

Seizmička analiza zvonika Katedrale svetog Dujma kombiniranom metodom konačno-diskretnih elemenata

Krolo, Kristina

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:123:697183>

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

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



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

Kristina Krolo

Split, 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Kristina Krolo

**Seizmička analiza zvonika Katedrale svetog Dujma
kombiniranom metodom konačno – diskretnih
elemenata**

Diplomski rad

Split, 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ GRAĐEVINARSTVO

KANDIDAT: Kristina Krolo

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083215245

KATEDRA: Katedra za teoriju konstrukcija

PREDMET: Osnove simulacijskog inženjerstva

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema:

Seizmička analiza zvonika Katedrale svetog Dujma kombiniranom metodom konačno – diskretnih elemenata

Opis zadatka:

Primjenom kombinirane metode konačno – diskretnih elemenata, na osnovu zadanog nacrtu zapadnog pročelja zvonika Katedrale Sv. Dujme provesti numeričku analizu konstrukcije izložene seizmičkom opterećenju. Kao ulazni podatak koristiti zapise horizontalnih i vertikalnih ubrzanjima tri realna potresa (Petrovac, Campano Lucano i South Iceland). Provesti inkrementalnu dinamičku analizu do potpunog sloma konstrukcije. Dobivene rezultate potrebno je analizirati i donijeti zaključak o ponašanju i nosivosti konstrukcije izložene seizmičkom opterećenju.

U Splitu, ožujak 2024.

Mentor:
Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Smoljanović
Komentor:
Izv. prof. dr. sc. Nikolina Živaljić

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Izv. prof. dr. sc. Ivan Balić

Seizmička analiza zvonika Katedrale svetog Dujma kombiniranom metodom konačno – diskretnih elemenata

Sažetak:

Diplomskim radom prikazana je seizmička analiza zvonika katedrale svetog Dujma koristeći kombiniranu metodu konačno – diskretnih elemenata. Konstrukcija diskretizirana na konačne elemente analizira se koristeći računalni program „Y-2D“. Kao potresno opterećenje korišteni su zapisi izmjenjenih oscilacija tla za tri potresa: Petrovac, Campano Lucano i South Iceland. Rezultati proračuna prikazani su dijagramom pomaka konstrukcije u vremenu i vizualnim prikazom širenja pukotina za svaki vremenski korak. Dobiveni rezultati omogućuju nam procjenu i usporedbu ponašanja konstrukcije za svako pojedino potresno opterećenje.

Ključne riječi:

Seizmički proračun, kombinirana metoda konačno – diskretnih elemenata, zidane konstrukcije, potres, vršno ubrzanje tla, pomak, pukotina, slom

Seismic analysis of the bell tower of Saint Dominus Cathedral using the combined finite – discrete element method

Abstract:

The thesis presents the seismic analysis of the bell tower of Saint Domnius Cathedral using the combined finite – discrete element method. The structure discretized to finite elements is analyzed using the „Y-2D“ computer program. Records of measured ground oscillations for three earthquakes were used as the seismic load: Petrovac, Campano Lucano and South Iceland. Results are presented with a diagram of the structure's displacement over time and a visual display of crack propagation for each time step. The obtained results allow us to evaluate and compare the behavior of the structure for each individual seismic load.

Keywords:

Seismic calculation, combined finite – discrete element method, masonry structures, earthquake, peak ground acceleration, displacement, crack, collapse

Sadržaj

1. UVOD	6
2. POTRES	8
2.1. Uzroci potresa i potresna djelovanja	8
2.2. Potresne zone.....	9
2.3. Referentni potresi	11
3. METODA PRORAČUNA	12
4. PRIMJENA FEM/DEM METODE	13
4.1. Geometrijske karakteristike i diskretizacije modela	13
4.1.1. Diskretizacija zvonika na diskretne elemente	14
4.1.2. Diskretizacija diskretnih elemenata mrežom konačnih elemenata	15
4.2. Svojstva materijala	16
4.3. Potresna djelovanja na konstrukciju.....	17
5. REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA.....	18
5.1. Rezultati analiza za potres Campano Lucano	18
5.1.1. Zapisi pomaka vrha konstrukcije	18
5.1.2. Prikaz nastanka i širenja pukotina.....	20
5.2. Rezultati analiza za potres Petrovac	24
5.2.1. Zapisi pomaka vrha konstrukcije	24
5.2.2. Prikaz nastanka i širenja pukotina.....	26
5.3. Rezultati analiza za potres South Iceland.....	30
5.3.1. Zapisi pomaka vrha konstrukcije	30
5.3.2. Prikaz nastanka i širenja pukotina.....	32
6. ANALIZA NUMERIČKIH REZULTATA	36
7. ZAKLJUČAK	39
8. LITERATURA.....	40

1. UVOD

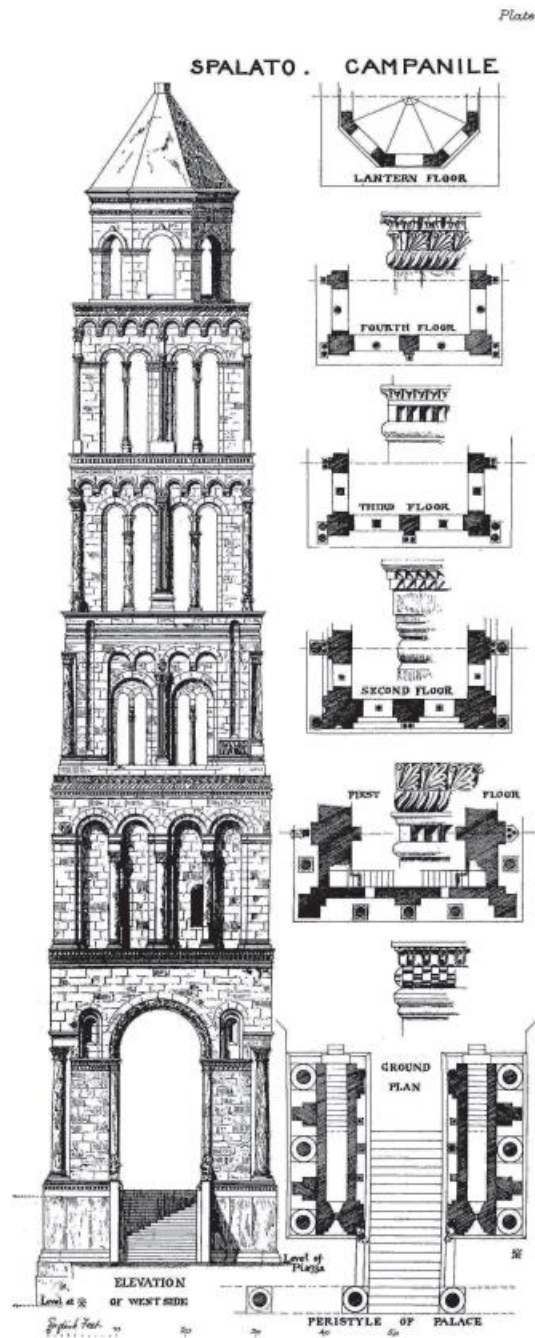
Seizmički proračun konstrukcija interdisciplinaran je proces ključan za stabilnost i sigurnost građevina u seizmički aktivnim područjima, a temelji se na razumijevanju ponašanja građevinskih materijala i konstrukcija pod dinamičkim opterećenjem koje nastaje uslijed potresa. Potresno djelovanje predstavlja dinamičke sile koje su izazvane brzim oslobađanjem energije u Zemljinoj kori, a koje mogu uzrokovati značajne pomake i deformacije, ali i oštećenja u vidu pukotina, lomova pa čak i kolapsa konstrukcije.

Postoji nekoliko metoda seizmičke analize koje ovisno o zahtjevima projekta i dostupnim resursima mogu biti jednostavne ili složene, poput linearne i nelinearne statičke analize, linearne i nelinearne dinamičke analize, te probabilističke analize. Kombinirana metoda konačno – diskretnih elemenata koju je razvio dr.sc. Munjiza, a kojom se koristimo u ovom radu, omogućuje nam simulaciju kontinuiranih medija poput zidanih konstrukcija, te razmatranje pojave pukotina, lomova i urušavanja.

Zidane konstrukcije jedna su od najstarijih metoda gradnje, a njihova primjena datira još iz antičkih vremena. Najčešće korišten materijal bio je kamen, poput vapnenca i mramora, zbog njihove trajnosti i estetskih kvaliteta. Blokovi su se međusobno povezivali mortom, odnosno mješavinom prijesna, vode i vezivnog materijala poput gline ili vapna.

Predmetna građevina ovog diplomskog rada je zvonik katedrale svetog Dujma, sa fokusom na zapadno pročelje. Izgradnja zvonika započinje u 13. stoljeću i traje čak do 16. stoljeća. Za gradnju je korišten bijeli vapnenac iz kamenoloma na otoku Braču, a koji se dijelom priskrbljivao upravo iz Dioklecijanove palače. Upravo se zbog korištenja trošne antičke građe i elementarnih nepogoda poput udara groma, zvonik u više navrata popravljao. Posebno je značajna radikalna obnova krajem 19. stoljeća, od 1890. do 1908., u izvedbi splitskog graditelja Andrije Perišića, a prema projektima bečkog arhitekta Aloisa Hausera. Prva dva kata obnovljena su zamjenom trošnih kamenih blokova, dok su se gornji katovi sasvim uklonili te podignuli novi.

Zvonik je sagrađen uz stupove iznad pristupnog stubišta katedrale, oblikujući nadsvođeni prolaz, sve u formi svečanog slavluka, danas mu visina doseže 57 metara i ima ukupno šest katova. Svi su katovi pravokutnog oblika, osim šestog koji ima oktogonalni oblik i nad njim je krov u obliku višestranične piramide. Unatoč dugom periodu gradnje i sudjelovanju brojnih graditelja, nastojala se održati skladnost pa je zvonik u cijelosti u duhu romaničkog stila.



Slika 1 / Zapadno pročelje zvonika prije restauracije (preuzeto iz T. G. Jackson, *Dalmatia, the Quarnero and Istria, Vol II*, Oxford 1887.)

Diplomskim radom prikazan je postupak seizmičkog proračuna zapadnog pročelja zvonika katedrale Svetog Dujma. Rezultati proračuna prikazani su dijagramom pomaka konstrukcije u vremenu i vizualnim prikazom širenja pukotina za svaki vremenski korak. Referenca za simulaciju potresnog djelovanja su zapisi realnih potresa koji su se dogodili u povijesti: Petrovac (Crna Gora, 1979.), South Iceland (Island, 1980.) i Campano Lucano (Italija, 2000.).

2. POTRES

2.1. Uzroci potresa i potresna djelovanja

Potresi predstavljaju kretanje tla koje se javlja zbog iznenadnog pomaka u zemljinoj kori ili u gornjem dijelu zemljinog plašta pri čemu se oslobađa elastična energija koja uzrokuje seizmičke valove koji se šire na sve strane. Prema uzroku nastanka potrese dijelimo na tektonske, vulkanske, potrese kao posljedica rušenja većih otvora u stijenskoj masi, potrese kao posljedica punjenja i pražnjenja akumulacija uz visoke brane te umjetno izazvane potrese.

Potresni valovi elastični su poremećaji koji se rasprostiru iz izvora kao rezultat kratkotrajnog procesa izjednačavanja neravnoteže napetosti u stijenama, i prenose kinetičku energiju oslobođenu u žarištu potresa (hipocentru) prema vani. Razlikujemo prostorne (P-longitudinalne i S-transverzalne) i površinske (Love-ove i Rayleigh-ove) valove.

Magnituda potresa M je mjera energije oslobođene u žarištu potresa koja se dalje predaje u obliku seizmičkih valova, definirao ju je Richter 1935. g. Jednaka je logaritmu sa bazom 10 maksimalne amplitude seizmičkih valova mjerenih na standardnom seizmografu na udaljenosti 100 km od hipocentra. Važno je napomenuti da potresi iste magnitude nemaju jednak učinak već posljedice djelovanja potresa ovise o lokalnim uvjetima.

Potres se može opisati i pomoću intenziteta koji opisuje utjecaj potresa na ljude, okoliš i građevine. Efekti potresa na površini Zemlje, za istu magnitudu, ovise o lokalnim uvjetima tla, kvaliteti građevina, dubini žarišta, udaljenosti od epicentra potresa, trajanju potresa, frekventnom sadržaju zapisa potresa. Intenzitet za jedan potres opada s udaljenošću od epicentra.

Opisne skale intenziteta potresa, odnosno makroseizmičke skale, efekte koji odgovaraju jednakim ubrzanjima tla svrstavaju u stupnjeve intenziteta trešnje tla. Skup srodnih učinaka predstavlja jedan stupanj makroseizmičkog intenziteta. Razlikujemo MSC, MM, MSK i EMS ljestvice. Sve navedene imaju 12 stupnjeva intenziteta, od neosjetnog, jedva osjetnog preko štetnog i jako štetnog, pa sve do vrlo razornog i pustošnog.

Potresno djelovanje možemo prikazati pomoću:

- elastičnog spektra odziva,
- vremenskog zapisa ubrzanja, brzina i pomaka,
- umjetnim akcelelogramima.

Elastični spektar odziva grafički nam prikazuje maksimalne odzive (pomake, brzine ili ubrzanja), konstrukcije izložene potresnom djelovanju Inženjerski ima veliku važnost jer nam pri projektiranju konstrukcija omogućuje predvidjeti kako će različiti dijelovi konstrukcije reagirati

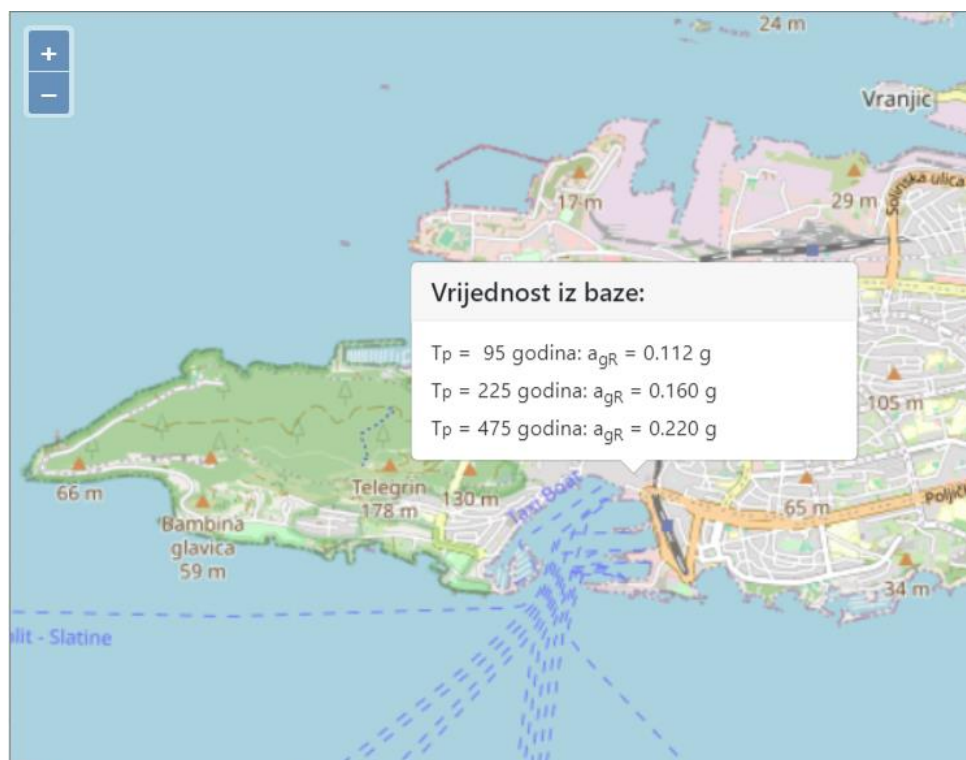
na potresne sile. Razlikuje se prema potresnim zonama i modificira se prema razredu tla promatranog područja.

Vremenski zapis ubrzanja, brzina i pomaka dobijemo pomoću akcelelograma koji mjere oscilacije tla u blizini epicentra potresa. Bilježe vibracije velikih amplituda, odnosno velikih ubrzanja za vertikalnu i horizontalnu komponentu. Dobiveni zapis, akcelelogram, predstavlja ubrzanje u vremenu, i osnova je pomoću koje integracijom dobijemo zapise brzina i pomaka u vremenu.

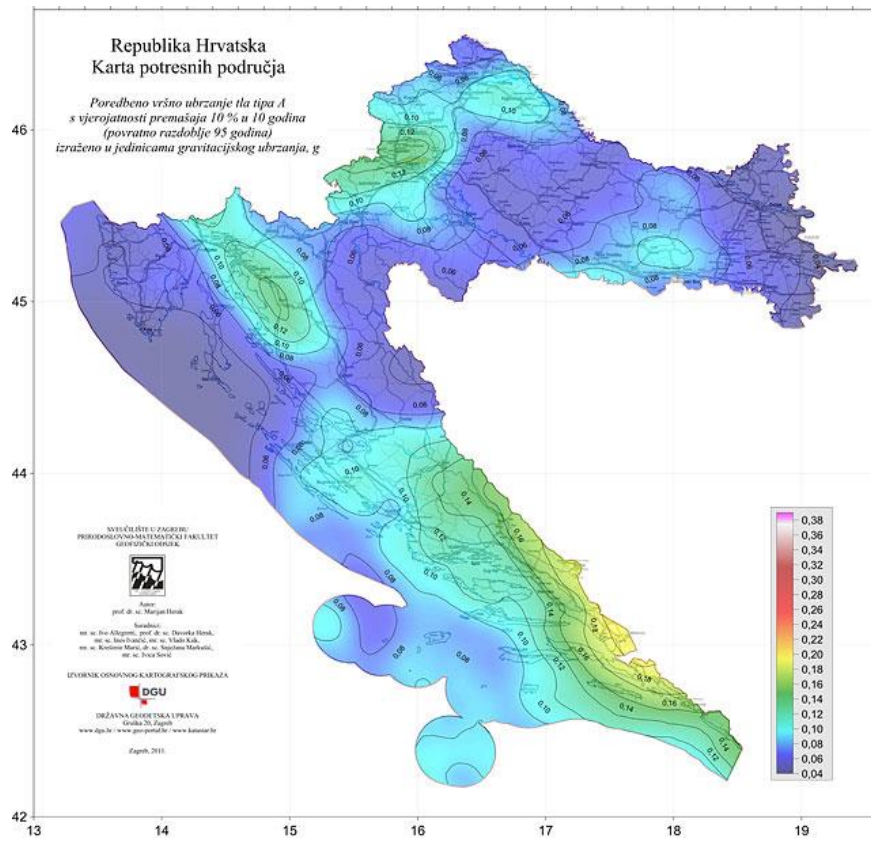
2.2. Potresne zone

Potresne zone geografska su područja sa većom vjerojatnošću seizmičke aktivnosti zbog svojih geoloških i tektonskih karakteristika. Identificirane su na temelju povijesnih podataka o potresima, geoloških istraživanja i tektonskih aktivnosti, i važno ih je poznavati kako bi se seizmički proračun konstrukcija pravilno proveo i kako bi se umanjio štetan utjecaj potresnog djelovanja.

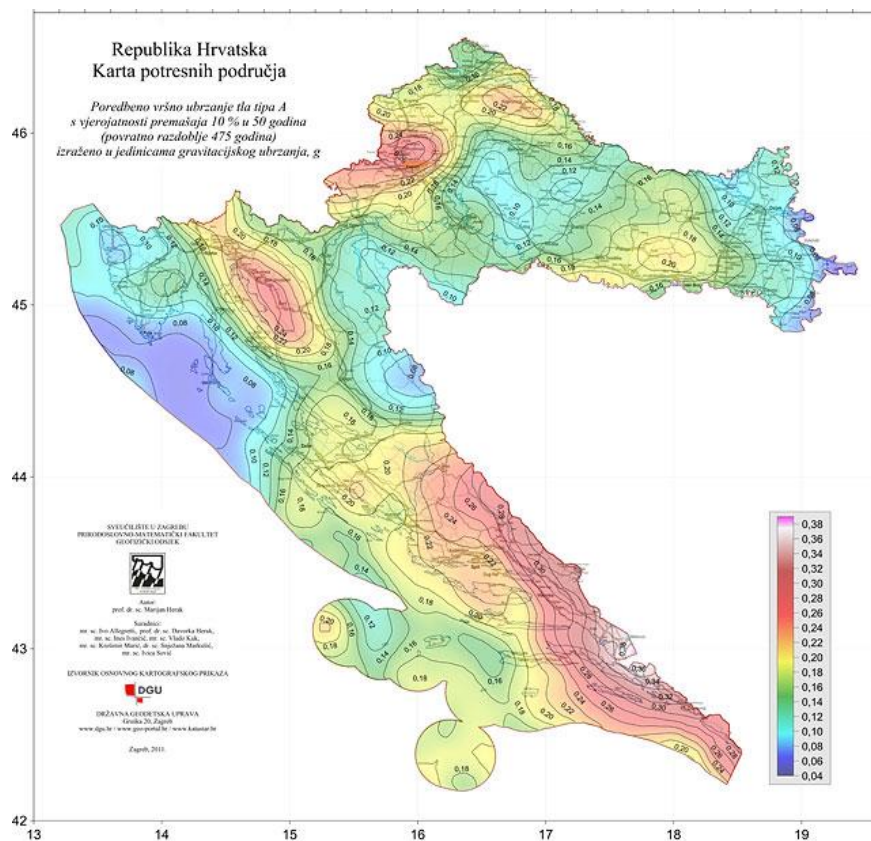
Prema Seizmološkoj karti Državne geodetske uprave RH, predmetna lokacija ovog diplomskog rada nalazi se na području za koje se za povratni period od 95 godina predviđa maksimalno horizontalno ubrzanje veličine 0.112g, a za povratni period od 475 godina maksimalno horizontalno ubrzanje veličine 0.220g.



Slika 2 / Maksimalno horizontalno ubrzanje za različite povratne periode [11]



Slika 3/ Potresne zone RH za povratni period od 95 godina



Slika 4/ Potresne zone RH za povratni period od 475 godina

2.3. Referentni potresi

Za seizmičku analizu kao potresno opterećenje korišteni su zapisi oscilacija tri povijesna potresa:

1) Campano Lucano, Italija, 1980.

Nastao je zbog sudara afričke i euroazijske tektonske ploče, a magnituda potresa iznosila je 6.9 prema Richterovoj ljestvici. Hipocentar potresna je bio na dubini oko 30 km. Osim velikih materijalnih šteta, razaranja s tisućama uništenih zgrada, ovaj potres broji i mnoge ljudske žrtve. Obnova je trajala godinama i uključivala je velike financijske investicije, ali je potaknuo promjene u Zakonodavstvu i postrožavanje standarda za seizmičku otpornost građevina.

2) Petrovac, Crna Gora, 1979.

Nastao je zbog složenih tektonskih procesa u Jadranskom moru, gdje se afrička ploča subducira ispod euroazijske ploče. Magnituda potresa iznosila je 6.9 prema Richterovoj ljestvici, a hipocentar je bio na dubini od 10 km. Posljedica su bila velika razaranja duž crnogorske obale, posebice starih gradskih jezgri. Obnova je zahtijevala velika financijska ulaganja, a potres je poseban imao i na lokalnu ekonomiju, posebice turizam. Uvedeni su stroži standardi za gradnju, s posebnim naglaskom na seizmičku otpornost novih građevina.

3) South Iceland, Island, 2000.

Island je seizmički aktivna zemlja zbog svoje lokacije na srednjoatlantskom grebenu gdje se razdvajaju euroazijska i sjevernoamerička tektonska ploča. Ovi potresi bili su rezultat naprezanja uzrokovanih širenjem oceanskog grebena. Magnituda oba potresa iznosila je 6.5 prema Richteru, a hipocentar se nalazio na dubini od oko 10 km. Iako su oba potresa bila jaka, šteta je bila relativno mala u usporedbi s njihovom magnitudom, a također nije bilo ljudskih žrtava. Seizmološke studije su nakon ovih potresa pokazale detaljan pogled na ponašanje rasjeda i naprezanja u regiji, a prikupljeni podaci korišteni su za unapređenje seizmičkog praćenja i modeliranja na Islandu. Postrožili su se građevinski propisi i posebna se pažnja obratila na bolji dizajn zgrada u vidu otpornosti na potrese.

3. METODA PRORAČUNA

Kombinirana metoda konačno – diskretnih elemenata (MKDE), zasniva se na simulaciji ponašanja velikog broja diskretnih elemenata koji se mogu naći u međusobnoj interakciji. Kombiniraju metodu konačnih elemenata (FEM) i metodu diskretnih elemenata (DEM) radi analize interakcija između čvrstih tijela i diskretnih čestica. Svaki diskretni element (zakrivljena konstrukcija) diskretiziran je s vlastitom mrežom konačnih elemenata, čime je omogućena njegova deformabilnost.

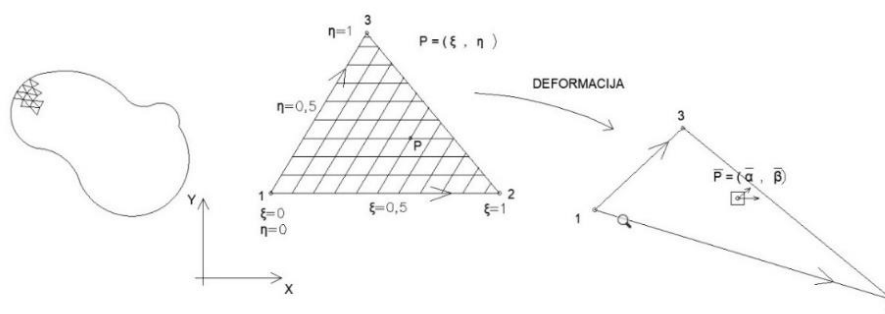
Metoda konačnih elemenata (FEM) koristi se za modeliranje kontinuiranih struktura kao što su čvrsti materijali, strukture ili fluidi, temelji se na diskretizaciji domene na manje elemente. Svaki element opisuje lokalno ponašanje materijala i posjeduje čvorove na kojima se računaju vrijednosti polja (deformacija, temperatura, tlak...).

Metoda diskretnih elemenata (DEM) koristi se za modeliranje diskretnih čestica, gdje svaka čestica predstavlja jedinicu materijala s definiranim svojstvima, a interakcija među njima opisuje se pomoću modela kontakta, trenja, deformacija i loma.

Ova dva pristupa integriraju se na način da se kontinuirana područja modeliraju pomoću FEM-a, dok se diskretna područja modeliraju pomoću DEM-a. Interakcije između kontinuiranih i diskretnih područja promatraju se na granicama elemenata.

Modeliranje interakcija uključuje definiranje graničnih uvjeta, modela kontakta, prijenosa sila, deformacija i drugih svojstava interakcije, uključujući praćenje raspodjele sila, deformacija i ostalih parametara u vremenu i prostoru.

MKDE jednadžbe gibanja rješava eksplicitno, za svaki čvor u svakom vremenskom koraku. Jednadžbe se formiraju poznavanjem sila u čvorovima u kombinaciji sa masama koncentriranim u čvorove. Sile su proračunate obradom eventualne kontaktne interakcije diskretnih elemenata i deformacije konačnih elemenata.



Slika 5 / Diskretizacija elementa izrađena u AutoCAD-u

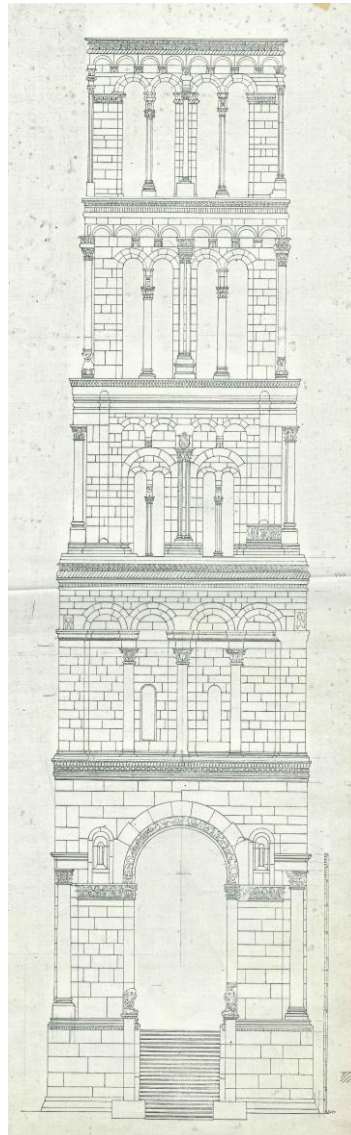
4. PRIMJENA FEM/DEM METODE

4.1. Geometrijske karakteristike i diskretizacije modela

Zvonik katedrale svetog Dujma zidana je konstrukcija izgrađena od kamenih vapnenačkih blokova različitih dimenzija i principa slaganja, vezanih mortom. Visina zvonika doseže otprilike 57 m sa ukupno šest etaža. Sve su etaže pravokutnog tlocrtnog oblika, osim zadnje koja ima oktogonalni tlocrtni oblik.

Kao podloga za izradu nacrtu za diskretizaciju korišten je arhitektonski snimak postojećeg stanja zvonika s kraja 19. stoljeća koji je izradio Alois Hauser u svrhu radikalne obnove zvonika, na koji je dodana nadogradnja, odnosno šesta etaža i krov.

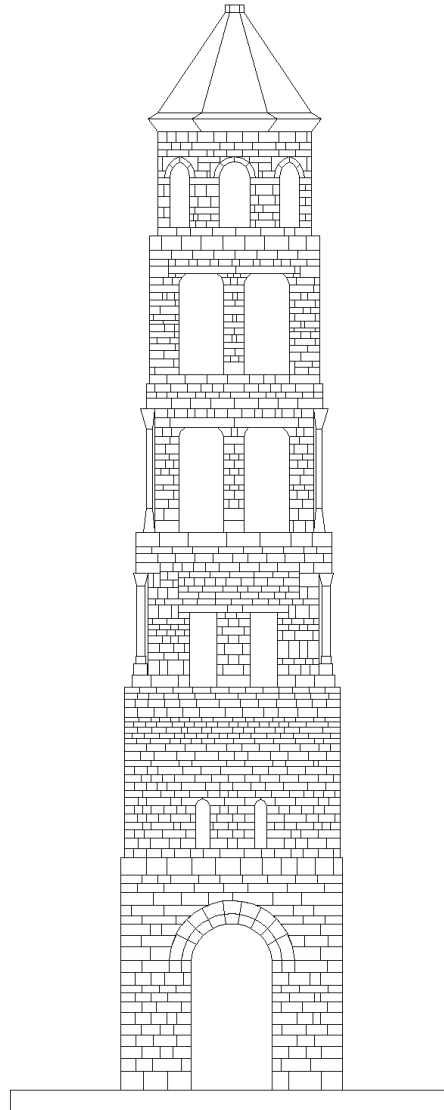
Osim konstruktivnih blokova, na pročelju opažamo razne dekorativne elemente poput vijenaca, ukrasnih stupića, figura, grbova i reljefa, ali su zanemareni prilikom analize zbog svojih nekonstruktivnih svojstava.



Slika 6 / Zapadno pročelje zvonika, Alois Hauser, 19. st. [2]

4.1.1. Diskretizacija zvonika na diskretne elemente

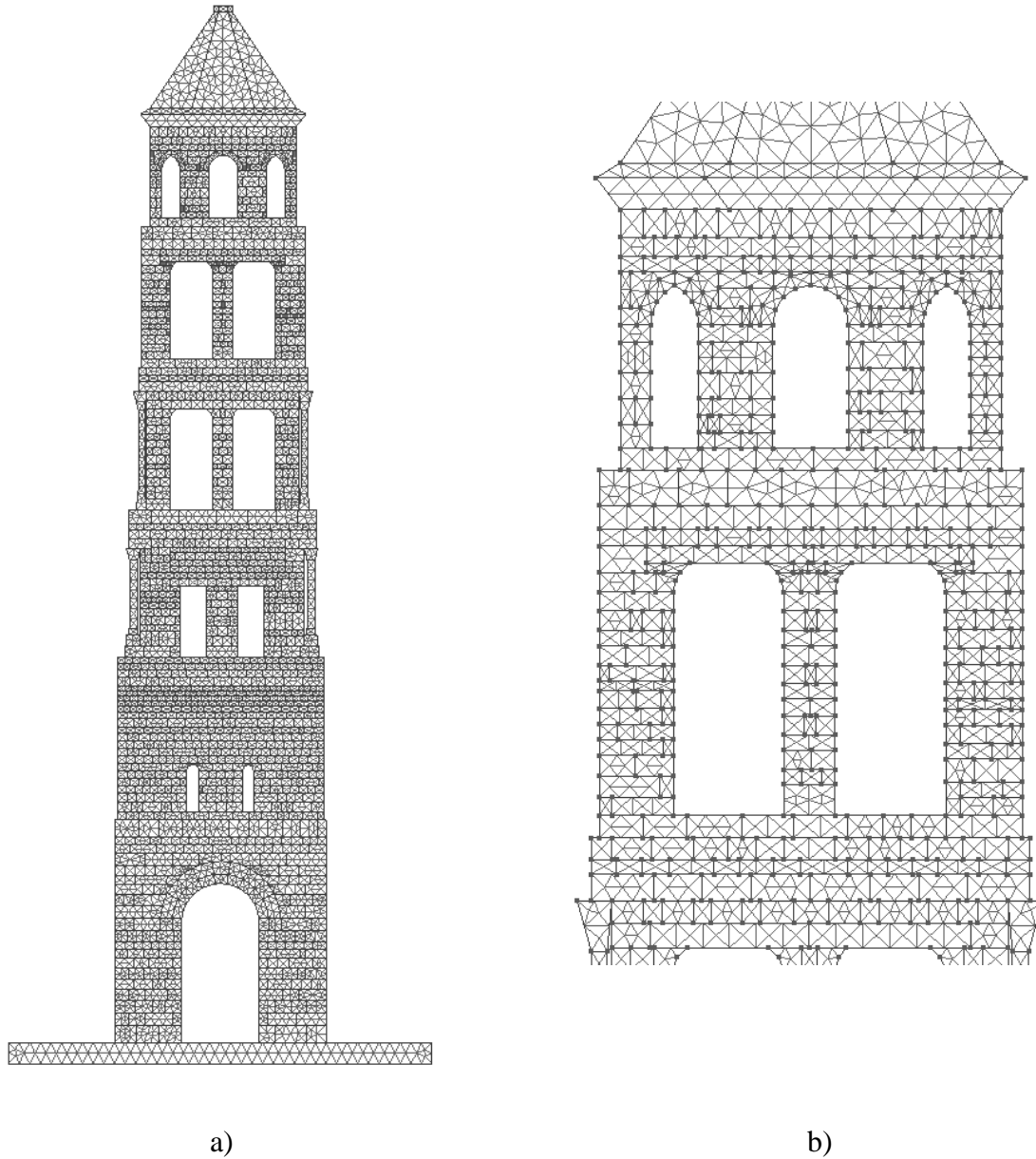
Diskretizacija zvonika napravljena je u računalnom programu „AutoCAD“, gdje jedan kameni blok predstavlja jedan diskretni element.



Slika 7 / Zapadno pročelje zvonika podijeljeno na diskretne elemente

4.1.2. Diskretizacija diskretnih elemenata mrežom konačnih elemenata

Mreža trokutastih konačnih elemenata generirana je računalnim programom „Gmsh“ na temelju ulazne datoteke dobivene pomoću nacрта zvonika podijeljenog na diskretne elemente i „DXF to Gmsh“ konvertera.



Slika 8 / a) Diskretizacija konstrukcije mrežom trokutastih konačnih elemenata; b) Detalj mreže konačnih elemenata

4.2. Svojstva materijala

Materijal korišten za gradnju zvonika katedrale svetog Dujma bio je bijeli vapnenac iz kamenoloma na otoku Braču, te drugih lokalnih kamenoloma. Vapnenac je sedimentna stijena nastala taloženjem organskih materijala, najčešće svijetle, bijelo – sive ili žućkaste boje. Ima homogenu, sitnozrnatu teksturu, srednje do visoke poroznosti.

Modul elastičnosti mjera je krutosti materijala, parametar koji određuje koliko se materijal deformira pod određenim opterećenjem. Modul elastičnosti vapnenca kao prirodnog kamena varira u ovisnosti o uvjetima formacije i točnom sastavu, približne su vrijednosti od 30 do 50 GPa.

Gustoća vapnenca kreće se između 2.6 i 2.7 g/cm³ što ga čini izdržljivim i otpornim na vremenske uvjete.

Statički koeficijent trenja je mjera otpornosti na početak klizanja između dvije površine, varira u ovisnosti o uvjetima površine i kontaktnih materijala. Tipične vrijednosti za vapnenac kreću se od 0.6 do 0.8, dok vlažni uvjeti mogu smanjiti koeficijent trenja.

Dinamički koeficijent trenja je mjera otpornosti na klizanje između dvije površine koje se već kreću jedna u odnosu na drugu. Vrijednosti za vapnenac u suhim uvjetima su od 0.5 do 0.7, a u suhim uvjetima od 0.3 do 0.5.

Koeficijent prigušenja važan je parametar u dinamici konstrukcija, a odnosi se na sposobnost materijala da apsorbira energiju vibracija ili oscilacija, čime se smanjuje amplituda oscilacija tijekom vremena. Ovisi o nekoliko faktora uključujući unutarnju strukturu, prisutnost mikropukotina, vrstu opterećenja i frekvenciju vibracija, a za prirodan materijal poput vapnenca ima izrazito niske vrijednosti.

Mehaničke karakteristike vapnenca prikazane su u tablici:

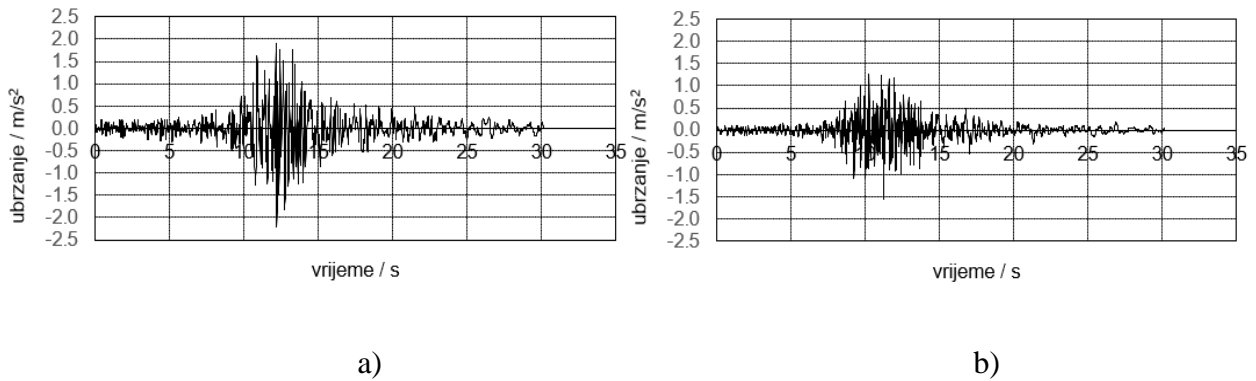
Modul elastičnosti	E (MPa)	48400
Gustoća	ρ [kg/m ³]	2700
Statički koeficijent trenja	μ_{st}	0.6
Dinamički koeficijent trenja	μ_{din}	0.6
Koeficijent prigušenja	$\bar{\mu}$	$4.5 \cdot 10^6$

Tablica 1 / Mehaničke karakteristike vapnenca

4.3. Potresna djelovanja na konstrukciju

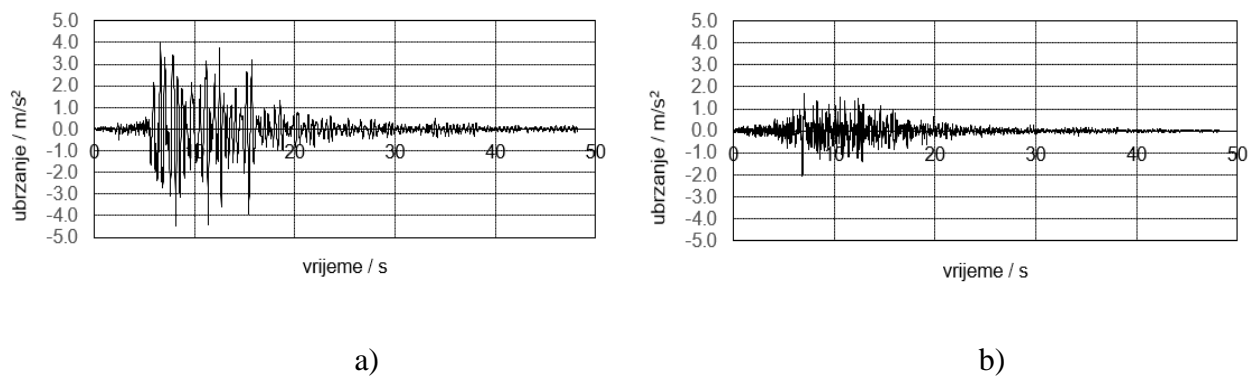
Kao ulazni podatak za seizmičku analizu, korišteni su zapisi ubrzanja tla realnih potresa sa svojim vertikalnim i horizontalnim komponentama:

1) Akcelelogram potresa Campano Lucano, Italija, 1980.



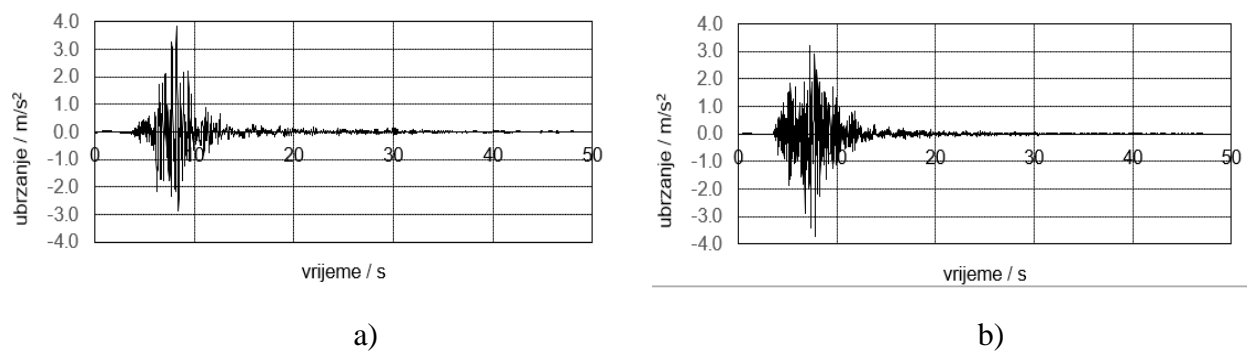
Slika 9 / Campano Lucano; a) horizontalna komponenta; b) vertikalna komponenta

2) Akcelelogram potresa Petrovac, Crna Gora, 1979.



Slika 10 / Petrovac; a) horizontalna komponenta; b) vertikalna komponenta

3) Akcelelogram potresa South Iceland, Island, 2000.

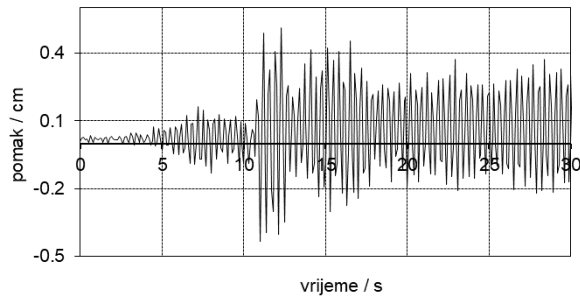


Slika 11 / South Iceland; a) horizontalna komponenta; b) vertikalna komponenta

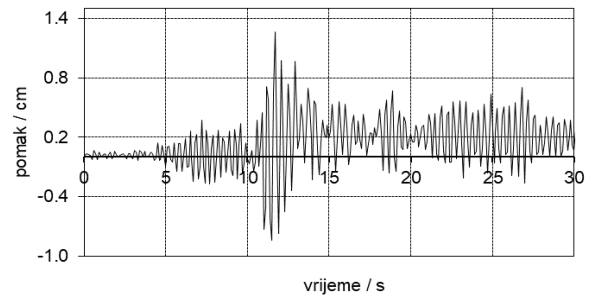
5. REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA

5.1. Rezultati analiza za potres Campano Lucano

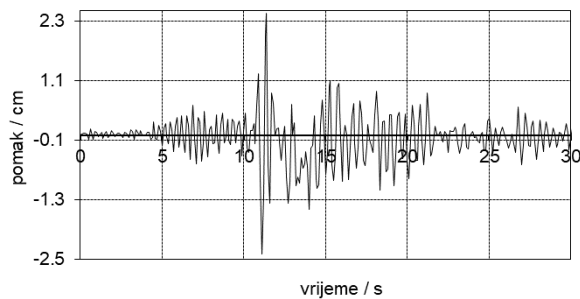
5.1.1. Zapisi pomaka vrha konstrukcije



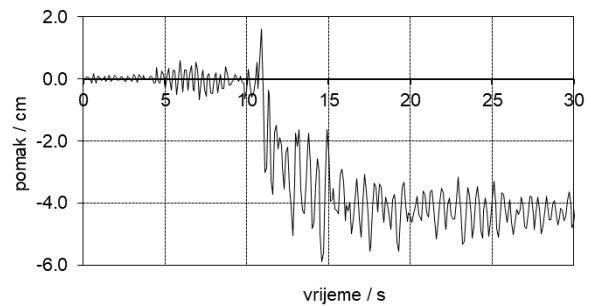
1) vršno ubrzanje 0.22g



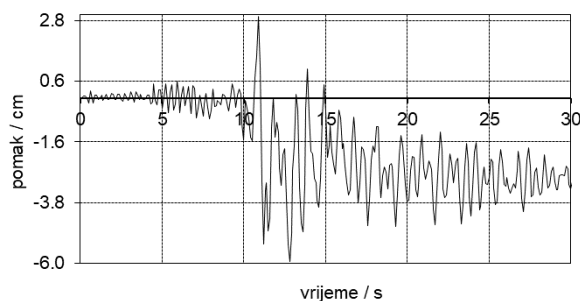
2) vršno ubrzanje 0.50g



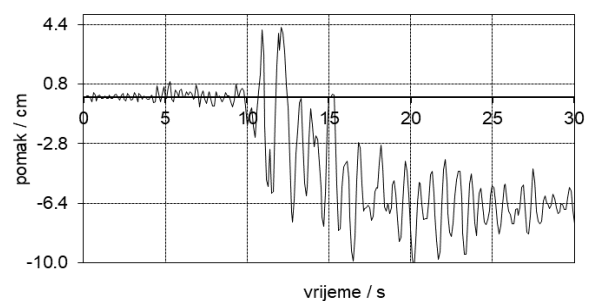
3) vršno ubrzanje 1.0g



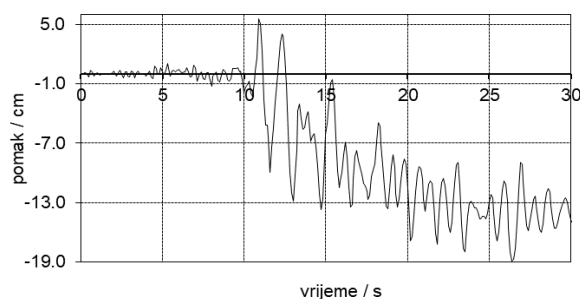
4) vršno ubrzanje 1.5g



5) vršno ubrzanje 2.0g



6) vršno ubrzanje 2.5g



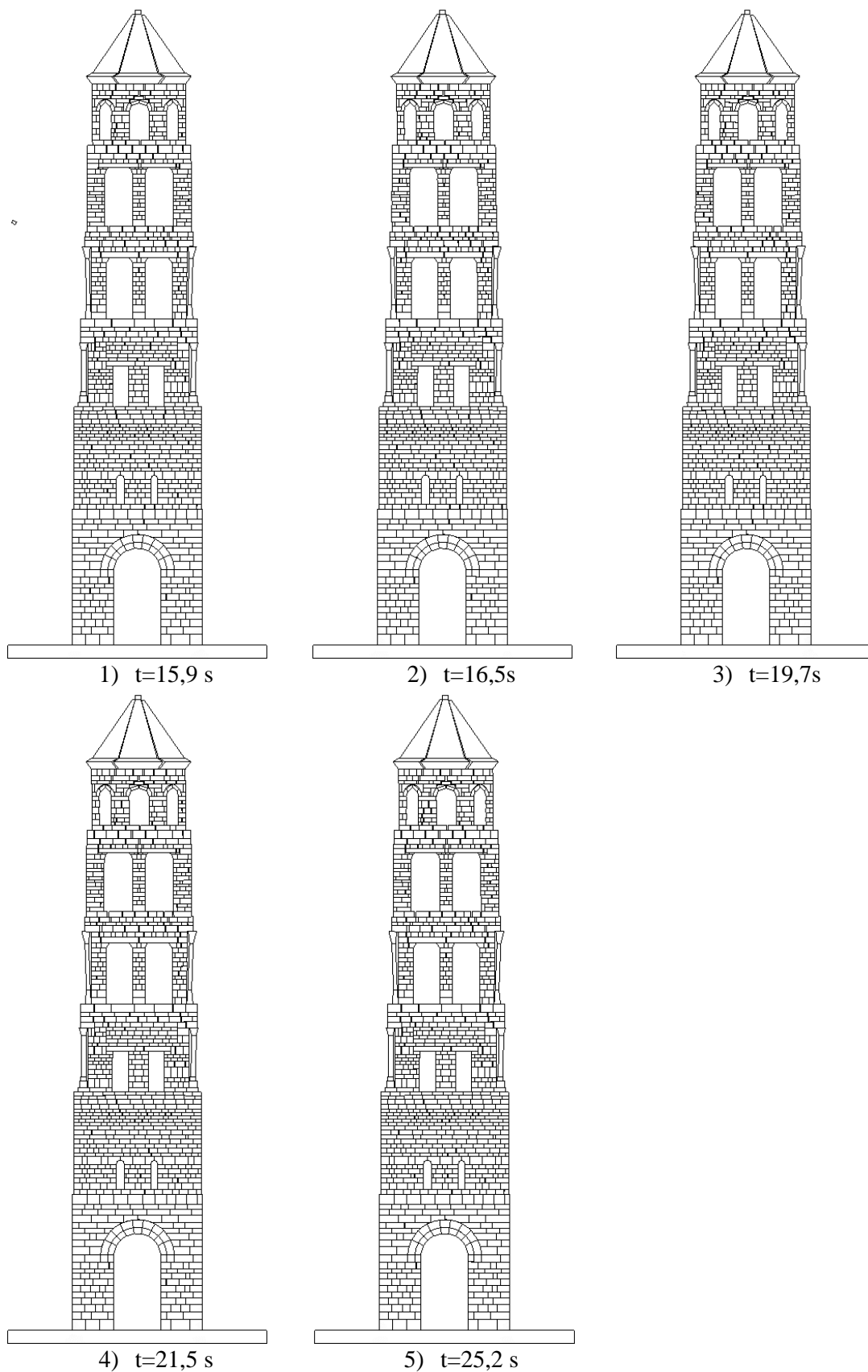
7) vršno ubrzanje 3.0g

Slika 12 / Zapisi pomaka tla uslijed djelovanja različitih vršnih ubrzanja tla

Slika 12 prikazuje pomake vrha konstrukcije u vremenu za potres Campano Lucano. Simulacija je izvršena za različita vršna ubrzanja tla, redom: 0.22g, 0.50g, 1.0g, 1.5g, 2.0g, 2.5g i 3.0g.

Iz grafova je vidljivo da do značajnijih pomaka konstrukcije dolazi tek pri većim vršnim ubrzanjima. Promatramo li graf pomaka za vršno ubrzanje $a_g = 0.22g$, koje je karakteristično za područje Splita, primjećujemo da se najveći pomaci javljaju između $t=10s$ i $t=15s$, a iznose otprilike 0.50 cm. Maksimalni pomaci javljaju se za vršno ubrzanje $a_g=3.0g$ i iznose do 19.0 cm ali ne dolazi do gubitka stabilnosti konstrukcije.

5.1.2. Prikaz nastanka i širenja pukotina

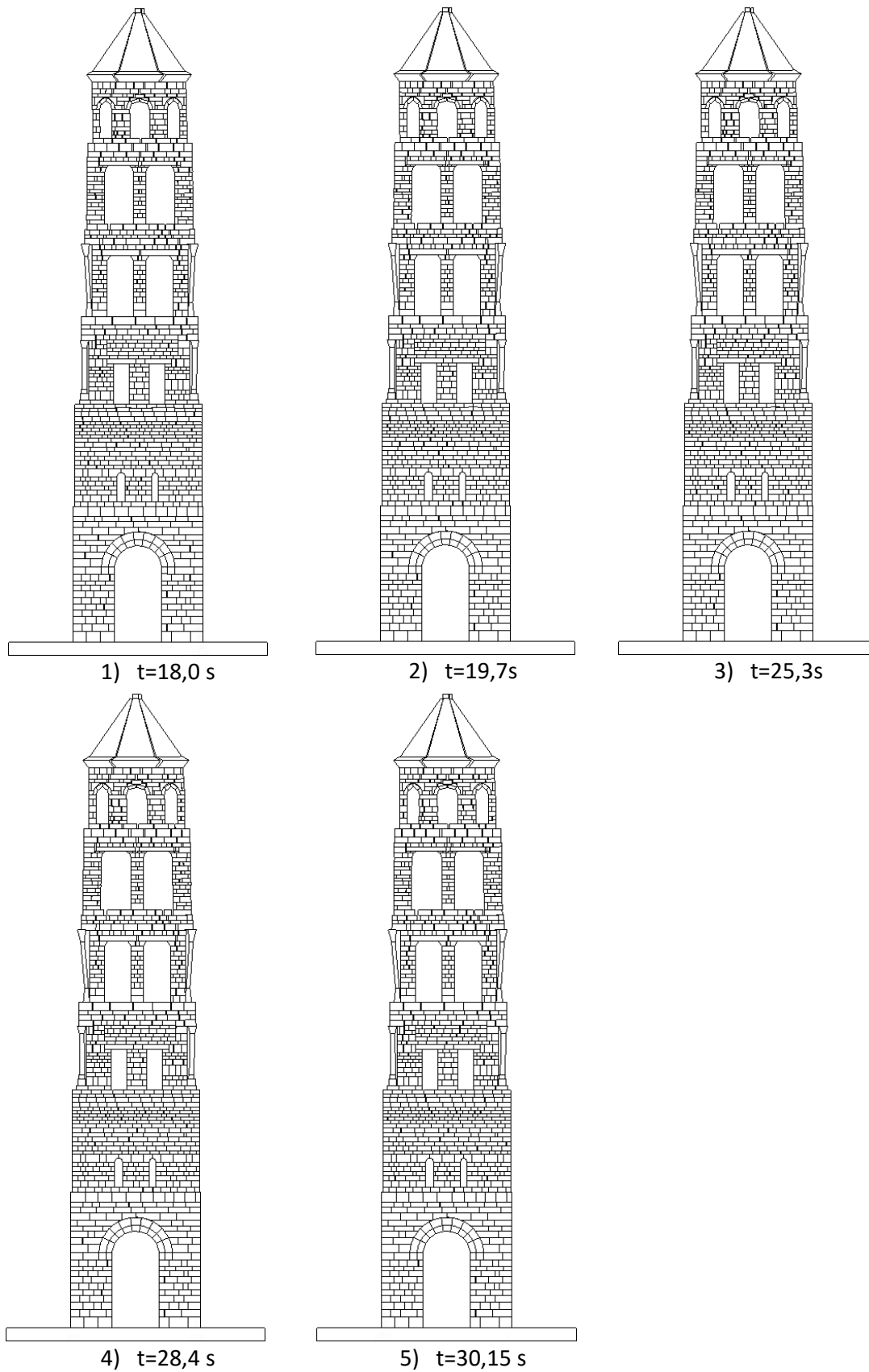


Slika 13 / Prikaz nastanka i širenja pukotina pri vršnom ubrzanju 2.5g

Slika 13 prikazuje nastanak i širenje pukotine konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja $a_g=2.5$ g.

Do značajnijih pomaka dolazi od trenutka $t=10$ s, nakon čega možemo primijetiti nastanak pukotina i odvajanje među blokovima gornjeg dijela konstrukcije, te urušavanje blokova sa krova konstrukcije.

Pomaci postupno rastu do trenutka $t=20$ s, te se pukotine među kamenim blokovima šire, ali nema značajnijih oštećenja, te najvažnije ne dolazi do urušavanja konstrukcije. Do kraja djelovanja pobude ne dolazi do povećanja oštećenja.



Slika 14 / Prikaz nastanka i širenja pukotina pri vršnom ubrzanju 3.0g

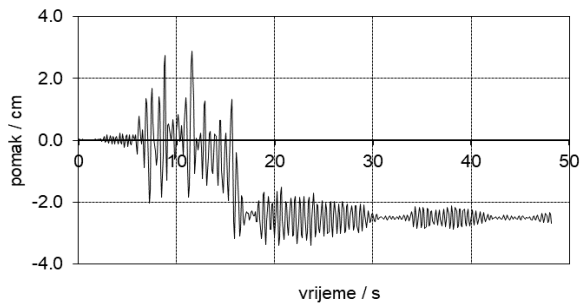
Slika 14 prikazuje nastanak i širenje pukotine konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja $a_g=3.0$ g.

Do značajnijih pomaka dolazi od trenutka $t=10$ s, nakon čega možemo primijetiti nastanak pukotina među blokovima gornjeg dijela konstrukcije.

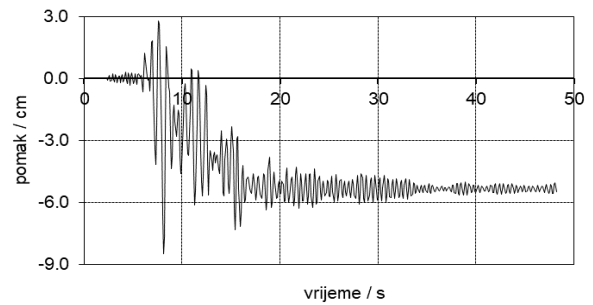
Pomaci postupno rastu do trenutka $t=25$ s, te se pukotine među kamenim blokovima šire i nešto su veće nego pri prethodnom vršnom ubrzanju ali nema značajnijih oštećenja i urušavanja konstrukcije. Do kraja djelovanja pobude ne dolazi do povećanja oštećenja.

5.2. Rezultati analiza za potres Petrovac

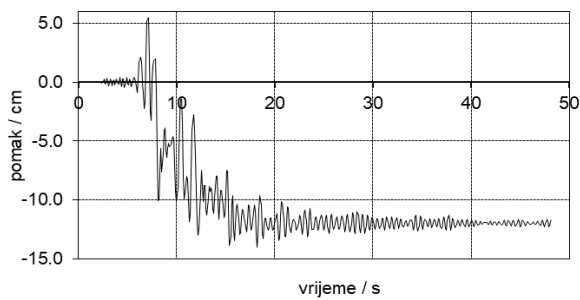
5.2.1. Zapisi pomaka vrha konstrukcije



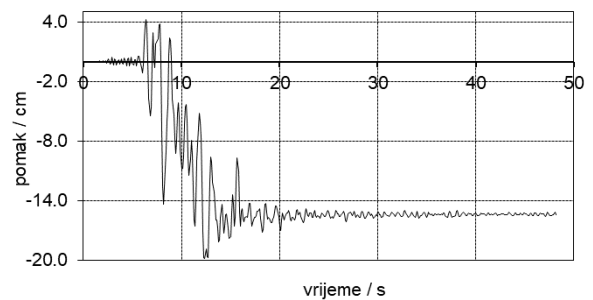
1) vršno ubrzanje 0.10g



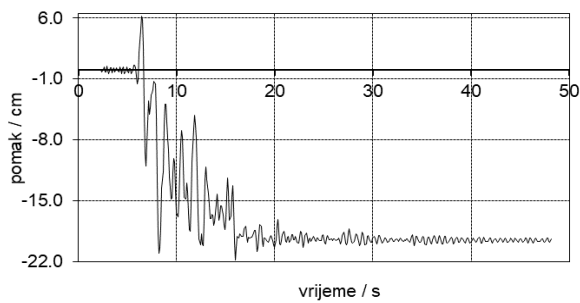
2) vršno ubrzanje 0.15g



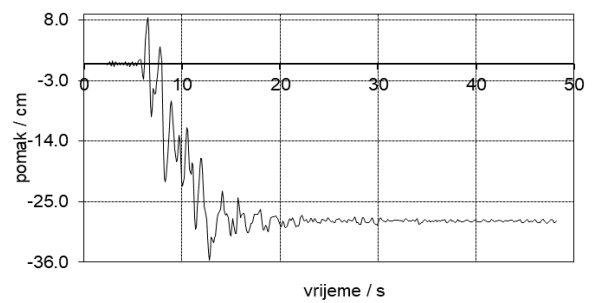
3) vršno ubrzanje 0.22g



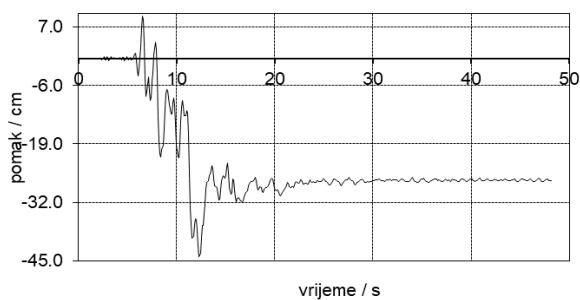
4) vršno ubrzanje 0.27g



5) vršno ubrzanje 0.30g



6) vršno ubrzanje 0.35g



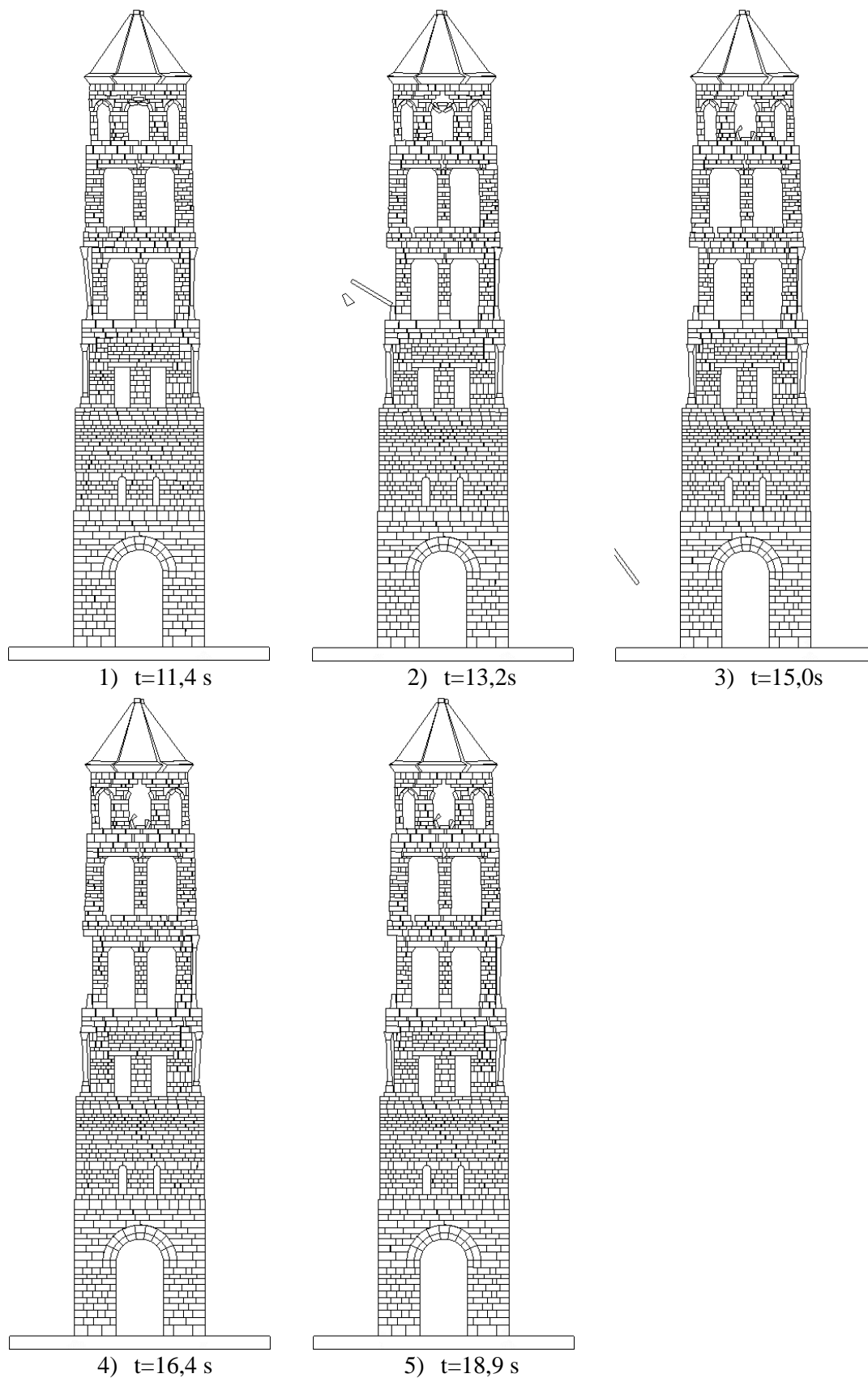
7) vršno ubrzanje 0.40g

Slika 15 / Zapisi pomaka tla uslijed djelovanja različitih vršnih ubrzanja tla

Slika 15 prikazuje pomake vrha konstrukcije u vremenu za potres Petrovac. Simulacija je izvršena za različita vršna ubrzanja tla, redom: 0.10g, 0.15g, 0.22g, 0.27g, 0.30g, 0.35g i 0.40g.

Već pri vrlo malim ubrzanjima tla možemo primijetiti pomake veličine do 10.0 cm. Pri vršnom ubrzanju $a_g = 0.22g$, koje je karakteristično za područje Splita, već od trenutka $t=5s$ primjećujemo razvoj pomaka koji su najveći između $t=10s$ i $t=20s$, a iznose otprilike 15.0 cm.

Maksimalni pomaci javljaju se za vršno ubrzanje $a_g=0.40g$ i iznose do 45.0 cm. Uslijed toga dolazi do značajnijih oštećenja i konstrukcija se djelomično urušava.

5.2.2. Prikaz nastanka i širenja pukotina

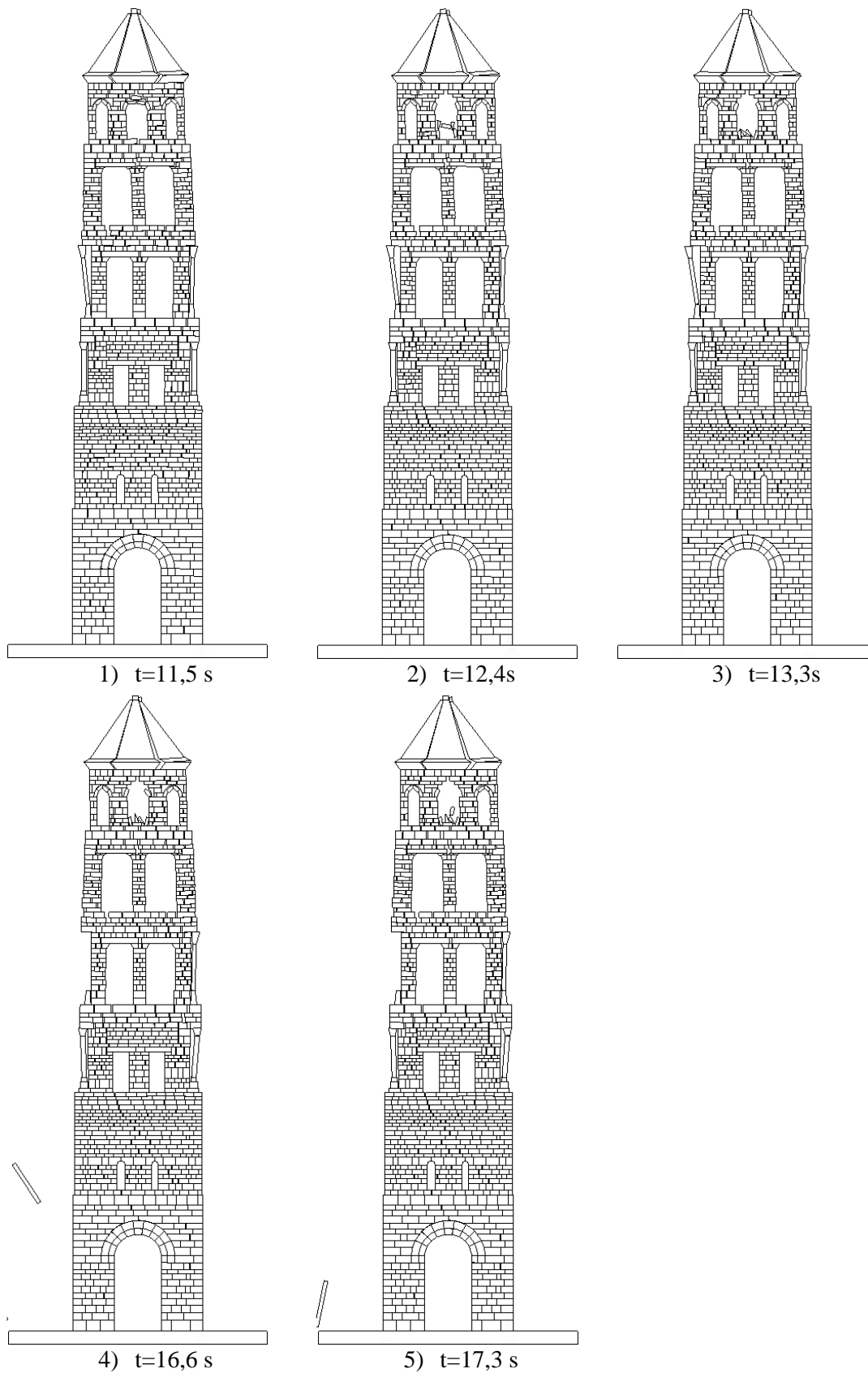
Slika 16 / Prikaz nastanka i širenja pukotina pri vršnom ubrzanju 0.35g

Slika 16 prikazuje nastanak i širenje pukotine konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja $a_g=0.35$ g.

Do značajnijih pomaka dolazi od trenutka $t=5$ s kada uočavamo nastanak pukotina među blokovima u gornjem dijelu konstrukcije. Postupnim rastom pomaka i daljnjim širenjem pukotina dolazi do urušavanja blokova krovne konstrukcije, kao i urušavanja lukova na zadnjoj etaži.

Najveće pomake primjećujemo oko $t=13$ s kada se pukotine šire prema donjem dijelu konstrukcije te dolazi do urušavanja potpornog stupa četvrte etaže zvonika.

Prema kraju djelovanja pobude nema značajnijeg širenja pukotina.



Slika 17 / Prikaz nastanka i širenja pukotina pri vršnom ubrzanju 0.40g

Slika 17 prikazuje nastanak i širenje pukotine konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja $a_g=0.40$ g.

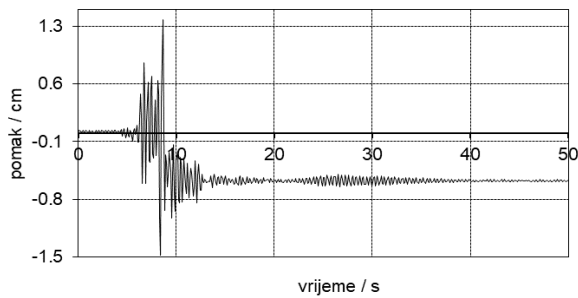
Nastanak prvih pukotina uočavamo već od trenutka $t=5$ s, ponajviše među blokovima u gornjem dijelu konstrukcije. Postupnim rastom pomaka i daljnjim širenjem pukotina dolazi do urušavanja blokova krovne konstrukcije, kao i urušavanja lukova na zadnjoj etaži.

Najveće pomake primjećujemo oko $t=13$ s kada se pukotine šire prema donjem dijelu konstrukcije te dolazi do urušavanja potpornog stupa četvrte etaže zvonika.

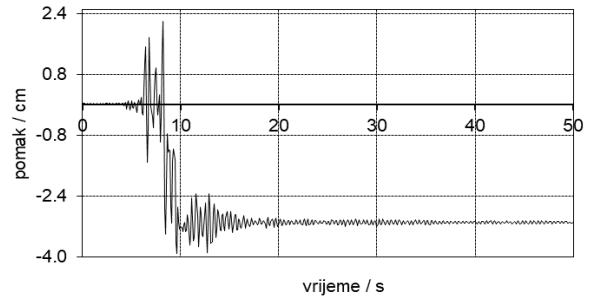
Prema kraju djelovanja pobude pukotine se šire i prema bazi zvonika, vidljiva je dijagonalna propagacija, ali bez većih oštećenja.

5.3. Rezultati analiza za potres South Iceland

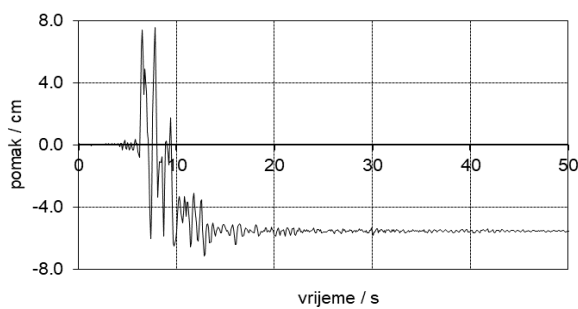
5.3.1. Zapisi pomaka vrha konstrukcije



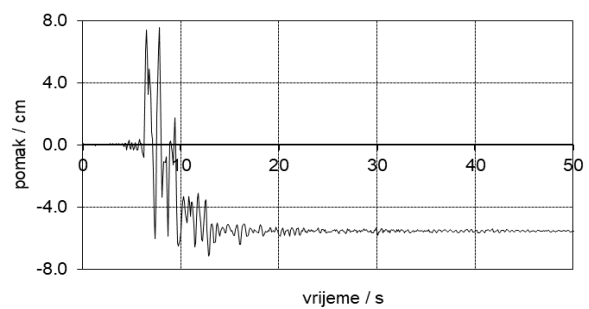
1) vršno ubrzanje 0.22g



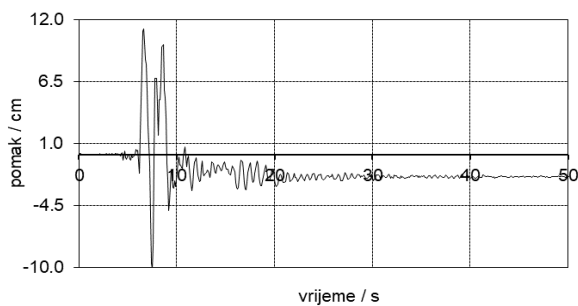
2) vršno ubrzanje 0.50g



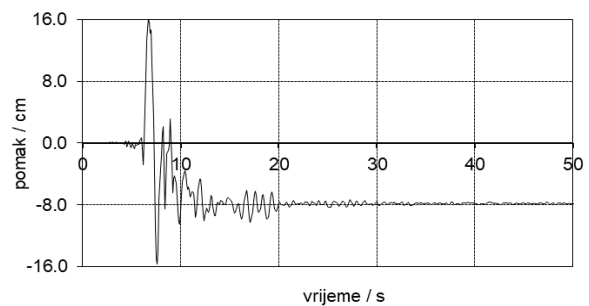
3) vršno ubrzanje 1.0g



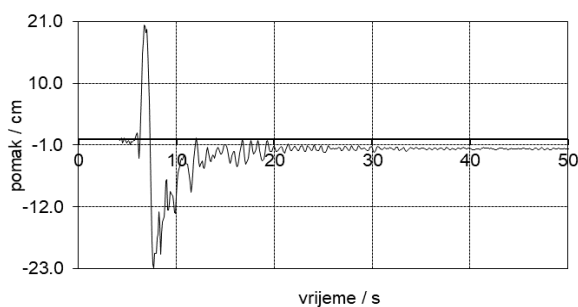
4) vršno ubrzanje 1.5g



5) vršno ubrzanje 2.0g



6) vršno ubrzanje 2.5g



7) vršno ubrzanje 3.0g

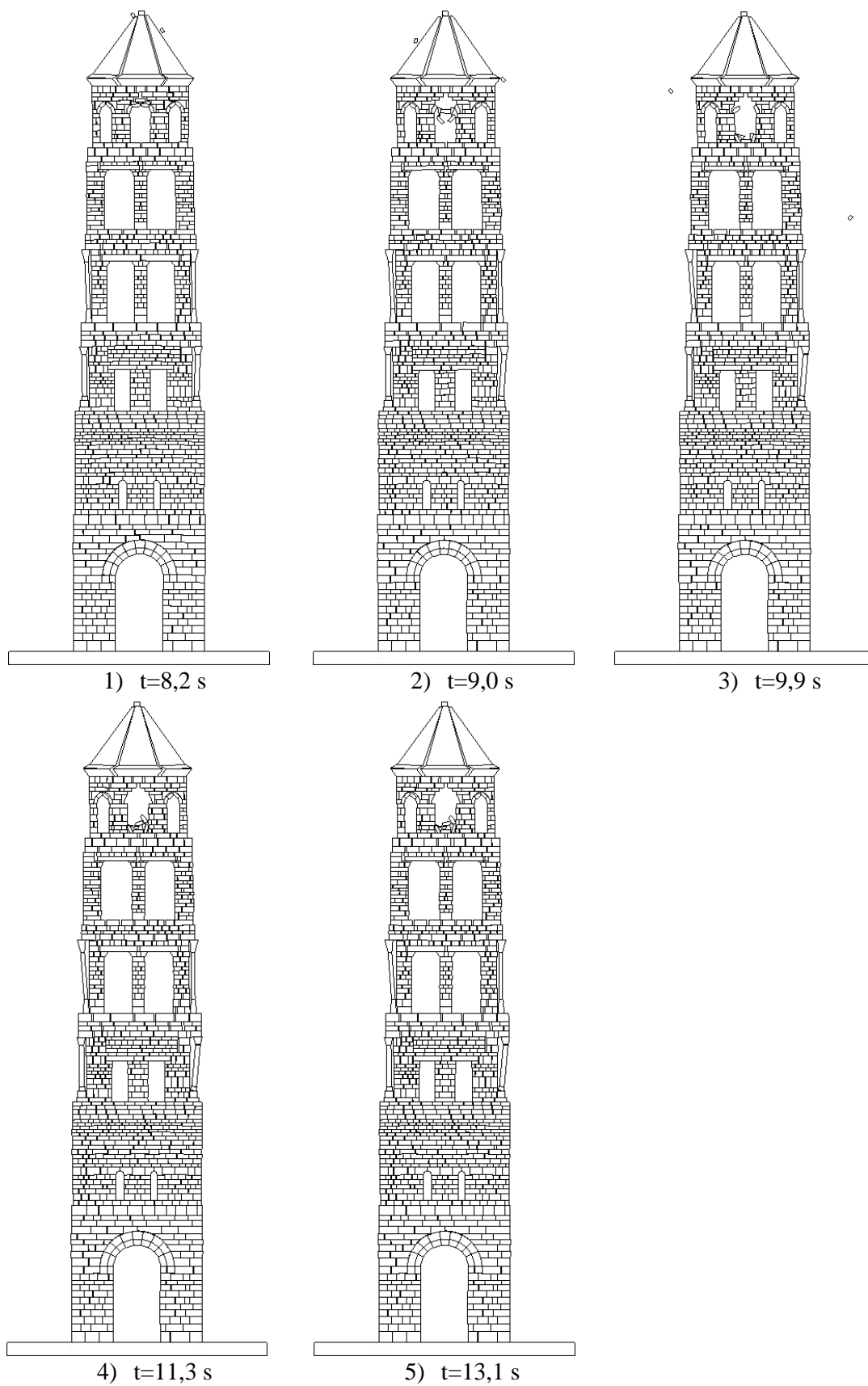
Slika 18 / Zapisi pomaka tla uslijed djelovanja različitih vršnih ubrzanja tla

Slika 18 prikazuje pomake vrha konstrukcije u vremenu za potres South Iceland. Simulacija je izvršena za različita vršna ubrzanja tla, redom: 0.22g, 0.50g, 1.0g, 1.5g, 2.0g, 2.5g i 3.0g.

Vidimo da već od trenutka $t=5s$ dolazi do razvoja pomaka, te pri manjim ubrzanjima iznose tek nekoliko centimetara, dok veću veličinu imaju pri većim ubrzanjima. Za vršno ubrzanje $a_g = 0.22g$, karakteristično za područje Splita, od trenutka $t=5s$ primjećujemo razvoj pomaka koji su najveći između $t=5s$ i $t=15s$, a iznose otprilike 1.5 cm.

Maksimalni pomaci javljaju se za vršno ubrzanje $a_g=3.0g$ i već do trenutka $t=10s$ iznose otprilike 23.0 cm, što izaziva urušavanje dijela konstrukcije.

5.3.2. Prikaz nastanka i širenja pukotina

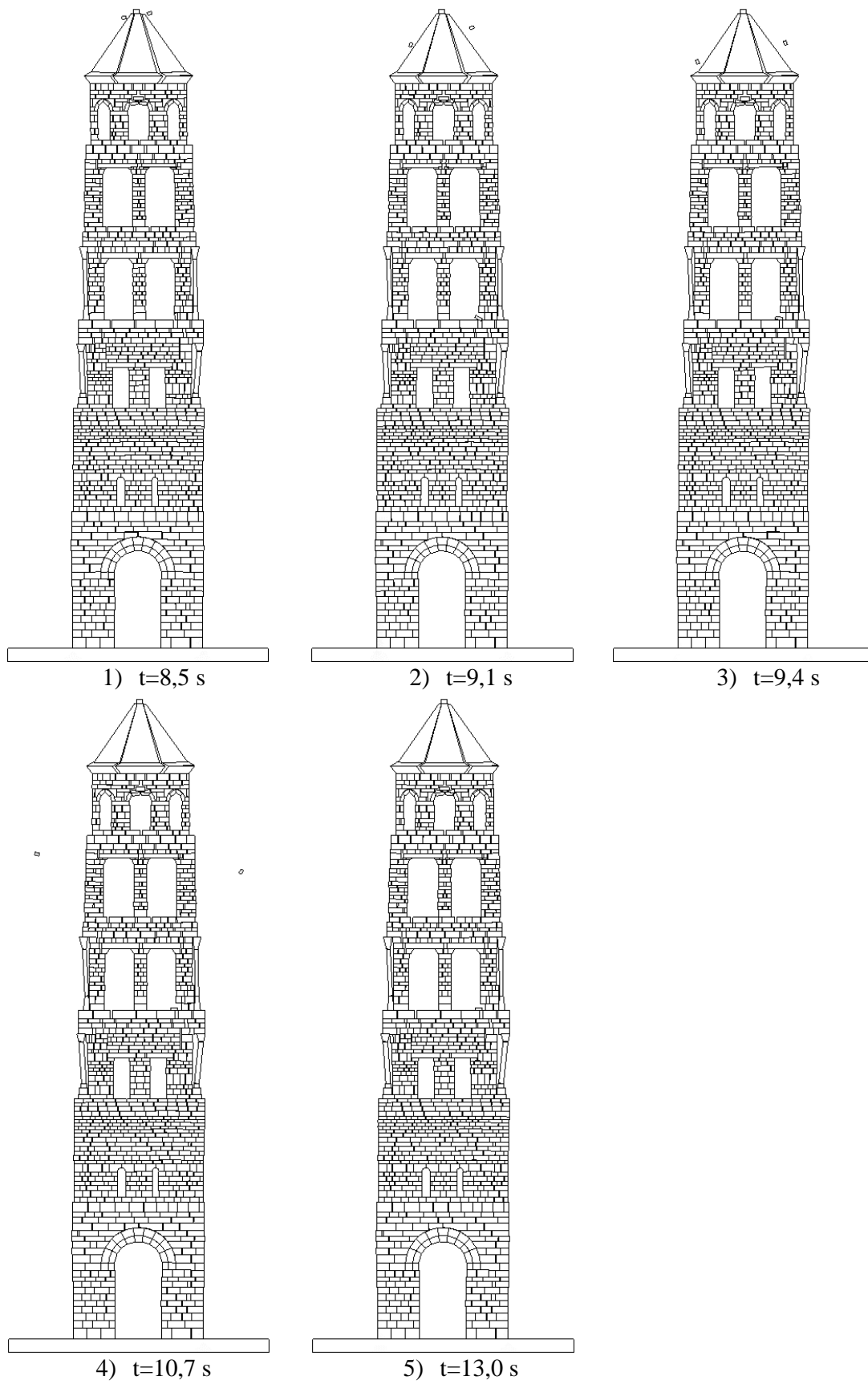


Slika 19 / Prikaz nastanka i širenja pukotina pri vršnom ubrzanju 2.5g

Slika 19 prikazuje nastanak i širenje pukotine konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja $a_g=2.5$ g.

Nastanak prvih pukotina uočavamo već od trenutka $t=5$ s kada u gornjem dijelu konstrukcije zbog naglo nastalih većih pomaka dolazi do urušavanja blokova. Daljnjim djelovanjem pobude deformacije i pukotine šire se prema donjim dijelovima konstrukcije. Primjećujemo oštećenja ponajviše rubnih blokova, odnosno bočno širenje konstrukcije, ali bez urušavanja blokova.

Najveće pomake uočavamo prije trenutka $t=10$ s kada dolazi do najvećeg oštećenja zvonika. Od trenutka $t=20$ s prema kraju djelovanja pobude nema većih deformacija.



Slika 20 / Prikaz nastanka i širenja pukotina pri vršnom ubrzanju 3.0g

Slika 20 prikazuje nastanak i širenje pukotina konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja $a_g=3.0$ g.

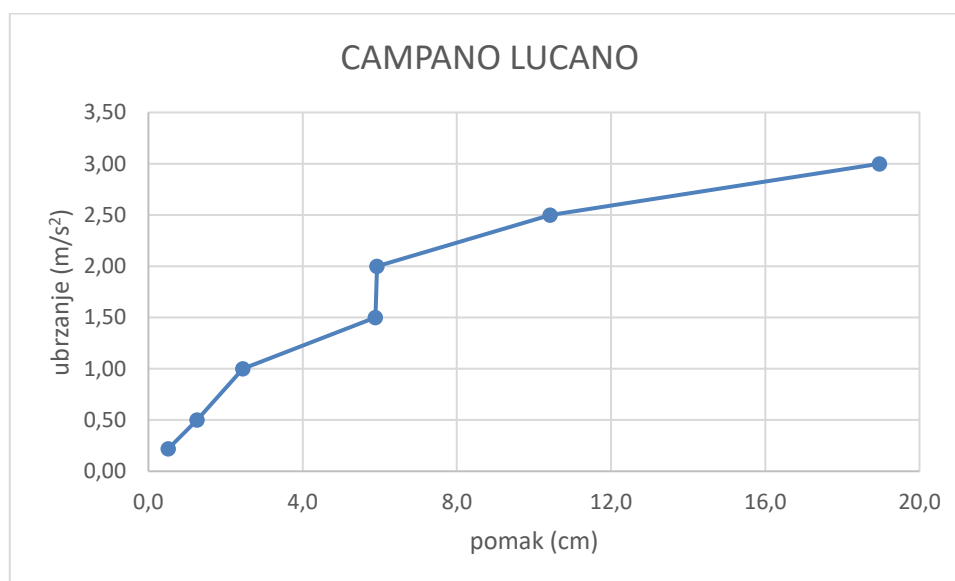
Do gubitka stabilnosti konstrukcije dolazi već u trenutku $t=5$ s, kada uslijed najvećih pomaka dolazi do urušavanja kamenih blokova gornjeg dijela konstrukcije, krova i lukova na zadnjoj etaži.

Deformacije i pukotine se šire prema donjem dijelu konstrukcije do trenutka $t=20$ s, te su vidljiva oštećenja po čitavoj visini zvonika. Prema kraju djelovanja pobude ne uočavaju se značajne deformacije.

6. ANALIZA NUMERIČKIH REZULTATA

Potres Campano Lucano najveća ubrzanja postiže između $t=10$ s i $t=15$ s, a maksimalno ubrzanje horizontalne komponente iznosi otprilike 2.2 m/s^2 . U tom rasponu za svako pojedino vršno ubrzanje tla bilježimo i maksimalne pomake konstrukcije.

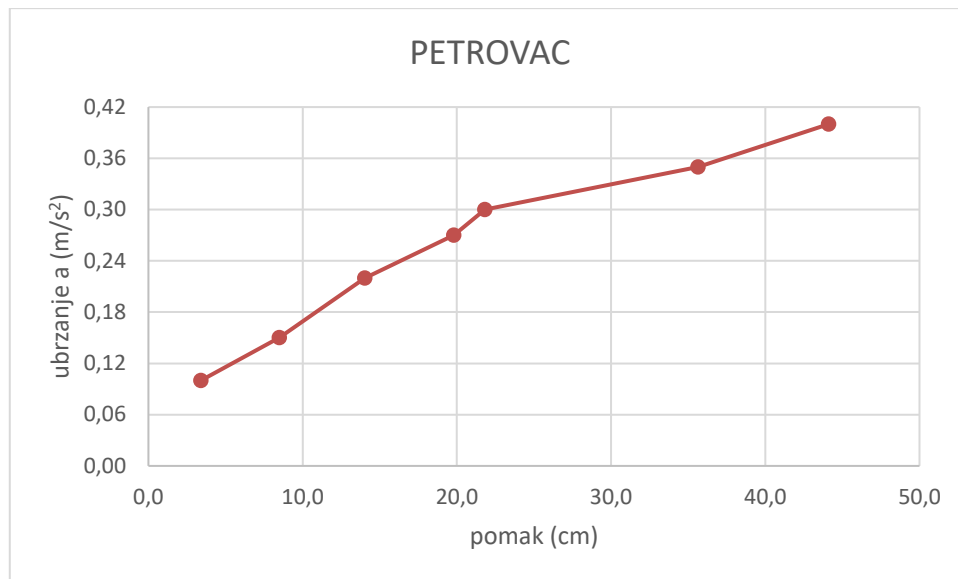
Promotrimo li *Graf 1* uočit ćemo da pri manjim vršnim ubrzanjima tla ne bilježimo značajnije pomake, njihov red veličina je tek par centimetara. Značajniji pomak konstrukcije primjećujemo pri vršnom ubrzanju $a_g=3.0 \text{ m/s}^2$ sa najvećim pomakom od 10 cm, a značajna razliku vidimo za vršno ubrzanje $a_g=3.5 \text{ m/s}^2$ kada maksimalni pomaci konstrukcije iznose 19 cm.



Graf 1 / Maksimalni pomaci za različita vršna ubrzanja za potres Campano Lucano

Petrovac najveća ubrzanja postiže od $t=5$ s do $t=15$ s, maksimalno ubrzanje horizontalne komponente je otprilike 4.4 m/s^2 . U tom vremenskom okviru dolazi i do najvećih pomaka konstrukcije.

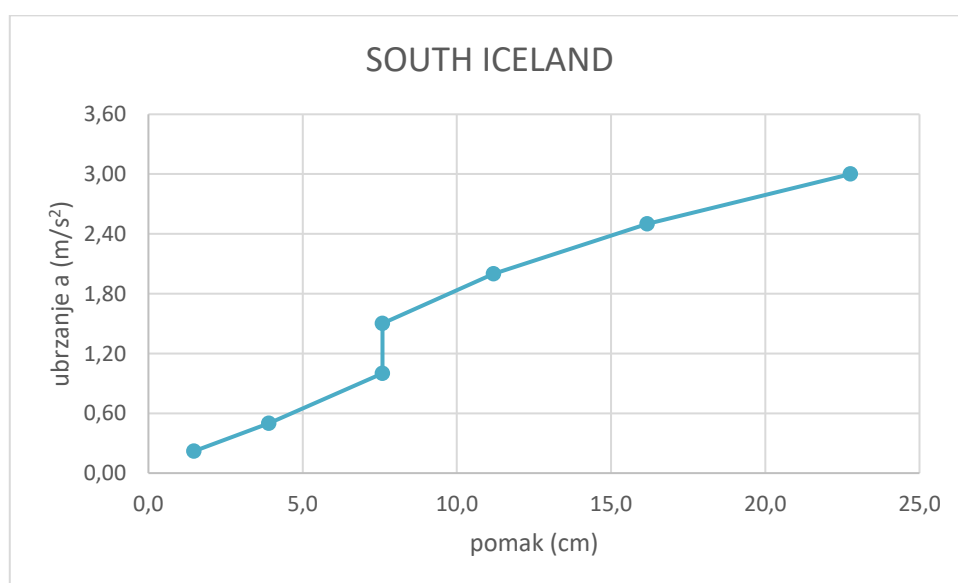
Na *Grafu 2* vidimo kako je s povećanjem vršnog ubrzanja, maksimalni pomaci gotovo linearno rastu. Za manja vršna ubrzanja $a_g=0.10$ i 0.15 m/s^2 iznose do 10 cm, za vršna ubrzanja do $a_g=0.30 \text{ m/s}^2$ pomaci iznose do 22 cm. Zatim pri vršnom ubrzanju $a_g=0.35 \text{ m/s}^2$ bilježimo znatan prirast pomaka koji iznosi 35 cm. Najznačajniji maksimalni pomak konstrukcije bilježimo za vršno ubrzanje $a_g=0.40 \text{ m/s}^2$ i on iznosi oko 44 cm.



Graf 2 / Maksimalni pomaci za različita vršna ubrzanja za potres Petrovac

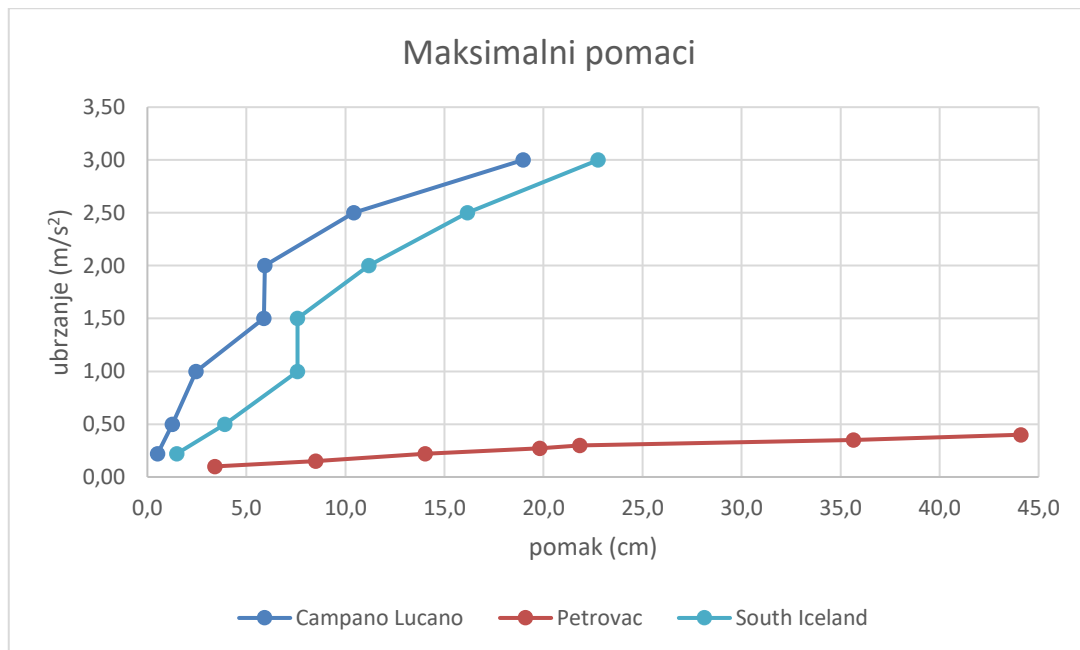
Najveća ubrzanja za potres South Iceland primjećujemo od $t=5$ s do $t=10$ s kada maksimalna vrijednost horizontalne komponente ubrzanja iznosi gotovo 4.0 m/s^2 . Analiza pomaka konstrukcije za svako pojedinačni ubrzanje pokazala je da upravo u tom rasponu bilježimo i najveće pomake konstrukcije.

Graf 3 prikazuje nam maksimalne pomake konstrukcije za različita vršna ubrzanja, pa tako možemo primijetiti da je pri manjim ubrzanjima red veličine pomaka do 5 cm. Za vršna ubrzanja $a_g=1.0$ i 1.5 m/s^2 maksimalan pomak iznosi 8 cm, a daljnjim povećanjem ubrzanja pomaci gotovo linearno rastu. Maksimalan pomak iznosi oko 23 cm, a bilježimo ga za vršno ubrzanje $a_g=3.0 \text{ m/s}^2$.



Graf 3 / Maksimalni pomaci za različita vršna ubrzanja za potres South Iceland

Na *Grafu 4* prikazana je usporedba maksimalnih pomaka za različita vršna ubrzanja za sva tri promatrana potresa iz kojeg je vidljivo da za potres Petrovac, iako imamo znatno manja vršna ubrzanja, bilježimo daleko najveće pomake konstrukcije. Campano Lucano i South Iceland promatrali smo za ista vršna ubrzanja ali veće pomake generira South Iceland.



Graf 4 / Maksimalni pomaci za različita vršna ubrzanja za sva tri potresa

7. ZAKLJUČAK

Diplomskim radom analizirala se seizmička otpornost zapadnog pročelja zvonika katedrale Svetog Dujma u Splitu pomoću kombinirane metode konačno – diskretnih elemenata. Za analizu su se koristili zapisi o maksimalnim horizontalnim i vertikalnim ubrzanjima tri povijesna potresa: Campano Lucano, Petrovac i South Iceland.

Promatrajući pomake konstrukcije za zadana vršna ubrzanja, vidljivo je kako za potres Petrovac imamo najveće pomake iako su analizirana vršna ubrzanja znatno manja od ubrzanja analiziranih za preostala dva potresa. Već pri malim vršnim ubrzanjima dolazi do kolapsa konstrukcije, pa je lako zaključiti da je za zvonik katedrale Svetog Dujma, najrazorniji potres upravo Petrovac.

Iako i za potrese Campano Lucano i South Iceland bilježimo urušavanja uglavnom gornjeg dijela konstrukcije, važno je primijetiti da do toga dolazi pri znatno većim vršnim ubrzanjima. Pri vršnim ubrzanjima istim kao za potres u Petrovcu ne dolazi do toliko ekstremnih pomaka, a oštećenja konstrukcije iako postoje ne dovode do gubitka stabilnosti.

Kombinirana metoda konačno – diskretnih elemenata omogućuje nam precizno predviđanje ponašanja konstrukcije za različita potresna djelovanja, te simulaciju nastajanja i širenja pukotina. Ipak, zbog velikog rasapa rezultata između pojedinih zapisa potresa, važno je u obzir uzeti što više zapisa kako bi predviđanja bila što pouzdanija. Prema EC8 potrebno je uzeti u obzir minimalno tri potresa i za mjerodavno ubrzanje uzeti ono najmanje koje uzrokuje kolaps, ili srednju vrijednost od barem sedam potresa.

8. LITERATURA

- [1] Babić, I. : Zapažanja o zvoniku splitske katedrale; Vjesnik za arheologiju i povijest dalmatinsku, 2007
- [2] Hauser, A. : Zvonik sv. Duje s mjerama; Arhitektonski snimak postojećeg stanja s kraja 19. stoljeća u mjerilu 1:40
- [3] Mateljan, A. : Splitska katedrala: zvonik, krstionica, riznica: povijest i umjetnost u duhu kršćanske vjere, 2024
- [4] Munjiza A. : The combined finite-discrete element method, John Wiley & Sons, 2004
- [5] Munjiza, A. : Zapisi s predavanja iz kolegija Osnove simulacijskog inženjerstva; Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2024
- [6] Nikolić, Ž. : Zapisi s predavanja iz kolegija Dinamika konstrukcija i potresno inženjerstvo; Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2024
- [7] Smoljanović, H. : Doktorski rad, Seizmička analiza zidanih konstrukcija metodom konačno-diskretnih elemenata; Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije; Split 2013
- [8] Smoljanović, H., Živaljić, N., Nikolić, Ž., Pregled metoda za modeliranje povijesnih zidanih konstrukcija, Građevinar, 2013
- [9] Trosković, T., Mirošević, K. : Brački kamen – povijest, eksploatacija i primjena. Znanstvena biblioteka, 2008
- [10] Živaljić, N., Metoda konačno-diskretnih elemenata za seizmičku 2D analizu AB konstrukcija, doktorska disertacija, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2012
- [11] <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>