Seizmička analiza i procjena nosivosti konstrukcije sjeverozapadne kule Dioklecijanove palače

Bašić, Lorena

Master's thesis / Diplomski rad

2025

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:217010

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-22**

Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Lorena Bašić

Split, 2025.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Lorena Bašić

Seizmička analiza i procjena nosivosti konstrukcije sjeverozapadne kule Dioklecijanove palače

Diplomski rad

Split, 2025.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

STUDIJ: SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ GRAĐEVINARSTVO

KANDIDAT: **Lorena Bašić**

MATIČNI BROJ: **0083224886**

KATEDRA: **Katedra za teoriju konstrukcija**

KOLEGIJ: **Dinamika konstrukcija i potresno inženjerstvo**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema:
Seizmička analiza i procjena nosivosti konstrukcije sjeverozapadne kule Dioklecijanove palače

Opis zadatka:

Za konstrukciju sjeverozapadne kule Dioklecijanove palače potrebno je izraditi model i provesti seizmičku analizu koja se bazira na kombiniranoj metodi konačno diskretnih elemenata FEM/DEM. Seizmičku analizu je potrebno provesti za tri zapisa ubrzanja potresa: Petrovac, Campano Lucano i South Iceland. Potrebno je detaljno analizirati rezultate te donijeti zaključke o ponašanju i nosivosti konstrukcije koja je izložena seizmičkom opterećenju.

U Splitu, listopad 2024.

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Ivan Balić

Komentor:

izv. prof. dr .sc. Nikolina Živaljić

Predsjednik Povjerenstva za završne i diplomske ispite studija Građevinarstvo:

izv. prof. dr. sc. Ivan Balić

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

kojom ja, Lorena Bašić, JMBAG: 0083224886, studentica Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, kao autorica ovog diplomskog rada izjavljujem da sam ga izradila samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Ivan Balić / komentorstvom izv. prof. dr. sc. Nikolina Živaljić.

U radu sam primijenila metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristila literaturu koja je navedena na kraju rada. Tuđe spoznaje, zaključke, teorije, formulacije i grafičke prikaze koje sam izravno ili parafrazirajući navela u radu citirala sam i povezala s korištenim bibliografskim jedinicama.

_____

(vlastoručni potpis studentice)

Seizmička analiza i procjena nosivosti konstrukcije sjeverozapadne kule Dioklecijanove palače

Sažetak:

U ovom radu prikazana je seizmička analiza sjeverozapadne kule Dioklecijanove palače u Splitu. U analizi su korišteni zapisi ubrzanja tri povijesna razorna potresa: Petrovac 1979., Campano Lucano 1980. i South Island 2000. Za proračun konstrukcije primjenjen je Y2D numerički model temeljen na kombiniranoj metodi konačnih i diskretnih elemenata FEM/DEM. Rezultati provedenih analiza prikazuju dinamički odgovor konstrukcije u vremenu iz kojeg je vidljiv način pojave razvoja pukotina sve do sloma konstrukcije.

Ključne riječi:

FEM/DEM, sjeverozapadna kula, Dioklecijanova palača, numerički model, zidane konstrukcije, seizmička analiza, potres

Seismic analysis and assessment of the structural load-bearing capacity of the northwestern tower of Diocletian's Palace

Abstract:

This study presents a seismic analysis of the northwestern tower of Diocletian's Palace in Split. The acceleration records of three historical devastating earthquakes were used in the analysis: Petrovac 1979, Campano Lucano 1980 and South Island 2000. The Y2D numerical model based on the combined finite and discrete element method FEM/DEM was applied for the structural analysis. The results of the performed analyses show the dynamic response of the structure over time, from which the mode of crack development up to the structural failure is visible.

Keywords:

FEM/DEM, northwest tower, Diocletian's Palace, numerical model, masonry structures, seismic analysis, earthquake

SADRŽAJ

1. UVOD 1
1.1. Zidane konstrukcije 1
1.2. Sjeverozapadna kula Dioklecijanove palače 2
2. METODE MODELIRANJA ZIDANIH KONSTRUKCIJA PRI SEIZMIČKOM OPTEREĆENJU 6
2.1. Numeričko modeliranje 6
2.2. Metode za seizmičku analizu zidanih konstrukcija 7
2.3. Metoda konačnih i diskretnih elemenata 8
2.4. FEM/DEM metoda 9
3. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE I DISKRETIZACIJA KULE 11
3.1. Seizmičko djelovanje 14
4. REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA 16
4.1. Rezultati analiza za potres Petrovac 16
4.2. Rezultati analiza za potres South Island 19
4.3. Rezultati analiza za potres Campano Lucano 22
5. SINTEZA I USPOREDBA REZULTATA 25
6. ZAKLJUČAK 26
7. LITERATURA 27

1. UVOD

1.1. Zidane konstrukcije

Jedna od najstarijih građevinskih tehnika koja se koristi i danas je građenje pomoću slaganja kamenih ili glinenih blokova koji se još mogu povezati i mortom. Najstariji primjeri takve gradnje su kružne kamene kolibe pronađene u blizini jezera Hullen u Izraelu, koje datiraju iz razdoblja između 9000. i 8000. godina prije Krista. Prve konstrukcije pretpostavlja se da su bile od hrpe neprerađenog kamena, no daljnim razvojem alata i ljudskih vještina kameni blokovi su postajali sve pravilnijeg oblika. Od materijla su se još koristili glina ili blato koje se prvotno sušilo na zraku, kasnije se pekao u posebnim pećima da bi mu se povećala čvrstoća. Usavršavanjem tehnika gradnje kroz povijest omogućio se razvoj raznih oblika konstrukcija kao što su: grede, lukovi, svodovi, stupovi za podizanje visina i kupole za postizanje većih raspona.

Zidane konstrukcije su poznate po dugovječnosti i jednostavnosti, za primjer imamo razne građevine stare nekoliko stotina ili tisuća godina koje se nalaze diljem svijeta:

a) Partenon u Ateni

b) Colloseum u Rimu

c) Egipatske piramide

d) Kineski zid

Slika 1. Zidane građevine diljem svijeta

Zidane konstrukcije predstavljaju izazov u opisivanju i razumijevanju njihovog mehaničkog ponašanja, izrazito zbog seizmičkog opterećenja. Zbog sljubnica između blokova, ispunjenih ili neispunjenih mortom pokazuje nelinearno i složeno ponašanje. Većina tih konstrukcija su smještene u seizmički aktivnom području, gdje su potresi otkrili njihovu ranjivost. Da bi se smanjio broj ljudskih žrtava i oštećenja, potrebno je dublje razumjeti ponašanje zidanih konstrukcija pod utjecajem seizmičkih sila. Cilj je razviti numerički model za simulaciju ponašanja zidanih konstrukcija pod seizmičkim opterećenjem. Takav model treba uzeti u obzir razvoj i širenje pukotina, efekte gibanja.

U ovom radu je korišten računalni program Y-2D koji se temelji na FEM/DEM metodi, analiza primjenom kombinirane metode konačno – diskretnih elemenata.

1.2. Sjeverozapadna kula Dioklecijanove palače

Dioklecijanova palača se u izvornom obliku sastojala od ukupno 16 kula, a sjeverozapadna kula na uglu očuvala je najveći dio svoje izvorne visine. Baš zbog toga razloga toj kuli je dodijeljen prioritet u znanstvenom programu istraživanja i prezentacije pojedinih dijelova palače, pod nazivom „ Dioklecijanova palača i prostorni razvoj Splita ". Na početku 20. stoljeća istraživači Niemann i Hebrard posvetili su posebnu pažnju sjeverozapadnoj kuli. Zaključili su da je kula u izvornom stanju imala prizemlje i dva kata te su u svojim radovima analizirali njezin značaj i pružili rekonstrukciju. Ali, nisu im se podudarala mišljenja o izgledu drugog kata. Niemann je pretpostavljao da je drugi kat bio identičan prvom, s dva prozora na svakoj strani zida. Hebrard je smatrao da je na drugom katu postojao još jedan prozor na svakom pročelju te je dodao mogućnost postojanja ulaza na južnoj strani kule. Niemann i Hebrard su prizemlje kule opisali kao prostor kvadratnog oblika, s drvenim konstrukcijama koje su se koristile za podove i krov. Prema njihovim rekonstrukcijama, stubište je bilo smješteno unutar zida, omogućujući pristup gornjim katovima.

Daljna istraživanja koja su temeljena na detaljnim snimanjima Zavoda za zaštitu spomenika kulture u Splitu otkrila su ostatke pilona na uglu u prizemlju sjeverozapadne kule. Prvi red kamenja tih pilona je očuvan i omogućio je rekonstrukciju samog izgleda kule. Na pretpostavku nalaza, pretpostavlja se da je prostor prizemlja bio prekriven bačvastim svodom, koji se nalazio na pilonima koji su smješteni na uglu. Svodovi su bili oslonjeni na vanjske

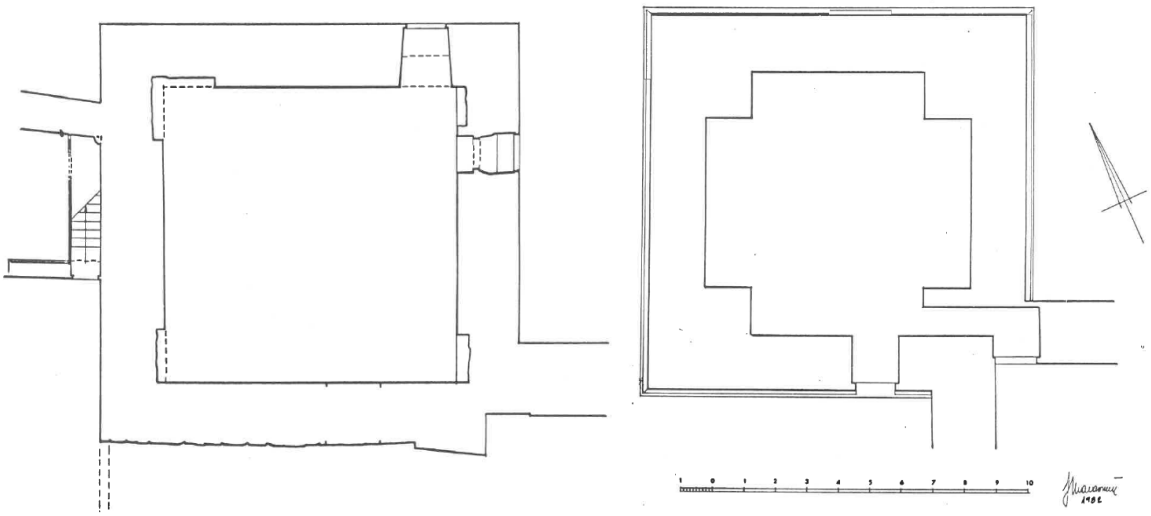
zidove kule, a njihov način gradnje ukazuje na faznu izgradnju – prvo su zidani kameni zidovi, zatim svodovi i unutarnji prostori.

Tijekom analize sačuvanih ostataka, otkriveno je da se ispod prizemlja nalazio sloj zemlje. Prozori na prvom katu su i dan danas još uvijek očuvani i u izvornom obliku, iako su kroz povijest doživjela manja oštećenja. Ova oštećenja, deformacije zidova i svodova, vjerojatno su posljedica požara koji je 1970. godine zahvatio kulu.

Prizemlje je bilo prekriveno svodovima, a iznad prvog kata se nalazila drvena konstrukcija. Raspored greda unutar zidova kule ukazuje da su se prostori u unutrašnjosti dijelili na četiri kvadrata dimenzija 4 x 4 metra. Grede su bile položene u smjeru istok – zapad, s manjim gredama koje su sve ukupno povezivale te prostore. Stubište se ne razlikuje od rekonstrukcija Niemanna i Hebrarda, ono je povezivalo prvi i drugi kat i nalazilo se unutar zidova kule. U 19. stoljeću stubište je zamijenjeno novim, manjim stepenicama. U izvornom stanju takva povezanost nije postojala – prostorije na drugom katu su bile dostupne samo kroz stubište smješteno unutar kule.

Detaljna analiza očuvanih kamenih elemenata u gornjim dijelovima kule otkrila je ostatke jednogg zapadnog prozora, koji je nekada bio dio zidova debljih od dva metra. Zaključeno je da su prozori na prvom katu bili širi i pružali više svjetla, a prozor na prizemlju je imao uži svjetlosni otvor koji se prema unutrašnjosti širio. Pretpostavlja se da su prozori na prvom katu imali svjetlosni otvor širine oko četiri stope (120 cm), zidovi na unutrašnjoj strani su bili još širi.

Drvena konstrukcija iznad prvog kata je bila dizajnirana tako da omogući pravilnu raspodjelu prostora unutar kule, koristeći grede na savijanje kao osnovnu tehniku gradnje. Taj princip izbjegavao je upotrebu luka i svodova u gornjim dijelovima konstrukcije, to je bilo u skladu toga vremena. Za krov se pretpostavlja da je bio prekriven kupama koje su bile karakteristične za razdoblje izgradnje Dioklecijanove palače. Ta pretpostavka se temelji na dosadašnjim istraživanjima i rekonstrukciji drugih dijelova palače te na radovima Niemanna i Hebrarda.

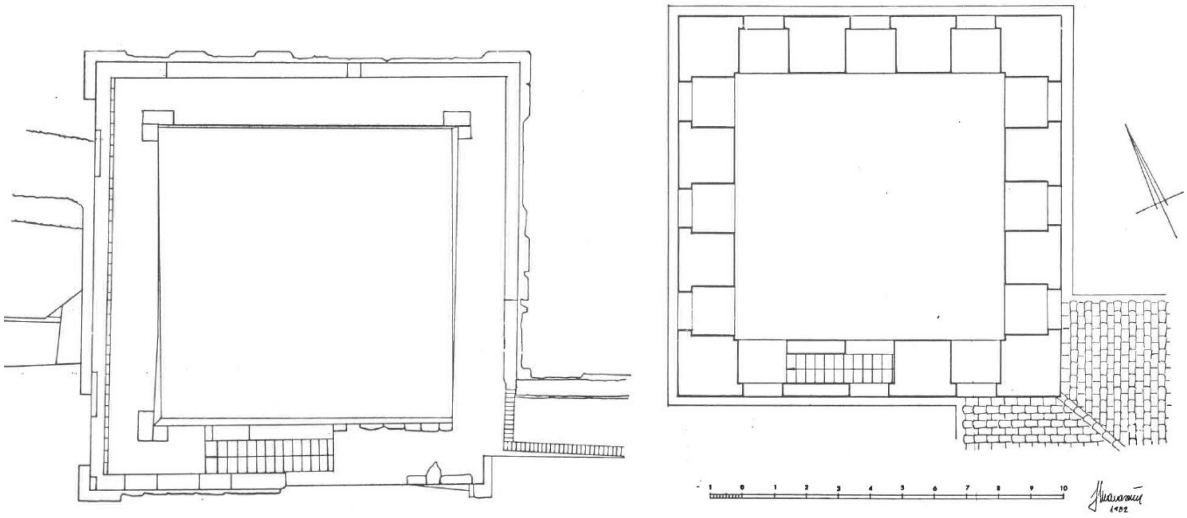


a) Tlocrt prizemlja, stanje 1970. *b) Pretpostavljeno izvorno stanje prizemlja*

Slika 2. Tlocrti prizemlja [1]

a) Tlocrt 1. kata, stanje 1970. *b) Pretpostavljeno izvorno stanje 1. kata*

Slika 3. Tlocrti 1. kata [1]



a) Tlocrt 2. kata, stanje 1970. *b) Pretpostavljeno izvorno stanje 2. kata*

Slika 4. Tlocrti 2. kata [1]

Slika 5. Sjeverozapadna kula Dioklecijanove palače

2. METODE MODELIRANJA ZIDANIH KONSTRUKCIJA PRI SEIZMIČKOM OPTEREĆENJU

Za modeliranje i analizu zidanih konstrukcija prvo se trebaju razumjeti njihova osnovna obilježja. Glavna karakteristika zidanih konstrukcija je njihova kompozitna struktura, sastavljena od blokova koji su razdvojeni sljubnicama, koje mogu i ne moraju biti ispunjene mortom. Sljubnice su glavni razlog nelinearnog i složenog ponašanja tih konstrukcija pa se dodatno otežava njihovo numeričko modeliranje. Upravo zbog tih problema razvijen je velik broj metoda i numeričkih modela za analizu zidanih konstrukcija, koje se razlikuju po razini složenosti i preciznosti rezultata. Metoda se bira ovisno o vrsti konstrukcije koja se analizira i dostupnim ulaznim podacima.

2.1. Numeričko modeliranje

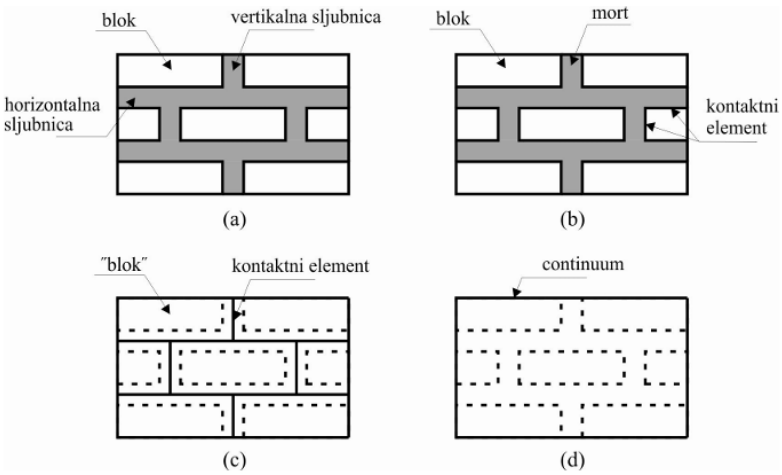
U numeričkom modeliranju zidanih konstrukcija koriste se dva glavna pristupa: idealizacija putem kontinuuma i diskontinuuma. Pristup koji se bazira na kontinuumu pretpostavlja da su naprezanja i deformacije unutar promatranog volumena opisane kontinuiranim funkcijama. Ponašanje materijala prikazano je konstituivnim zakonom, koji povezuje naprezanja i deformacije. Kombiniranjem tog zakona s jednadžbama ravnoteže dobiju se diferencijalne jednadžbe koje uz poštivanje rubnih uvjeta daju rješenje o naprezanjima i pomacima u konstrukciji. Analitička rješenja tih jednadžbi većinom nisu dostupna pa se one mogu riješiti približnim numeričkim metodama, od kojih je najčešće korištena metoda konačnih elemenata. Dok se pristup koji je temeljen na diskontinuumu prikazuje kao skup diskretnih elemenata koji se tijekom analize mogu razdvajati, slobodno kretati te ponovno stupiti u dinamičku interakciju. Tu se diskretni elementi većinom tretiraju kao kruta tijela, a numerička integracija njihovih jednadžbi gibanja kroz vrijeme se najčešće provodi eksplicitnim metodama. Takvi modeli pripadaju metodama diskretnih elemenata.

Bez obzira koji se model koristi, ovisno o razini jednostavnosti i točnosti analize razlikuju se: mikro modeliranje, pojednostavljeno mikro modeliranje i makro modeliranje (Slika 6.). [2]

- Detaljno mikro-modeliranje – taj pristup uključuje pojedinačno modeliranje i diskretizaciju bloka i morta pomoću konačnih elemenata, dok se njihova međusobna interakcija simulira kontaktima koji su definirani kontaktnim elementima.
- Pojednostavljeno mikro-modeliranje – u tom pristupu koristi se prošireni blok koji se modelira konačnim elementima, dok je interakcija između blokova i mortnih spojeva

opisana kontaktnim elementima. Najviše pažnje se posvećuje definiranju odgovarajućih fizičko – mehaničkih parametara idealiziranog materijala zida, koji uključuje svojstva blokova, morta u horizontalnim i vertikalnim spojevima te karakteristike veze između morta i zidnih elemenata.

- Makro – modeliranje – ta metoda idealizira zidni element kao homogeni anizotropni kontinuum u kojem su svojstva bloka i morta ravnomjerno raspoređena. Često se koristi za analizu seizmičkog ponašanja složenih konstrukcija kao što su povijesne građevine ili mostovi. Najveći nedostatak tog pristupa je nemogućnost preciznog simuliranja diskontinuiteta između blokova ili unutar dijelova zidane konstrukcije.



Slika 6. Stupnjevi modeliranja zidanih konstrukcija: a) elementi zidane konstrukcije, b) mikro modeliranje, c) pojednostavljeno mikro modeliranje, d) makro modeliranje

2.2. Metode za seizmičku analizu zidanih konstrukcija

Metode za seizmičku analizu zidanih konstrukcija dijele se na: linearne i nelinearne. Linearne metode uključuju pojednostavljenu ekvivalentnu statičku analizu i modalnu analizu, a nelinearne metode uključuju statičke metode postupnog guranja i metode odgovora u vremenu. Kod pojednostavljene ekvivalentne statičke analize potresno opterećenje se zamjenjuje ekvivalentnim statičkim opterećenjem na dva načina. U prvom načinu se pretpostavlja konstantno horizontalno ubrzanje konstrukcije te se zanemari da to ubrzanje traje kraće vrijeme tijekom potresa. Rezonantni efekti koji nastaju zbog elastičnih svojstava materijala se također ne uzimaju u obzir. Ta metoda se koristi za analizu stabilnosti povjesnih kamenih konstrukcija, lukova, gdje elastičnost materijala nema veliki utjecaj. U drugom načinu uvodi se raspodijeljeno opterećenje duž visine konstrukcije, ono raste od dna prema vrhu, na taj način se detaljnije uzima u obzir raspodjela horizontalnih sila koja je posljedica dinamičkog odgovora konstrukcije. Seizmička analiza pomoću modalne analize se provodi

metodom konačnih elemenata, kojom se izračunavaju vlastiti oblici i frekvencije. Statička metoda postupnog guranja se temelji na postepenom povećanju amplitude horizontalnih sila uz istovremeno praćenje odgovora konstrukcije.

2.3. Metoda konačnih i diskretnih elemenata

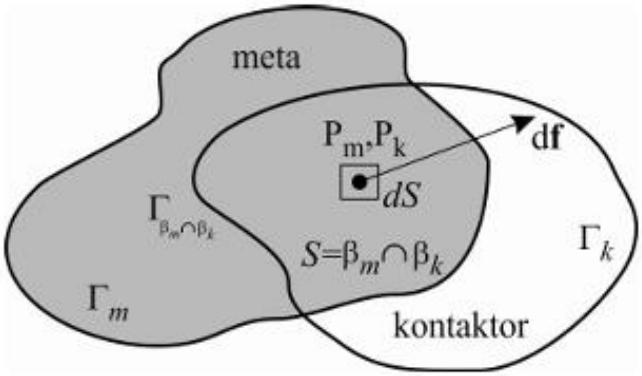
Metoda konačnih elemenata – To je najčešće korištena metoda i za proračun zidanih konstrukcija kao i konstrukcija općenito. Postoje razni numerički modeli kojima je baza bila metoda konačnih elemenata, a razlikuju se prema vrsti konačnih elemenata kojima je konstrukcija diskretizirana te prema ponašanju materijala koji može biti linearan ili nelinearan. Zbog svoje dugotrajne primjene se najčešće koristi kod zidanih konstrukcija. Makromodeliranje daje optimalnu ravnotežu između troškova proračuna i razine preciznosti. Numerički modeli koji su temeljeni na linearno elastičnom ponašanju materijala često su se koristili za analizu velikih zidanih objekata u slučaju kada zahtjevi proračuna nisu bili strogi. Zidane konstrukcije imaju vrlo nisku vlačnu čvrstoću te zbog tog razloga pokazuju nelinearno ponašanje i pri vrlo malim razinama opterećenja. Stoga se izbjegava linearna analiza u modeliranju zidanih konstrukcija jer može dovesti do netočnih rezultata i zaključaka. Ali, ako se analizira ponašanje konstrukcije po pojave prvih pukotina onda je njezina primjena opravdana. Primjenom nelinearne analize je moguće u potpunosti razumjeti ponašanje zidanih konstrukcija. Nelinearni makromodeli uzimaju u obzir različitu vlačnu i tlačnu čvrstoću te elastična i neelastična svojstva materijala duž osi. Takvi modeli tretiraju konstrukciju kao homogeni ortotropni kontinuum, njihovi parrametri se određuju ispitivanjem uzoraka velikih naprezanja pod homogenim stanjem naprezanja.

Metoda diskretnih elemenata - Cundall je začetnik te metode koji je razvio DEM koja je u početku bila osmišljena za simuliranje klizanja i razdvajanja stijenskih masa duž unaprijed definiranih pukotina odnosno diskontinuiteta. Glavna karakteristika metode diskretnih elemenata koja je omogućila njezinu primjenu u analizi zidanih konstrukcija je prikaz konstrukcije kao sustava odvojenih blokova koji su povezani kontaktnih elementima. Taj pristup omogućuje simulaciju urušavanja konstrukcije uslijed rotacije, klizanja duž sljubnica ili djelovanja udarnih opterećenja. Tijekom vremena su razvijeni razni numerički modeli koji su bazirani na metodi diskretnih elemenata. Ti se modeli razlikuju prema obliku diskretnih elemenata, metodama za izračunavanje kontaktnih sila, tehnikama prepoznavanja kontakata, načinima rješavanja jednadžbi gibanja kroz vrijeme i slično.

2.4. FEM/DEM metoda

Metoda konačno-diskretnih elemenata (FEM/DEM) je numerička metoda koja kombinira prednosti metode konačnih elemenata (FEM) i metode diskretnih elemenata (DEM). Ta metoda je razvijena za simulaciju procesa fragmentacije gdje se u obzir uzimaju deformabilni blokovi koji mogu pucati i koji omogućuju da se tijekom analize jedan blok podijeli na više njih. Unutar FEM/DEM metode blokovi su podijeljeni na mrežu trokutnih konačnih elemenata, između kojih se mogu postaviti kontaktni elementi koji omogućuju modeliranje materijalne nelinearnosti te pojave razvoja pukotina.

Zadatak algoritma za detekciju kontakta je identificirati sve elemente koji su potencijalno u međusobnom kontaktu, dok istovremeno eliminira one kojisu dovoljno udaljeni da kontakt nije moguć. Nakon identifikacije elemenata u kontaktu slijedi proračun kontaktnih sila, a to se ostvaruje pomoću algoritma za interakciju kontakta. Kontaktne sile pojavljuju se između dva diskretna elementa, jedan element se definira kao „kontaktor", drugi element se definira kao „meta". Kada se ta dva elementa nađu u kontaktu, dolazi do njihovog preklapanja preko površine S, koja je omeđena rubom Γ, kao što je prikazano za Slici 7. *[3]*



Slika 7. Kontaktna diferencijalna sila u okolini točaka P_m i P_k

Za proračun kontaktnih sila između kontaktora i mete uspostavljena su potencijalna polja φ_k i φ_m čiji intenzitet opada od središta elementa prema njihovim rubovima. Ako se promatra točka P_k na kontaktoru, prema teoriji potencijala diferencijalna sila kojom meta djeluje na diferencijalno malu površinu dS_k u okolici točke P_k zbog prodora kontaktora u metu se izračunava kao:

$$-\text{grad}\varphi_m(P_k)dS_k \tag{1}$$

Diferencijalna sila kojom kontaktor zbog prodora mete u kontaktor djeluje na diferencijalno malu površinu dS_m u okolici točke P_m na meti se izračunava kao:

$$-\text{grad}\varphi_k(P_m)dS_m \tag{2}$$

Prema zakonu akcije i reakcije, sila kojom točka P_m djeluje na točku P_k kao posljedica potencijala kontaktora, jednaka je:

$$\text{grad}\varphi_k(P_m)dS_m \tag{3}$$

Ukupna kontaktna diferencijalna sila na točku P_k koja se nalazi na kontaktoru može se izraziti uzimajući u obzir da je $dS_k=dS_m$:

$$df_k = [\text{grad}\varphi_k(P_m) - \text{grad}\varphi_m(P_k)]dS \tag{4}$$

Da bi se izračunala ukupna kontaktna sila koja djeluje na kontaktor integriramo prethodni izraz preko cijele preklapajuće površine S i dobijemo:

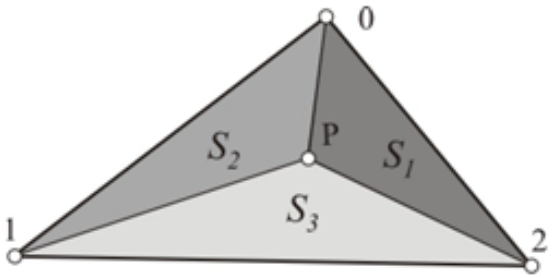
$$f_k = \int_{S=\beta m\cap\beta k}^{o}[\text{grad}\varphi_k - \text{grad}\varphi_m]dS \tag{5}$$

Iz prethodnog objašnjenja vidi se da polje kontaktnih sila koje opisuje prodor kontaktora u metu i mete u kontaktor predstavlja konzervativno polje. To je zato što su sile definirane kao gradijent potencijalne funkcije.

U kombiniranoj metodi konačnih i diskretnih elemenata postoji mogućnost da veliki broj diskretnih elemenata bude u međusobnom kontaktu te je on dodatno još podijeljen na više konačnih elemenata što omogućuje njihovo raspadanje tijekom analize. To znači da se problem određivanja kontaktnih sila mora rješavati na razini konačnih elemenata. Za to je odabran najjednostavniji konačni element u ravnini – trokutni tročvorni konačni element. Za takav tip konačnih elemenata, potencijal φ u točki P elementa može se definirati:

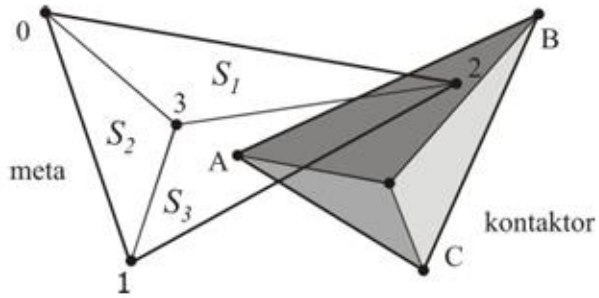
$$\varphi(P)=\min\{3S_1/S,\ 3S_2/S,\ 3S_3/S\} \tag{6}$$

gdje su S_1, S_2 i S_3 površine podtrokuta, a S ukupna površina trokutnog konačnog elementa, kako je prikazano na Slici 8. [3]



Slika 8. Potencijal φ u točki P konačnog elementa

Problem određivanja kontaktnih sila između dva trokutna konačna elementa može se svesti na interakciju kontaktora s bridovima mete i mete s bridovima kontaktora, kao što je prikazano na Slici 9. [3]



Slika 9. Kontakt trokuta kontaktora i mete i kontakt ruba kontaktora s metom

3. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE I DISKRETIZACIJA KULE

Provedena je seizmička analiza sjeverozapadne kule Dioklecijanove palače, kao što je opisano u uvodu rada. Osnovni materijal kojim se gradila kula je bijeli domaći vapnenac s otoka Brača. Karakteristike materijala prikazane su u Tablici 1.

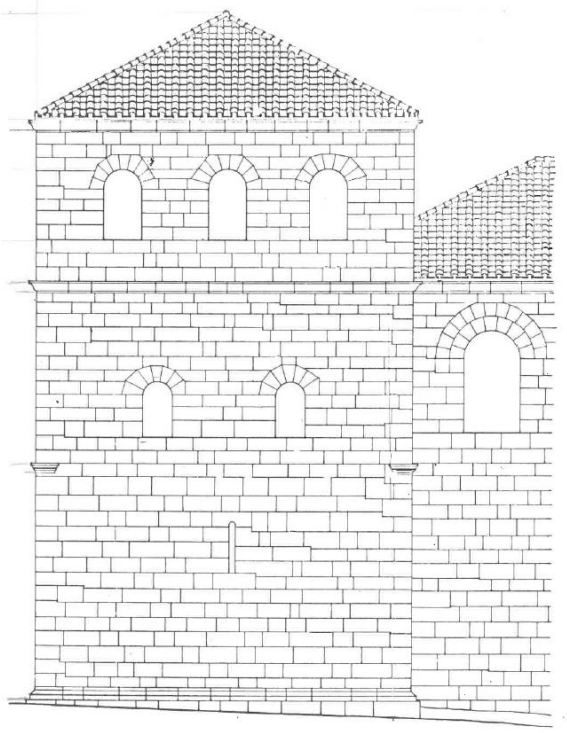
Modul elastičnosti	Gustoća	Statički koeficijent trenja	Dinamički koeficijent trenja	Koeficijent prigušenja
E (MPa)	ρ (kg/m^3)	μ_{st}	μ_{din}	$\bar{\mu}$
48400	2700	0.6	0.64	$4.5 \cdot 10^6$

Tablica 1. Mehaničke karakteristike kamena

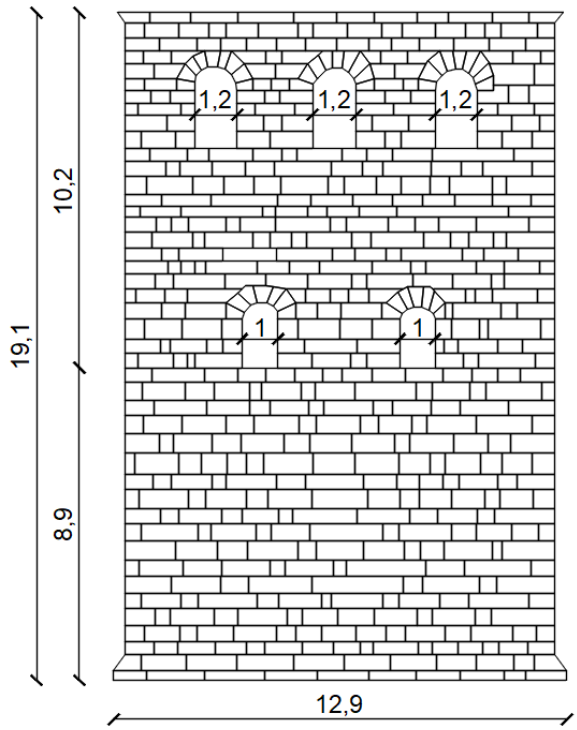
Diskretizacija kule mrežom trokutastih konačnih elemenata izrađena je korištenjem računalnog programa „Gmsh".

Neobjavljena studija iz 1982. godine autora Jerka Marasovića gdje je prikazano pretpostavljeno izvorno stanje kule je podloga po kojoj se računala analiza, kako je prikazano na Slici 10.

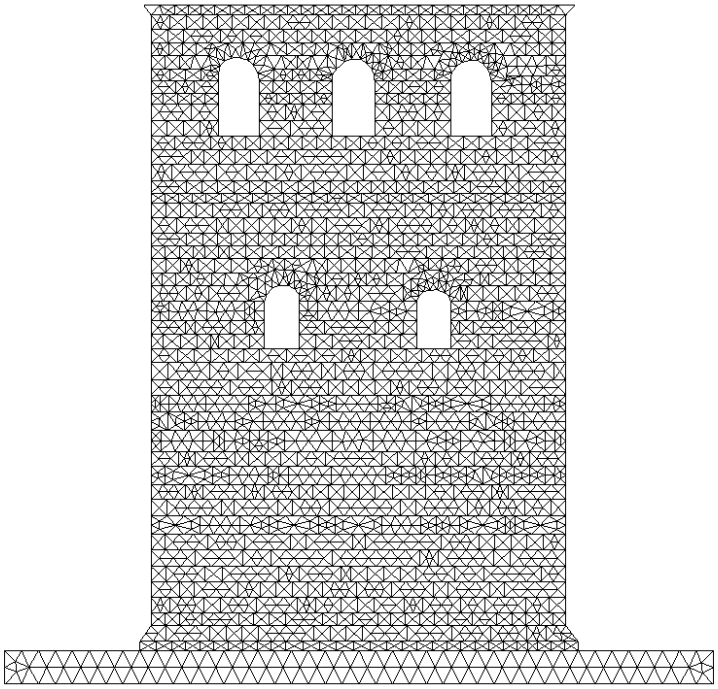
Tlocrtne dimenzije kule su 19,1 x 12,9 metara. Geometrija kula prikazana je na Slici 11.



Slika 10. Pretpostavljeno izvorno stanje kule



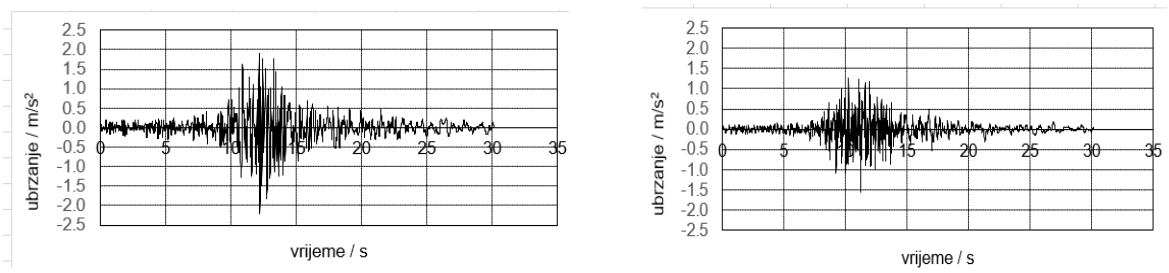
Slika 11. Geometrija kule



Slika 12. Diskretizacija modela mrežom konačnih elemenata

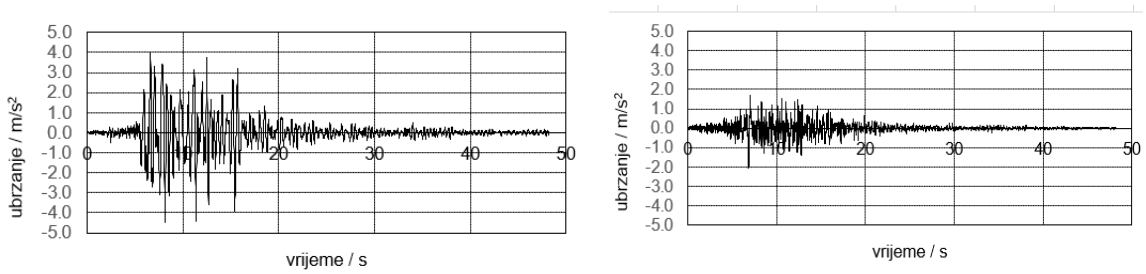
3.1. Seizmičko djelovanje

Za opterećenje konstrukcije izdvojena su tri seizmička zapisa, Campano Lucano (Slika 13.), Petrovac (Slika 14.) i South Iceland zapis (Slika 15.)



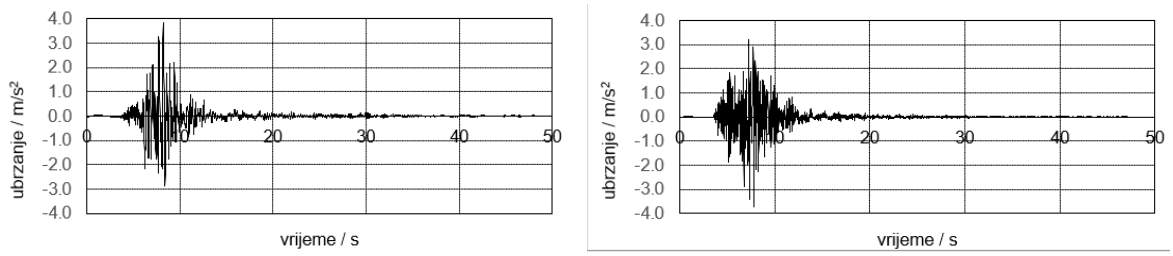
a) b)

Slika 13. Zapis ubrzanja potresa Campano Lucano, a) horizontalna i b) vertikalna komponenta



a) b)

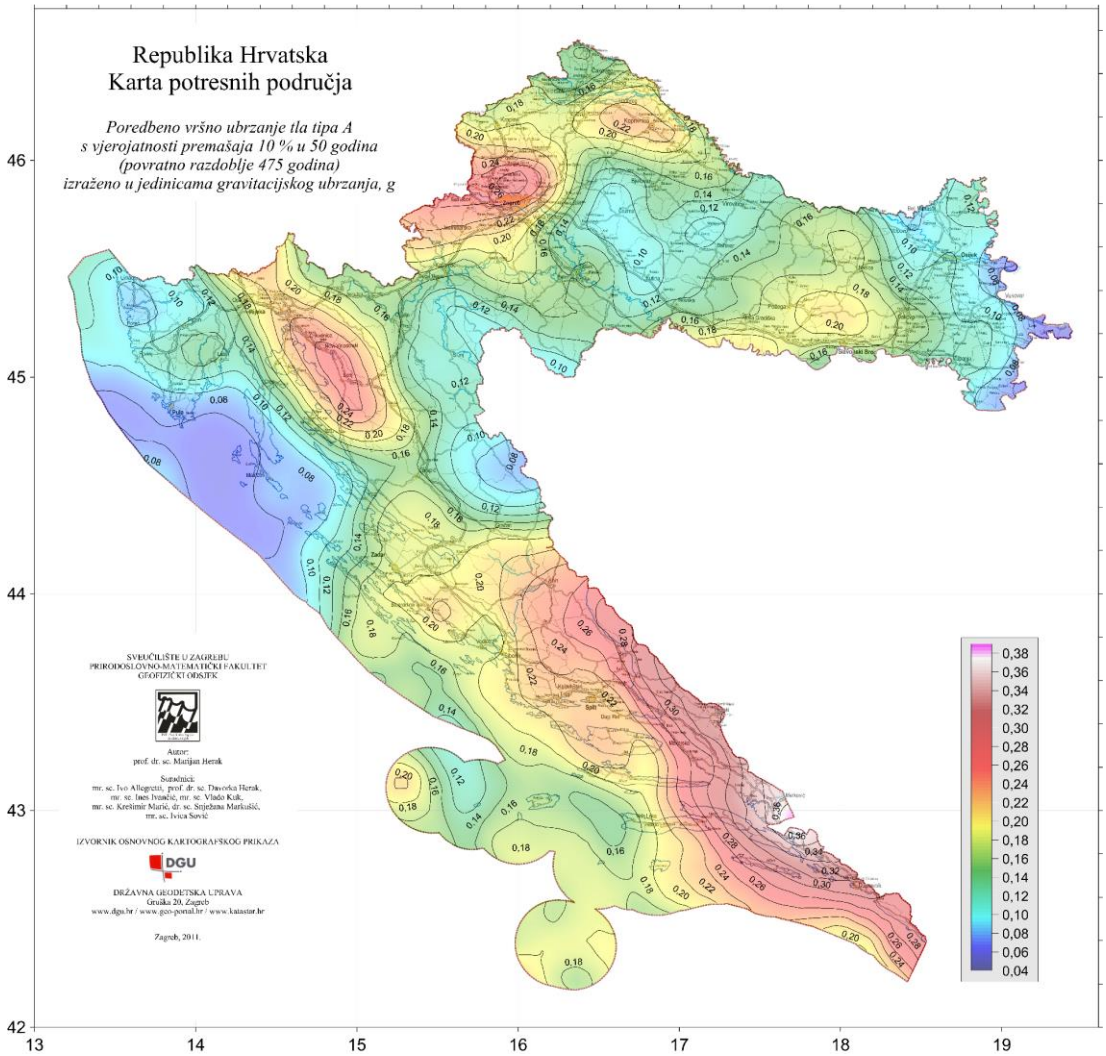
Slika 14. Zapis ubrzanja potresa Petrovac, a) horizontalna i b) vertikalna komponenta



a) b)

Slika 15. Zapis ubrzanja potresa South Iceland, a) horizontalna i b) vertikalna komponenta

Na Slici 16. prema karti potresnih područja Republike Hrvatske, lokacija promatrane konstrukcije nalazi se na području za koje se za povratni period od 475 godina predviđa maksimalno horizontalno ubrzanje veličine 0.22 g.

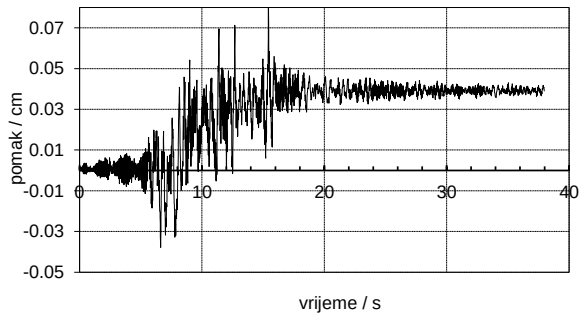


Slika 16. Karta potresnih područja za povratno razdoblje od 475 godina [4]

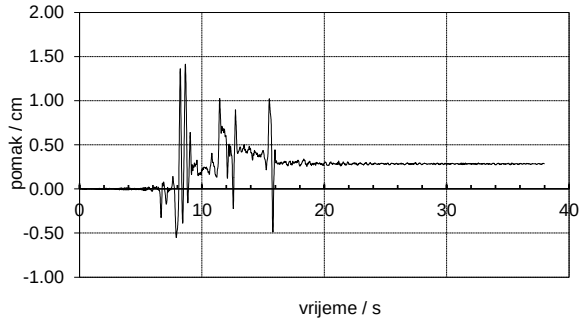
4. REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA

4.1. Rezultati analiza za potres Petrovac

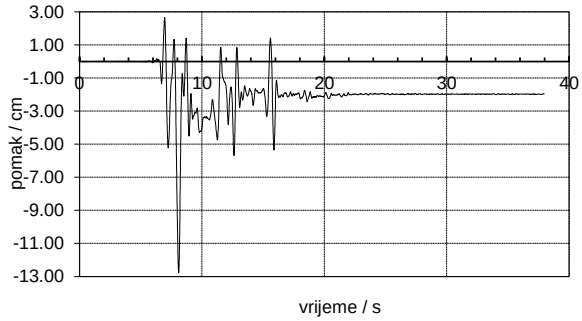
Na Slici 17. prikazuju se pomaci vrha konstrukcije u vremenu za različita vršna ubrzanja za potres Petrovac. Maksimalni pomaci se javljaju za vršno ubrzanje a_g = 2.0 g i iznose 37.3 cm. Pri tom ubrzanju konstrukcija se djelomično urušava te dolazi do značajnih oštećenja.



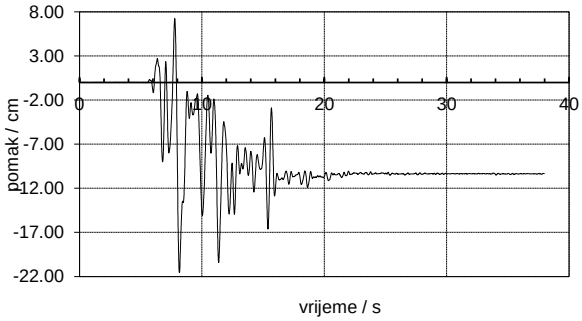
a) vršno ubrzanje 0.22 g



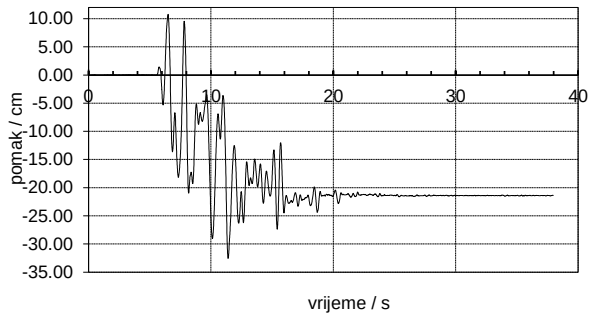
b) vršno ubrzanje 0.35 g



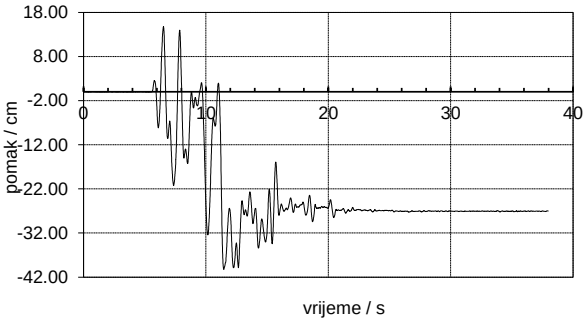
c) vršno ubrzanje 0.5 g



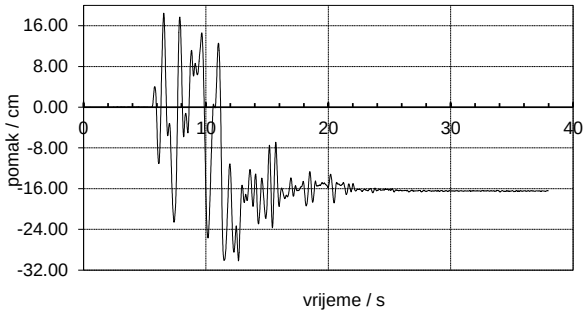
d) vršno ubrzanje 0.75 g

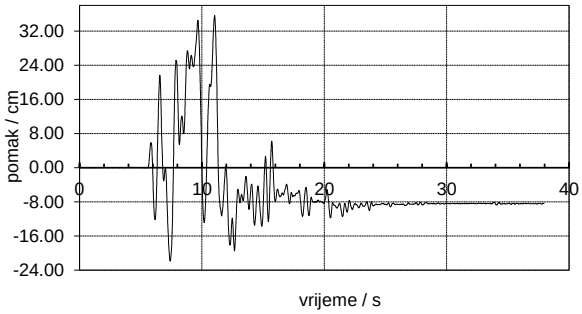


e) vršno ubrzanje 1.0 g

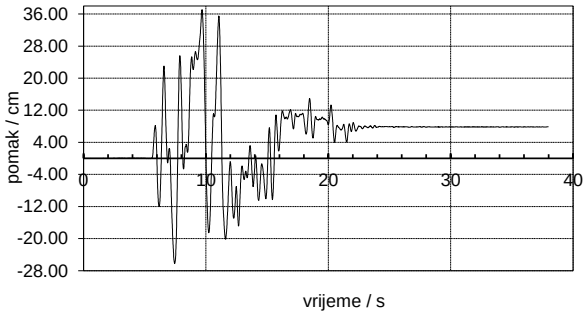


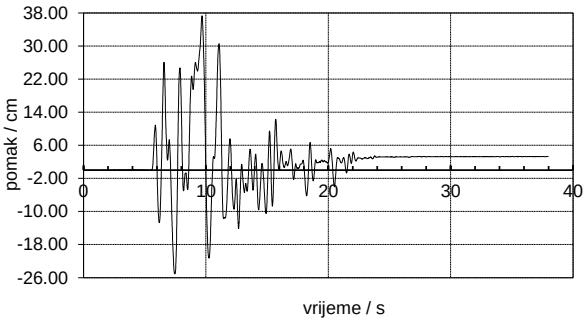
f) vršno ubrzanje 1.2 g





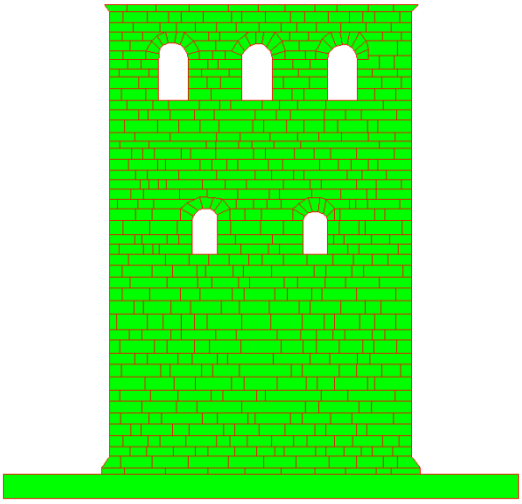
g) vršno ubrzanje 1.4 g *h) vršno ubrzanje 1.6 g*





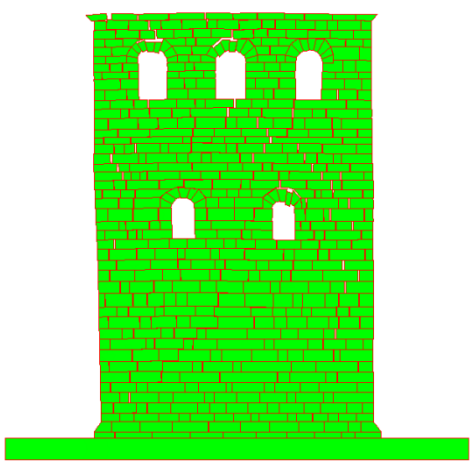
i) vršno ubrzanje 1.8 g *j) vršno ubrzanje 2.0 g*

Slika 17. Zapisi pomaka vrha konstrukcije uslijed djelovanja različitih vršnih ubrzanja tla

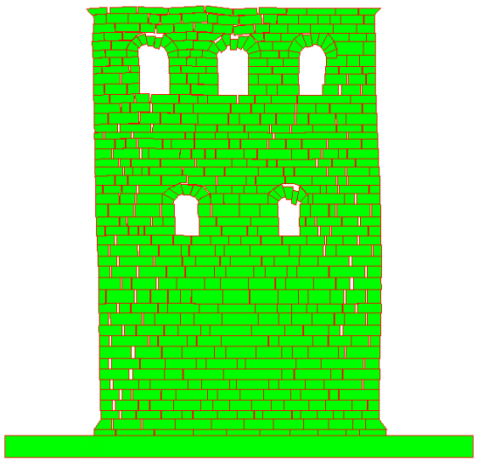


Slika 18. Prikaz deformiranja konstrukcije pri vršnom ubrzanju tla 0.22 g

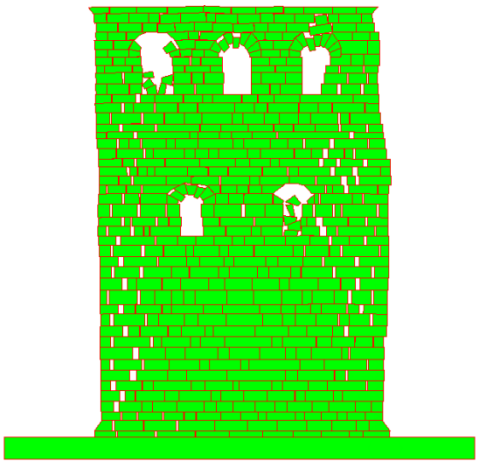
Kod vršnog ubrzanja za a_g = 0.22 g pomaci su vrlo mali i iznose 0.09 cm. Nisu vidljive deformacije kao ni značajni pomaci konstrukcije. Konstrukcija ima značajnu seizmičku otpornost.



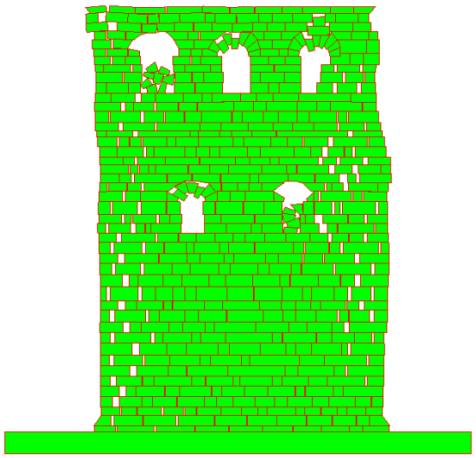
a) t= 11.3 s



b) t = 13.8 s



c) t= 29.55 s



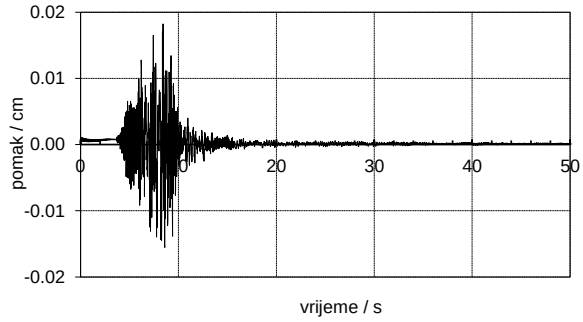
d) t= 48.2 s

Slika 19. Prikaz deformiranja konstrukcije pri vršnom ubrzanju tla 2.0 g

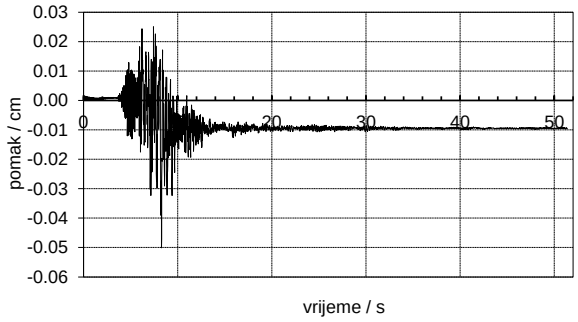
Na Slici 19. se prikazuje deformiranje konstrukcije pri vršnom ubrzanju tla 2.0 g. Prve pukotine se pojavljuju poviše lukova u gornjem dijelu konstrukcije. Povećanjem vremena postepeno se urušava desni donji svod kao i cijela desna strana konstrukcije.

4.2. Rezultati analiza za potres South Island

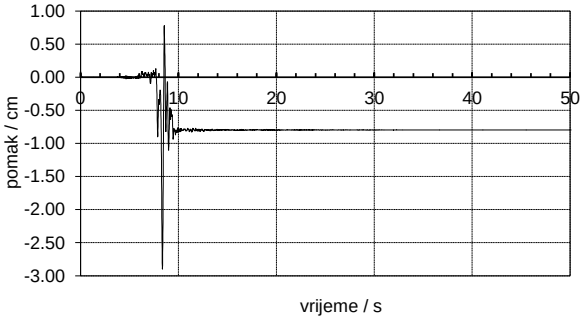
Na Slici 20. prikazuju se pomaci vrha konstrukcije u vremenu za različita vršna ubrzanja za potres South Island. Maksimalni pomaci se javljaju za vršno ubrzanje a_g = 3.0 g i iznose 12.6 cm. Pri tom ubrzanju konstrukcija je stabilna s minimalnim oštećenjima.



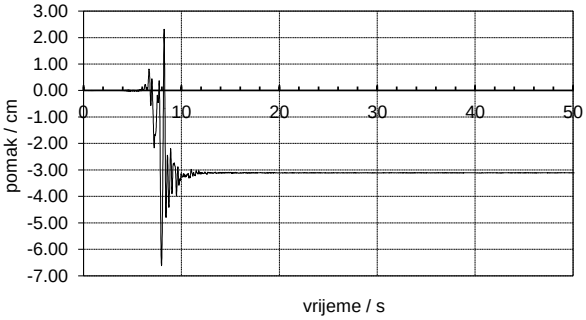
a) vršno ubrzanje 0.22 g



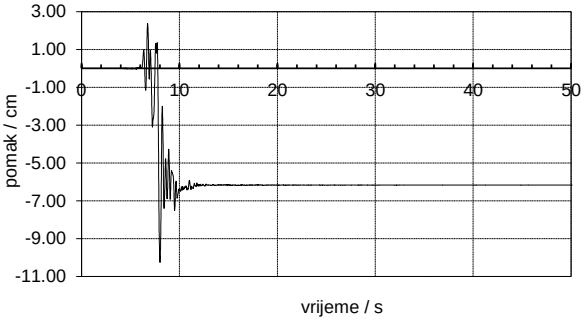
b) vršno ubrzanje 0.5 g



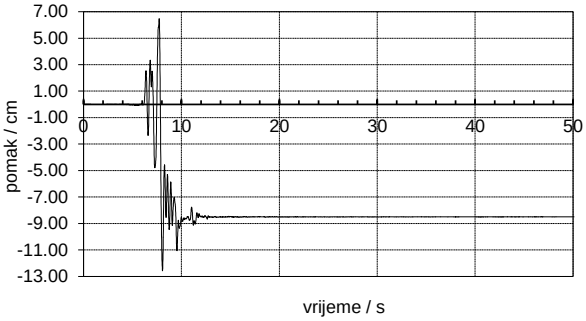
c) vršno ubrzanje 1.0 g



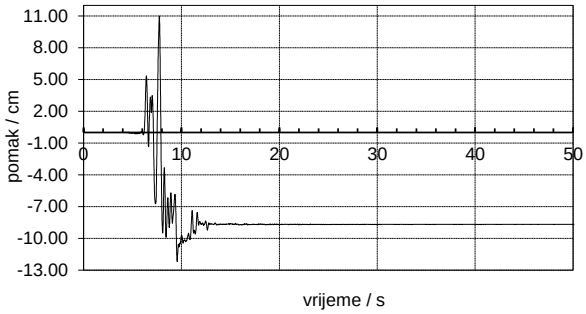
d) vršno ubrzanje 1.5 g



e) vršno ubrzanje 2.0 g

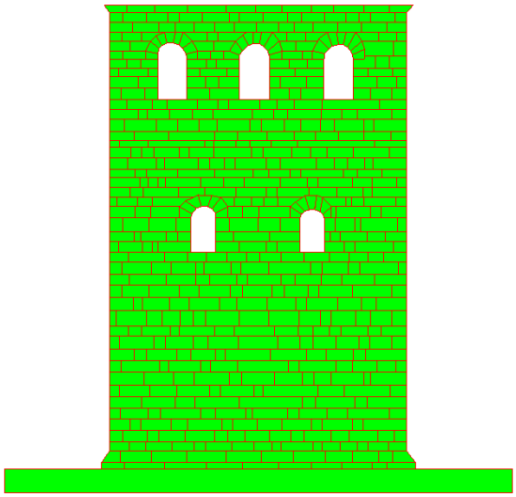


f) vršno ubrzanje 2.5 g



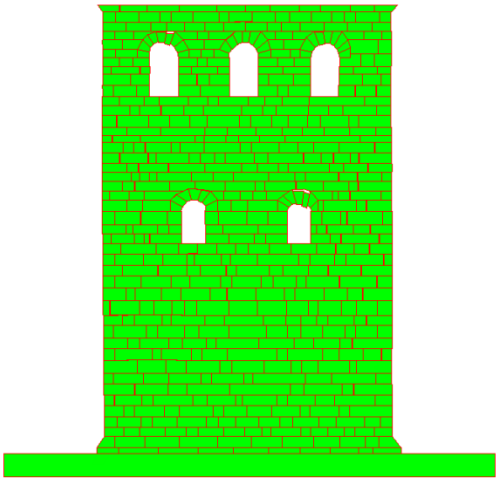
g) vršno ubrzanje 3.0 g

Slika 20. Zapisi pomaka vrha konstrukcije uslijed djelovanja različitih vršnih ubrzanja tla

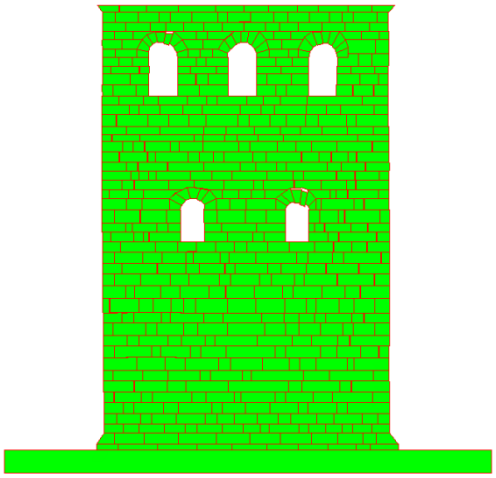


Slika 21. Prikaz deformiranja konstrukcije pri vršnom ubrzanju tla 0.22 g

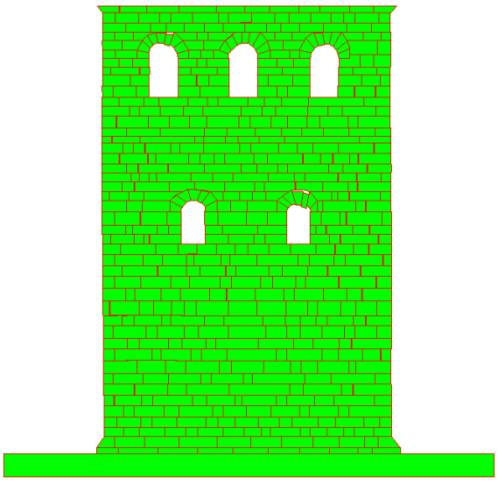
Kod vršnog ubrzanja za a_g = 0.22 g pomaci su vrlo mali i iznose 0.02 cm. Nisu vidljive deformacije kao ni pomaci konstrukcije. Konstrukcija ima značajnu seizmičku otpornost.



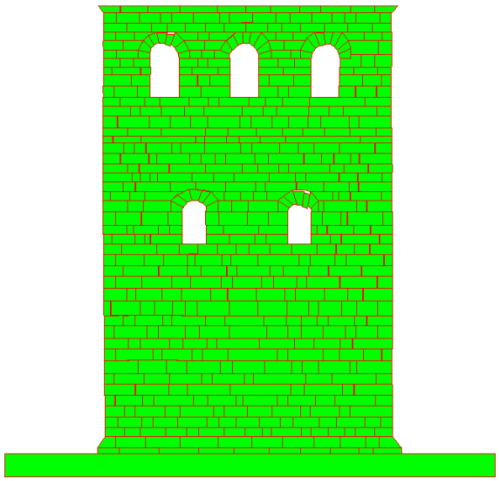
a) t= 14.25 s



b) t= 28.7 s



c) t= 44.5 s



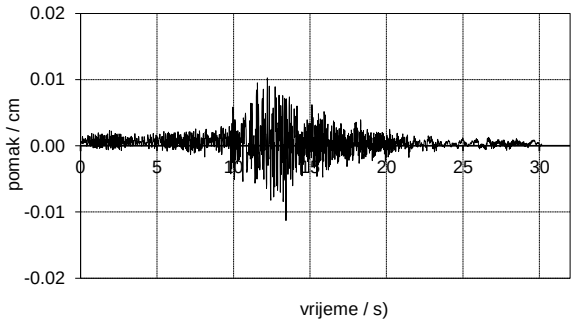
d) t= 48.6 s

Slika 22. Prikaz deformiranja konstrukcije pri vršnom ubrzanju tla 3.0 g

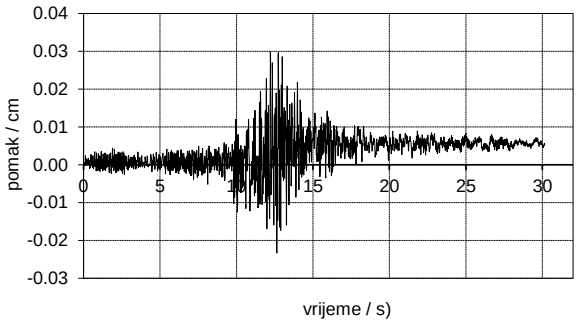
Na Slici 22. se prikazuje deformiranje konstrukcije pri vršnom ubrzanju tla 3.0 g. Uočavaju se zanemarive deformacije između blokova i poviše lukova. Konstrukcija ima značajnu seizmičku otpornost.

4.3. Rezultati analiza za potres Campano Lucano

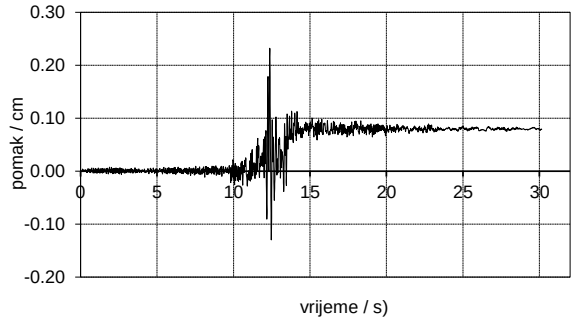
Na Slici 23. prikazuju se pomaci vrha konstrukcije u vremenu za različita vršna ubrzanja za potres Campano Lucano. Maksimalni pomaci se javljaju za vršno ubrzanje a_g = 3.0 g i iznose 3.6 cm. Pri tom ubrzanju ne dolazi do gubitka stabilnosti konstrukcije.



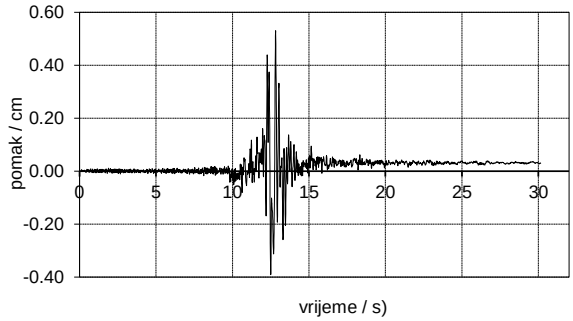
a) vršno ubrzanje 0.22 g



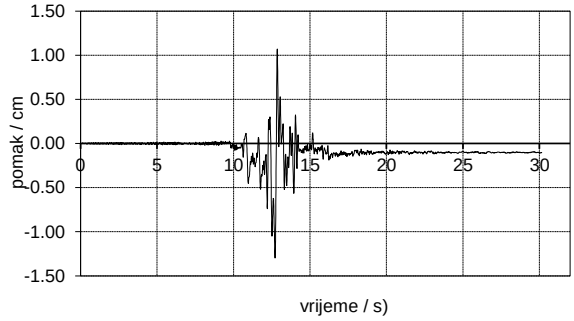
b) vršno ubrzanje 0.5 g



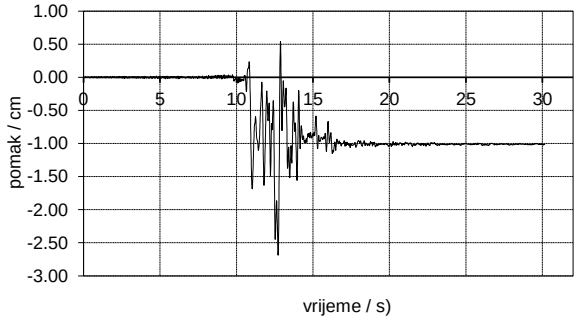
c) vršno ubrzanje 1.0 g



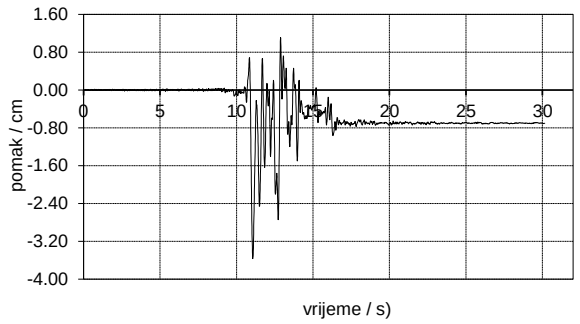
d) vršno ubrzanje 1.5 g



e) vršno ubrzanje 2.0 g

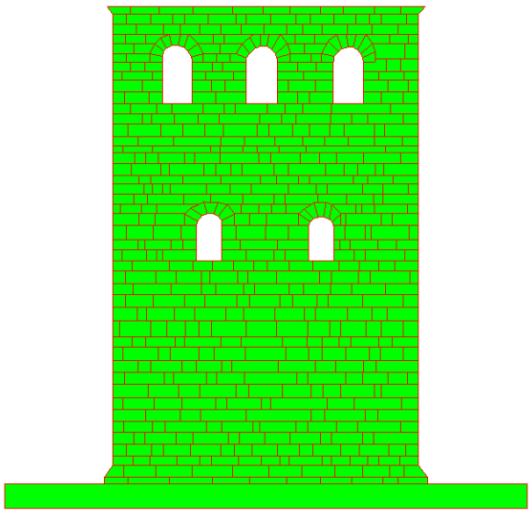


f) vršno ubrzanje 2.5 g



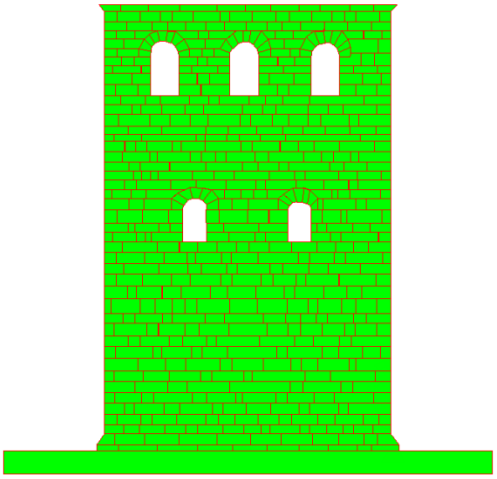
g) vršno ubrzanje 3.0 g

Slika 23. Zapisi pomaka vrha konstrukcije uslijed djelovanja različitih vršnih ubrzanja tla

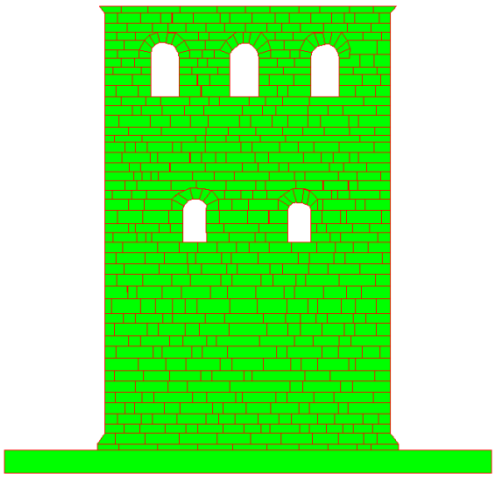


Slika 24. Prikaz deformiranja konstrukcije pri vršnom ubrzanju tla 0.22 g

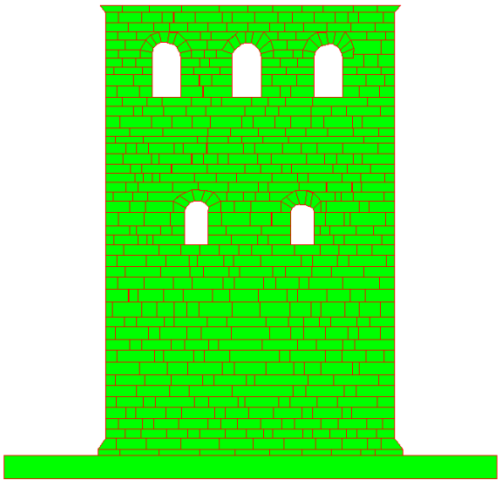
Kod vršnog ubrzanja za a_g = 0.22 g pomaci su vrlo mali i iznose 0.01 cm.. Nisu vidljive deformacije ni pomaci konstrukcije. Konstrukcija ima značajnu seizmičku otpornost.



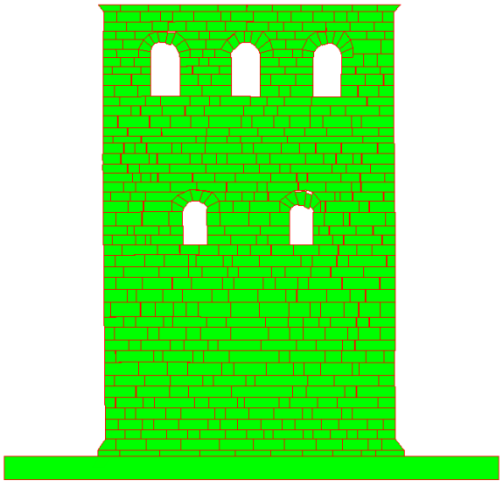
a) t= 12.1 s



b) t= 18.0 s



c) t= 25.4 s



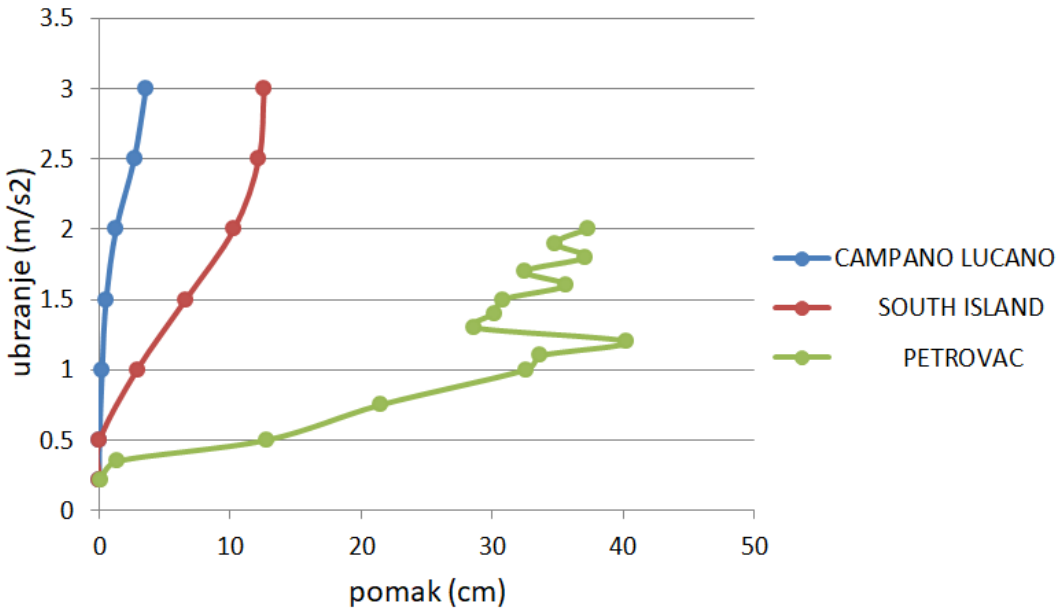
d) t= 38.4 s

Slika 25. Prikaz deformiranja konstrukcije pri vršnom ubrzanju tla 3.0 g

Na Slici 25. se prikazuje deformiranje konstrukcije pri vršnom ubrzanju tla 3.0 g. Primjećuje se sitno razdvajanje između blokova i poviše lukova, deformacije su sveukupno male. Konstrukcija ima značajnu seizmičku otpornost.

5. SINTEZA I USPOREDBA REZULTATA

Nakon provedenih numeričkih proračuna konstrukcije pod seizmičkim djelovanjima i analize graničnih stanja, napravljena je detaljna analiza dobivenih rezultata. Analiza se provela za sva tri potresa istovremeno te će se usporediti njihov utjecaj na promatranu konstrukciju.



Slika 26. Grafički prikaz pomak – ubrzanje uslijed djelovanja različitih potresa

PETROVAC		SOUTH ISLAND		CAMPANO LUCANO	
ubrzanje (g)	pomak (cm)	ubrzanje (g)	pomak (cm)	ubrzanje (g)	pomak (cm)
0.22	0.09	0.22	0.02	0.22	0.01
0.35	1.4	0.5	0.05	0.5	0.03
0.5	12.8	1	2.9	1	0.2
0.75	21.5	1.5	6.6	1.5	0.5
1	32.6	2	10.3	2	1.3
1.1	33.7	2.5	12.2	2.5	2.7
1.2	40.3	3	12.6	3	3.6
1.3	28.6				
1.4	30.2				
1.5	30.8				
1.6	35.6				
1.7	32.5				
1.8	37.1				
1.9	34.8				
2	37.3				

Tablica 2. Prikaz pomak–ubrzanje uslijed djelovanja različitih potresa

Može se primjetiti da su pomaci za potrese Campano Lucano i South Island vrlo mali. Kod Campano Lucano maksimalni pomak je 3.6 cm, a kod South Island 12.6 cm. Prvi dio grafa za potres Petrovac je skoro linearan, do pomaka od otprilike 40 cm, a maksimalni pomak je 40.3 cm. Najveći pomaci sjeverozapadne kule su nastali uslijed djelovanja potresa Petrovac gdje je najveće ubrzanje prije sloma a_g= 2.0 g, pri čemu se ostvari pomak od 37.3 cm. Za ostala dva potresa konstrukcija može podnijeti vrlo velika vršna ubrzanja.

Rezultati seizmičke analize pokazuju da se konstrukcija najmanje može oduprijeti potresu Petrovac, za razlika od ostala dva potresa te se zbog toga Petrovac smatra najrelevantnijim za analizu sjeverozapadne kule.

6. ZAKLJUČAK

Diplomskim radom analizirala se seizmička otpornost sjeverozapadne kule Dioklecijanove palače primjenom kombinirane metode konačno-diskretnih elemenata. Konstrukcija se nalazi u Splitu gdje je vršno ubrzanje a_g= 0.22 g za povratni period od 475 godina. Referentni potresi koji su korišteni u analizi su Campano Lucano, Petrovac te South Island. Za vršno ubrzanje od 0.22 g konstrukcija nije pretrpjela primjetna oštećenja, ima značajnu seizmičku otpornost.

Uspoređujući numeričke rezultate uočava se da je Petrovac najnepovoljniji potres, pokazuje najveće pomake pri manjih vršnih ubzanjima za razliku od ostala dva potresa te je taj potres najmjerodavniji za analizu same konstrukcije. South Island i Campano Lucano za ista vršna ubrzanja pokazuju dosta manje pomake, oštećenja su minimalna te ne dolazi do gubitka nosivosti.

Rezultati analize u ovom radu pokazali su prikladnost korištene metode za ponašanje povijesnih zidanih konstrukcija izloženih seizmičkom opterećenju. Detaljno se prati razvoj i širenje pukotina sve do rušenja konstrukcije.

7. LITERATURA

[1] J. Marasović. Sjeverozapadn kula Dioklecijanove palače, neobjavljena studija 1982.

[2] Smoljanović H., Seizmička analiza zidanih konstrukcija metodom konačno-diskretnih elemenata, Disertacija, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, 2013.

[3] Munjiza A., The combined finite-discrete element method, John Wiley & Sons, 2004.

[4] http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php