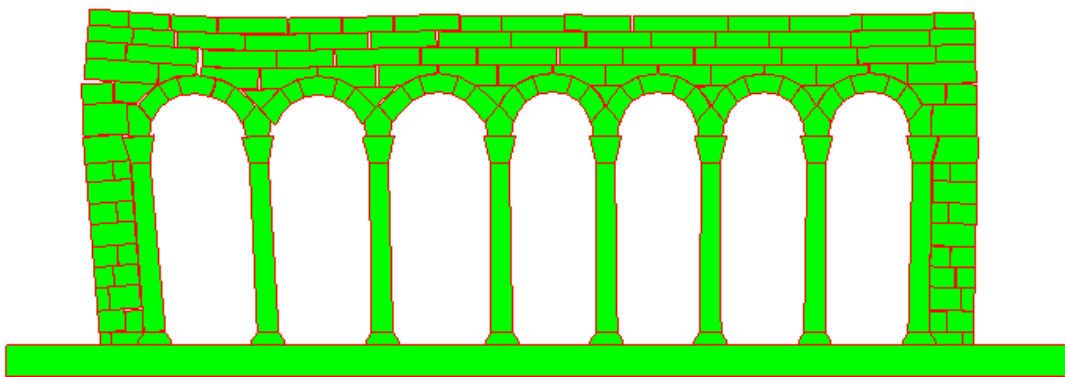
*Slika 17. Prikaz odvajanja blokova kolonade za ubrzanje tla 2.50 g*



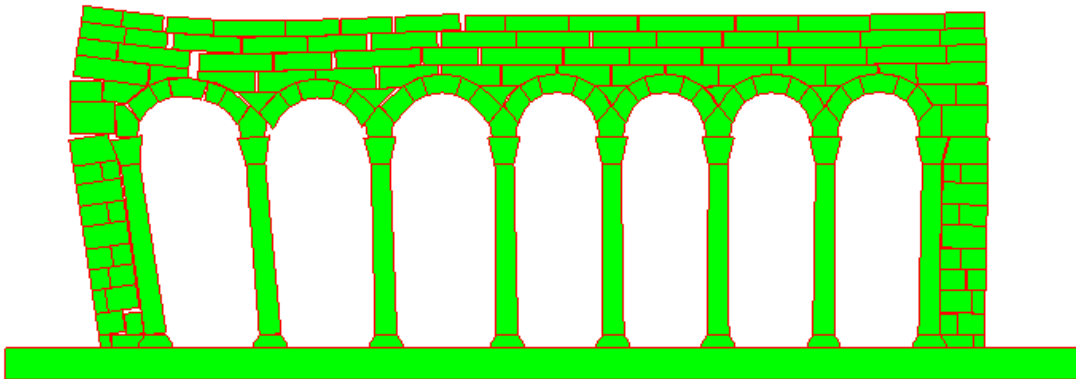
a)  $t=6.50$  s



b)  $t=8.00$  s

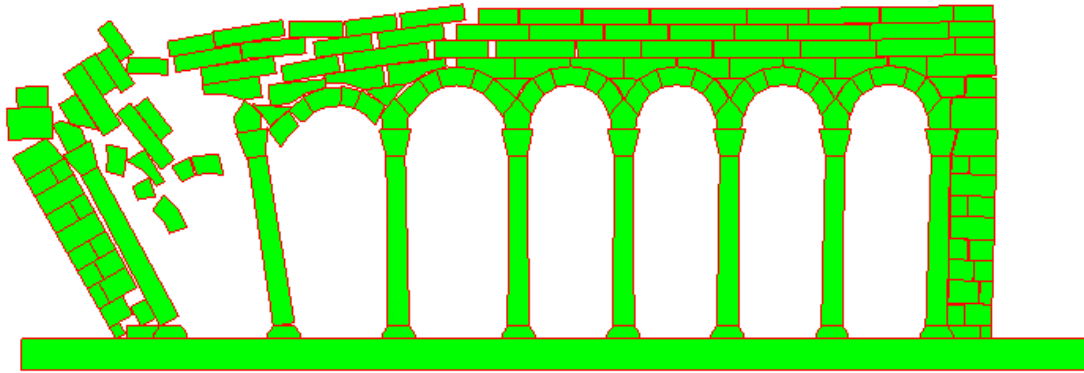


c)  $t=10.00$  s



d)  $t=14.00$  s





e)  $t=15.50$  s

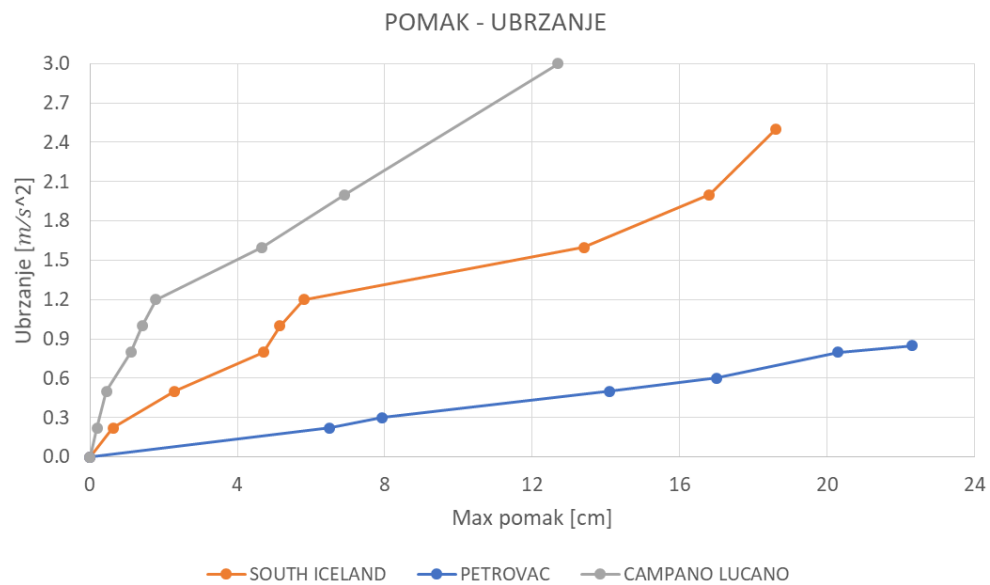
*Slika 18. Prikaz odvajanja blokova i slom kolonade za ubrzanje tla 2.60 g*

#### 4. SINTEZA I USPOREDBA REZULTATA

Tablica 2. i dijagram na slici 18. prikazuju vezu između vršnog ubrzanja podloge i pomaka za tri različita potresa analizirana u ovom radu. Ovi prikazi omogućuju usporedbu intenziteta i učinaka svakog potresa na kolonadu.

Tablica 2. Odnos između pomaka i ubrzanja za sva tri potresa

SOUTH ICELAND		PETROVAC		CAMPANO LUCANO	
Pomak (cm)	Ubrzanje (m/s <sup>2</sup> )	Pomak (cm)	Ubrzanje (m/s <sup>2</sup> )	Pomak (cm)	Ubrzanje (m/s <sup>2</sup> )
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.62	0.22	6.50	0.22	0.19	0.22
2.30	0.50	7.93	0.30	0.45	0.50
4.71	0.80	14.10	0.50	1.11	0.80
5.15	1.00	17.00	0.60	1.42	1.00
5.80	1.20	20.30	0.80	1.79	1.20
13.40	1.60	22.3	0.85	4.67	1.60
16.80	2.00			6.91	2.00
18.6	2.50			12.7	3.00



Slika 19. Grafički prikaz odnosa između pomaka i ubrzanja tri različita potresa

U prethodnom poglavlju analizirani su efekti vršnih ubrzanja tri različita potresa na kolonadu te su prikazani pomaci konstrukcije pri ubrzanju tla koje uzrokuje njeno rušenje. Uočeno je da kolonada oscilira oko početnog položaja pri malim vršnim ubrzanjima tijekom cijelog trajanja potresa. Kako se vršno ubrzanje povećava, pomiče se i položaj osciliranja. Najveće amplitude, odnosno odstupanja od srednje vrijednosti, variraju ovisno o vrsti potresa.

Kod potresa Petrovac najveće amplitude javljaju se između pete i dvadesete sekunde.

Kod potresa Campano Lucano, one se pojavljuju između desete i tridesete sekunde, dok su za potres South Iceland najveće amplitude između pete i petnaeste sekunde.

Rezultati seizmičke analize pokazuju da su nastali najveći pomaci vrha kolonade tijekom potresa Petrovac, pri čemu maksimalno vršno ubrzanje koje konstrukcija može izdržati prije sloma iznosi 0,85 g, a pomak pri tom ubrzanju je 22,3 cm. Pri analizi potresa South Iceland, najveći pomak koji konstrukcija može podnijeti iznosi 18,6 cm, pri vršnom ubrzanju od 2,50 g. Za potres Campano Lucano, konstrukcija podnosi izuzetno velika ubrzanja. Vjerojatnost nastanka potresa s vršnim ubrzanjem većim od 3,0 g je vrlo mala, pa je u numeričkim analizama to ubrzanje odabrano kao maksimalno. Za potres Campano Lucano i ubrzanje 3.0g ostvaren je pomak od 12,7 cm. Rezultati seizmičke analize pokazuju da je intenzitet potresa u Petrovcu najveći, zbog čega se upravo ovaj potres smatra najrelevantnijim za analizu kolonade.

#### 4.1. Zaključak

Potres je prirodna pojava čiju snagu i učinke na građevinske konstrukcije ne možemo precizno predvidjeti. Kroz povijest se pokazalo da potresi mogu imati katastrofalne posljedice, uključujući mnogobrojne ljudske žrtve i značajnu materijalnu štetu.

Kako bi se smanjili negativni učinci potresa, razvijaju se različite numeričke metode za analizu ponašanja konstrukcija izloženih seizmičkom djelovanju. Prilikom takvih analiza prednost imaju numeričke metode koje mogu simulirati odnosno predvidjeti trenutke kada konstrukcija gubi stabilnost i dolazi do njenog urušavanja. Jedna od tih metoda, kombinirana metoda konačnih i diskretnih elemenata, korištena je u ovom radu. Analize provedena ovom metodom daje realnu simulaciju odvajanja blokova i ponašanja konstrukcije u trenutku potpunog kolapsa, što je ključno za predviđanje opasnosti.

U okviru rada provedena je inkrementalna dinamička analiza za tri realna potresa. Rezultati seizmičke analize pokazuju da je potres Petrovac najnepovoljniji te je on mjerodavan za analizu ponašanje kolonade izložene seizmičkom opterećenju. Za ubrzanje 0.22g koje je mjerodavno za Split za sva tri potresa na konstrukciji nije nastalo nikakvo oštećenje.

Analize provedene u ovom radu pokazuju prednost kombinirane metode konačnih i diskretnih elemenata za simulaciju ponašanja povijesnih zidanih konstrukcija izloženih seizmičkom opterećenju.

## 5. LITERATURA

- [1] Smoljanović H, Seizmička analiza zidanih konstrukcija metodom konačno-diskretnih elemenata, Fakultet građevinarstva, aritekture i geodezije, Split, 2013
- [2] <https://saxdor.hr/hr/clanci/najbolje-destinacije-u-dalmaciji-za-jednodnevne-izlete-4419>
- [3] <https://www.hrz.hr/images/stories/izlozbe/peristil2007/Pano-04.pdf>
- [4] Grad Split i Hrvatski restauratorski zavod, Izložba o konzervatsko-restauratorskim radovima na Peristilu Dioklecijanove palače u Splitu, Grad Split, 2013
- [5] Živaljić N, Metoda konačno-diskretnih elemenata za seizmičku 2D analizu AB konstrukcija, Fakultet građevinarstva, aritekture i geodezije, Split, 2012
- [6] Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities, (2014) Version 2.8.5.
- [7] Y: FEM/DEM COMPUTER PROGRAM, Copyright (C) 2000, Dr. Antonio Munjiza
- [8] Munjiza A.: The combined finite-discrete element method, John Wiley & Sons, 2004
- [9] Balić I; Smoljanović, H; Trogrlić, B; Munjiza, A, Seismic Analysis of the Bell Tower of the Church of St. Francis of Assisi on Kaptol in Zagreb by Combined Finite-Discrete Element Method // Buildings, 11 (2021), 8; 373, 17 doi:10.3390/buildings11080373
- [10] Talijančić A, Sučić Marić A, Vujčić D, Jakaša D, Juras D, Snimak postojećeg stanja, Istočna kolonada na Peristilu, Istočni pogled M 1:50, Grad Split, rujan 2008