

# Seizmička analiza zidanog srednjovjekovnog obrambenog tornja Dona u Italji

---

Atir, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*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:123:255857>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-17**



*Repository / Repozitorij:*

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



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

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

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marija Atir**

**Split, 2022.**

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

**Marija Atir**

**Seizmička analiza zidanog  
srednjovjekovnog obrambenog tornja  
Donà u Italiji**

**Diplomski rad**

**Split, 2022.**

# **Seizmička analiza zidanog srednjovjekovnog obrambenog tornja Donà u Italiji**

## ***Sažetak:***

U ovom radu prikazana je seizmička analiza zidanog tornja primjenom metode konačno-diskretnih elemenata. Toranj je izložen djelovanju linearno rastućeg horizontalnog ubrzanja podloge koristeći zapise tri realna potresa i četiri rubna uvjeta. Potresna otpornost tornja je analizirana na temelju dobivenih rezultata numeričke analize za svaki tip potresa i rubnog uvjeta konstrukcije.

## ***Ključne riječi:***

Kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata, zidani toranj, dinamičko opterećenje, seizmička analiza

# **Seismic analysis of the medieval military defence and sighting masonry tower Donà in Italy**

## ***Abstract:***

This paper presents the seismic analysis of a masonry tower using the finite-discrete element method. The tower was exposed to linearly increasing horizontal base acceleration using records of three real earthquakes. The seismic resistance of the tower was analysed based on the obtained results for each earthquake and type of the support system.

## ***Keywords:***

Combined finite-discrete element method, masonry tower, dynamic load, seismic analysis

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

**KANDIDAT: Marija Atir**

**MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083219590**

**KATEDRA: Katedra za teoriju konstrukcija**

**PREDMET: Dinamika konstrukcija i potresno inženjerstvo**

### **ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

**Tema: Seizmička analiza zidanog srednjovjekovnog obrambenog tornja Donà u Italiji**

Opis zadatka: Na temelju zadane geometrije modela zidanog srednjovjekovnog obrambenog tornja Donà u Italiji potrebno je napraviti analizu seizmičke otpornosti predmetne građevine koristeći kombiniranu metodu konačnih i diskretnih elemenata (FEM/DEM). Seizmičku analizu provesti za zapise tri potresa na lokaciji: Campano Lucano, Petrovac i South Iceland. Analizirati četiri različita rubna uvjeta: upeti u krutoj podlozi, slobodnostojeći na elastičnoj podlozi, slobodnostojeći na krutoj podlozi i ukopan u elastičnoj podlozi. Potrebno je provesti analizu dobivenih rezultata i donijeti zaključke o vrsti oslanjanja tornja na podlogu.

U Splitu, ožujak 2022.

Voditelji Diplomskog rada:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Balić

Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Smoljanović

Predsjednik Povjerenstva

za završne i diplomske ispite:

Izv. prof. dr. sc. Ivo Andrić

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata.....	2
2. Proračunski model tornja i geometrijska svojstva materijala .....	6
2.1. Geometrija i diskretizacija tornja .....	6
2.2. Ubrzanje podloge u obliku potresne pobude.....	8
2.3. Geometrijska svojstva materijala .....	9
3. Analiza ponašanja tornja uslijed djelovanja tri različita potresa .....	10
3.1. Djelovanja potresa Campano Lucano na toranj upeti u krutoj podlozi.....	10
3.2. Djelovanja potresa Campano Lucano na toranj slobodno stojeći na elastičnoj podlozi	15
3.3. Djelovanje potresa Campano Lucano na toranj slobodno stojeći na krutoj podlozi.	20
3.4. Djelovanje potresa Campano Lucano na toranj ukopan u elastičnoj podlozi .....	25
3.5. Djelovanja potresa Petrovac na toranj upeti u krutoj podlozi.....	29
3.6. Djelovanja potresa Petrovac na toranj slobodno stojeći na elastičnoj podlozi .....	32
3.7. Djelovanje potresa Petrovac na toranj slobodno stojeći na krutoj podlozi .....	35
3.8. Djelovanje potresa Petrovac na toranj ukopani u elastičnoj podlozi .....	38
3.9. Djelovanja potresa South Island na toranj upeti u krutoj podlozi.....	41
3.10. Djelovanja potresa South Island na toranj slobodno stojeći na elastičnoj podlozi ...	45
3.11. Djelovanje potresa South Island na toranj slobodno stojeći na krutoj podlozi .....	50
3.12. Djelovanje potresa South Island na ukopani toranj u elastičnoj podlozi .....	54
4. Analiza rezultata .....	58
4.1. Zaključak.....	65
5. Literatura.....	66

*Zahvaljujem se mentoru izv. prof.dr.sc.. Ivanu Baliću i komentoru izv. prof. dr. sc. Hrvoju Smoljanoviću na trudu, razumijevanju, pomoći i vodstvu prilikom izrade ovog diplomskog rada.*

*Zahvaljujem se svojim roditeljima, obitelji i posebno baki na pružanju bezuvjetne podrške i motivaciji tijekom cijelog studiranja.*

*Također, hvala svim prijateljima koji su mi učinili ovaj studentski život bogatijim.*

# 1. Uvod

Razvojem civilizacije, arhitekti i građevinari koristili su zidanje kao osnovnu tehniku građenja zbog trajnosti, raznovrsnosti i estetike samih konstrukcija. Egipatske piramide, rimski Koloseum, indijski Taj Mahal - tek su neke od svjetski značajnih primjera zidanih konstrukcija. Takve konstrukcije čine kulturno dobro te ih je potrebno očuvati.

Za očuvanje povijesnih zidanih konstrukcija potrebno je poznavati njihovo mehaničko ponašanje te ponašanje u uvjetima seizmičkog opterećenja - dominantnog opterećenja u seizmičkim područjima. Upravo zbog toga je važna numerička analiza.

Općenito, postojeće zidane konstrukcije predstavljaju visoku osjetljivost na seizmičku pobudu. Seizmička procjena postojećih zidanih konstrukcija je izuzetno složena i ovisna o većem broju parametara.

Tijekom godina razvijene su brojne numeričke metode za analizu zidanih konstrukcija koje se razlikuju po razini točnosti, količini ulaznih podataka, očekivanim rezultatima, efektima koji se mogu javiti u konstrukciji za određenu pobudu te vremenu trajanja proračuna. [1, 2]

U numeričkom modeliranju zidanih konstrukcija postoje dva osnovna modela, a to su: metoda konačnih elemenata i metoda diskretnih elemenata.

Metoda konačnih elemenata je najčešće korištena metoda za modeliranje mehanike kontinuuma koja je našla svoju primjenu i u analizi zidanih konstrukcija. Prema toj metodi, konstrukcija se simulira kao ortotropni kontinuum, a s obzirom na stupanj jednostavnosti razlikuju se mikro, makro ili pojednostavljeno mikro modeliranje. Prema makro modeliranju, koji je ujedno i najzastupljeniji pristup u praksi, struktura se promatra kao ortotropni kontinuum, a konstitutivni odnosi se opisuju uz pomoć eksperimenata i tehnika homogenizacije. Veliki nedostatak ovakvog pristupa koji se temelji na kontinuumu je njegova nesposobnost opisivanja pojave velikih diskontinuiteta koji nastaju tijekom kolapsa te nemogućnost simuliranja mehanike interakcija između više blokova što je važno pri analizi konstrukcija izloženih intenzivnom potresnom opterećenju kao i analizi progresivnog loma konstrukcije. [3]

Metodom diskretnih elemenata mogu se opisati fenomeni temeljeni na diskontinuumu, uključujući gibanje i interakciju pojedinih čestica. Međutim, nedostatak ovog modela je u tome što nema mogućnost opisivanja stanja deformacije i naprezanja unutar diskretnih elemenata što je važno pri analizi pojave i razvoja pukotina. U određenim situacijama ta dva fenomena mogu nastati istovremeno, stoga je bio potreban razvoj numeričkog alata koji bi obuhvatio prednosti



objiju metode. Stoga su razvijeni numerički modeli temeljeni na kombiniranoj metodi konačno-diskretnih elemenata za analizu takvih problema gdje se prati mehanička interakcija između nekoliko deformabilnih tijela. [3]

U ovom radu prikazana je primjena kombinirane metode konačno-diskretnih elemenata u analizi potresne otpornosti tornja izloženog monotono rastućem horizontalnom ubrzanju tla koristeći zapise tri stvarna potresa te odgovora konstrukcije na seizmičku pobudu. Toranj je također analiziran na različite vrste rubnih uvjeta: upeti u krutoj podlozi, slobodno stojeći na elastičnoj podlozi, slobodno stojeći na krutoj podlozi i ukopani u elastičnoj podlozi u svrhu usporedbe te dobivanja najoptimalnijeg rješenja u praksi. Budući da svaka metoda ima svoje područje primjene, odabrana je kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata koja obuhvaća prednosti obje spomenute metode- metoda konačnih elemenata i metoda diskretnih elemenata te je najprikladnija za ovu vrstu konstrukcije.

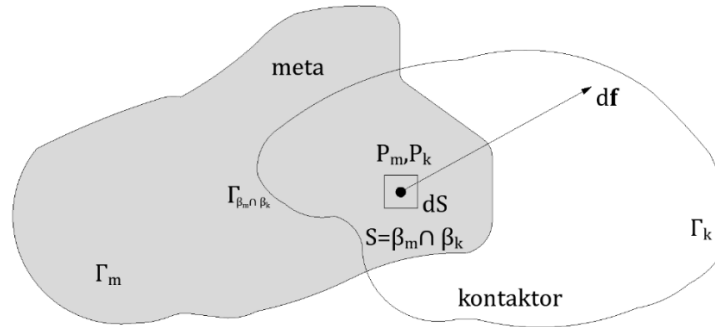
### **1.1. Kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata**

Kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata smatra se najsuvremenijom tehnikom za analizu zidanih konstrukcija koristeći pristup spojnih elemenata za opisivanje ponašanja loma pojedinih blokova predstavljenih jednim diskretnim elementom. Stoga, u kombiniranim simulacijama konačno-diskretnih elemenata, broj diskretnih elemenata može varirati tijekom procesa potpunog loma konstrukcije. Budući da kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata uključuje algoritme za detekciju kontakta i kontaktne interakcije, ova tehnika je sposobna modelirati mehaničku interakciju nekoliko tijela.

U kombiniranoj metodi konačno-diskretnih elemenata, svaki diskretni element koji predstavlja kameni blok je diskretiziran pomoću mreže konačnih elementa kako bi se opisala deformabilnost blokova. Glavni koraci kombinirane metode konačno-diskretnih elemenata uključuje detekciju kontakta, kontaktne interakcije, algoritme loma i pukotina, proračun deformacija te vremensku integraciju jednadžbi. Ova metoda implementirana je za simulaciju prijelaza s kontinuuma na diskontinuum - što može dovesti do loma, pukotina i potpunog sloma konstrukcije. Osim toga, omogućuje nam detaljnu simulaciju urušavanja konstrukcije što može predstavljati važnu ulogu u projektiranju konstrukcija u ekstremnim uvjetima opterećenja, kao što su potresi. Pri tome, može se odrediti nosivost konstrukcije te identificirati progresivni načini urušavanja. [3]

Metoda se zasniva na simulaciji konstrukcije s velikim brojem elemenata koji su modelirani s po jednim diskretnim elementom. Svaki pojedini diskretni element u interakciji

je s njemu bliskim diskretnim elementima i modeliran je vlastitom mrežom konačnih elemenata čime je omogućena njegova deformabilnost. Kontakne sile javljaju se između dva diskretna elementa koja se nađu u kontaktu od kojih se jedan proglašava kontaktorom, a drugi metom. [4]



Slika 1 Kontaktna diferencijalna sila u okolini točaka  $P_m$  i  $P_k$  [4]

Kontaktori i meta, kada su u kontaktu, preklapaju se preko površine  $S$  koja je omeđena vanjskim rubom  $\Gamma_{\beta_m \cap \beta_k}$ , a ukupna kontaktna diferencijalna sila glasi

$$d\mathbf{f}_k = [\text{grad}\varphi_k(P_m) - \text{grad}\varphi_k(P_k)]dS \quad (1)$$

gdje su  $P_m$  i  $P_k$  točke u kojima se preklapaju meta i kontaktor, a  $\varphi$  je odgovarajuća funkcija potencijala. Ukupna kontaktna sila se dobije nakon integracije preko cijele preklapajuće površine  $S$

$$\mathbf{f}_k = \int_{S=\beta_m \cap \beta_k} [\text{grad}\varphi_k - \text{grad}\varphi_k]dS \quad (2)$$

Kao dio algoritma kontaktnih sila, Coulomb-ov model suhog trenja implementiran je za posmične sile u obliku

$$\mathbf{f}_t = -k_t \boldsymbol{\delta}_t \quad (3)$$

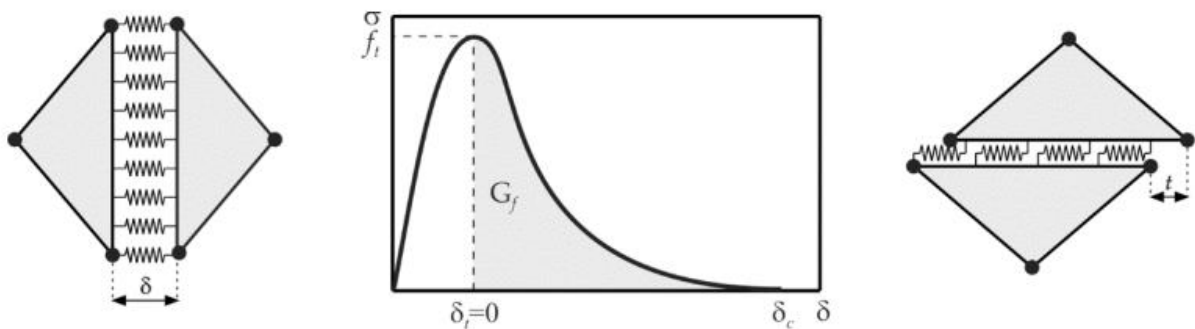
gdje je  $f_t$  tangencijalna elastična kontaktna sile,  $k_t$  je *penalty* koeficijent za trenje, a  $\boldsymbol{\delta}$  je tangencijalni vektor pomaka između dva elementa.

U slučaju da je  $f_t$  veća od maksimalne sile trenja definirana Coulomb-ovim zakonom  $|f_t| > \mu|f_n|$  tada elementi klize jedan duž drugog dok se posmična sila između njih definira uz pomoć normalne sile  $f_n$  prema

$$f_t = -\mu f_n \quad (4)$$

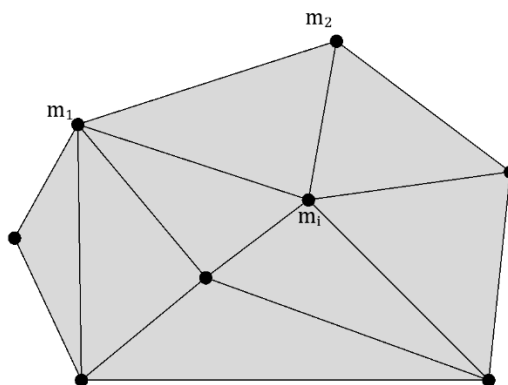
gdje je  $\mu$  koeficijent trenja.

Prijelaz iz kontinuuma u diskontinuum nastaje pojavom procesa loma i fragmentacije. Promatranje nastajanja pukotina te njihovo širenje zanimljivo je jer se na taj način određuje izdržljivost konstrukcije na vanjska djelovanja. Model pukotine u okviru kombinirane metode konačno-diskretnih elemenata razvijen je za simulaciju nastajanja i širenja pukotine u materijalu u vlaku i posmiku što je postignuto modelima opruga na rubu konačnog elementa kao što je prikazano na slici 5a i 5c. Model materijala temelji se na aproksimaciji eksperimentalnih krivulja naprezanje-deformacija kao što je prikazano na slici 5b.



Slika 2 a) model normalne opruge, b) model materijala, c) model posmične opruge [4,5]

Položaj i oblik svakog diskretnog elementa u ravnini u kombiniranoj metodi konačno-diskretnih elemenata opisan je s trenutnim koordinatama čvorova konačnih elemenata. Za izračun trenutne koordinate čvorova treba se uzeti u obzir masa sustava koja je koncentrirana u čvorovima konačnih elemenata što vodi prema modelu koncentriranih masa.



Slika 3 Model koncentriranih masa [4]

Provedba vremenske integracije jednačbe gibanja pojedinog čvora u vremenu izvedena je eksplicitnim putem koristeći metodu konačnih razlika koja je uvjetno stabilna i čija je stabilnost i točnost ovisna o izboru vremenskog koraka. Osnovna shema metode konačnih razlika prikazana je u obliku

$$\mathbf{v}_{i,t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{i,t-\Delta t/2} + \Delta t \mathbf{f}_{i,t}/m_i \quad (5)$$

$$\mathbf{x}_{i,t+\Delta t} = \mathbf{x}_{i,t} + \Delta t \mathbf{v}_{i,t+\Delta t/2} \quad (6)$$

Gdje su  $\mathbf{x}_i$ ,  $\mathbf{v}_i$ ,  $\mathbf{f}_i$ ,  $m_i$  redom vektor položaja, vektor brzine, vektor ukupne sile i masa pojedinog čvora, a  $\Delta t$  vremenski korak.

## 2. Proračunski model tornja i geometrijska svojstva materijala

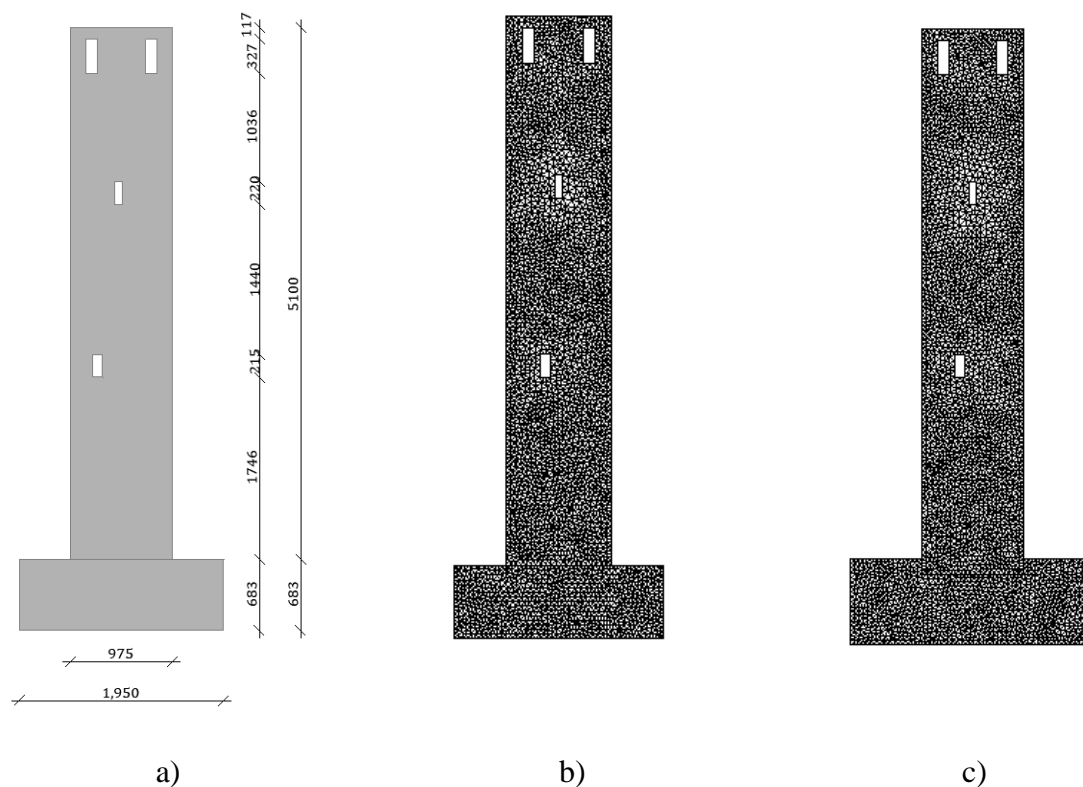
### 2.1. Geometrija i diskretizacija tornja

Geometrija tornja, uz manje izmjene, preuzeta je iz literature [6]. Za potrebe ovog rada geometrija tornja djelomično je izmijenjena u odnosu na postojeću konstrukciju na način da su visine zidova tornja jednake, a manji otvori su zanemareni.

Diskretizacija tornja mrežom konačnih elemenata provedena je uz pomoć programa Gmsh [7] i prikazana je na slikama 4b) i 4c).

Analize tornja su izvršene za četiri rubna uvjeta: 1) upeti u krutoj podlozi; 2) slobodno stojeći na elastičnoj podlozi; 3) slobodno stojeći na krutoj podlozi; 4) ukopan u elastičnoj podlozi za svaki pojedini potres (Campano Lucano, Petrovac i South Island).

Geometrija numeričkog modela tornja sastoji se od trokutastih tročvornih elemenata i opisana je sa 6496 trokutnih konačnih elemenata, gdje svaki element ima 3 čvora sa 2 stupnja slobode u čvoru, što čini ukupno 3467 čvora za rubne uvjete: 1) upeti u krutoj podlozi, 2) slobodno stojeći na elastičnoj podlozi i 3) slobodno stojeći na krutoj podlozi što je prikazano na slici 4b). Za rubni uvjet 4) ukopani u elastičnoj podlozi: broj konačnih elemenata iznosi 6966, a broj čvorova 3719, što je prikazano na slici 4c).

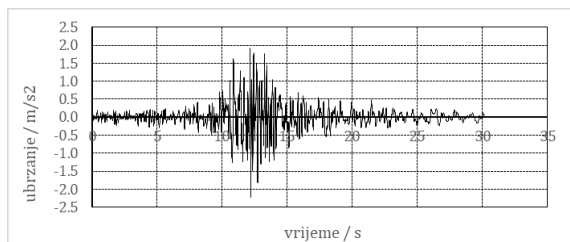


Slika 4 Prikaz tornja: a) geometrija; b) Mreža konačnih elemenata za rubne uvjete: upeti u krutu podlogu, slobodno stojeći na elastičnoj podlozi, slobodno stojeći na krutoj podlozi; c) mreža konačnih elemenata za rubni uvjet: ukopani u elastičnoj podlozi

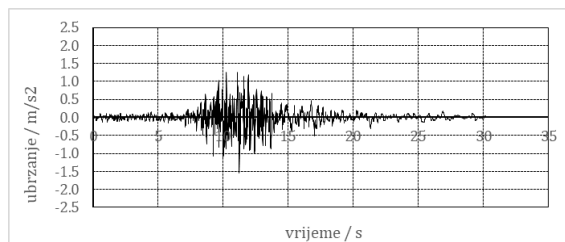
Za potrebe simulacije pojave i širenja pukotina, kontaktni elementi su implementirani unutar mreže konačnih elemenata s mogućnošću vlačnog i posmičnog loma [5]. Debljina konačnih elemenata tla iznosi 19.55 m, debljina konačnih elemenata na rubovima tornja iznosi 9.55 m što simulira bočne zidove, a debljina središnjih elemenata konačnih elemenata (između bočnih zidova) je 3,9 m.

## 2.2. Ubrzanje podloge u obliku potresne pobude

U numeričkoj analizi, konstrukcija je bila izložena horizontalnom ubrzanju tla koja je zabilježena za vrijeme tri realna potresa: Campano Lucano, Petrovac i South Island. U nastavku su prikazane korištene horizontalne i vertikalne komponente zapisa ubrzanja tla koji su snimljeni za vrijeme potresa.

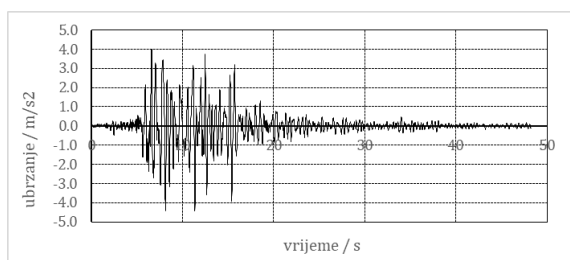


a)

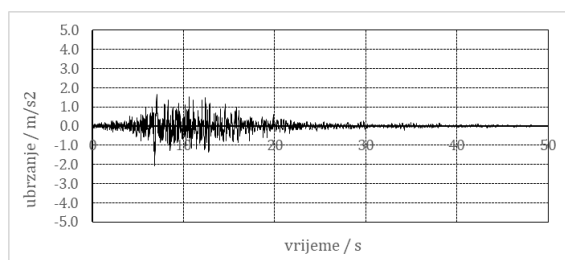


b)

Slika 5 Akcelerogram potresa Campano Lucano: a) horizontalna komponenta; b) vertikalna komponenta

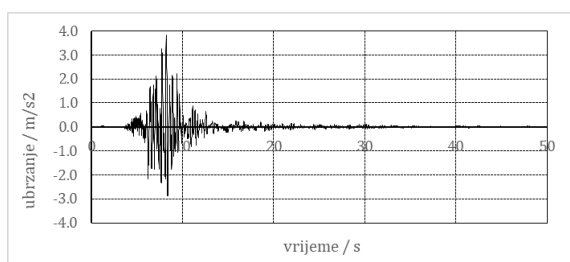


a)

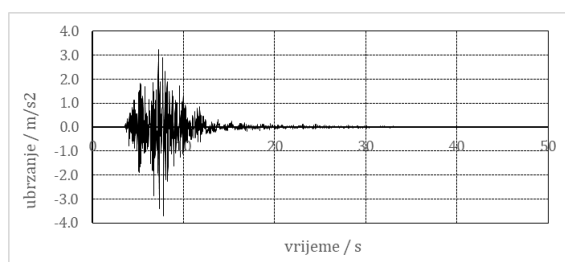


b)

Slika 6 Akcelerogram potresa Petrovac: a) horizontalna komponenta; b) vertikalna komponenta



a)



b)

Slika 7 Akcelerogram potresa South Island: a) horizontalna komponenta; b) vertikalna komponenta

### 2.3. Geometrijska svojstva materijala

U tablici 1 prikazani su parametri materijala koji su korišteni. Svojstva materijala odnose se na stanje s pretpostavljenim svojstvima materijala građevine.

<i>Karakteristike materijala</i>	<i>Konstrukcija</i>	<i>Tlo</i>
<i>Modul elastičnosti, <math>E</math> (MPa)</i>	2250	70
<i>Poissonov koeficijent, <math>\nu</math></i>	0.30	0.20
<i>Vlačna čvrstoća, <math>f_t</math> (MPa)</i>	0.27	-
<i>Posmična čvrstoća, <math>f_s</math> (MPa)</i>	1.08	-
<i>Energija loma u vlaklu <math>G_{f,t}</math> (N/m)</i>	140	-
<i>Energija loma u posmiku <math>G_{f,s}</math> (N/m)</i>	560	-
<i>Gustoća, <math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1800	1800
<i>Koeficijent trenja, <math>\mu</math></i>	0.70	0.70
<i>Prigušenje, <math>\zeta</math></i>	0.20	0.40

Tablica 1 Svojstva materijala

- Tlu nije dana mogućnost pucanja.



### 3. Analiza ponašanja tornja uslijed djelovanja tri različita potresa

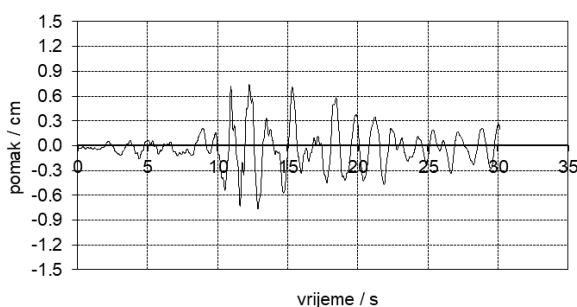
Provedena je analiza tornja izloženog djelovanju potresnog opterećenja pri čemu su korišteni zapisi ubrzanja tla snimljeni za vrijeme potresa u Campano Lucano (Italija) 1980., Petrovcu (Crna Gora) 1979. te Selsundu (South Island) 2000. godine te četiri različita rubna uvjeta: upeti u krutoj podlozi, slobodno stojeći na elastičnoj podlozi, slobodno stojeći na krutoj podlozi i ukopan u elastičnoj podlozi.

U nastavku su prikazani rezultati analize tornja izloženi linearno rastućem horizontalnom ubrzanju podloge. Toranj je izložen horizontalnom monotono rastućem ubrzanju podloge čija se amplituda postepeno povećava do sloma konstrukcije. Prikazane su i simulacije pojave i širenja pukotina te konačni slom konstrukcije pri svakom spomenutom potresu i rubnom uvjetu.

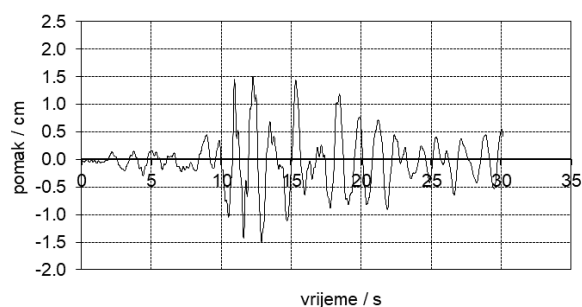
Za analizu je korišten računalni program Y: FEM/DEM COMPUTER PROGRAM [8]

#### 3.1. Djelovanja potresa Campano Lucano na toranj upeti u krutoj podlozi

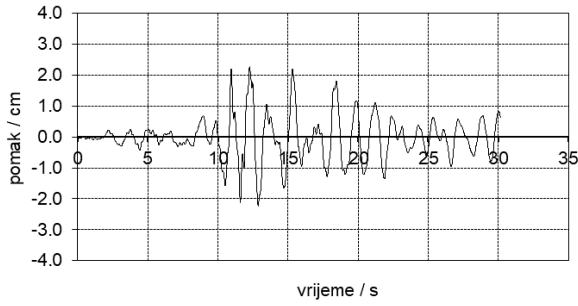
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa Campano Lucano za rubni uvjet tornja: upeti u krutoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



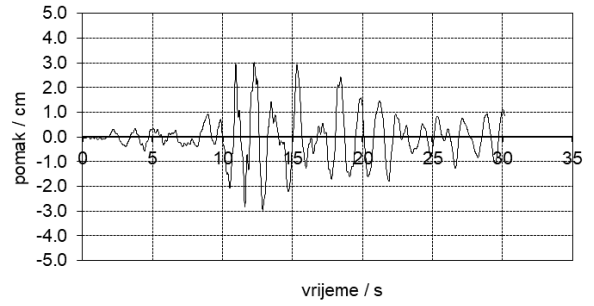
vršno ubrzanje **0.20 g**



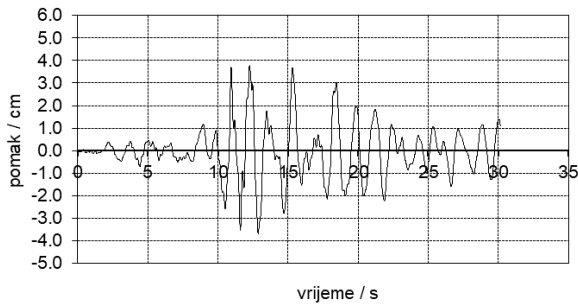
vršno ubrzanje **0.40 g**



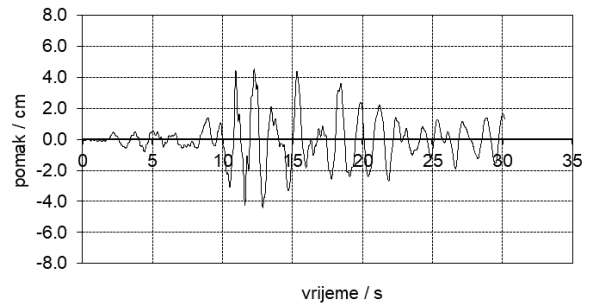
vršno ubrzanje **0.60 g**



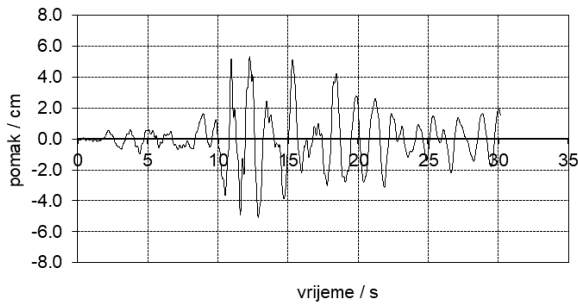
vršno ubrzanje **0.80 g**



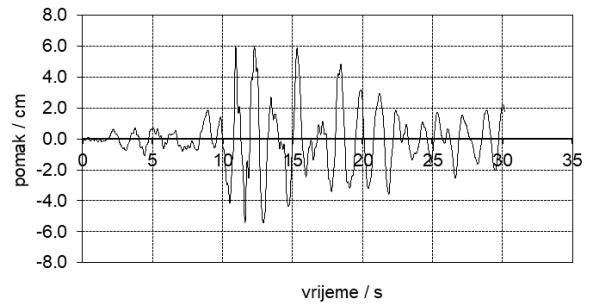
vršno ubrzanje **1.00 g**



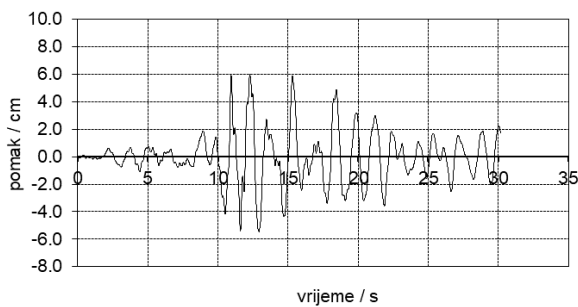
vršno ubrzanje **1.20 g**



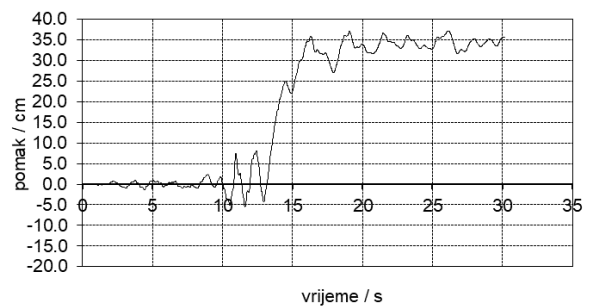
vršno ubrzanje **1.40 g**



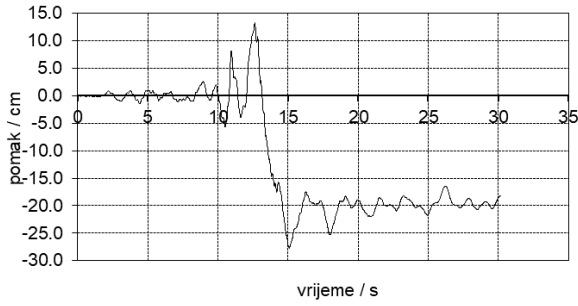
vršno ubrzanje **1.60 g**



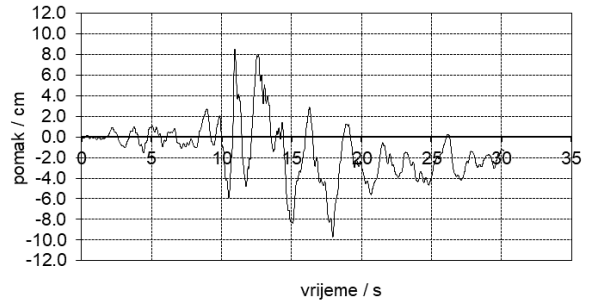
vršno ubrzanje **1.80 g**



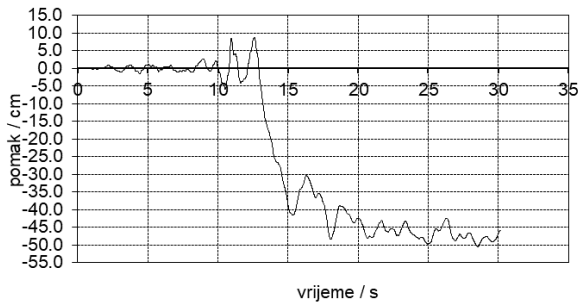
vršno ubrzanje **2.00 g**



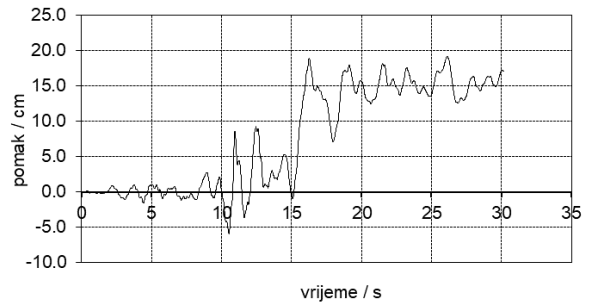
vršno ubrzanje **2.20 g**



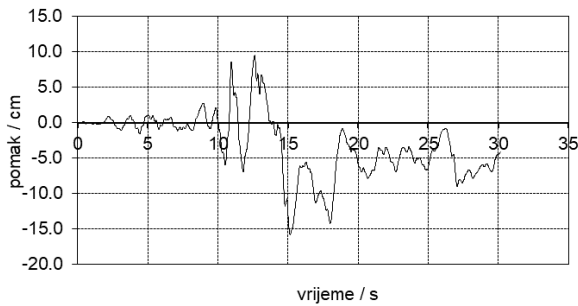
vršno ubrzanje **2.30 g**



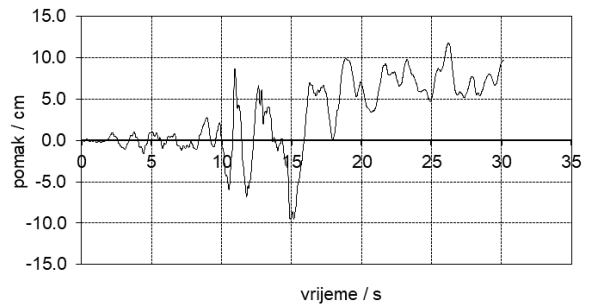
vršno ubrzanje **2.31 g**



vršno ubrzanje **2.32 g**



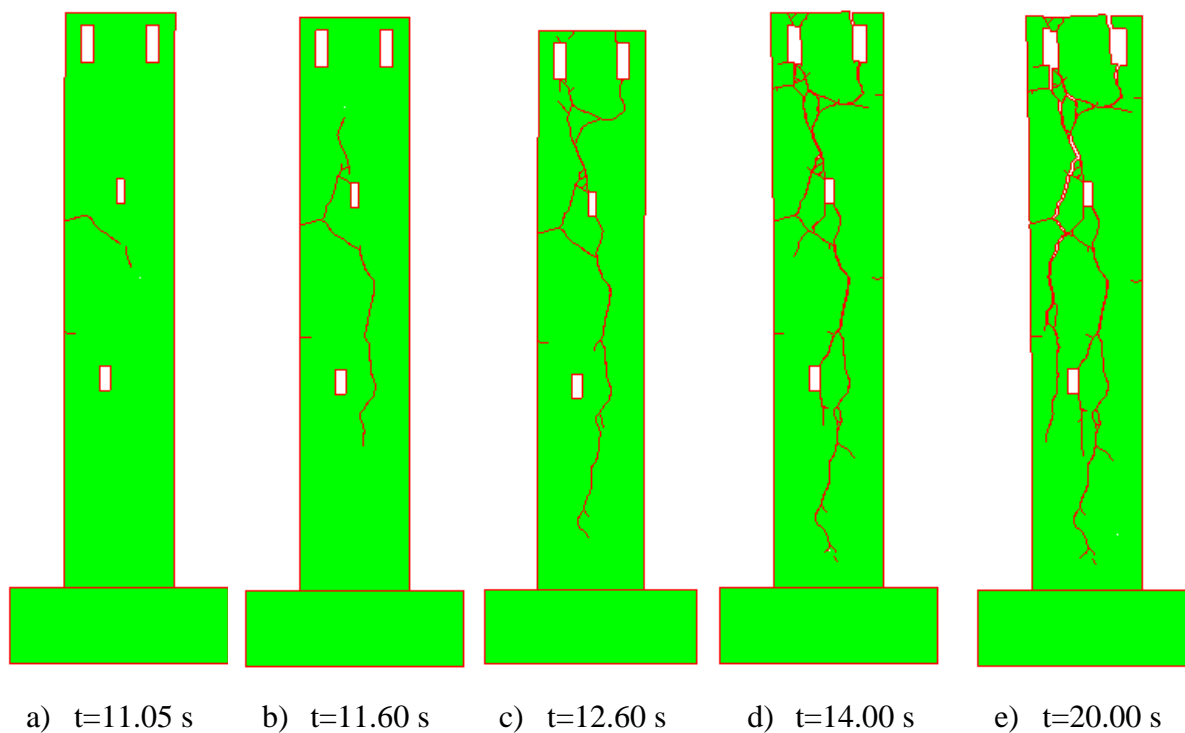
vršno ubrzanje **2.33 g**



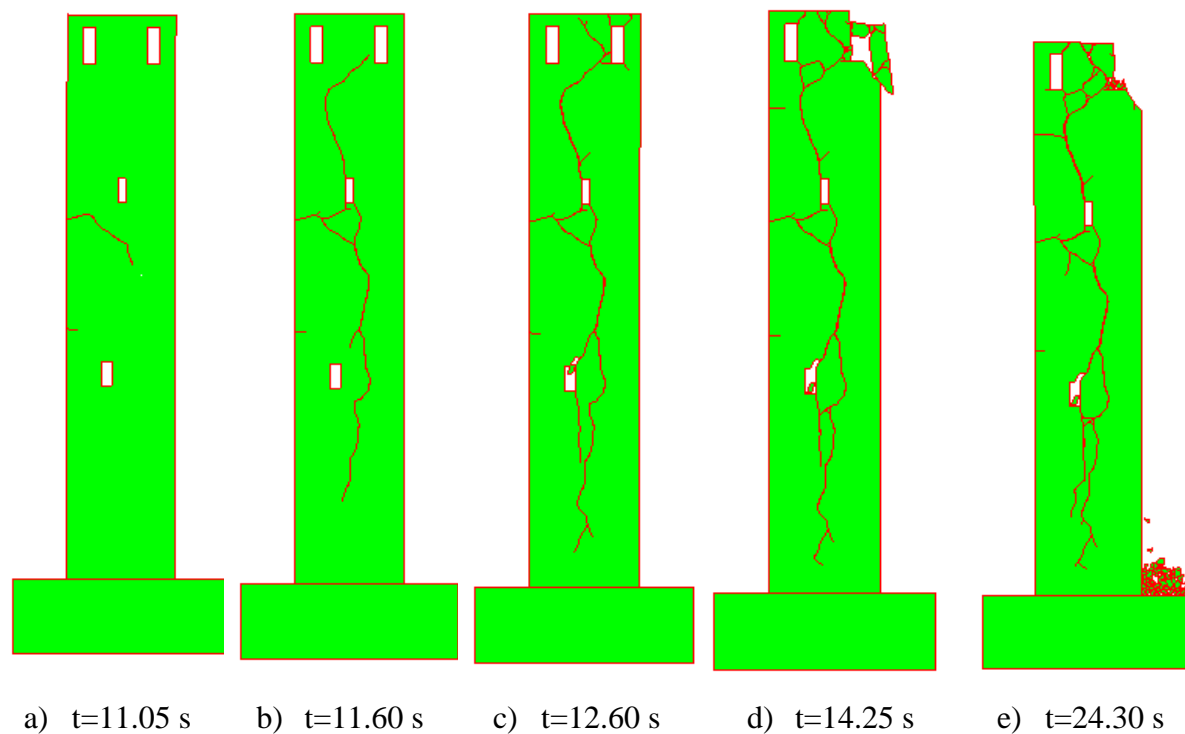
vršno ubrzanje **2.34 g**

## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

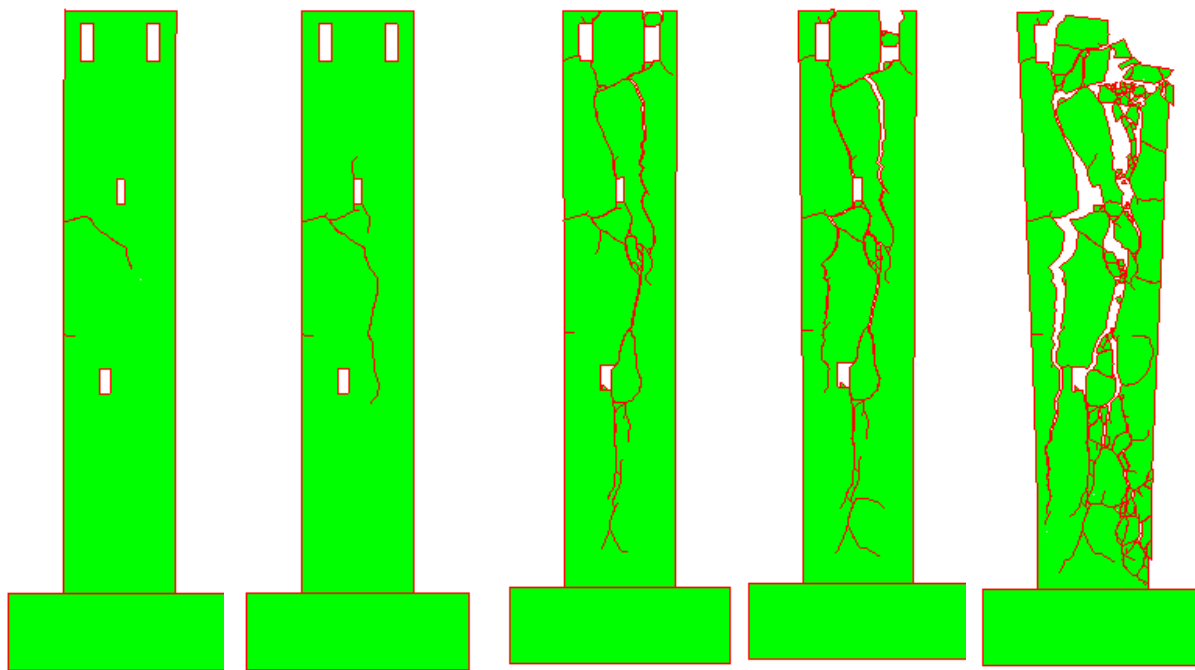
Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres Campano Lucano sa rubnim uvjetom tornja: upeti u krutoj podlozi.



*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 2.31 g*



*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 2.34 g*



a)  $t=11.05$  s

b)  $t=11.35$  s

c)  $t=14.05$  s

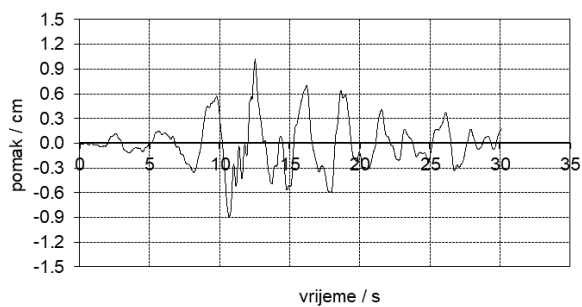
d)  $t=17.10$  s

e)  $t=24.05$  s

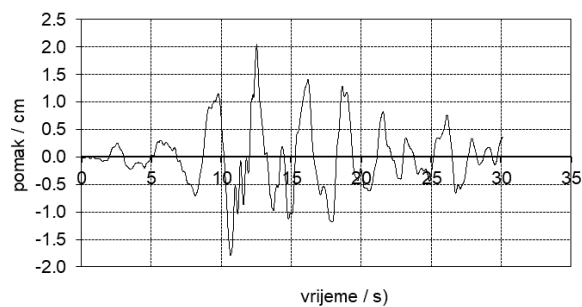
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje 2.35 g*

### 3.2. Djelovanja potresa Campano Lucano na toranj slobodno stojeći na elastičnoj podlozi

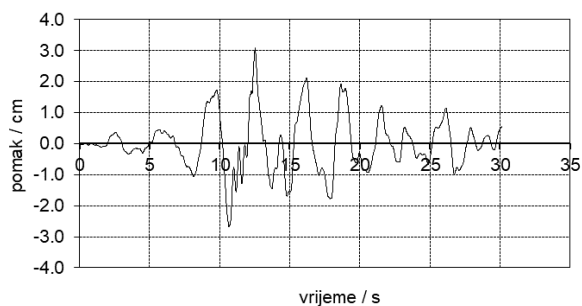
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa Campano Lucano za rubni uvjet tornja: slobodno stojeći na elastičnoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



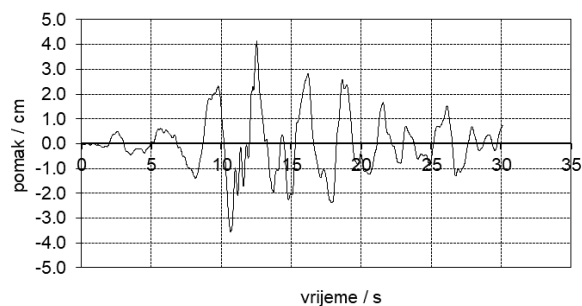
vršno ubrzanje **0.20 g**



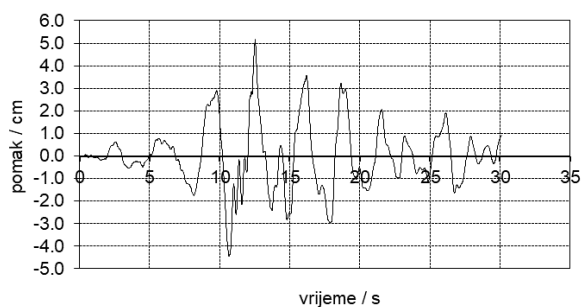
vršno ubrzanje **0.40 g**



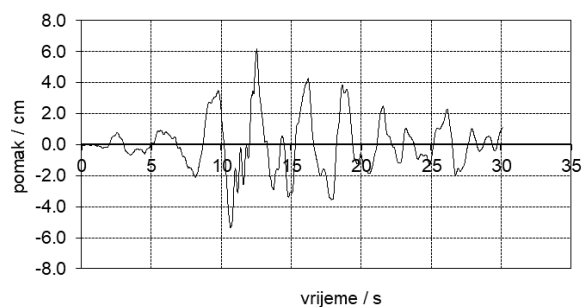
vršno ubrzanje **0.60 g**



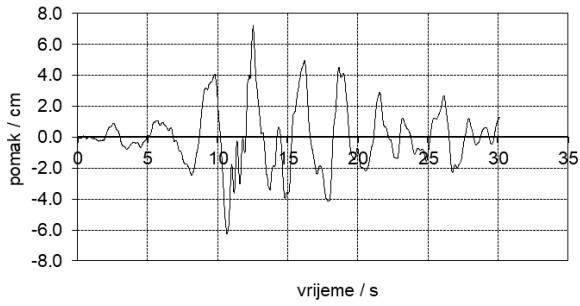
vršno ubrzanje **0.80 g**



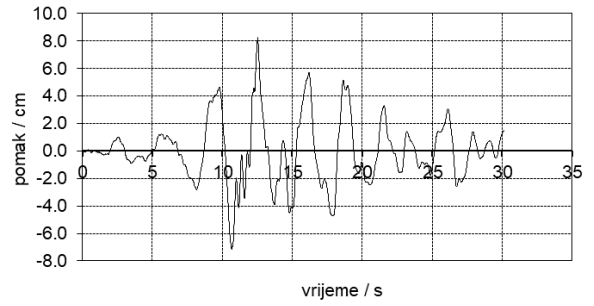
vršno ubrzanje **1.00 g**



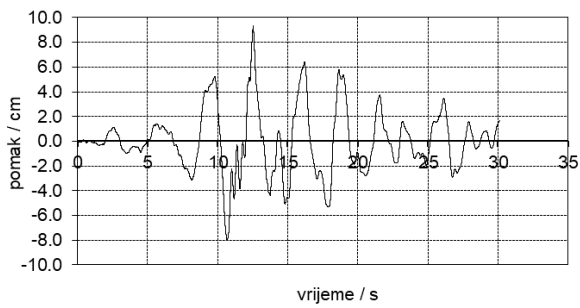
vršno ubrzanje **1.20 g**



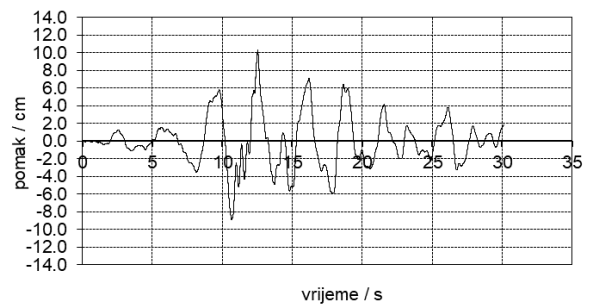
vršno ubrzanje **1.40 g**



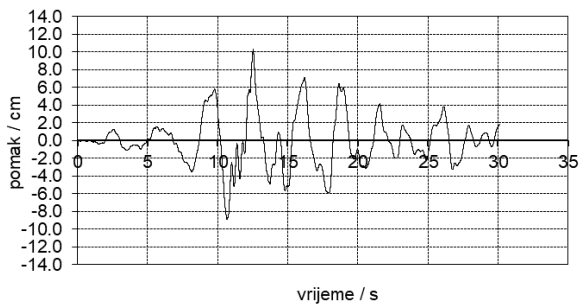
vršno ubrzanje **1.60 g**



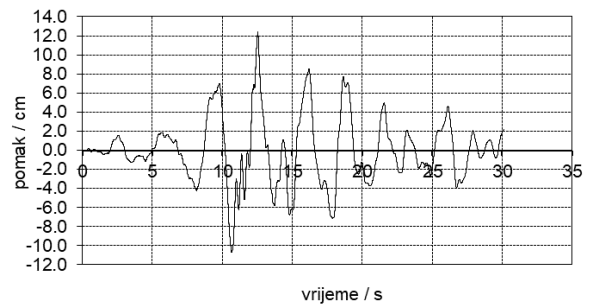
vršno ubrzanje **1.80 g**



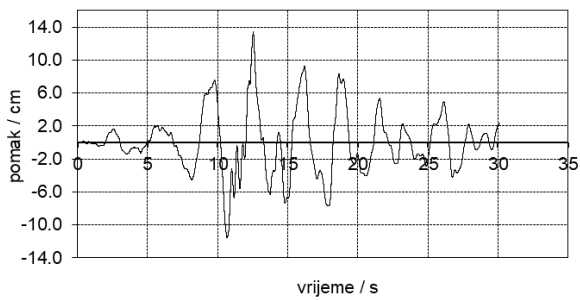
vršno ubrzanje **2.00 g**



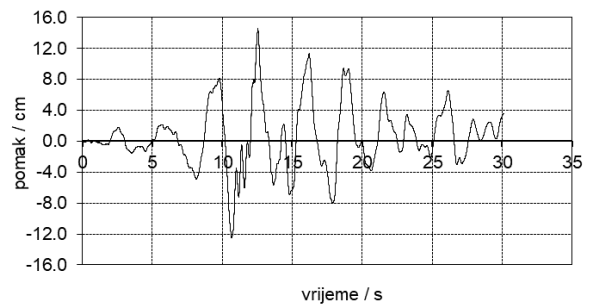
vršno ubrzanje **2.20 g**



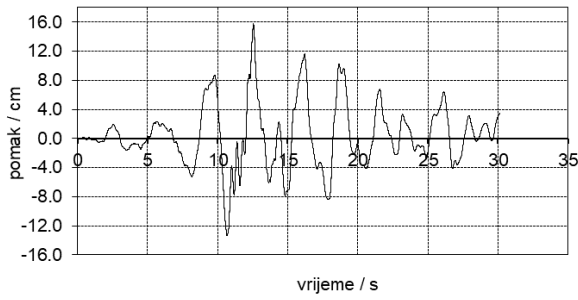
vršno ubrzanje **2.40 g**



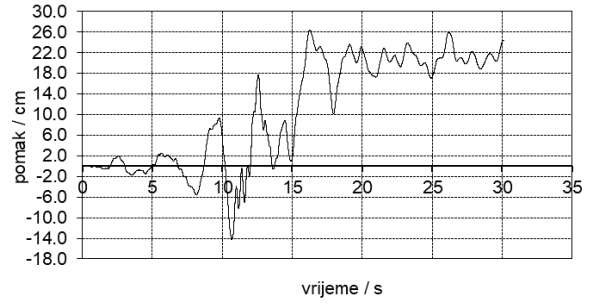
vršno ubrzanje **2.60 g**



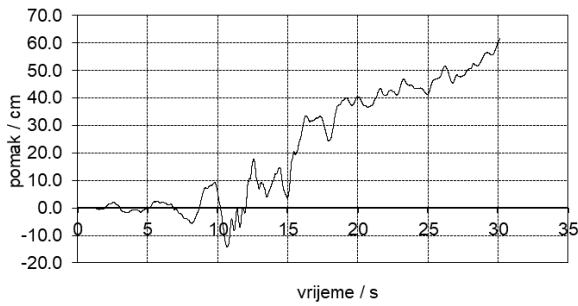
vršno ubrzanje **2.80 g**



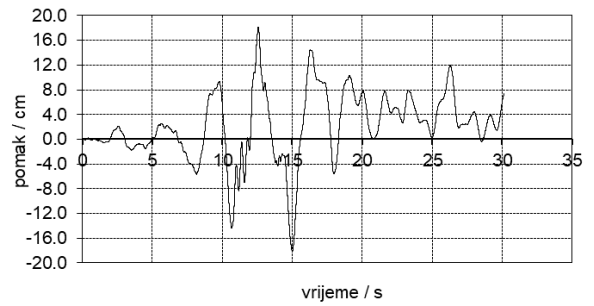
vršno ubrzanje **3.00 g**



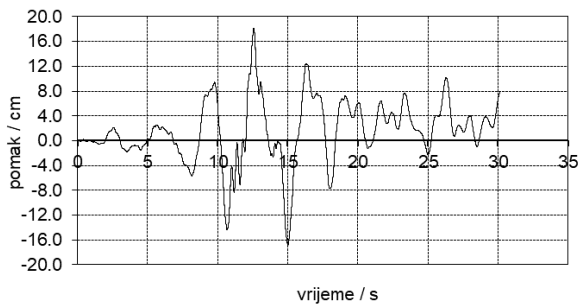
vršno ubrzanje **3.20 g**



vršno ubrzanje **3.21 g**



vršno ubrzanje **3.22 g**

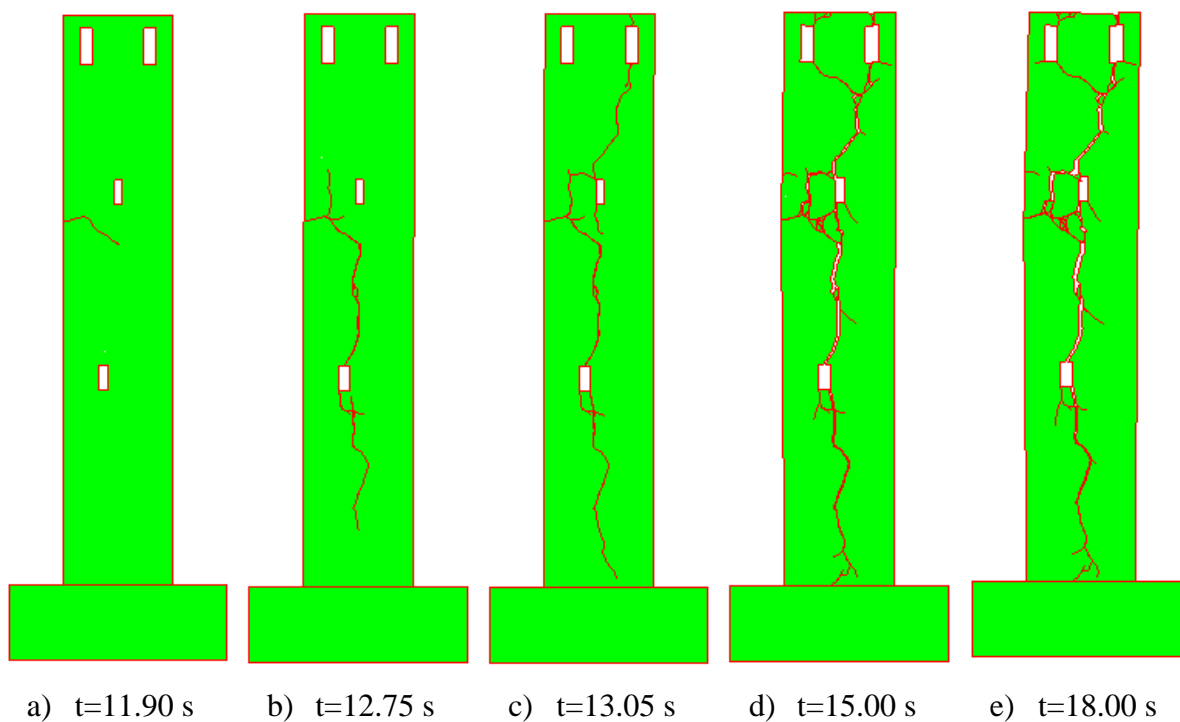


vršno ubrzanje **3.23 g**

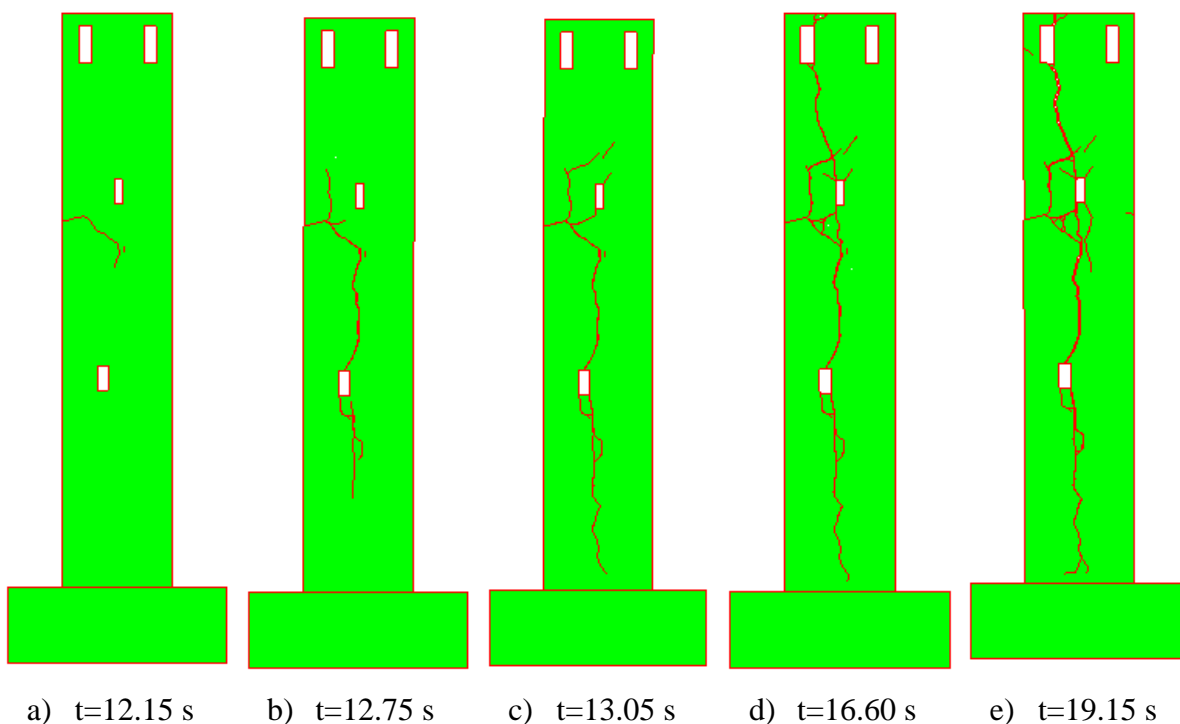


## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

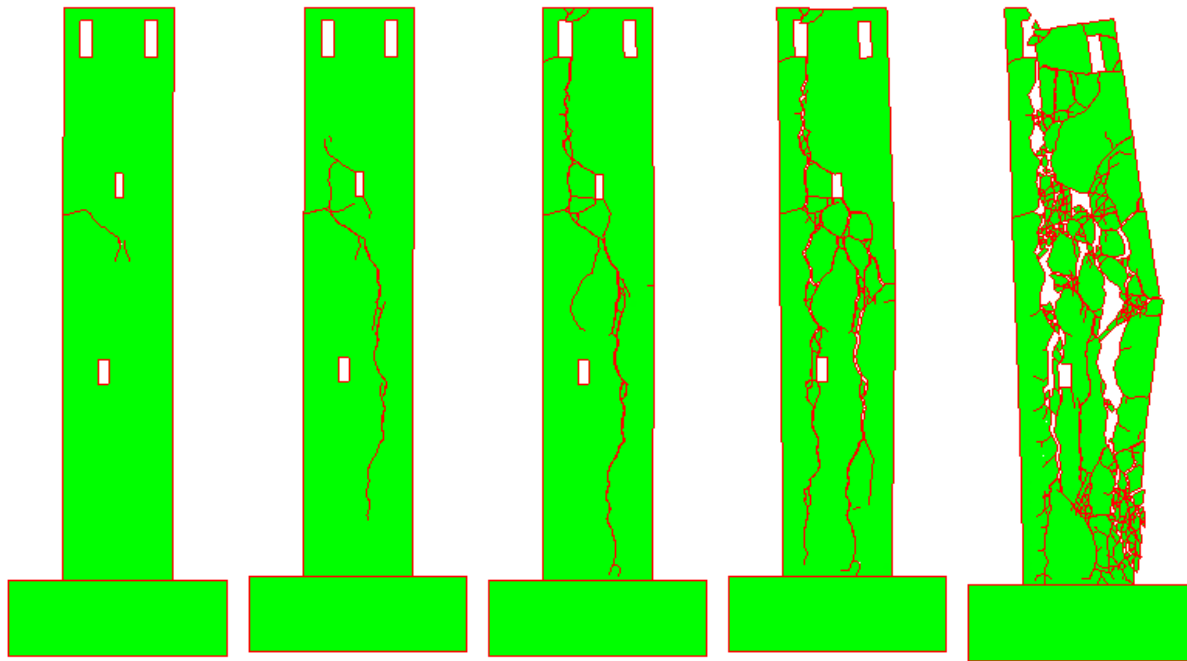
Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres Campano Lucano i rubnim uvjetom tornja: slobodno stojeći na elastičnoj podlozi.



*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje 3.21 g*



*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje 3.23 g*



a)  $t=12.25$  s

b)  $t=12.75$  s

c)  $t=13.25$  s

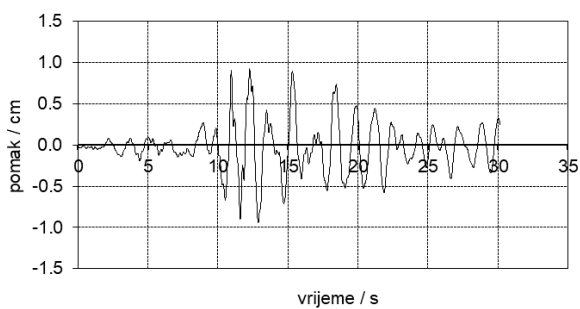
d)  $t=14.80$  s

e)  $t=16.55$  s

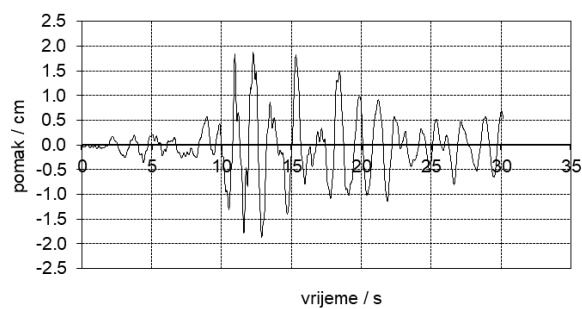
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje 3.24 g*

### 3.3. Djelovanje potresa Campano Lucano na toranj slobodno stojeći na krutoj podlozi

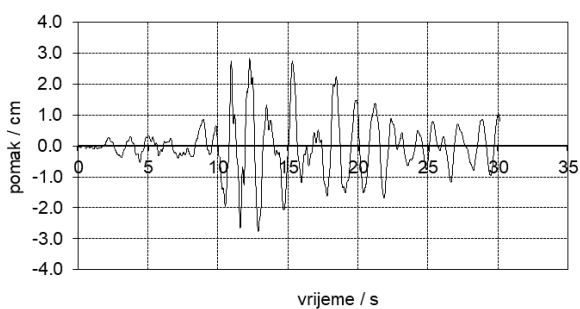
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa Campano Lucano za rubni uvjet tornja: slobodno stojeći na krutoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



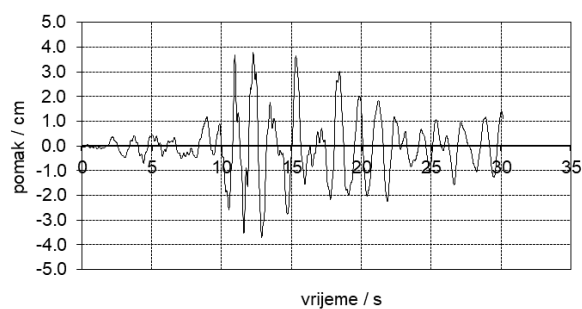
vršno ubrzanje **0.25 g**



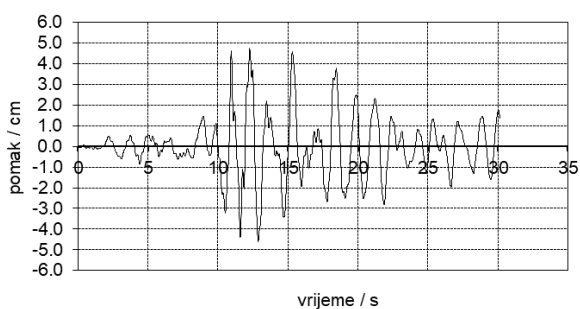
vršno ubrzanje **0.50 g**



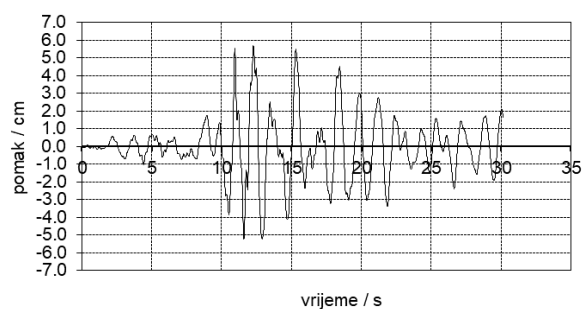
vršno ubrzanje **0.75 g**



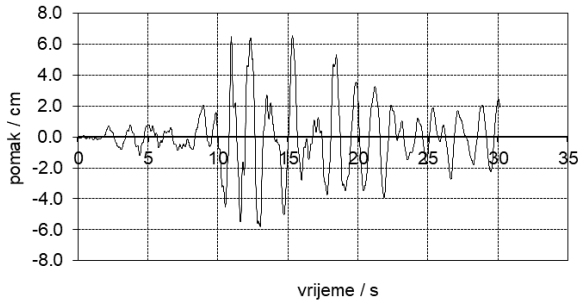
vršno ubrzanje **1.00 g**



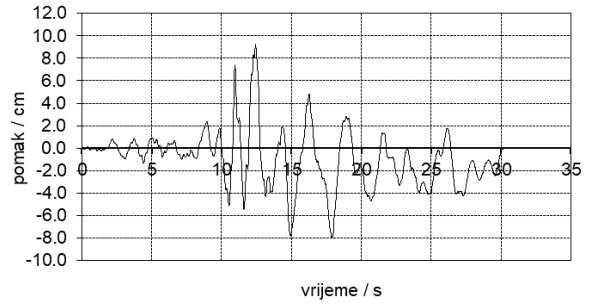
vršno ubrzanje **1.25 g**



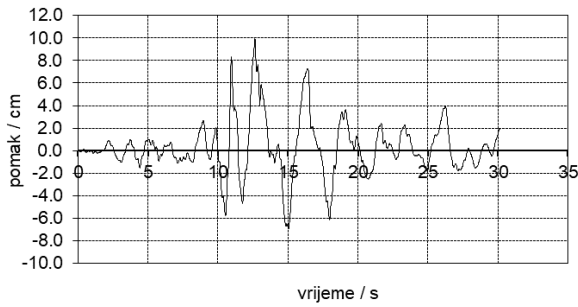
vršno ubrzanje **1.50 g**



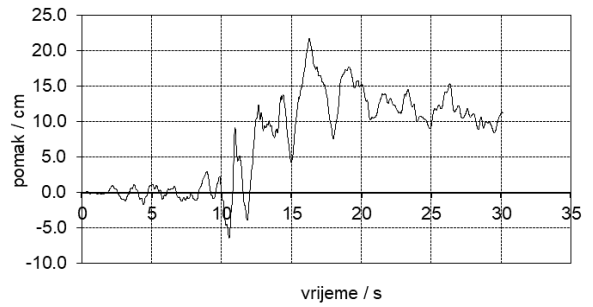
vršno ubrzanje **1.75 g**



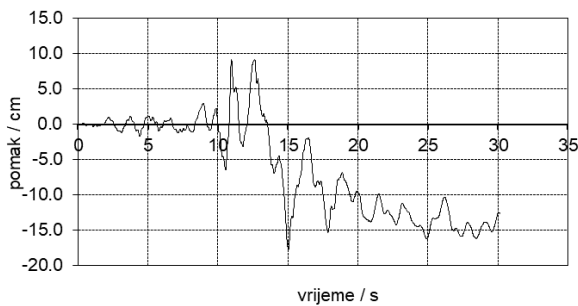
vršno ubrzanje **2.00 g**



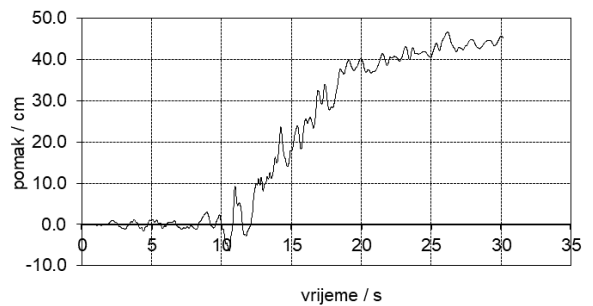
vršno ubrzanje **2.25 g**



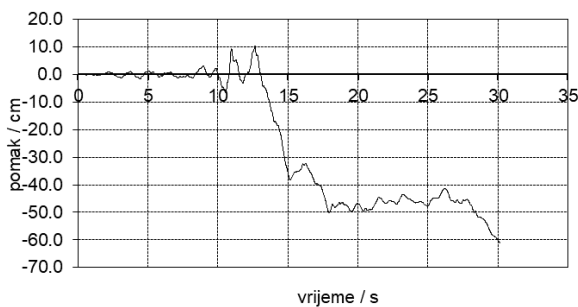
vršno ubrzanje **2.50 g**



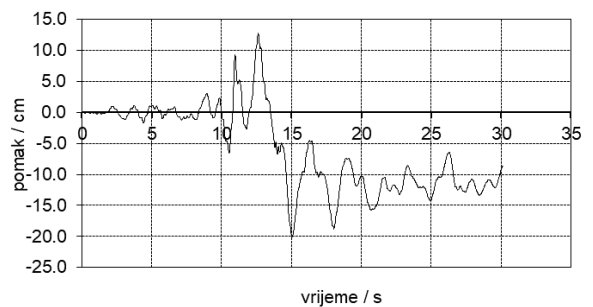
vršno ubrzanje **2.51 g**



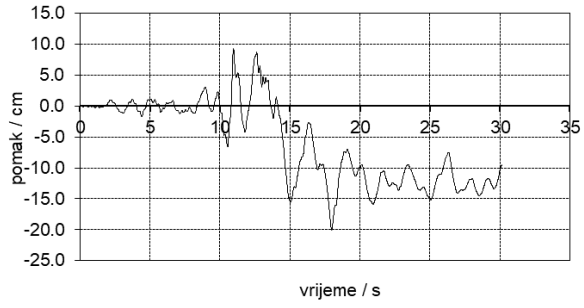
vršno ubrzanje **2.52 g**



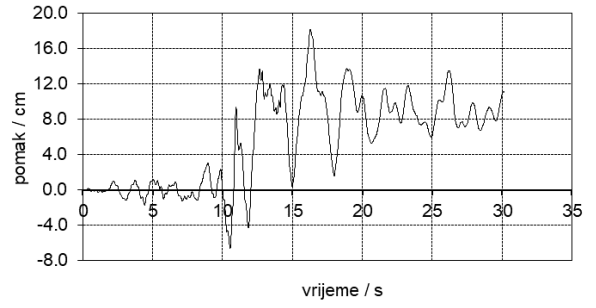
vršno ubrzanje **2.53 g**



vršno ubrzanje **2.54 g**



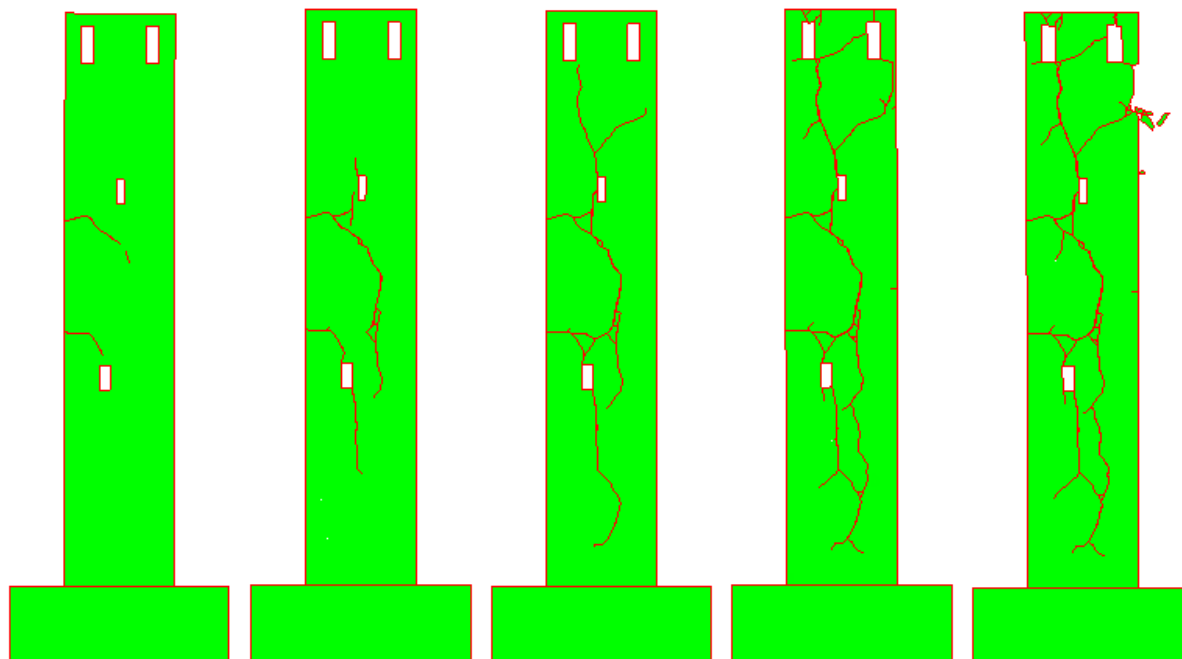
vršno ubrzanje **2.55 g**



vršno ubrzanje **2.56 g**

### Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres Campano Lucano i rubnim uvjetom tornja: slobodno stojeći na krutoj podlozi.



f)  $t=11.05$  s

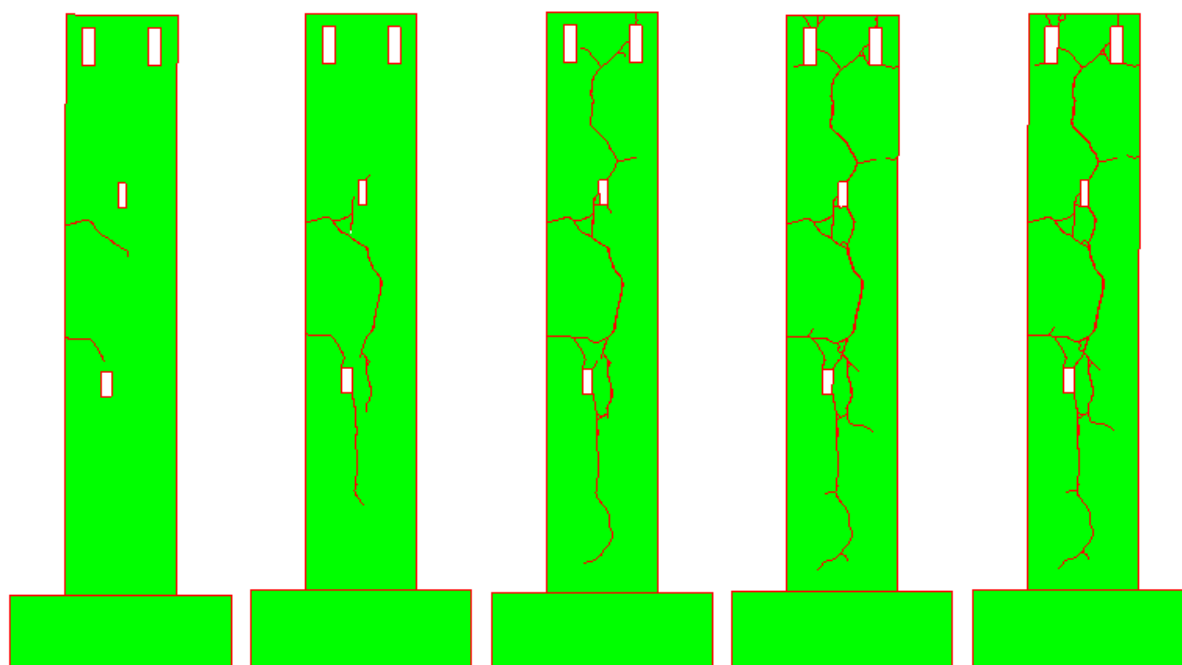
g)  $t=11.25$  s

h)  $t=12.05$  s

i)  $t=14.75$  s

j)  $t=18.25$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 2.54 g*



a)  $t=11.05$  s

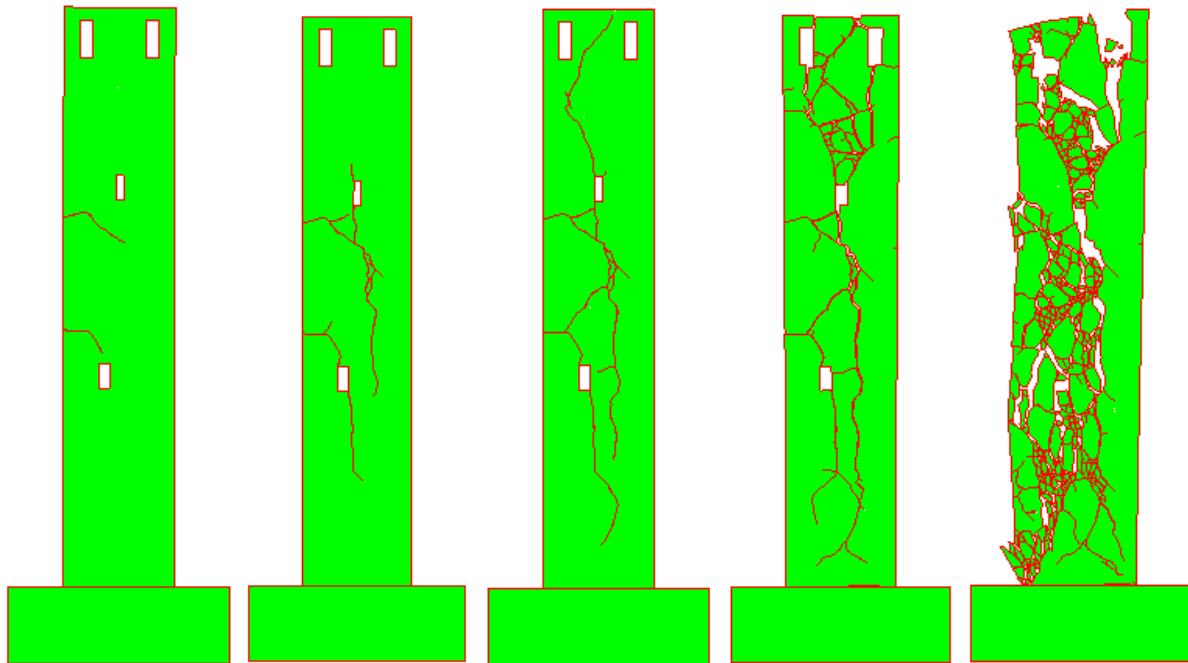
b)  $t=11.25$  s

c)  $t=12.10$  s

d)  $t=15.55$  s

e)  $t=18.75$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 2.56 g*



a)  $t=11.05$  s

b)  $t=11.25$  s

c)  $t=11.70$  s

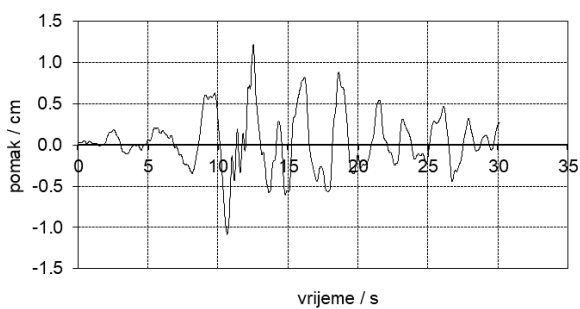
d)  $t=13.60$  s

e)  $t=16.00$  s

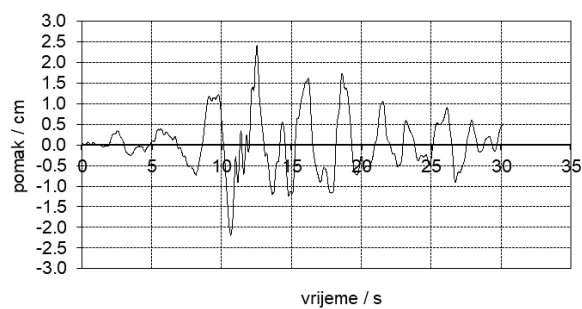
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje 2.57 g*

### 3.4. Djelovanje potresa Campano Lucano na toranj ukopan u elastičnoj podlozi

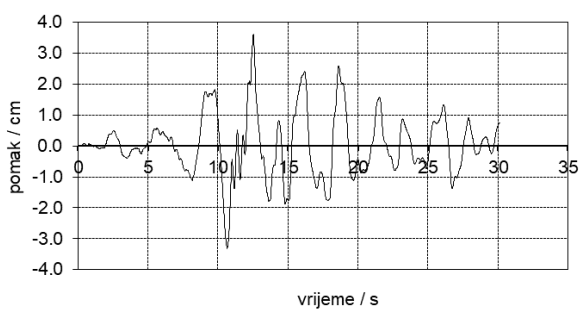
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa Campano Lucano za rubni uvjet tornja: ukopan u elastičnoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



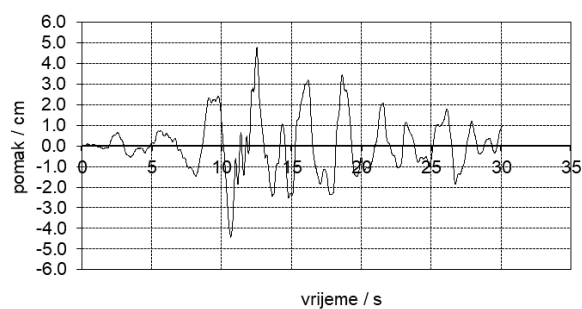
vršno ubrzanje **0.25 g**



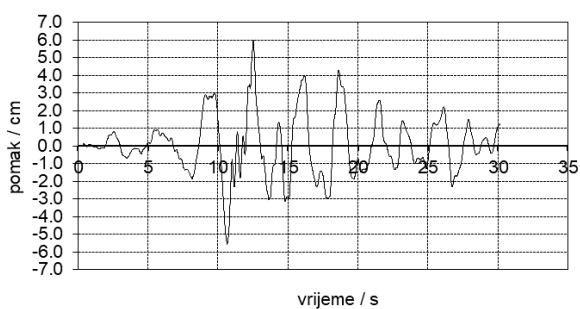
vršno ubrzanje **0.50 g**



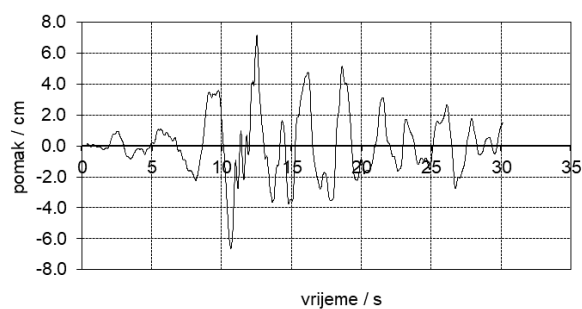
vršno ubrzanje **0.75 g**



vršno ubrzanje **1.00 g**

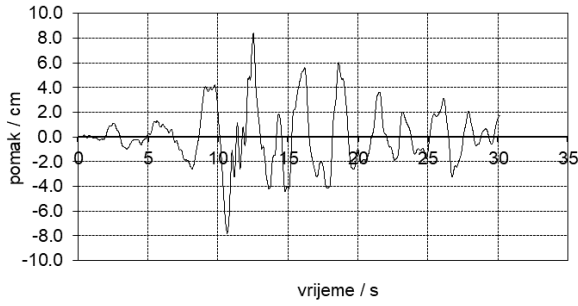


vršno ubrzanje **1.25 g**

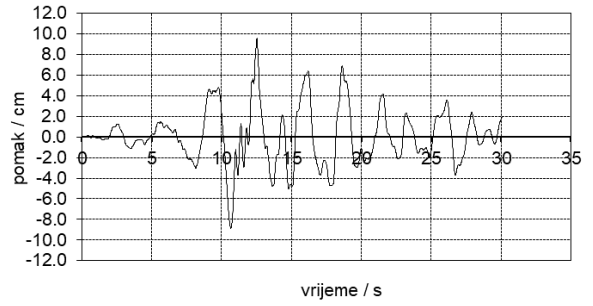


vršno ubrzanje **1.50 g**

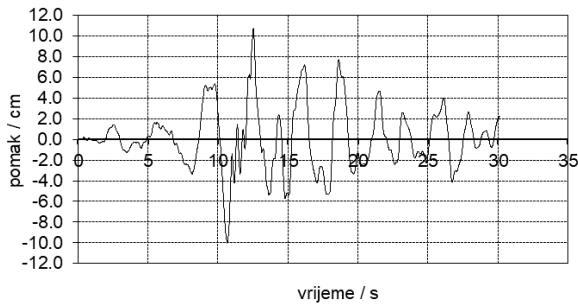




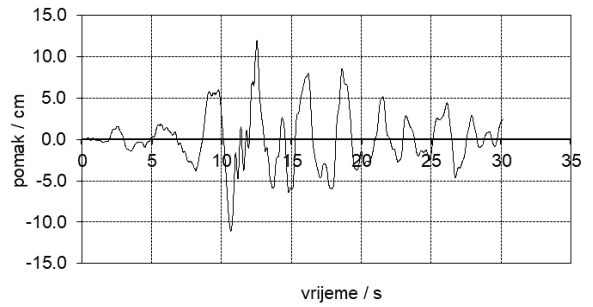
vršno ubrzanje **1.75 g**



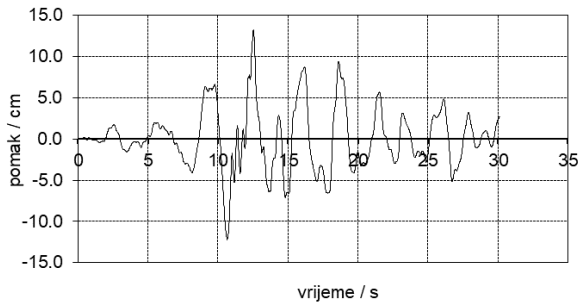
vršno ubrzanje **2.00 g**



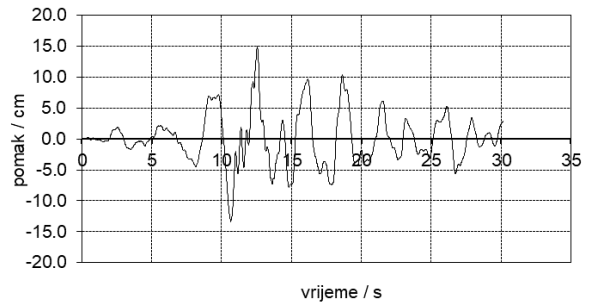
vršno ubrzanje **2.25 g**



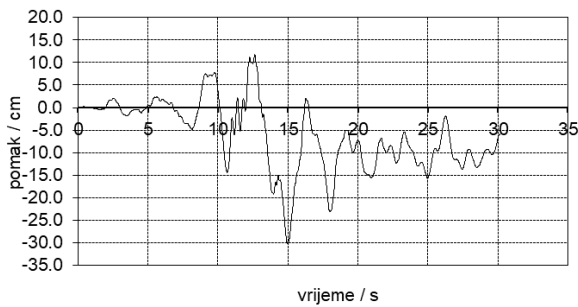
vršno ubrzanje **2.50 g**



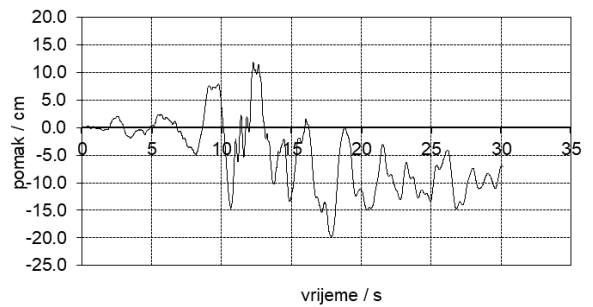
vršno ubrzanje **2.75 g**



vršno ubrzanje **3.00 g**



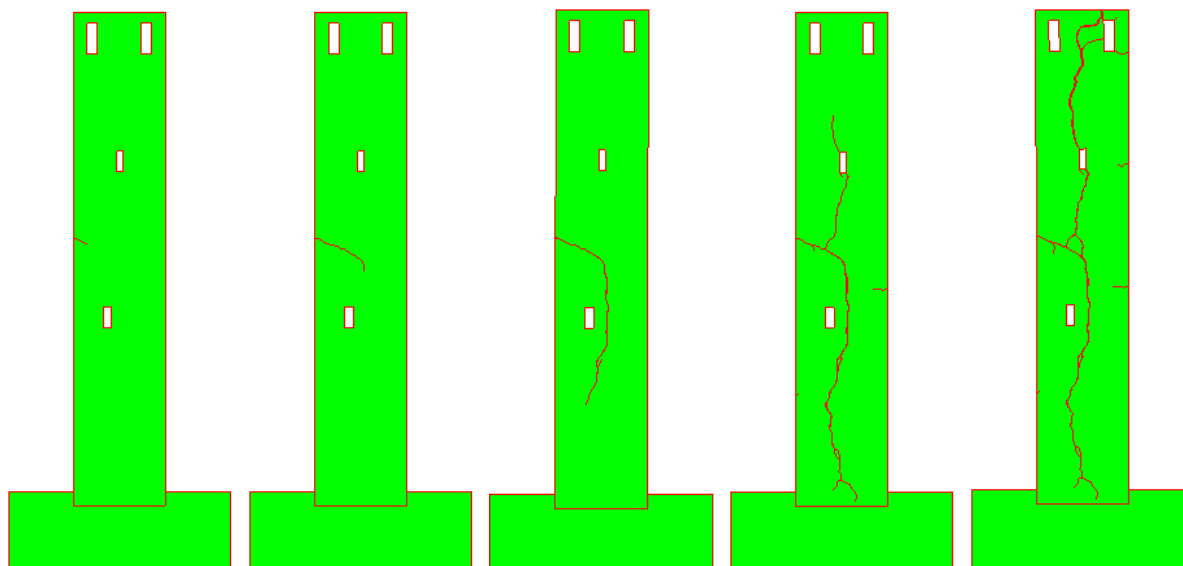
vršno ubrzanje **3.25 g**



vršno ubrzanje **3.30 g**

## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres Campano Lucano sa rubnim uvjetom tornja: ukopan u elastičnoj podlozi.



a)  $t=11.15$  s

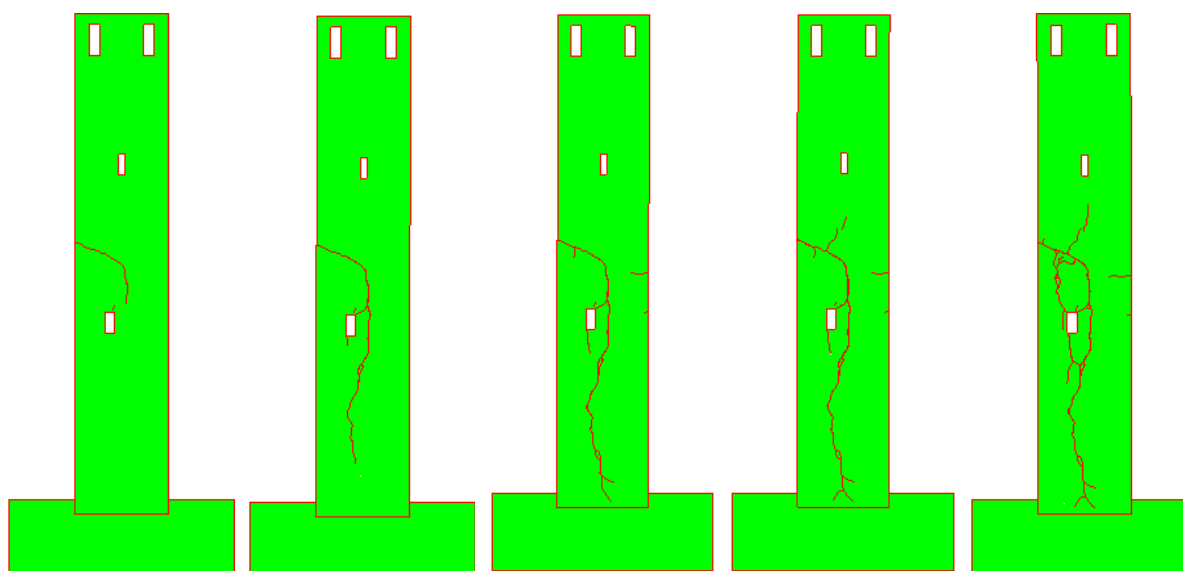
b)  $t=12.00$  s

c)  $t=12.35$  s

d)  $t=13.00$  s

e)  $t=14.00$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 3.25 g*



a)  $t=12.00$  s

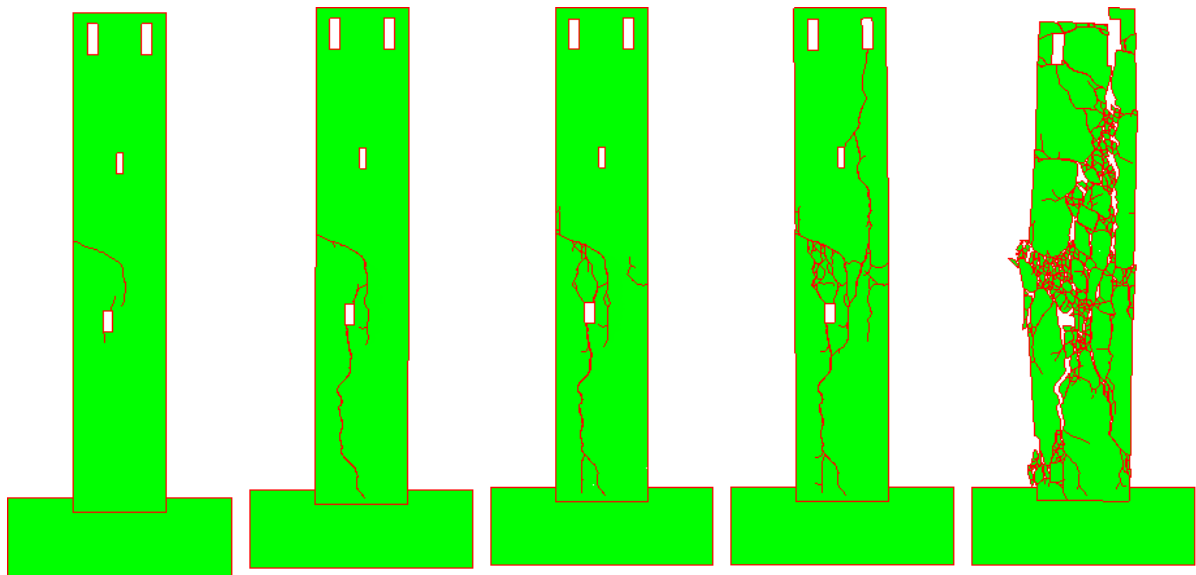
b)  $t=12.40$  s

c)  $t=12.75$  s

d)  $t=12.90$  s

e)  $t=15.25$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 3.30 g*



a)  $t=12.00$  s

b)  $t=12.50$  s

c)  $t=13.15$  s

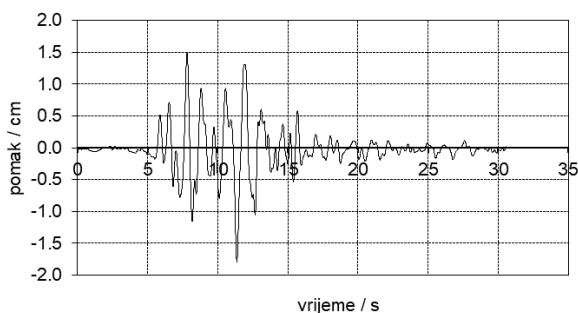
d)  $t=15.30$  s

e)  $t=18.50$  s

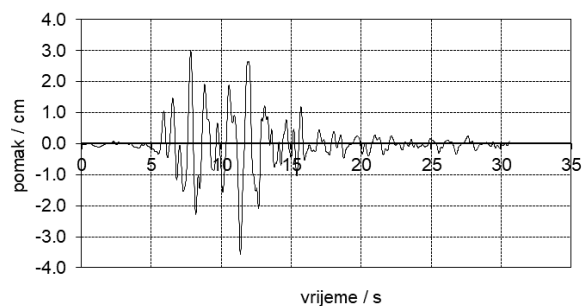
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje 3.31 g*

### 3.5. Djelovanja potresa Petrovac na toranj upeti u krutoj podlozi

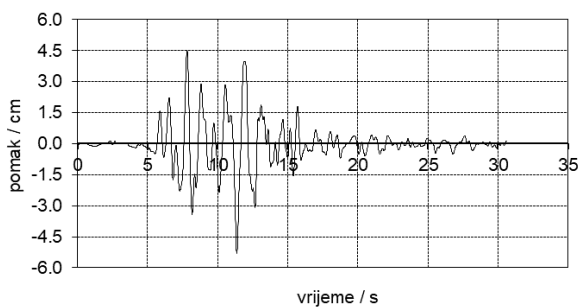
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa Petrovac za rubni uvjet tornja: upeti na krutoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



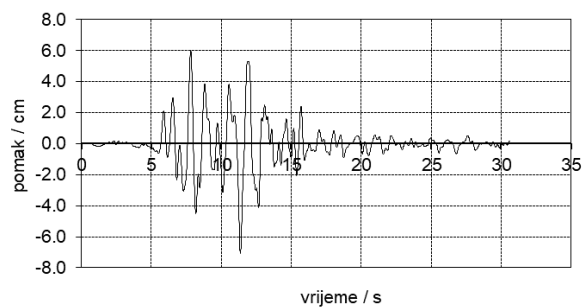
vršno ubrzanje **0.05 g**



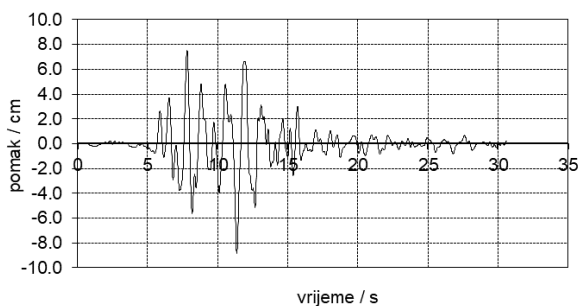
vršno ubrzanje **0.10 g**



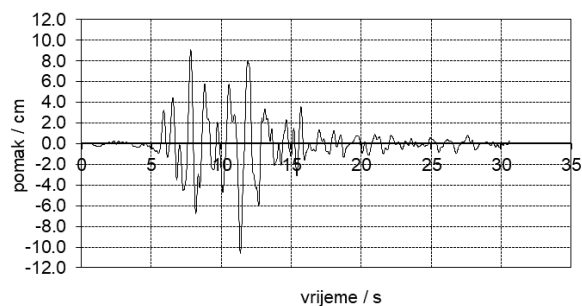
vršno ubrzanje **0.15 g**



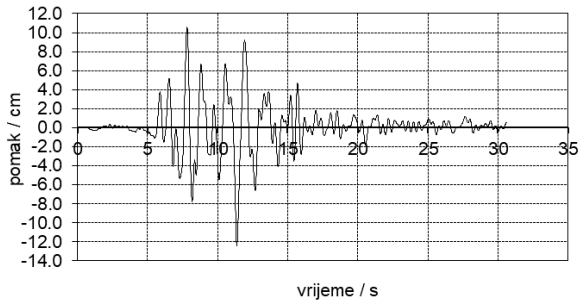
vršno ubrzanje **0.20 g**



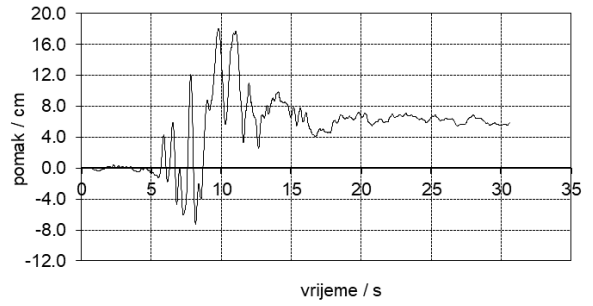
vršno ubrzanje **0.25 g**



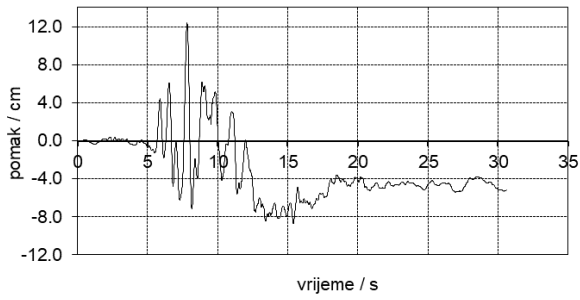
vršno ubrzanje **0.30 g**



vršno ubrzanje **0.35 g**



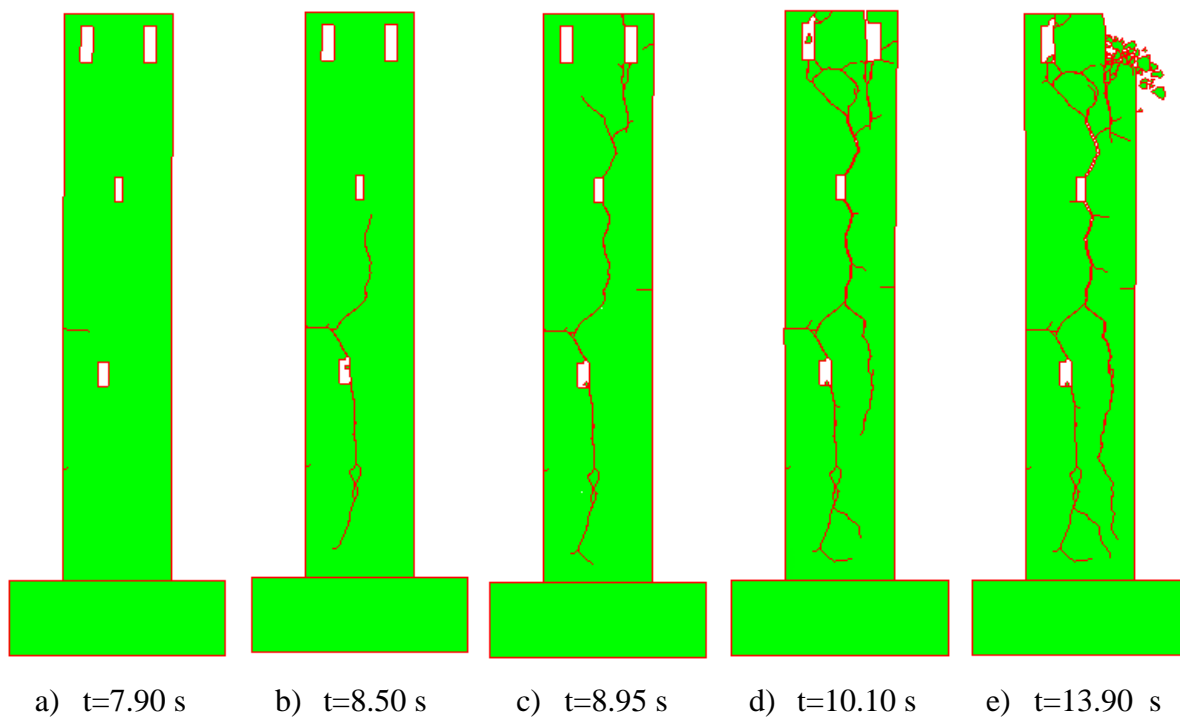
vršno ubrzanje **0.40 g**



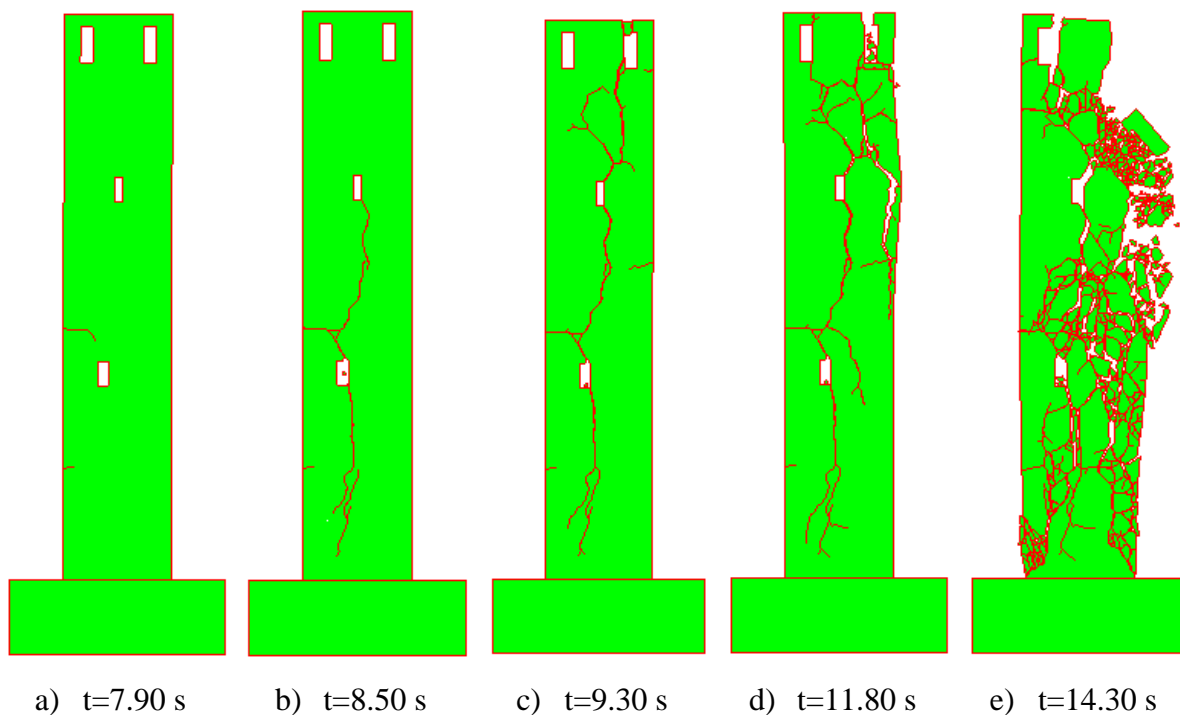
vršno ubrzanje **0.41 g**

## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres Petrovac i rubnim uvjetom tornja: upeti u krutoj podlozi.



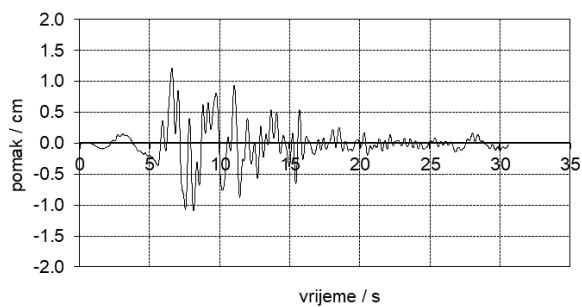
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 0.41 g*



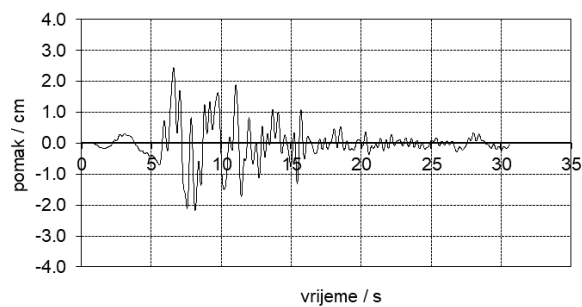
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 0.42 g*

### 3.6. Djelovanja potresa Petrovac na toranj slobodno stojeći na elastičnoj podlozi

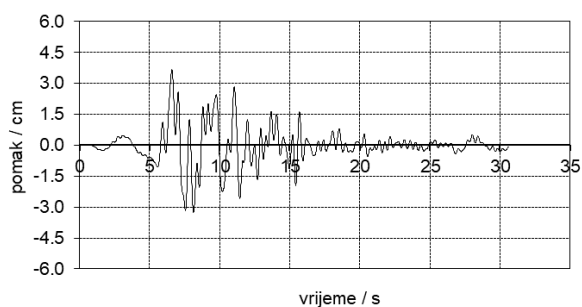
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa Petrovac za rubni uvjet tornja: slobodno stojeći na elastičnoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



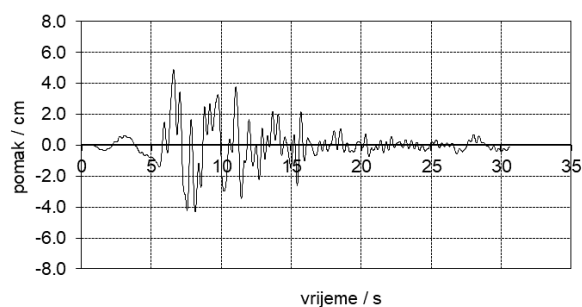
vršno ubrzanje **0.05 g**



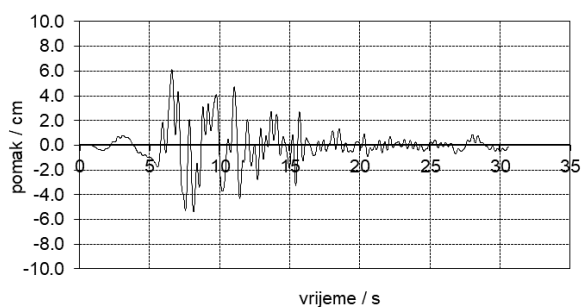
vršno ubrzanje **0.10 g**



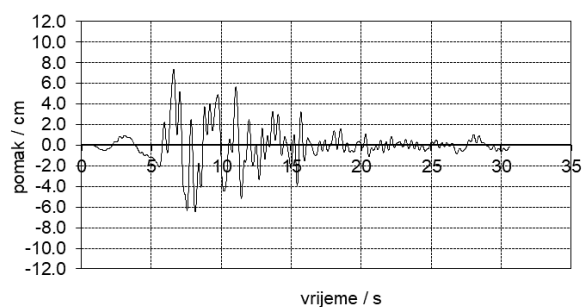
vršno ubrzanje **0.15 g**



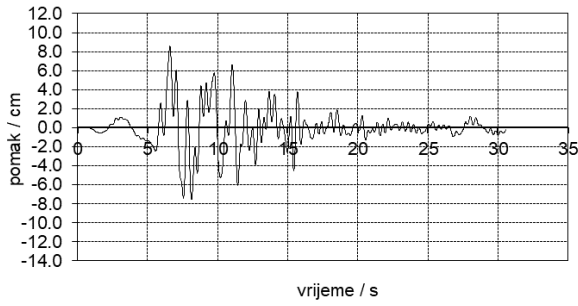
vršno ubrzanje **0.20 g**



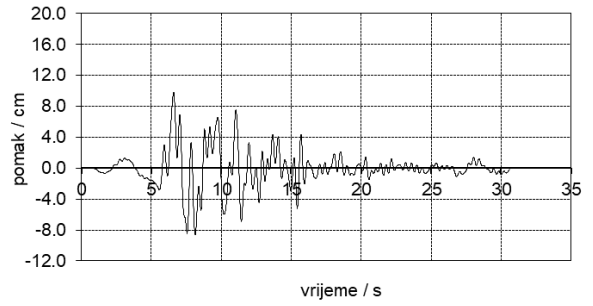
vršno ubrzanje **0.25 g**



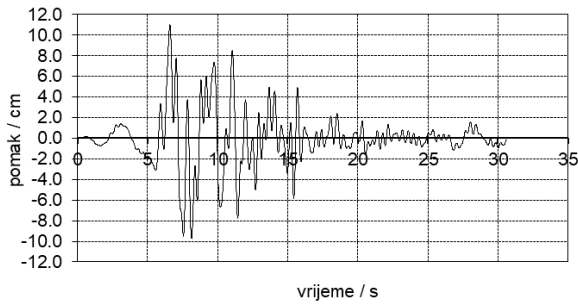
vršno ubrzanje **0.30 g**



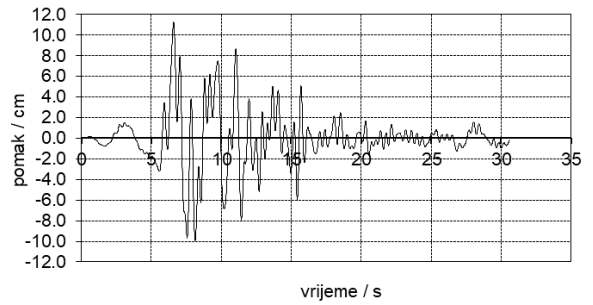
vršno ubrzanje **0.35 g**



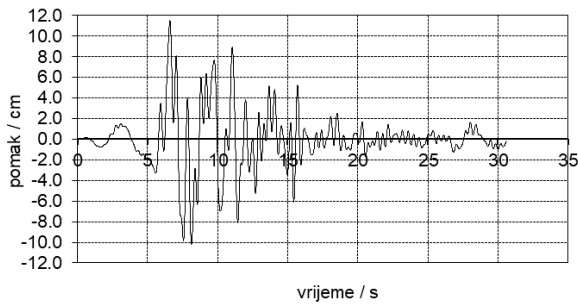
vršno ubrzanje **0.40 g**



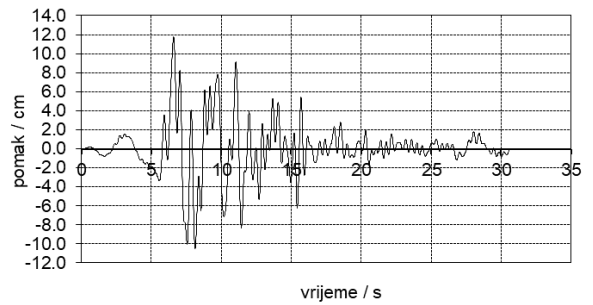
vršno ubrzanje **0.45 g**



vršno ubrzanje **0.46 g**



vršno ubrzanje **0.47 g**

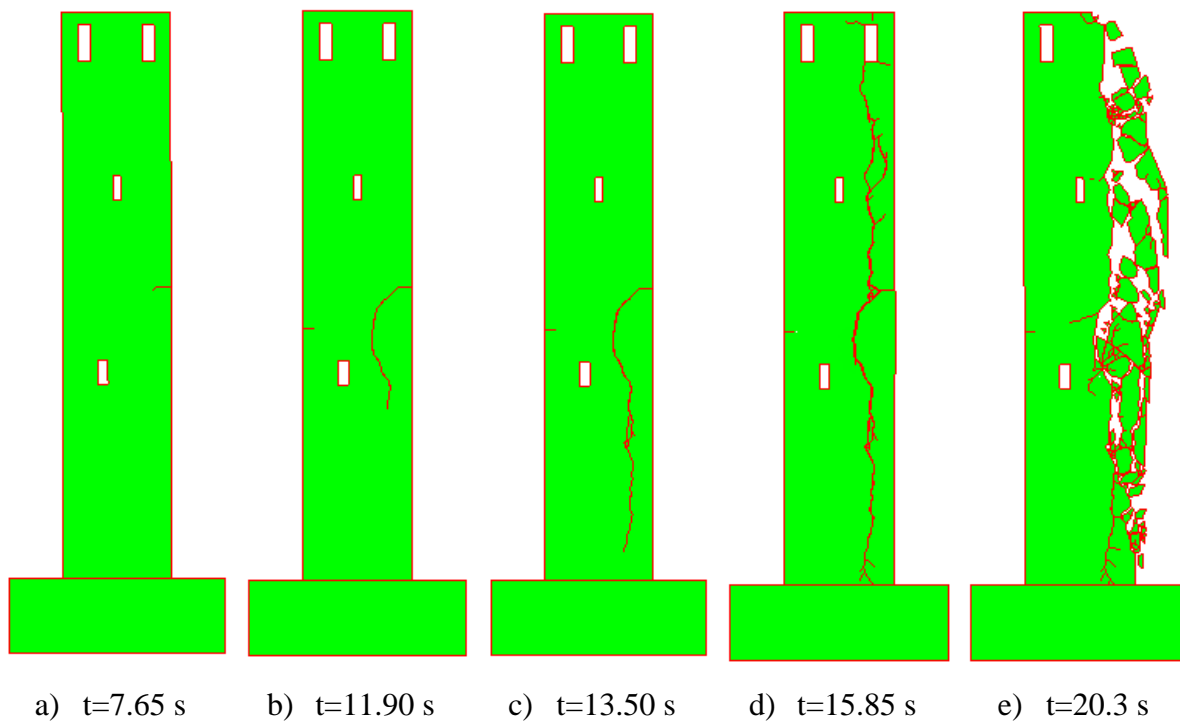


vršno ubrzanje **0.48 g**

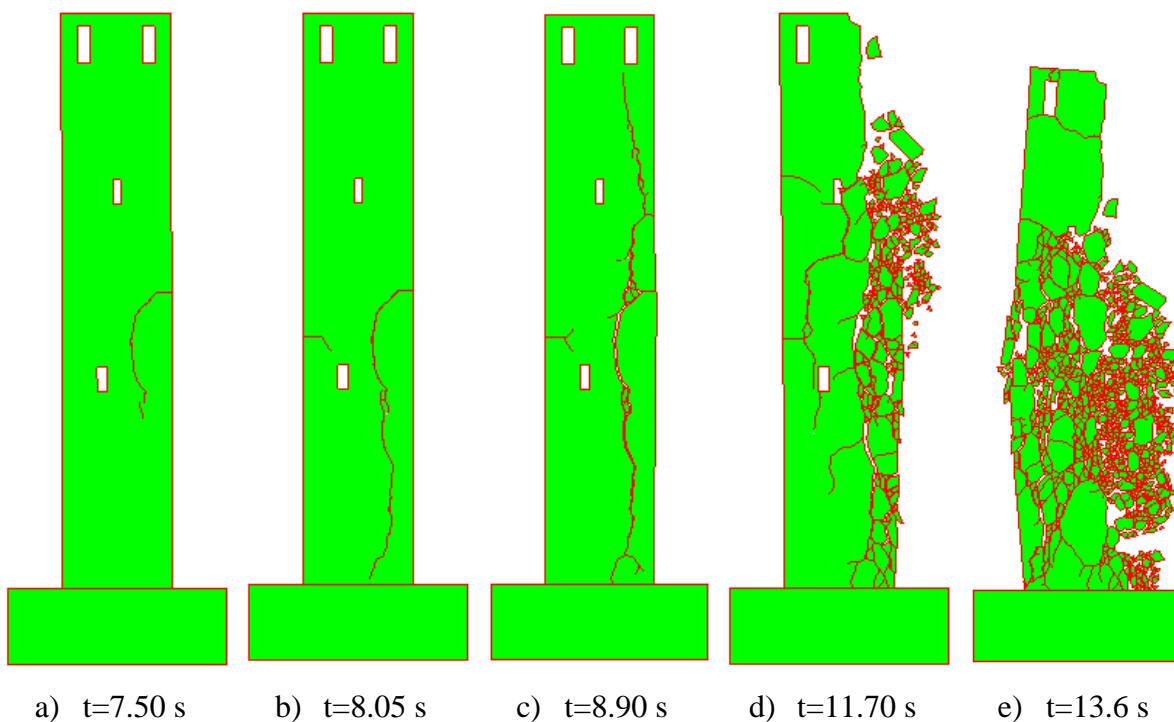


## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres Petrovac s rubnim uvjetom: slobodno stojeći na elastičnoj podlozi.



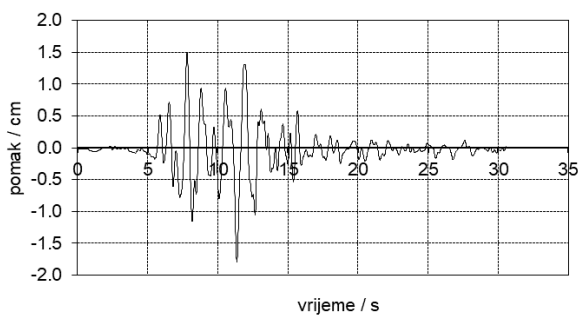
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubznanje 0,49 g*



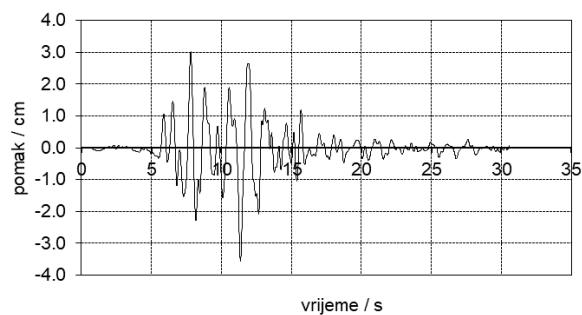
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubznanje 0.50 g*

### 3.7. Djelovanje potresa Petrovac na toranj slobodno stojeći na krutoj podlozi

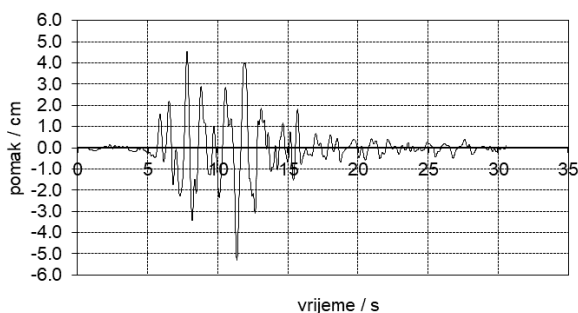
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa Petrovac za rubni uvjet tornja: slobodno stojeći na krutoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



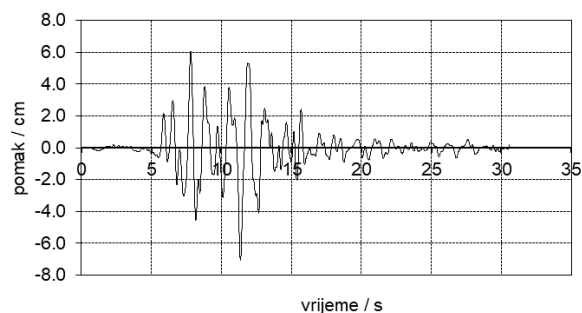
vršno ubrzanje **0.05 g**



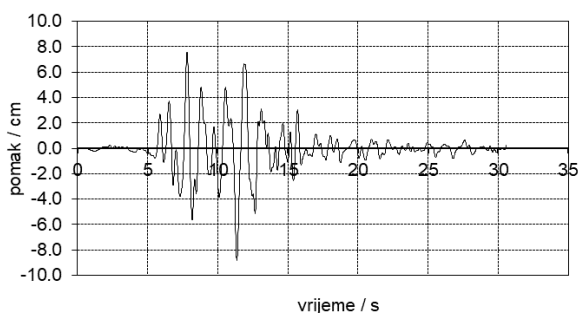
vršno ubrzanje **0.10 g**



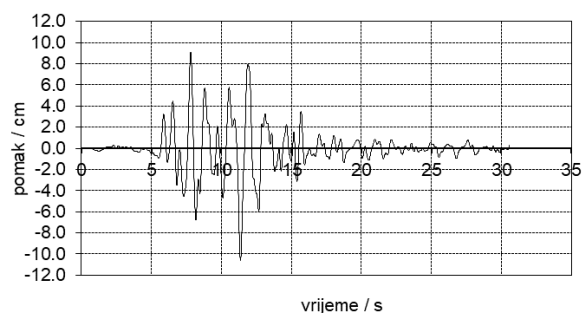
vršno ubrzanje **0.15 g**



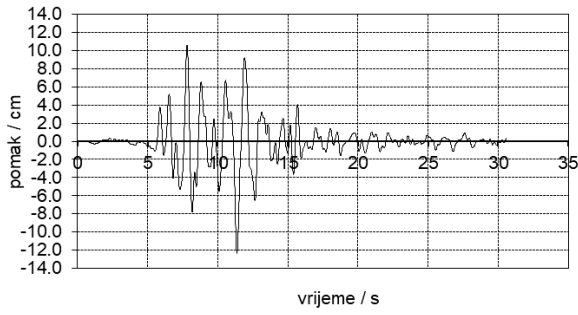
vršno ubrzanje **0.20 g**



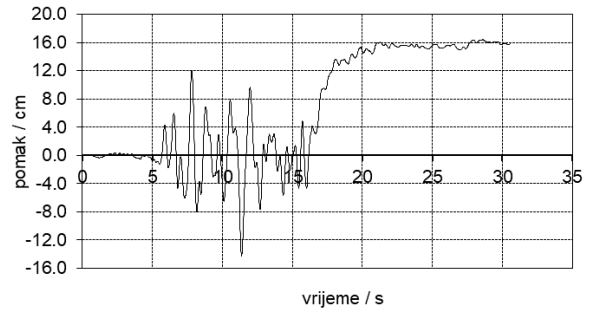
vršno ubrzanje **0.25 g**



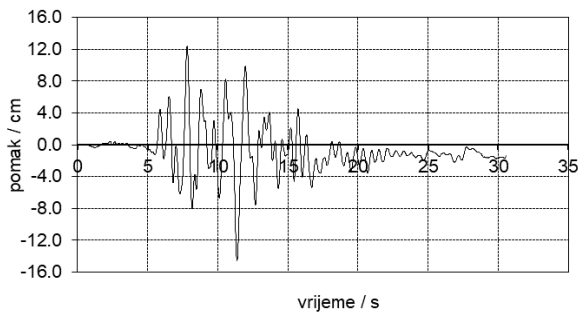
vršno ubrzanje **0.30 g**



vršno ubrzanje **0.35 g**



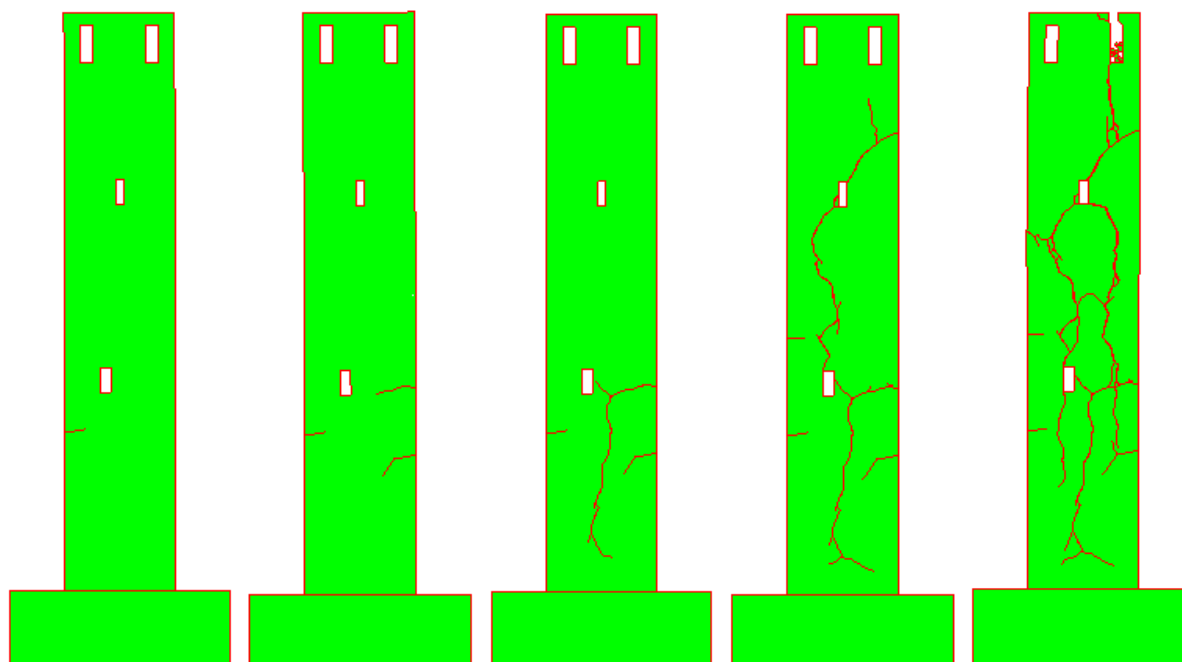
vršno ubrzanje **0.40 g**



vršno ubrzanje **0.41 g**

## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres Petrovac i rubnim uvjetom: slobodno stojeći na krutoj podlozi.



a)  $t=8.25$  s

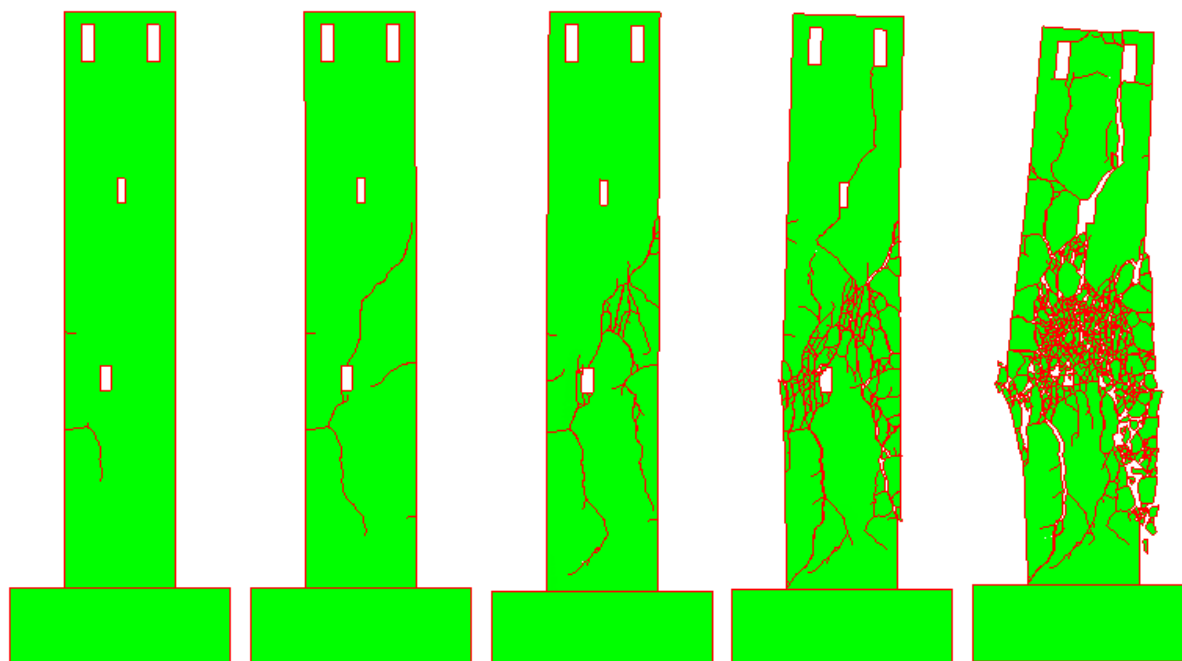
b)  $t=11.50$  s

c)  $t=12.50$  s

d)  $t=16.20$  s

e)  $t=18.50$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje 0.40 g*



a)  $t=10.50$  s

b)  $t=11.60$  s

c)  $t=12.60$  s

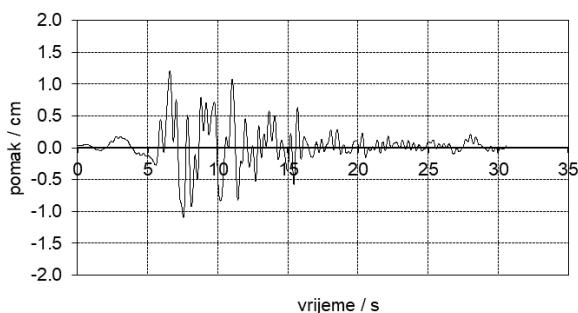
d)  $t=13.15$  s

e)  $t=14.00$  s

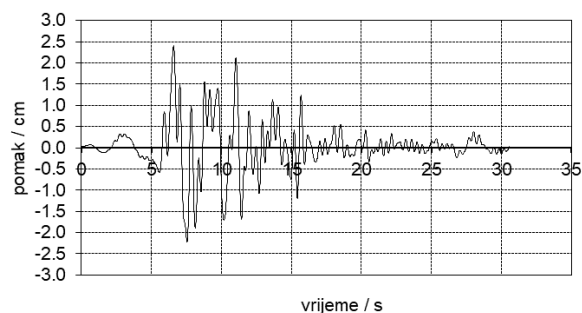
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje 0.42 g*

### 3.8. Djelovanje potresa Petrovac na toranj ukopani u elastičnoj podlozi

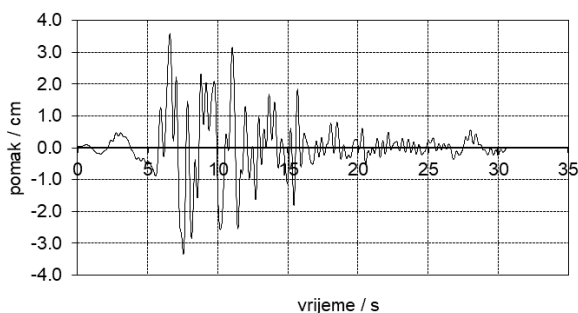
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa Petrovac za rubni uvjet tornja: slobodno stojeći na elastičnoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



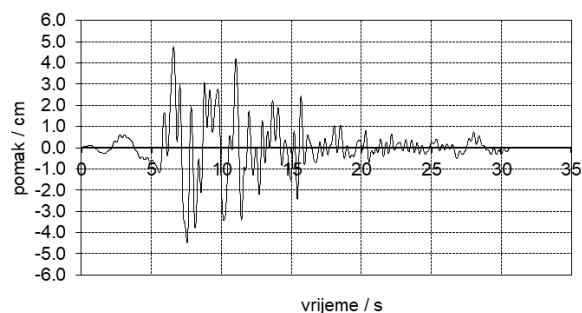
vršno ubrzanje **0.05 g**



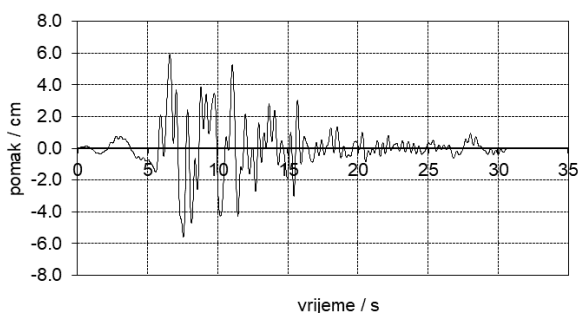
vršno ubrzanje **0.10 g**



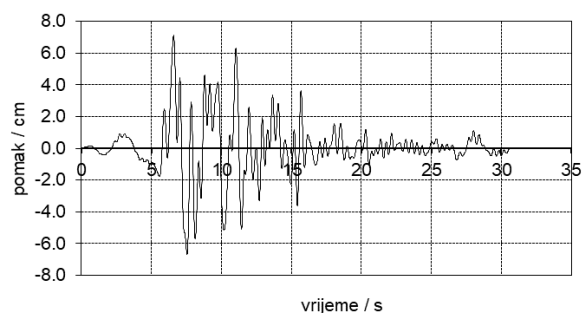
vršno ubrzanje **0.15 g**



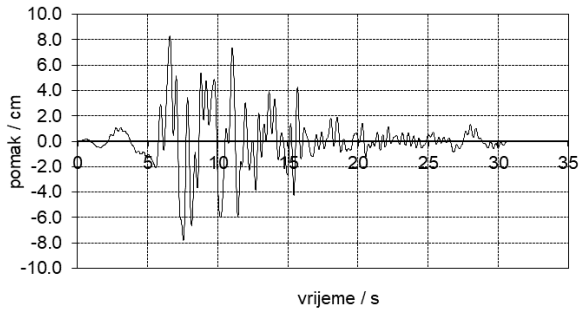
vršno ubrzanje **0.20 g**



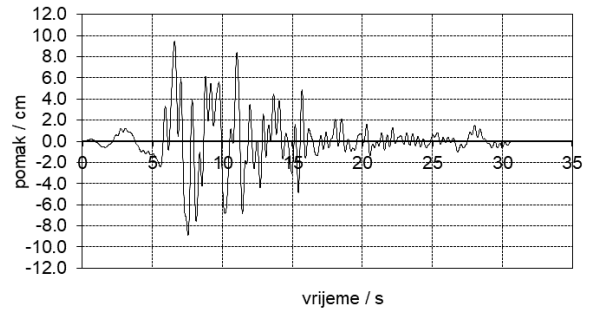
vršno ubrzanje **0.25 g**



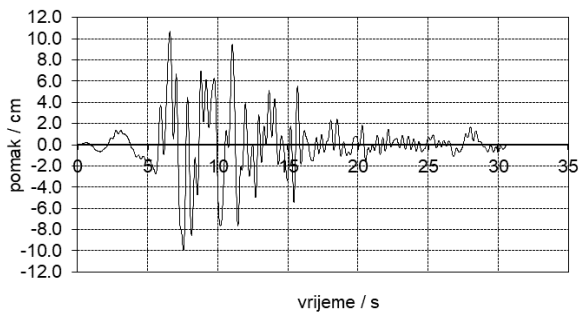
vršno ubrzanje **0.30 g**



vršno ubrzanje **0.35 g**



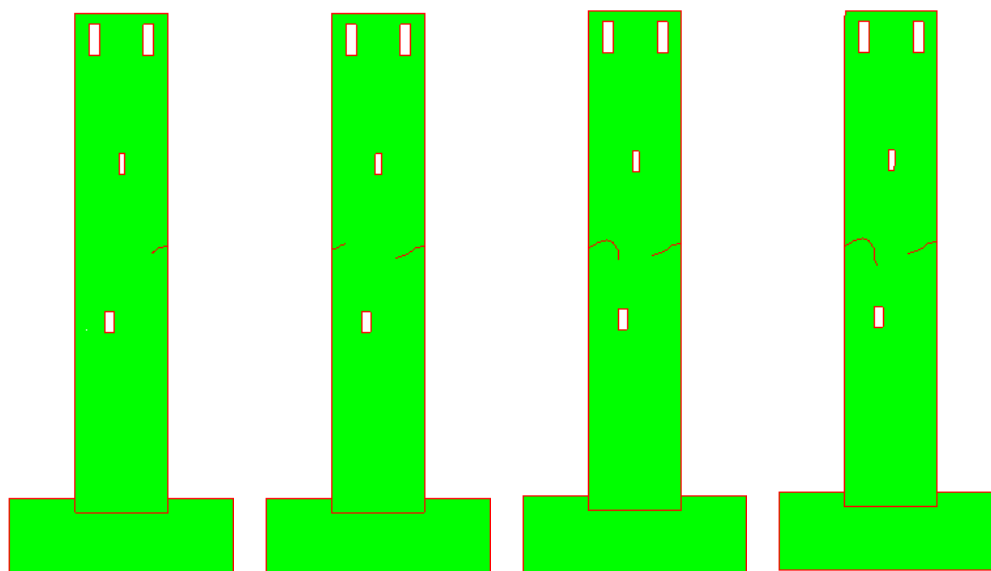
vršno ubrzanje **0.40 g**



vršno ubrzanje **0.45 g**

## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres Petrovac i rubnim uvjetom: ukopan u elastičnoj podlozi.



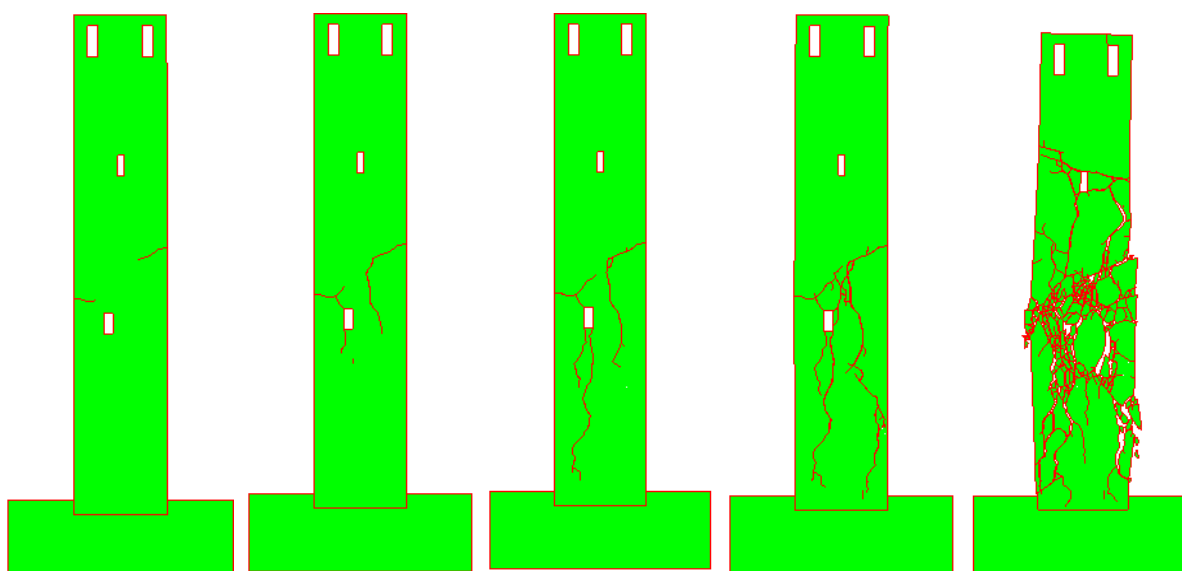
a)  $t=6.95$  s

b)  $t=8.00$  s

c)  $t=8.95$  s

d)  $t=9.30$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 0.49 g*



a)  $t=8.10$  s

b)  $t=13.35$  s

c)  $t=14.50$  s

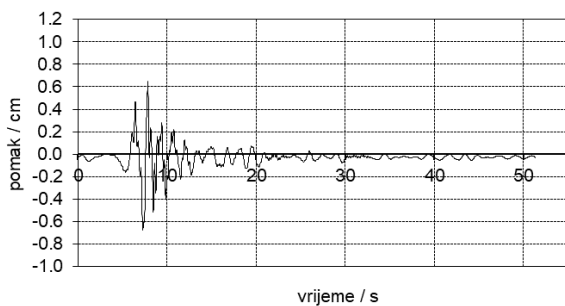
d)  $t=15.90$  s

e)  $t=16.75$  s

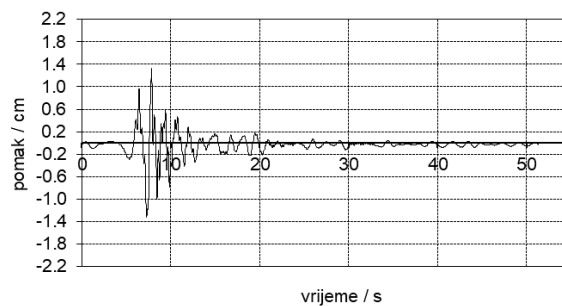
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 0.50 g*

### 3.9. Djelovanja potresa South Island na toranj upeti u krutoj podlozi

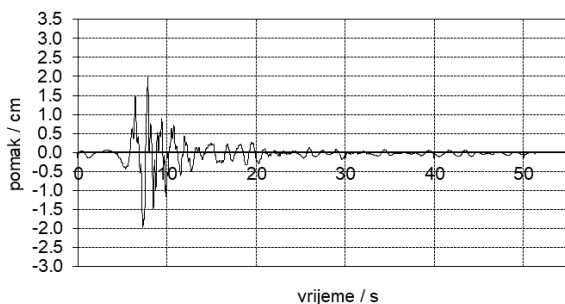
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa South Island za rubni uvjet tornja: upeti u krutoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



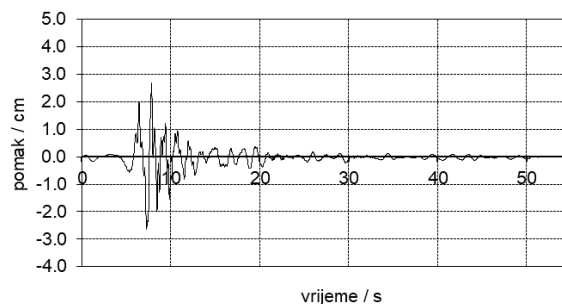
vršno ubrzanje **0.10 g**



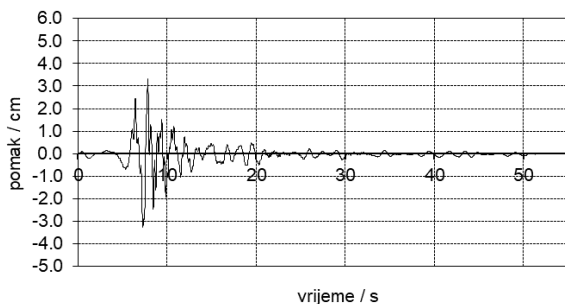
vršno ubrzanje **0.20 g**



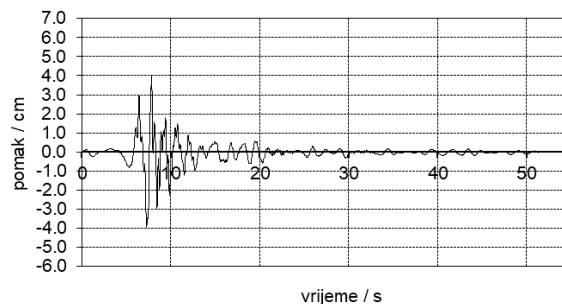
vršno ubrzanje **0.30 g**



vršno ubrzanje **0.40 g**

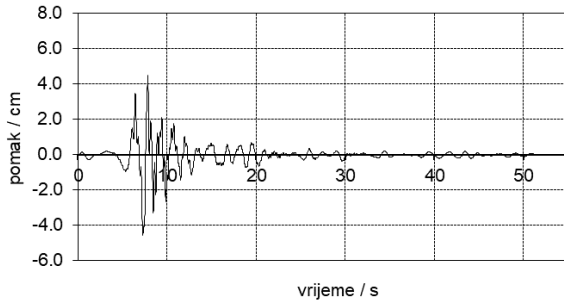


vršno ubrzanje **0.50 g**

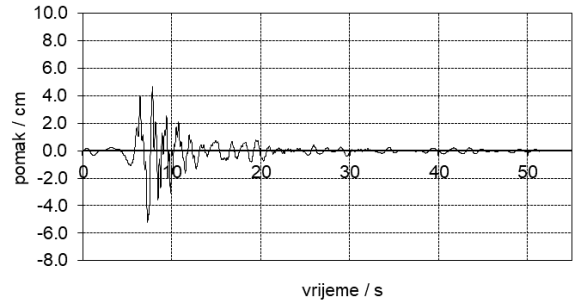


vršno ubrzanje **0.60 g**

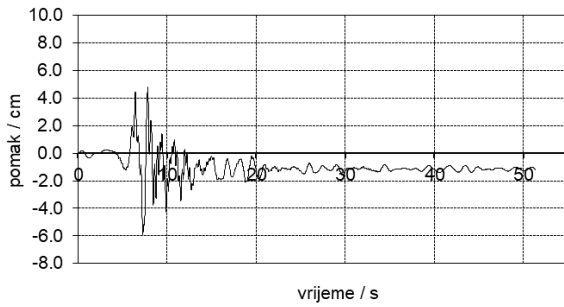




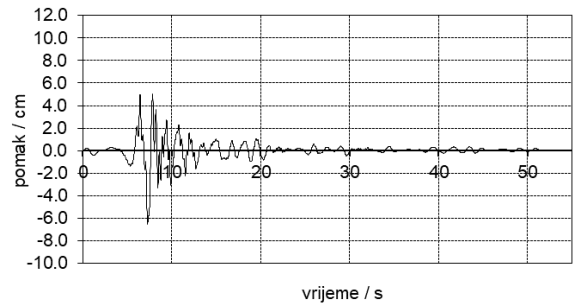
vršno ubrzanje **0.70 g**



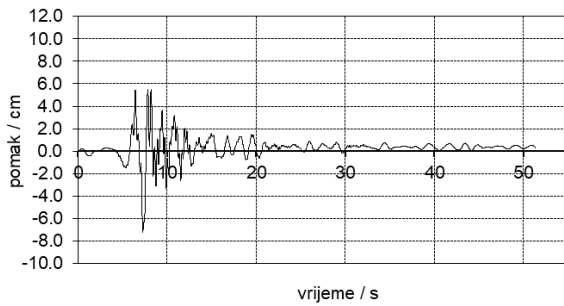
vršno ubrzanje **0.80 g**



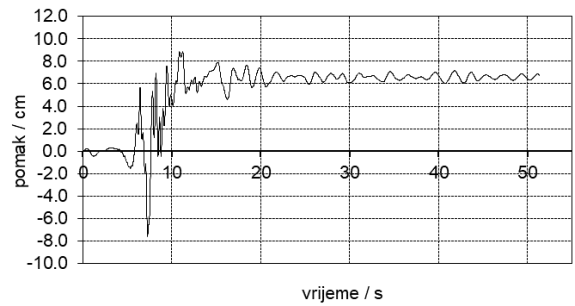
vršno ubrzanje **0.90 g**



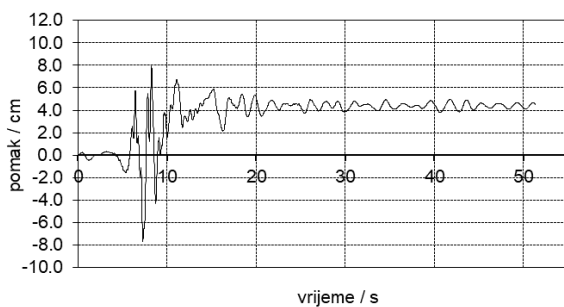
vršno ubrzanje **1.00 g**



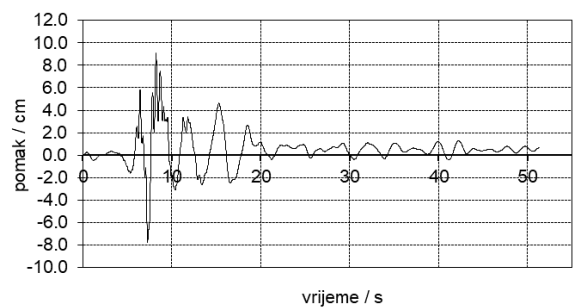
vršno ubrzanje **1.10 g**



vršno ubrzanje **1.15 g**



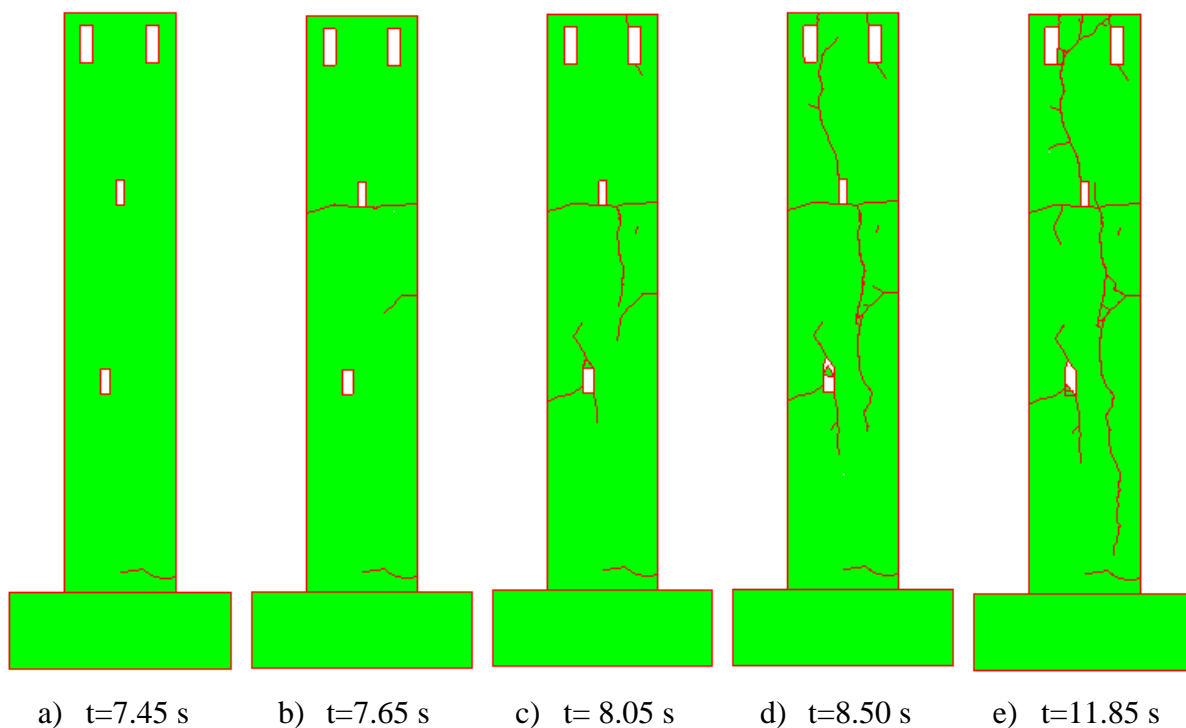
vršno ubrzanje **1.16 g**



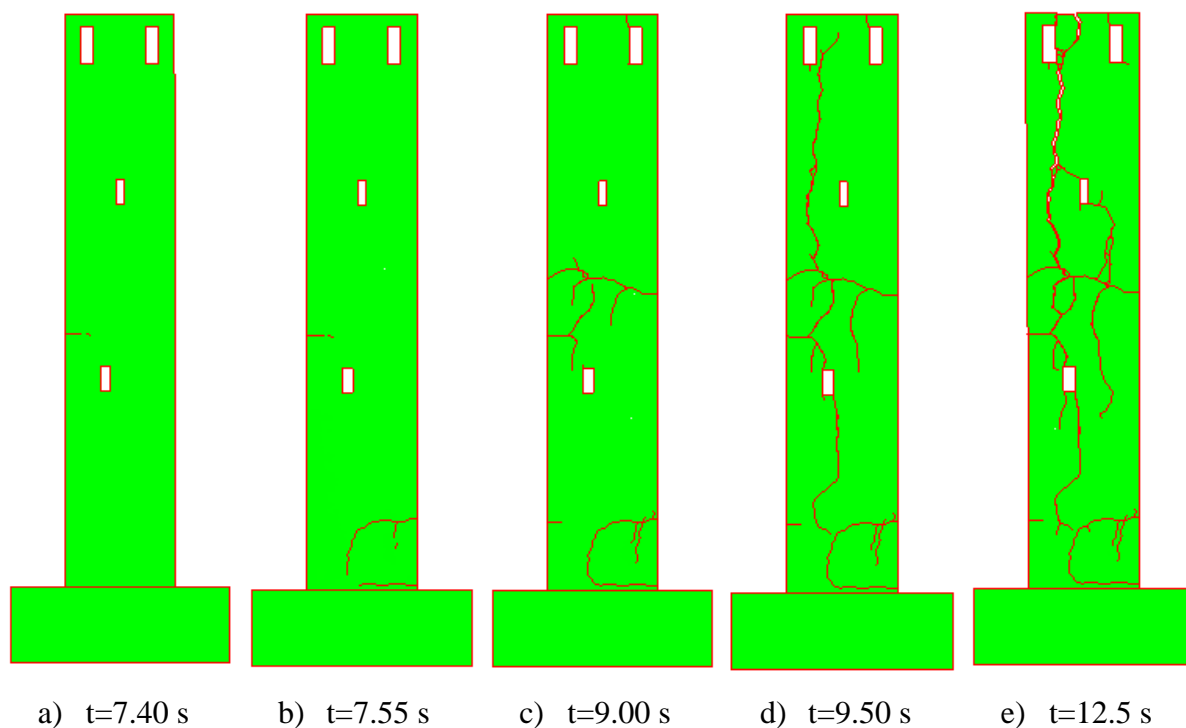
vršno ubrzanje **1.17 g**

## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

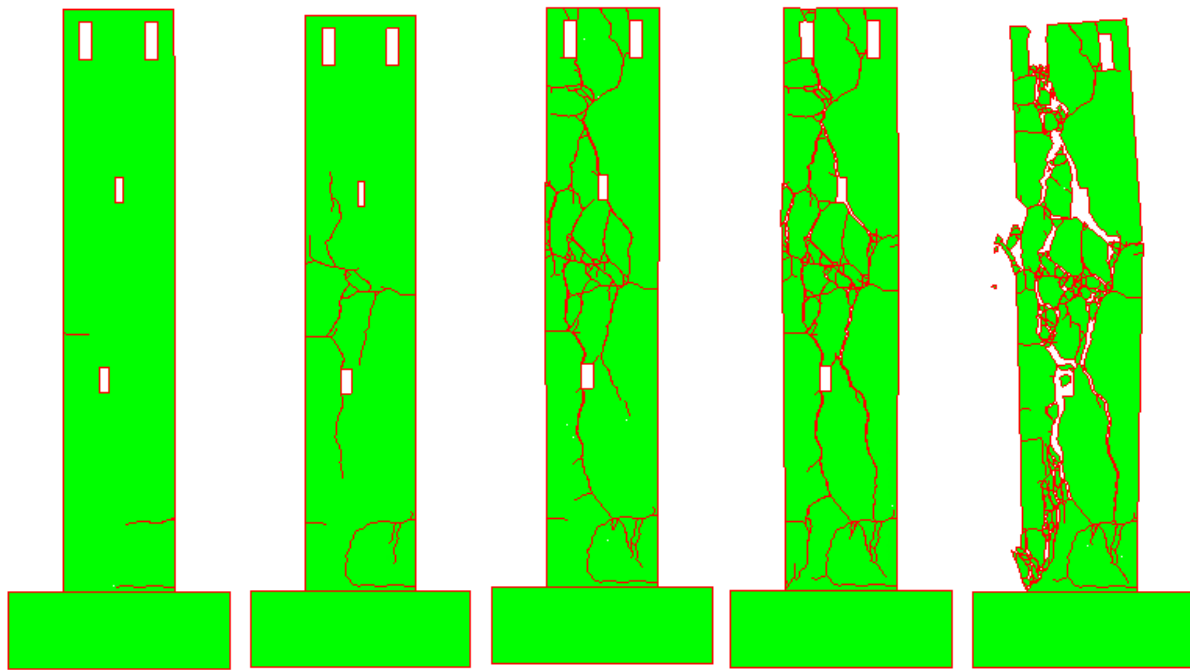
Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres South Island i rubnim uvjetom: upeti u krutoj podlozi.



*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 1.05 g*



*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 1.17 g*



a)  $t=7.45$  s

b)  $t=8.05$  s

c)  $t=8.60$  s

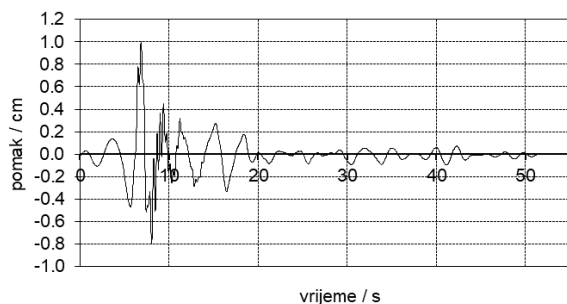
d)  $t=9.15$  s

e)  $t=12.5$  s

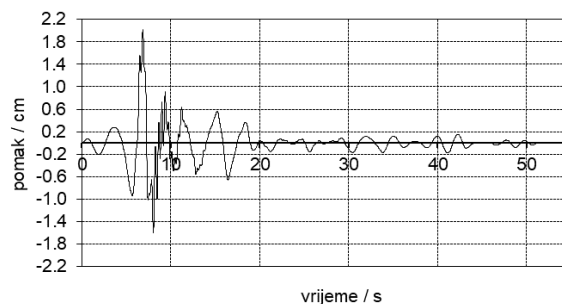
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje **1.19 g***

### 3.10. Djelovanja potresa South Island na toranj slobodno stojeći na elastičnoj podlozi

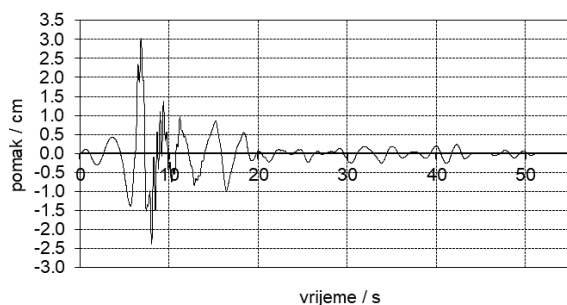
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa South Island za rubni uvjet tornja: slobodno stojeći na elastičnoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



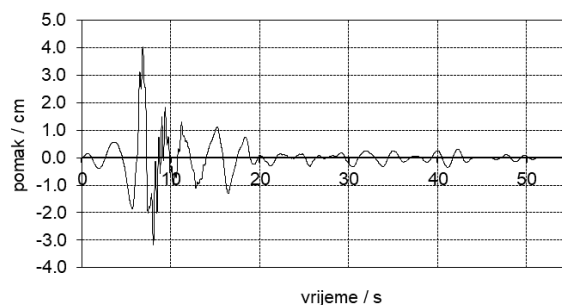
vršno ubrzanje **0.10 g**



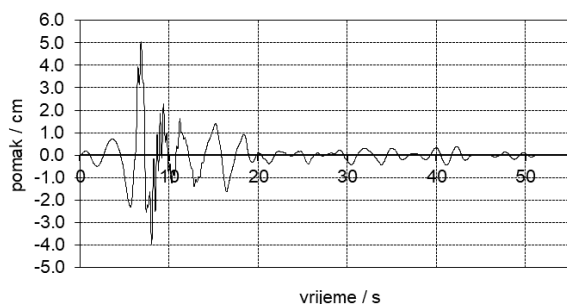
vršno ubrzanje **0.20 g**



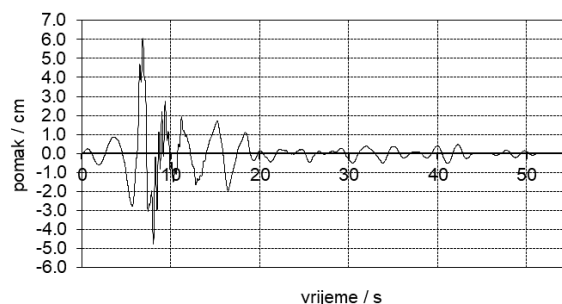
vršno ubrzanje **0.30 g**



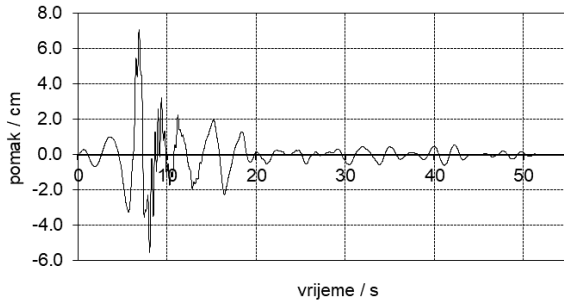
vršno ubrzanje **0.40 g**



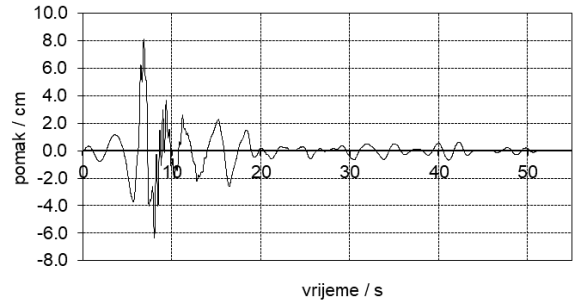
vršno ubrzanje **0.50 g**



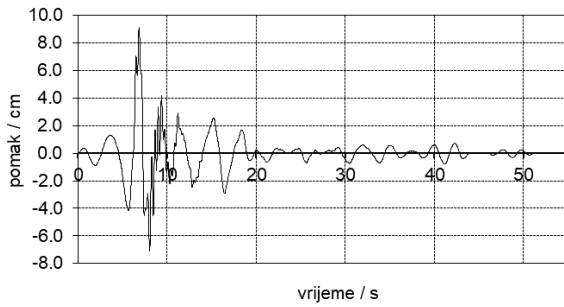
vršno ubrzanje **0.60 g**



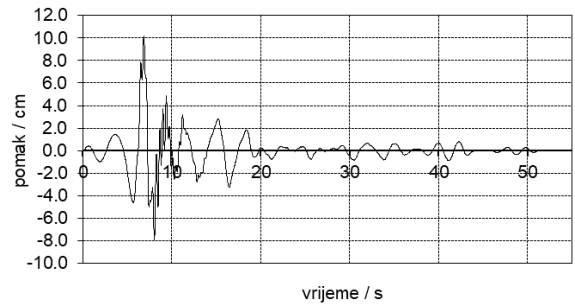
vršno ubrzanje **0.70 g**



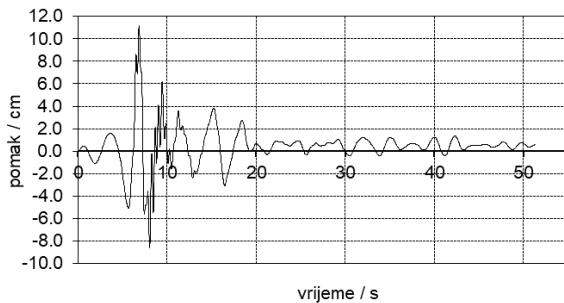
vršno ubrzanje **0.80 g**



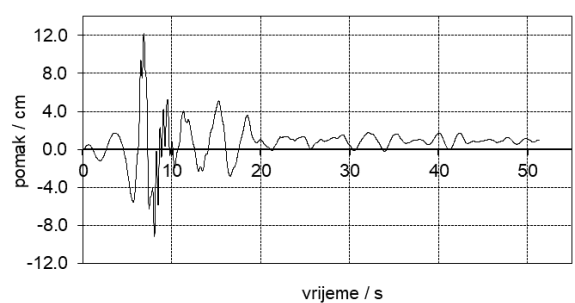
vršno ubrzanje **0.90 g**



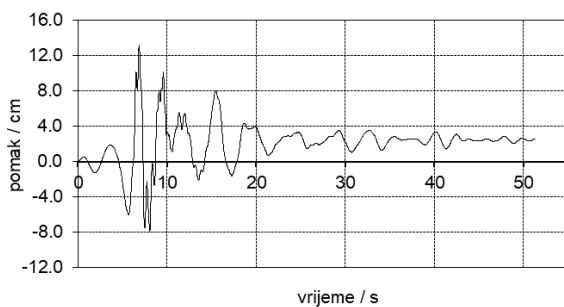
vršno ubrzanje **1.00 g**



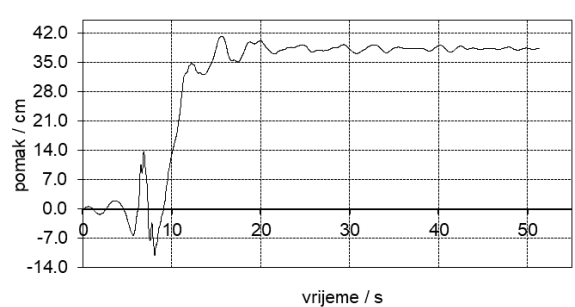
vršno ubrzanje **1.10 g**



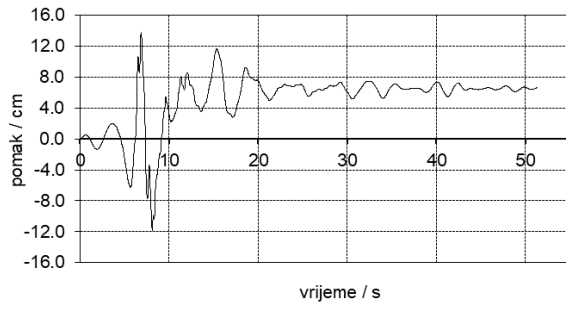
vršno ubrzanje **1.20 g**



vršno ubrzanje **1.30 g**



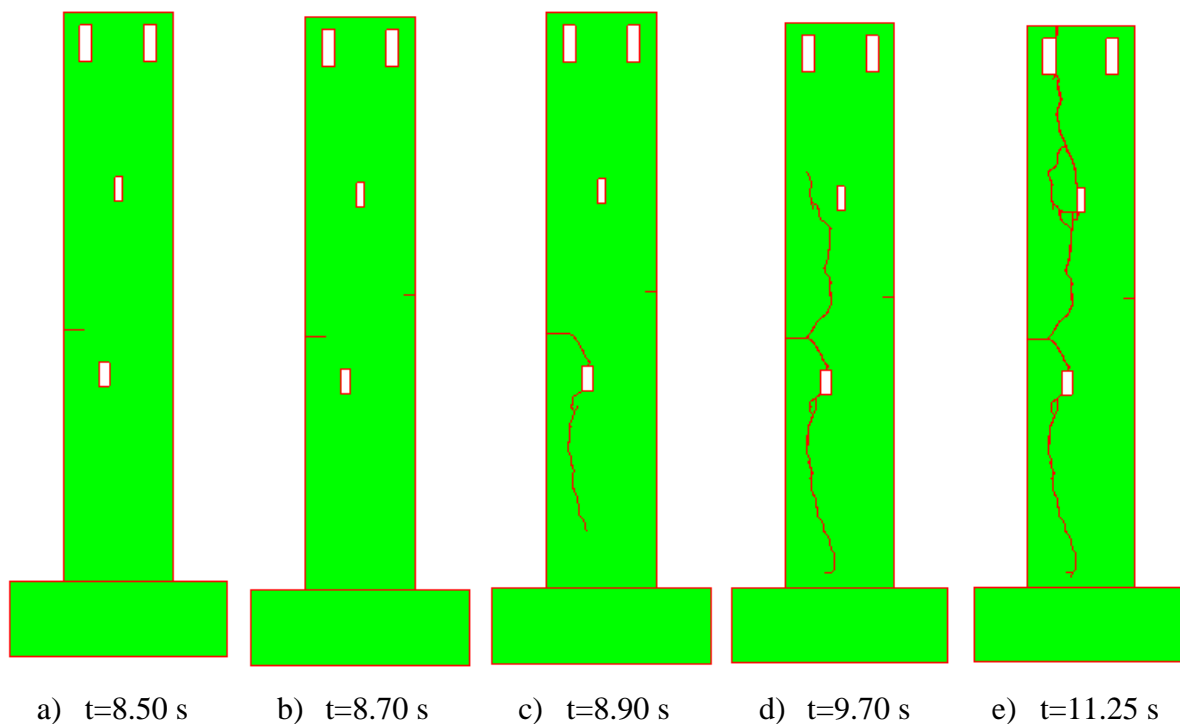
vršno ubrzanje **1.35 g**



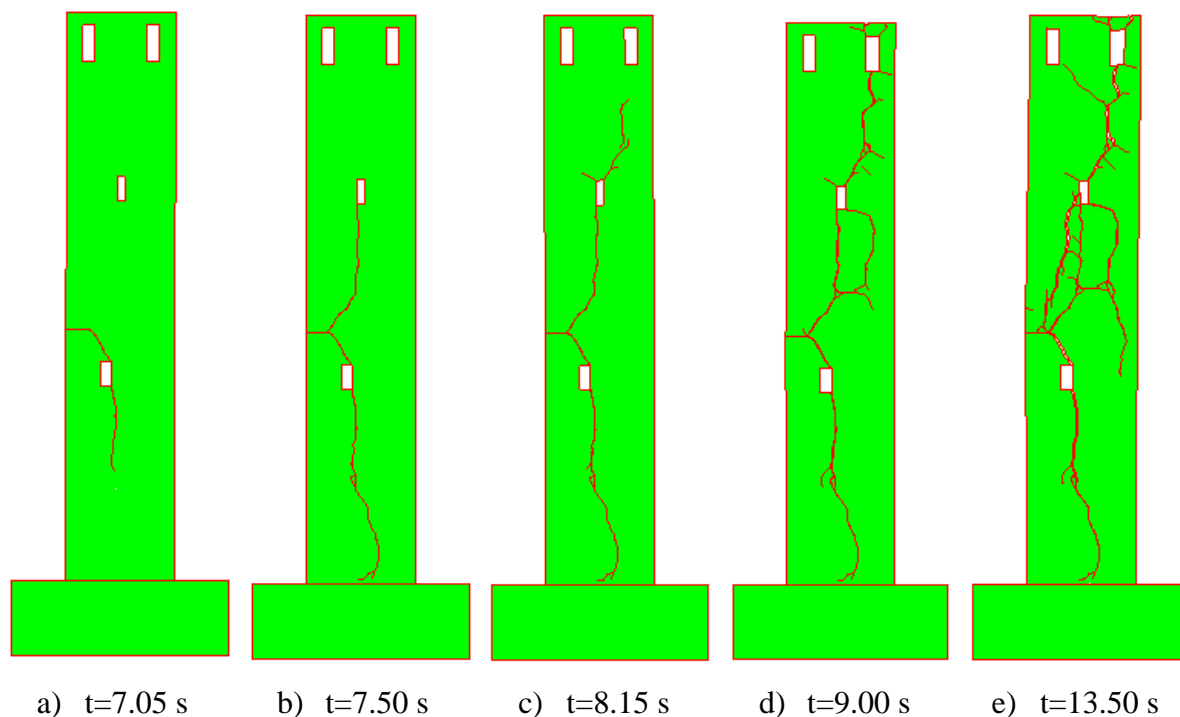
vršno ubrzanje **1.36 g**

## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

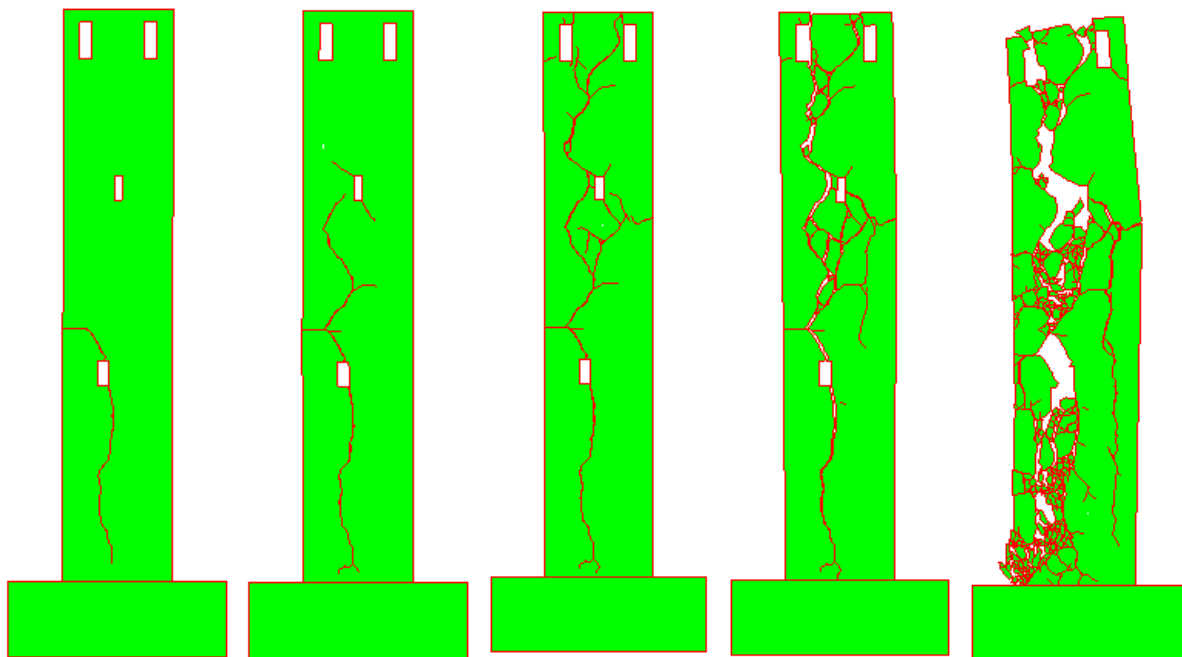
Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres South Island i rubnim uvjetom: slobodno stojeći na elastičnoj podlozi.



*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 1.15 g*



*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 1.35 g*



a)  $t=7.10$  s

b)  $t=8.50$  s

c)  $t=8.75$  s

d)  $t=11.90$  s

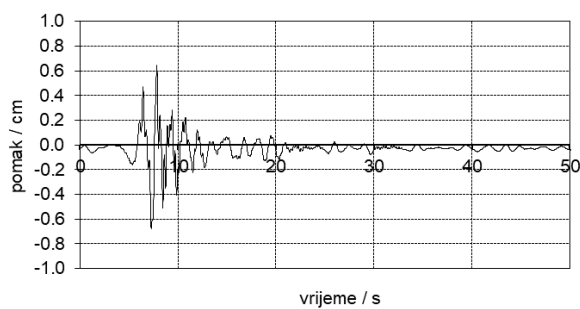
e)  $t=24.05$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje **1.39 g***

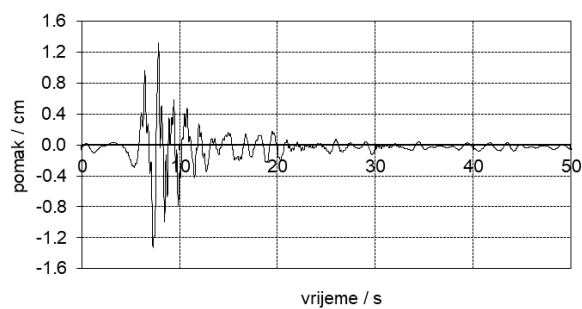


### 3.11. Djelovanje potresa South Island na toranj slobodno stojeći na krutoj podlozi

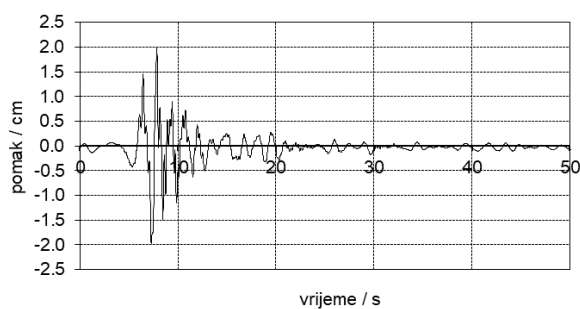
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa South Island za rubni uvjet tornja: slobodno stojeći na krutoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



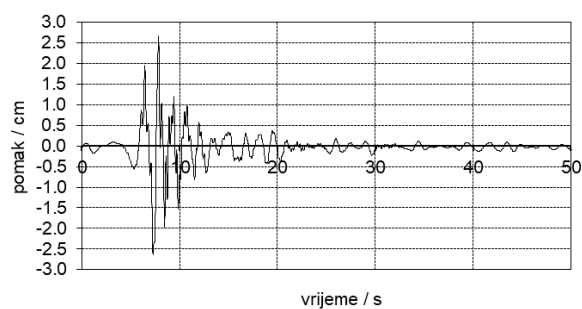
vršno ubrzanje **0.10 g**



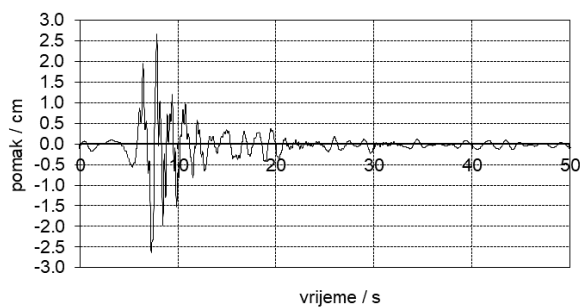
vršno ubrzanje **0.20 g**



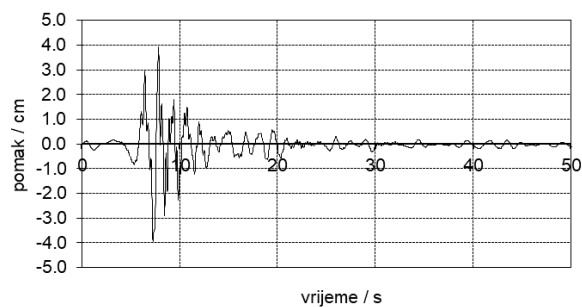
vršno ubrzanje **0.30 g**



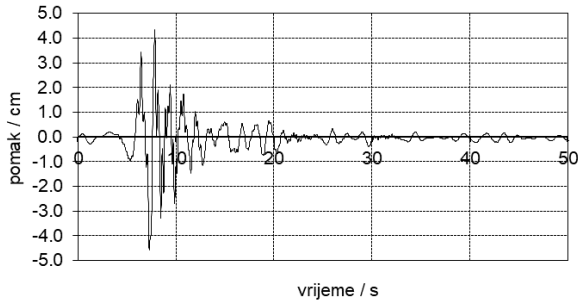
vršno ubrzanje **0.40 g**



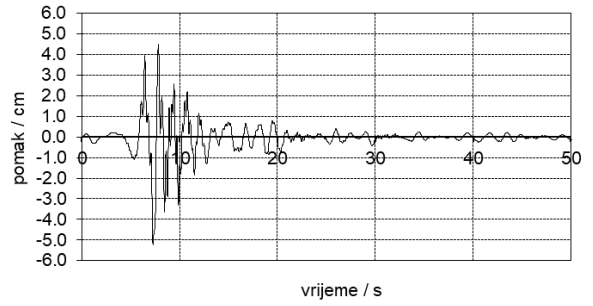
vršno ubrzanje **0.50 g**



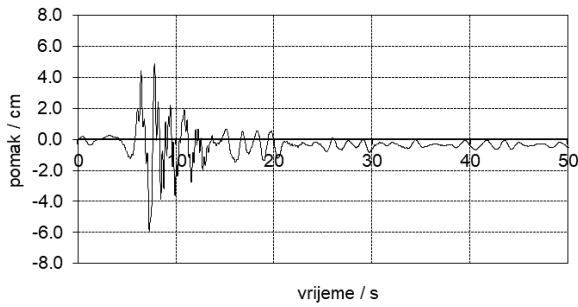
vršno ubrzanje **0.60 g**



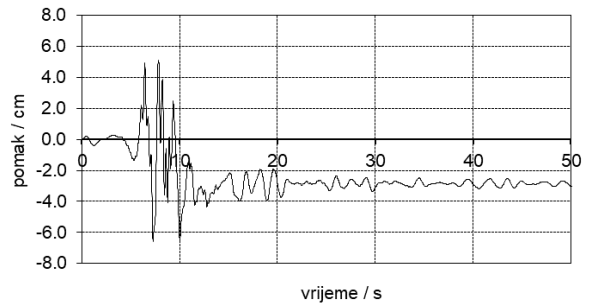
vršno ubrzanje **0.70 g**



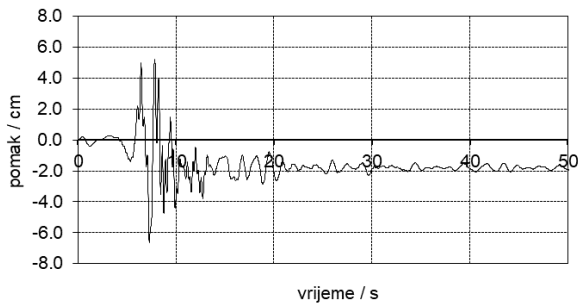
vršno ubrzanje **0.80 g**



vršno ubrzanje **0.90 g**



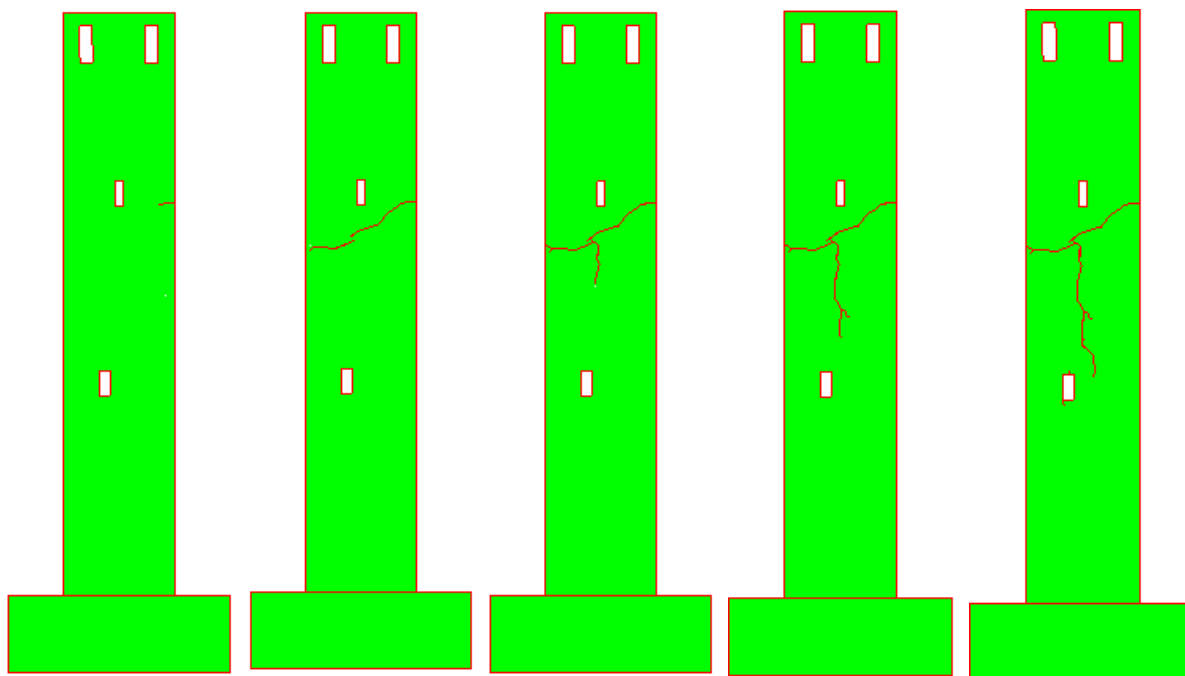
vršno ubrzanje **1.00 g**



vršno ubrzanje **1.01 g**

## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres South Island i rubnim uvjetom: slobodno stojeći na krutoj podlozi.



f)  $t=7.60$  s

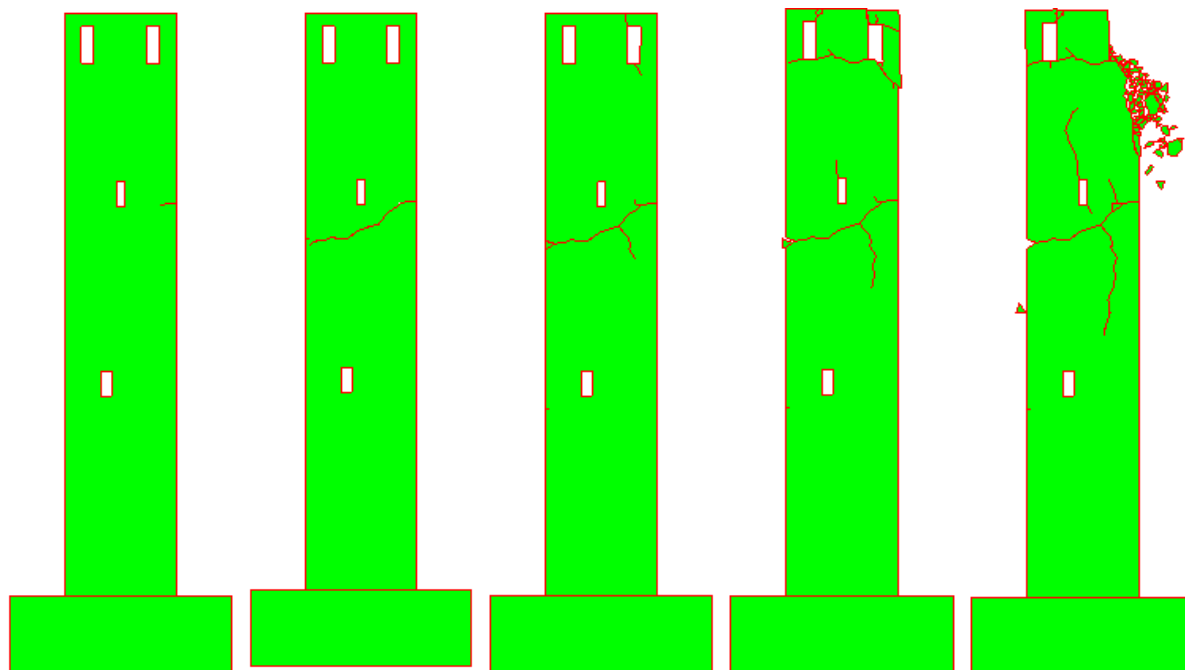
g)  $t=7.65$  s

h)  $t=8.85$  s

i)  $t=9.20$  s

j)  $t=10.00$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje **0.90 g***



a)  $t=7.60$  s

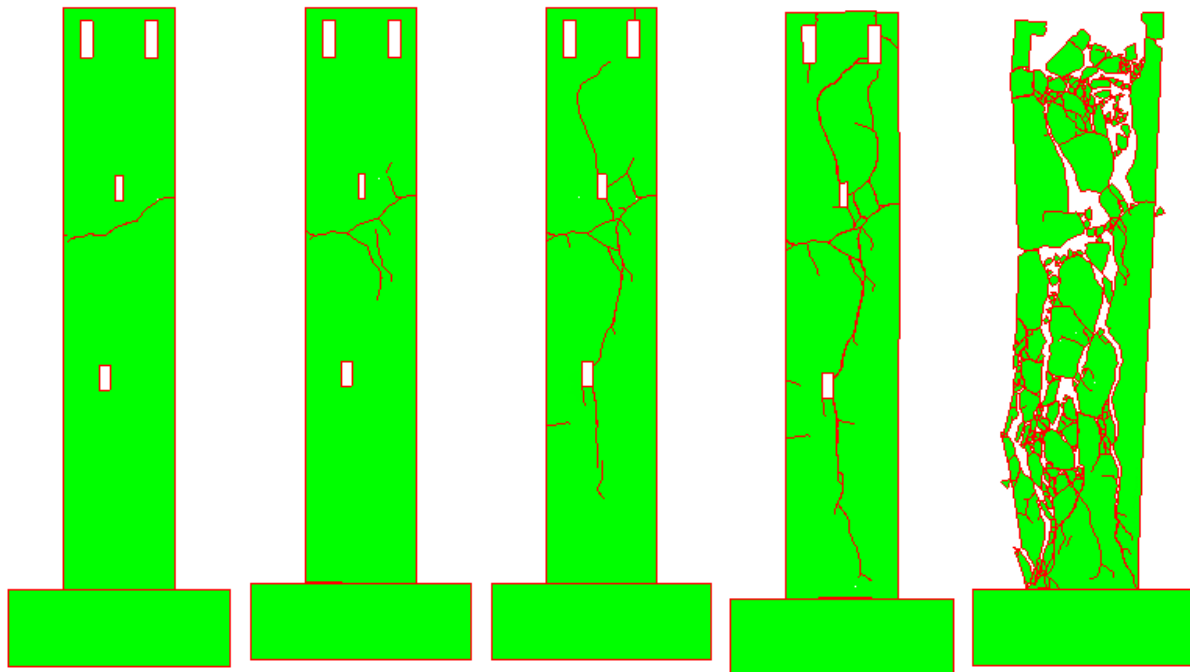
b)  $t=7.65$  s

c)  $t=8.00$  s

d)  $t=9.00$  s

e)  $t=11.25$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje **1.10 g***



a)  $t=7.65$  s

b)  $t=7.85$  s

c)  $t=8.05$  s

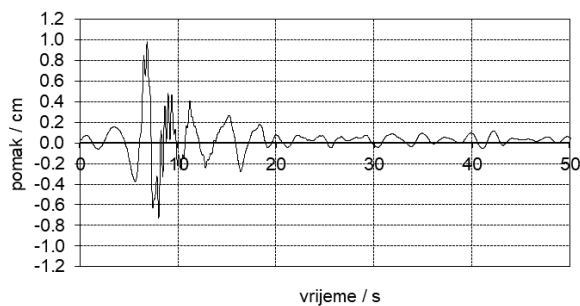
d)  $t=8.35$  s

e)  $t=13.50$  s

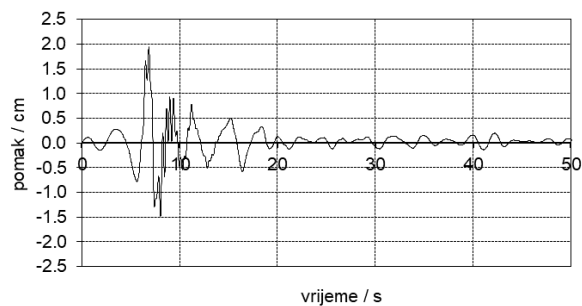
*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje 1.20 g*

### 3.12. Djelovanje potresa South Island na ukopani toranj u elastičnoj podlozi

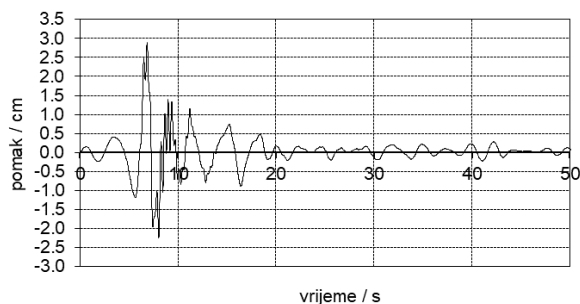
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka vrha tornja u vremenu za vršna ubrzanja potresa South Island za rubni uvjet tornja: ukopan na elastičnoj podlozi. Ubrzanja se monotono povećavaju sve do sloma konstrukcije.



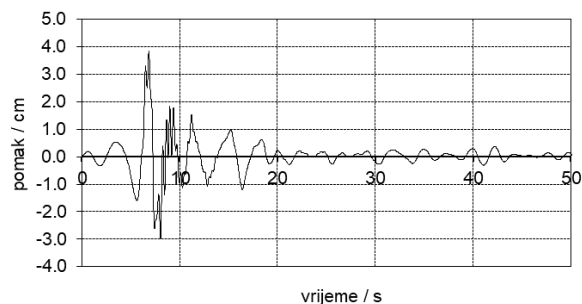
vršno ubrzanje **0.10 g**



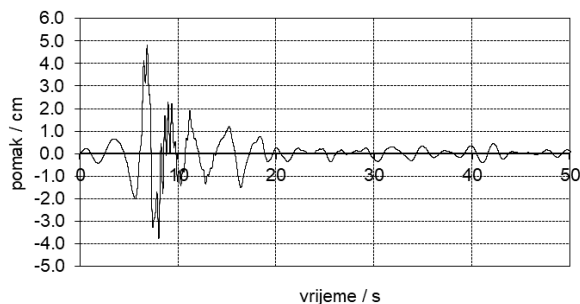
vršno ubrzanje **0.20 g**



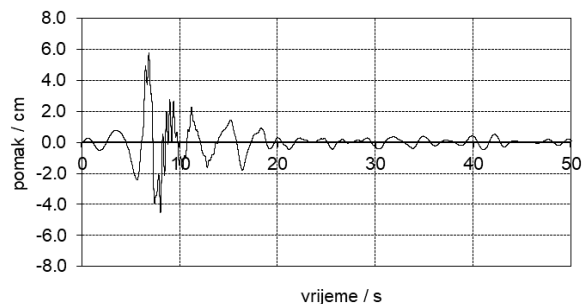
vršno ubrzanje **0.30 g**



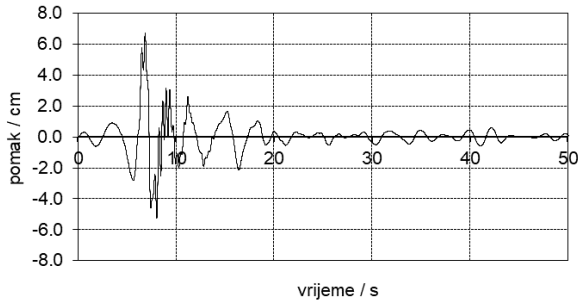
vršno ubrzanje **0.40 g**



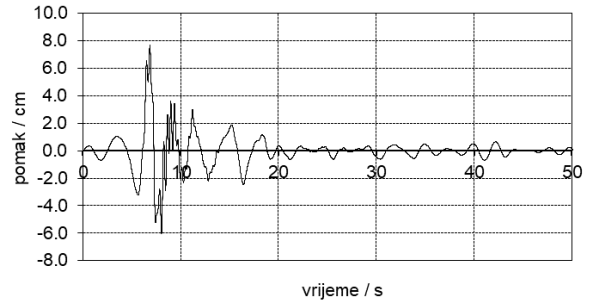
vršno ubrzanje **0.50 g**



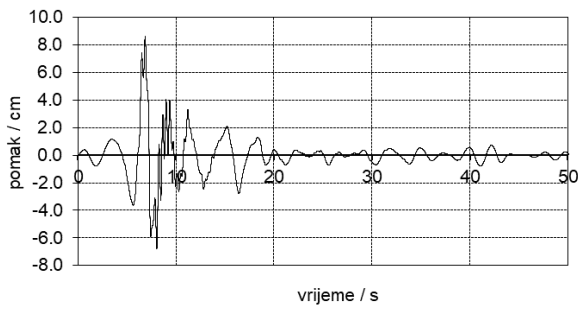
vršno ubrzanje **0.60 g**



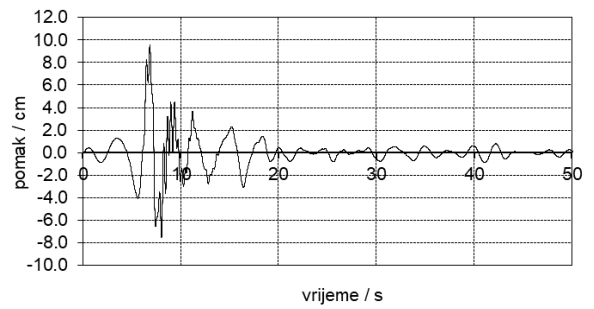
vršno ubrzanje **0.70 g**



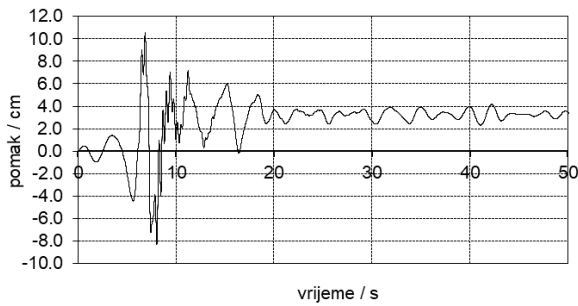
vršno ubrzanje **0.80 g**



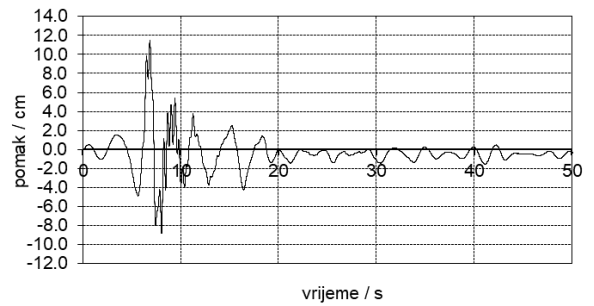
vršno ubrzanje **0.90 g**



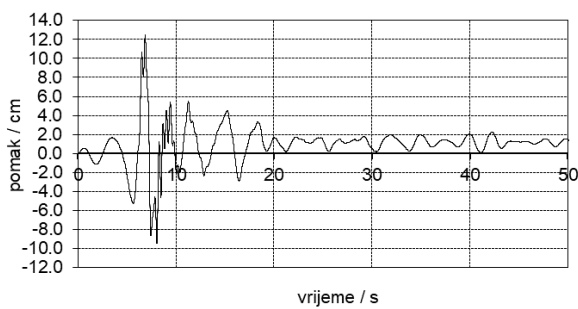
vršno ubrzanje **1.00 g**



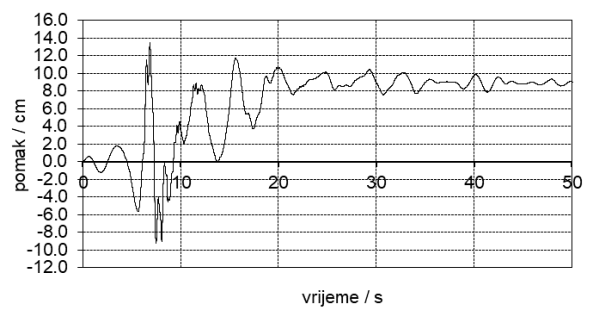
vršno ubrzanje **1.10 g**



vršno ubrzanje **1.20 g**



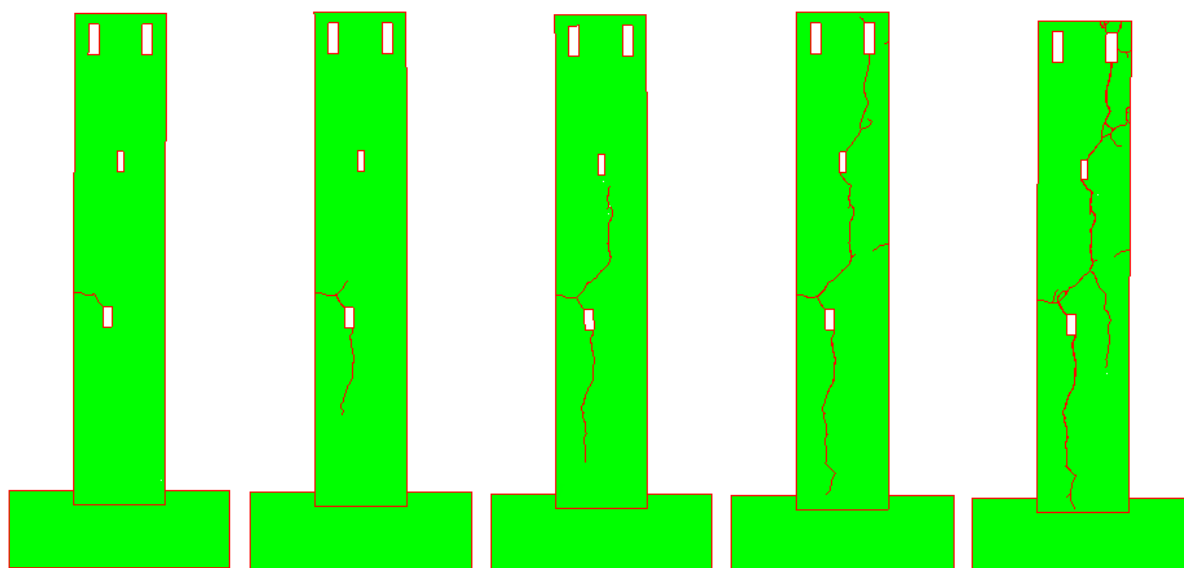
vršno ubrzanje **1.30 g**



vršno ubrzanje **1.40 g**

## Grafički prikaz pojave i širenja pukotina

Prikazani su u nastavku grafički prikazi za vršno ubrzanje u trenutku gdje se pojavila prva pukotina, širenje pukotine te konačni slom konstrukcije za potres South Island i rubnim uvjetom: ukopan na elastičnoj podlozi.



a)  $t=6.95$  s

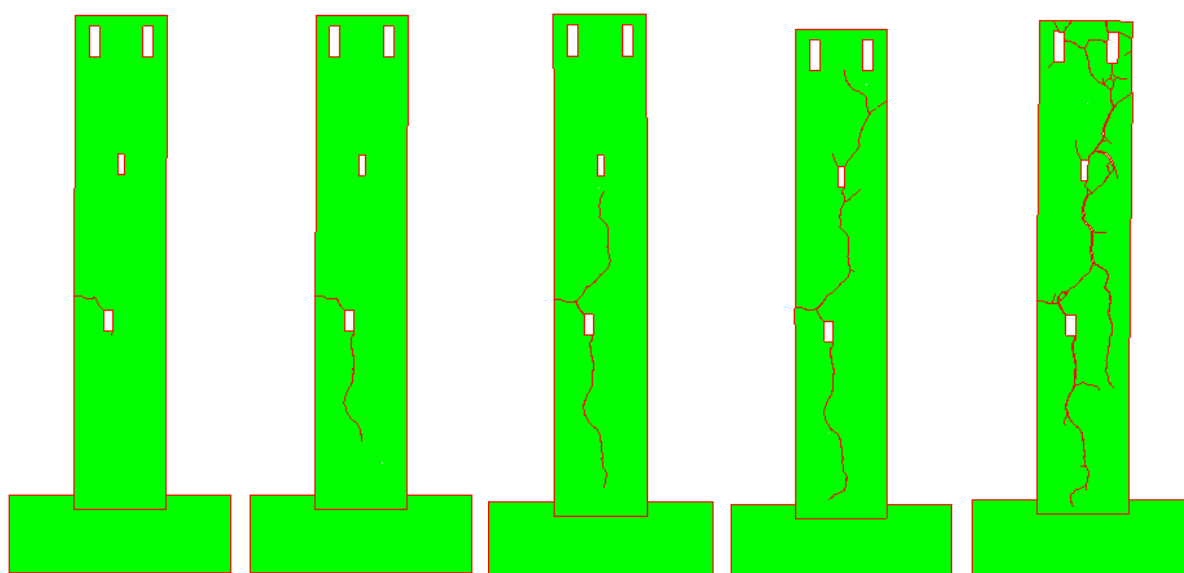
b)  $t=7.45$  s

c)  $t=8.10$  s

d)  $t=8.40$  s

e)  $t=9.50$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 1.35 g*



a)  $t=6.95$  s

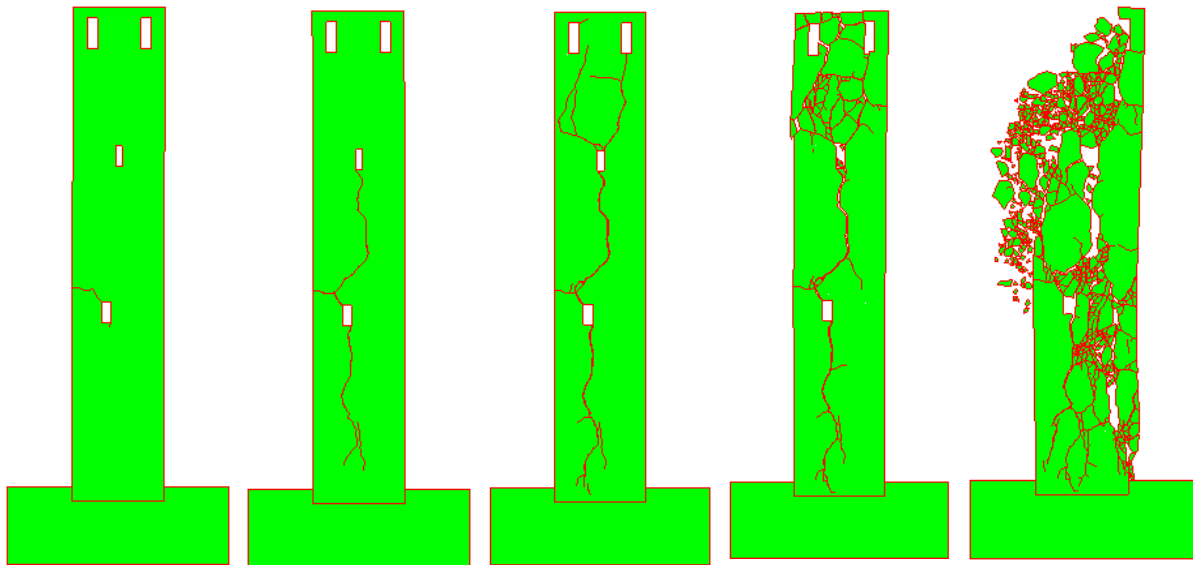
b)  $t=7.10$  s

c)  $t=7.50$  s

d)  $t=8.40$  s

e)  $t=11.50$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubrzanje 1.45 g*



a)  $t=6.95$  s

b)  $t=8.15$  s

c)  $t=8.60$  s

d)  $t=9.55$  s

e)  $t=13.15$  s

*Pojava i širenje pukotina za vršno ubzanje **1.46 g***

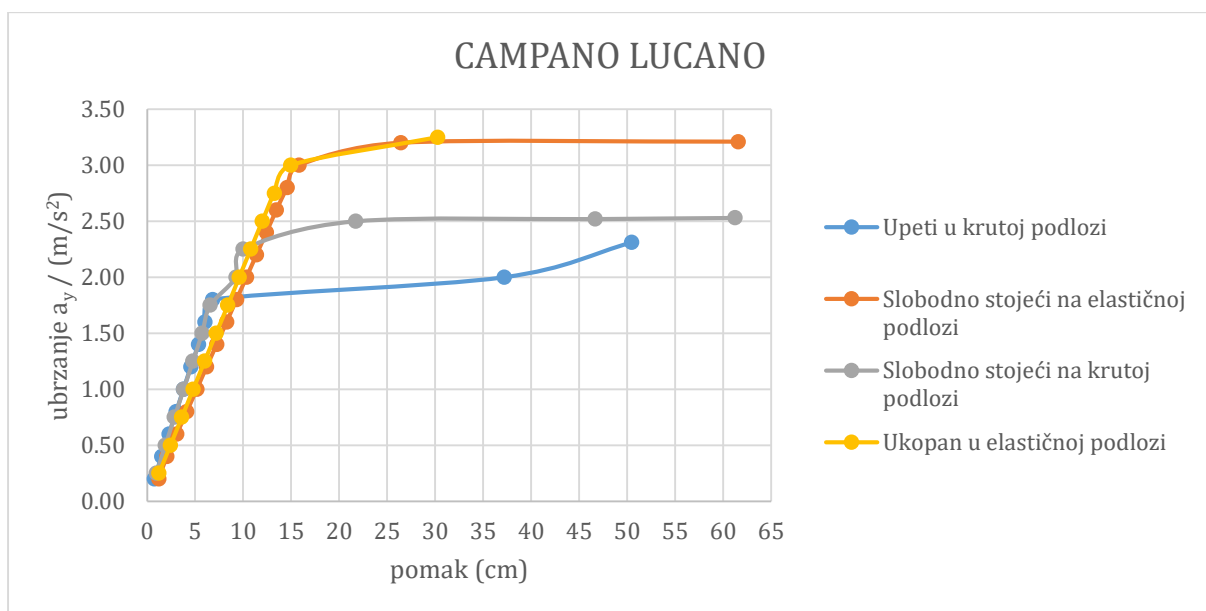


## 4. Analiza rezultata

U nastavku su prikazani tablični prikazi i dijagrami pomaka vrha tornja i ubrzanja za sva tri potresa – Campano Lucano, Petrovac i South Island sa četiri rubna uvjeta

CAMPANO LUCANO							
Upeti u krutoj podlozi		Slobodno stojeći na elastičnoj podlozi		Slobodno stojeći na krutoj podlozi		Ukopan u elastičnoj podlozi	
ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)
0.20	0.74	0.20	1.20	0.25	0.95	0.25	1.22
0.40	1.50	0.40	2.06	0.50	1.88	0.50	2.41
0.60	2.27	0.60	3.09	0.75	2.83	0.75	3.60
0.80	3.03	0.80	4.13	1.00	3.79	1.00	4.79
1.00	3.79	1.00	5.17	1.25	4.76	1.25	5.98
1.20	4.55	1.20	6.20	1.50	5.71	1.50	7.18
1.40	5.34	1.40	7.24	1.75	6.56	1.75	8.40
1.60	6.02	1.60	8.28	2.00	9.24	2.00	9.59
1.80	6.81	1.80	9.31	2.25	9.98	2.25	10.78
2.00	37.20	2.00	10.35	2.50	21.71	2.50	11.99
2.20	27.70	2.20	11.39	2.52	46.66	2.75	13.24
2.31	50.46	2.40	12.43	2.53	61.26	3.00	14.96
2.32	19.18	2.60	13.47			3.25	30.26
2.33	15.80	2.80	14.58			3.30	19.84
2.34	11.75	3.00	15.83				
		3.20	26.44				
		3.21	61.59				

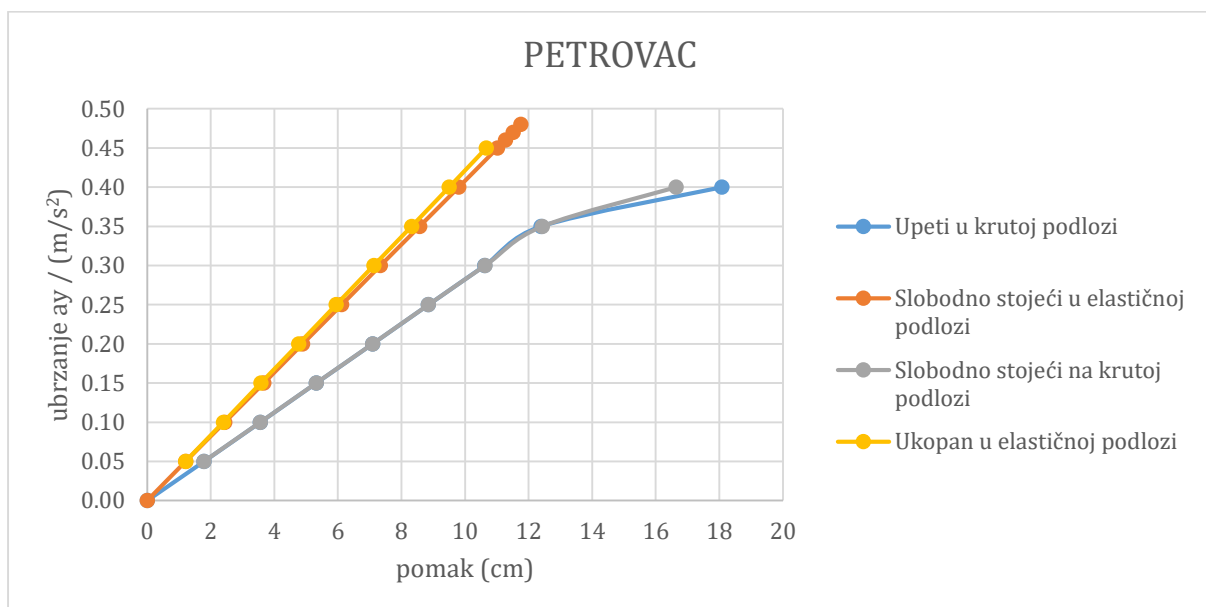
Tablica 2 Ubrzanja i pomaci tornja pri potresu Campano Lucano s četiri rubna uvjeta



Slika 8 Ubrzanja i pomaci tornja pri potresu Campano Lucano s četiri rubna uvjeta

PETROVAC							
Upeti u krutoj podlozi		Slobodno stojeći na elastičnoj podlozi		Slobodno stojeći na krutoj podlozi		Ukopan u elastičnoj podlozi	
ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	1.79	0.05	1.21
0.05	1.79	0.05	1.21	0.10	3.56	0.10	2.40
0.10	3.56	0.10	2.44	0.15	5.32	0.15	3.58
0.15	5.32	0.15	3.67	0.20	7.09	0.20	4.77
0.20	7.09	0.20	4.89	0.25	8.85	0.25	5.95
0.25	8.85	0.25	6.12	0.30	10.63	0.30	7.13
0.30	10.62	0.30	7.34	0.35	12.43	0.35	8.32
0.35	12.39	0.35	8.57	0.40	16.64	0.40	9.50
0.40	18.08	0.40	9.80			0.45	10.67
		0.45	11.02				
		0.46	11.27				
		0.47	11.51				
		0.48	11.76				

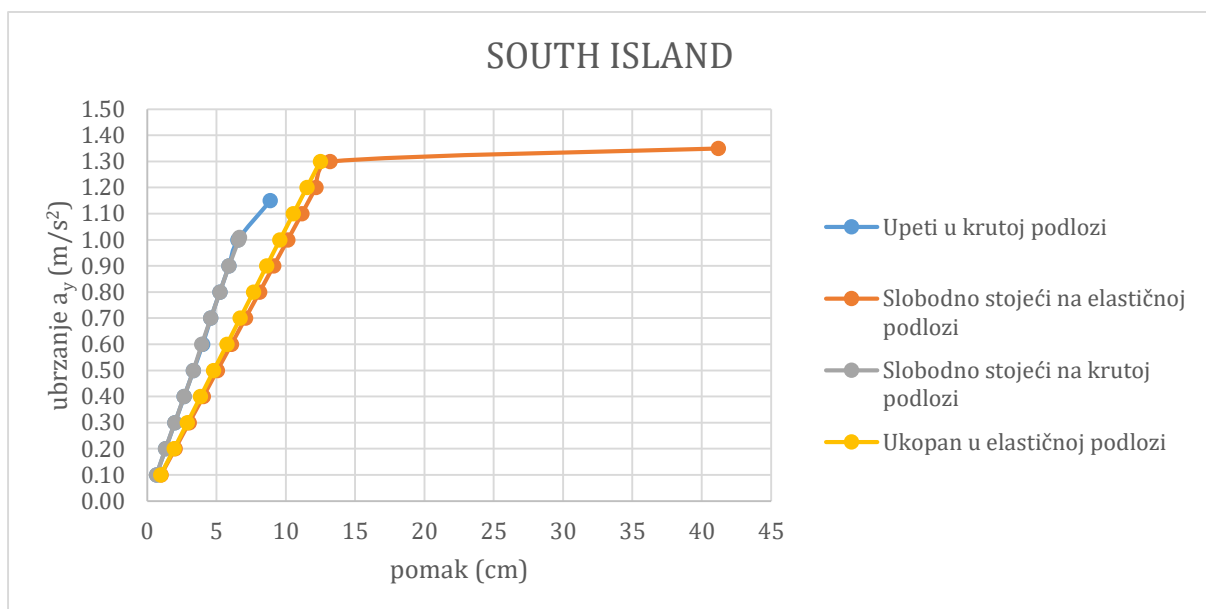
Tablica 3 Ubrzanja i pomaci tornja pri potresu Petrovac s četiri rubna uvjeta



Slika 9 Ubrzanja i pomaci tornja pri potresu Petrovac s četiri rubna uvjeta

SOUTH ISLAND							
Upeti u krutoj podlozi		Slobodno stojeći na elastičnoj podlozi		Slobodno stojeći na krutoj podlozi		Ukopan u elastičnoj podlozi	
ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)
0.10	0.67	0.10	1.00	0.10	0.68	0.10	0.97
0.20	1.33	0.20	2.02	0.20	1.33	0.20	1.94
0.30	2.00	0.30	3.03	0.30	2.00	0.30	2.90
0.40	2.67	0.40	4.05	0.40	2.67	0.40	3.85
0.50	3.34	0.50	5.06	0.50	3.34	0.50	4.80
0.60	4.00	0.60	6.08	0.60	3.94	0.60	5.76
0.70	4.59	0.70	7.09	0.70	4.59	0.70	6.71
0.80	5.24	0.80	8.11	0.80	5.24	0.80	7.67
0.90	5.89	0.90	9.12	0.90	5.90	0.90	8.62
1.00	6.55	1.00	10.14	1.00	6.60	1.00	9.58
1.10	7.21	1.10	11.16	1.01	6.66	1.10	10.55
1.15	8.88	1.20	12.17			1.20	11.52
1.16	7.92	1.30	13.19			1.30	12.49
1.17	9.07	1.35	41.20			1.40	13.46

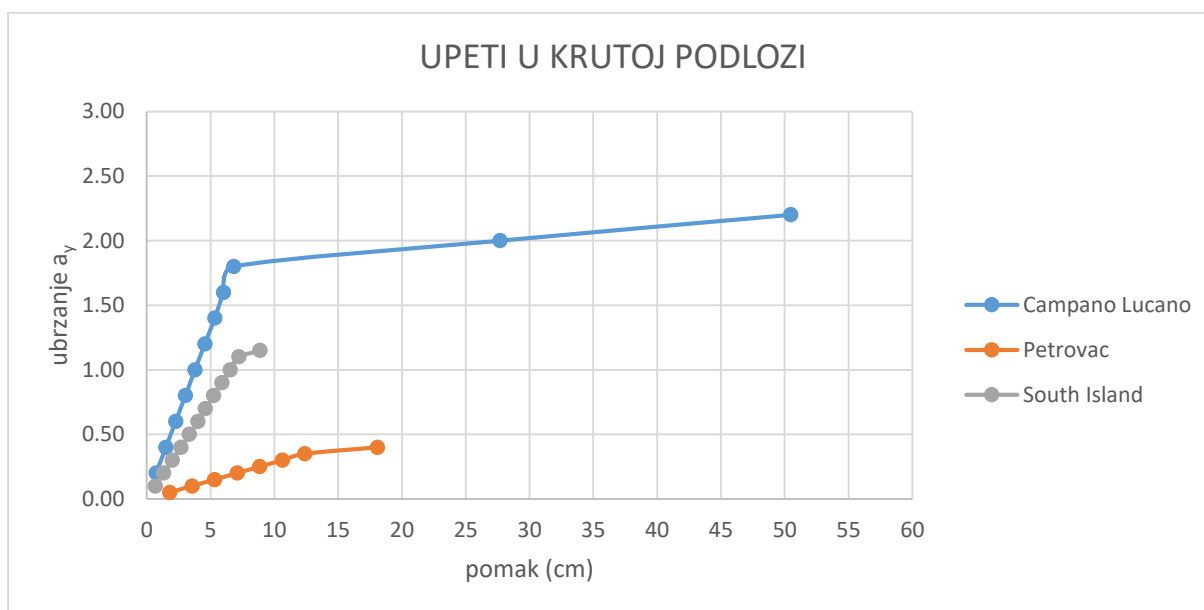
Tablica 4 Ubrzanja i pomaci tornja pri potresu South Island s četiri rubna uvjeta



Slika 10 Ubrzanja i pomaci tornja pri potresu South Island s četiri rubna uvjeta

UPETI U KRUTOJ PODLOZI					
Campano Lucano		Petrovac		South Island	
ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)
0.20	0.74	0.05	1.79	0.10	0.67
0.40	1.50	0.10	3.56	0.20	1.33
0.60	2.27	0.15	5.32	0.30	2.00
0.80	3.03	0.20	7.09	0.40	2.67
1.00	3.79	0.25	8.85	0.50	3.34
1.20	4.55	0.30	10.62	0.60	4.00
1.40	5.34	0.35	12.39	0.70	4.59
1.60	6.02	0.40	18.08	0.80	5.24
1.80	6.81	0.41	12.40	0.90	5.89
2.00	37.20			1.00	6.55
2.20	27.70			1.10	7.21
2.30	9.70			1.15	8.88
2.31	50.46			1.16	7.92
2.32	19.18			1.17	9.07
2.33	15.80				
2.34	11.75				

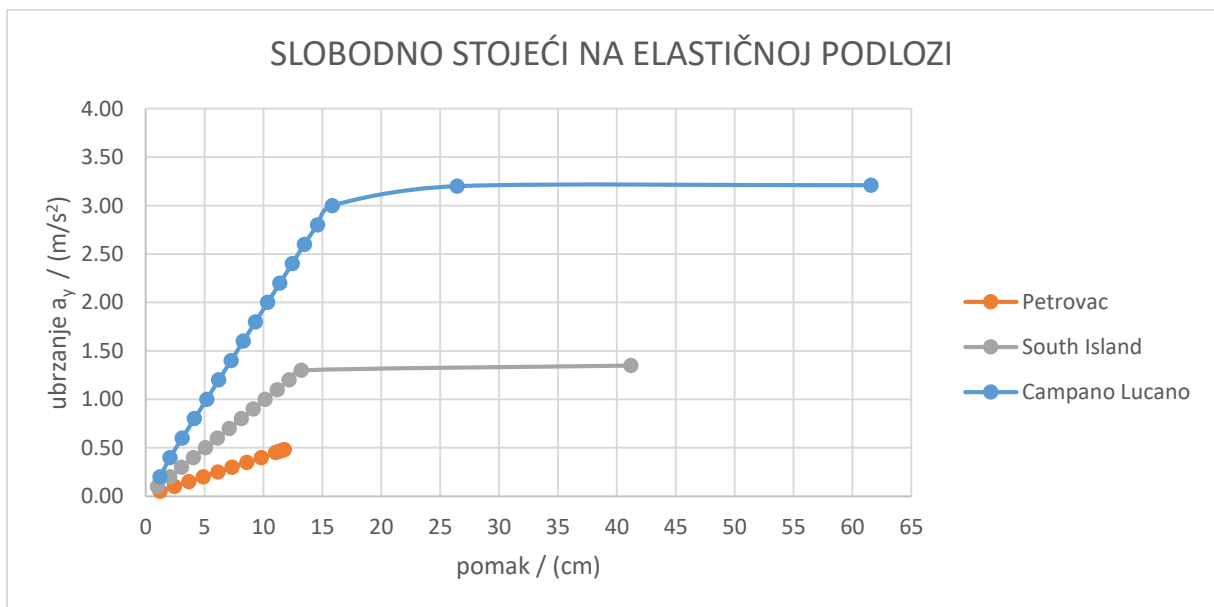
Tablica 5 Ubrzanja i pomaci za rubni uvjet: upeti u krutoj podlozi



Slika 11 Ubrzanja i pomaci za rubni uvjet: upeti u krutoj podlozi

SLOBODNO STOJEĆI NA ELASTIČNOJ PODLOZI					
Campano Lucano		Petrovac		South Island	
ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)
0.20	1.20	0.05	1.21	0.10	1.00
0.40	2.06	0.10	2.44	0.20	2.02
0.60	3.09	0.15	3.67	0.30	3.03
0.80	4.13	0.20	4.89	0.40	4.05
1.00	5.17	0.25	6.12	0.50	5.06
1.20	6.20	0.30	7.34	0.60	6.08
1.40	7.24	0.35	8.57	0.70	7.09
1.60	8.28	0.40	9.80	0.80	8.11
1.80	9.31	0.45	11.02	0.90	9.12
2.00	10.35	0.46	11.27	1.00	10.14
2.20	11.39	0.47	11.51	1.10	11.16
2.40	12.43	0.48	11.76	1.20	12.17
2.60	13.47			1.30	13.19
2.80	14.58			1.35	41.20
3.00	15.83				
3.20	26.44				
3.21	61.59				

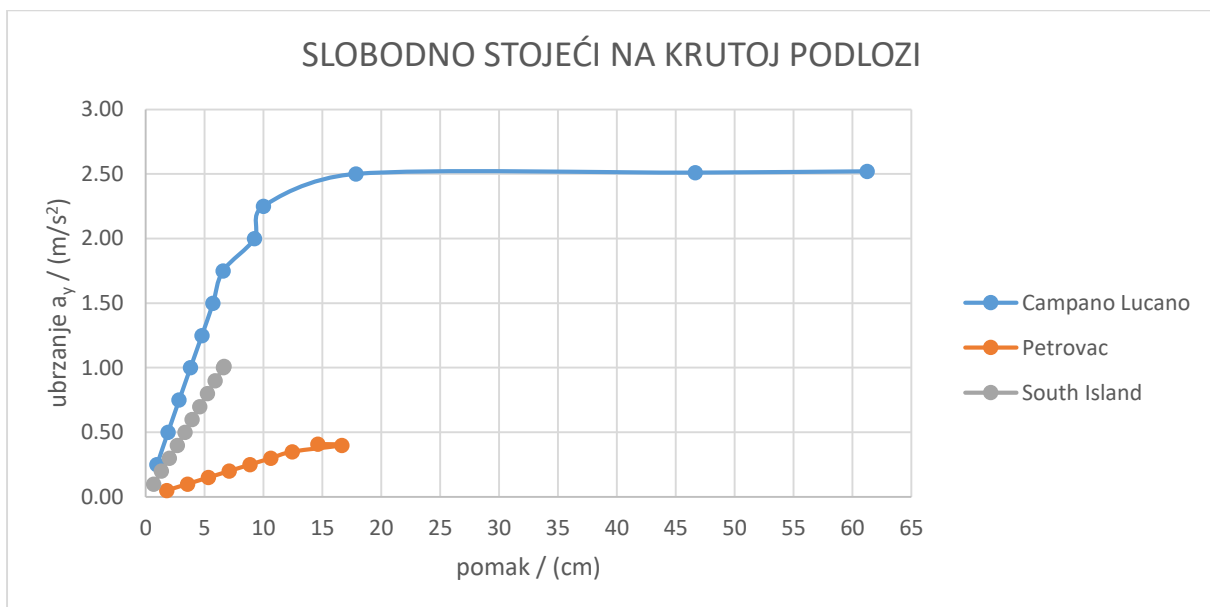
Tablica 6 Ubrzanja i pomaci za rubni uvjet: slobodno stojeći na elastičnoj podlozi



Slika 12 Ubrzanja i pomaci za rubni uvjet: slobodno stojeći na elastičnoj podlozi

SLOBODNO STOJEĆI NA KRUTOJ PODLOZI					
Campano Lucano		Petrovac		South Island	
ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)
0.25	0.95	0.05	1.79	0.10	0.68
0.50	1.88	0.10	3.56	0.20	1.33
0.75	2.83	0.15	5.32	0.30	2.00
1.00	3.79	0.20	7.09	0.40	2.67
1.25	4.76	0.25	8.85	0.50	3.34
1.50	5.71	0.30	10.63	0.60	3.94
1.75	6.56	0.35	12.43	0.70	4.59
2.00	9.24	0.40	16.64	0.80	5.24
2.25	9.98	0.41	14.62	0.90	5.90
2.50	21.71			1.00	6.60
2.51	17.84			1.01	6.66
2.52	46.66				
2.53	61.26				

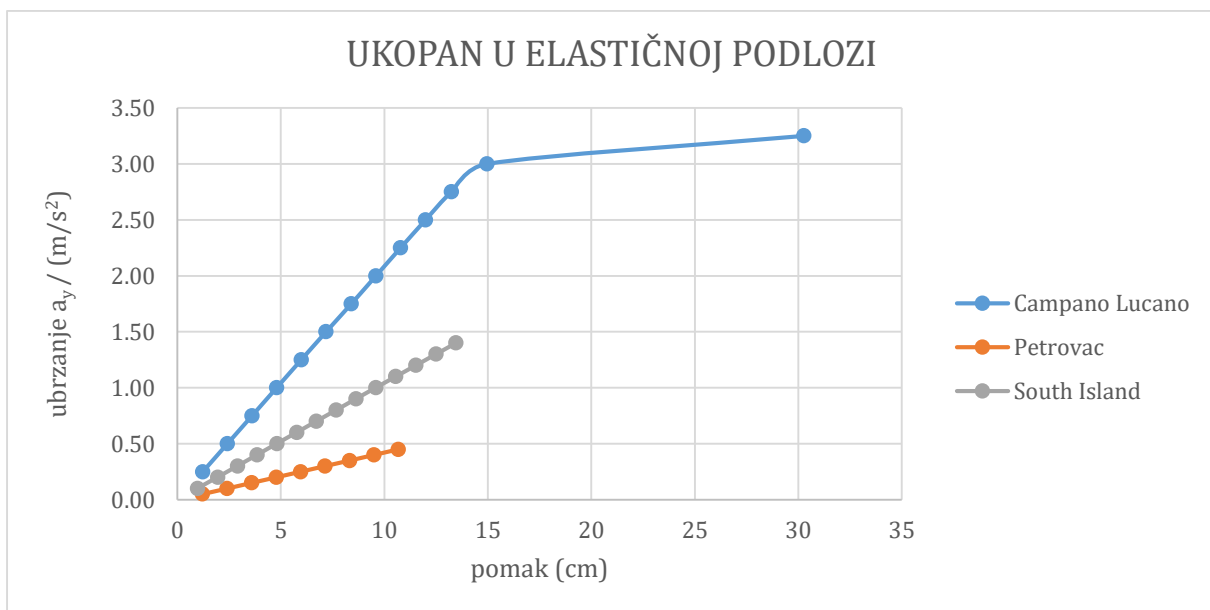
Tablica 7 Ubrzanja i pomaci za rubni uvjet: slobodno stojeći na krutoj podlozi



Slika 13 Ubrzanja i pomaci za rubni uvjet: slobodno stojeći na krutoj podlozi

UKOPAN U ELASTIČNOJ PODLOZI					
Campano Lucano		Petrovac		South Island	
ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)
0.25	1.22	0.05	1.21	0.10	0.97
0.50	2.41	0.10	2.40	0.20	1.94
0.75	3.60	0.15	3.58	0.30	2.90
1.00	4.79	0.20	4.77	0.40	3.85
1.25	5.98	0.25	5.95	0.50	4.80
1.50	7.18	0.30	7.13	0.60	5.76
1.75	8.40	0.35	8.32	0.70	6.71
2.00	9.59	0.40	9.50	0.80	7.67
2.25	10.78	0.45	10.67	0.90	8.62
2.50	11.99			1.00	9.58
2.75	13.24			1.10	10.55
3.00	14.96			1.20	11.52
3.25	30.26			1.30	12.49
3.30	19.84			1.40	13.46

Tablica 8 Ubrzanja i pomaci za rubni uvjet: ukopan u elastičnoj podlozi



Slika 14 Ubrzanja i pomaci za rubni uvjet: ukopan u elastičnoj podlozi

#### **4.1. Zaključak**

U ovom radu prikazana je primjena kombinirane metode konačno-diskretnih elemenata u analizi stabilnosti zidanog srednjovjekovnog obrambenog tornja Donà u Italiji. . Toranj je izložen horizontalnim i vertikalnim ubrzanjima podloge snimljenima za vrijeme tri realna potresa, čije su amplitude inkrementalno povećavane do sloma konstrukcije..

Provedena je usporedba numeričkih rezultata na model tornja za svaki potres pri četiri različita rubna uvjeta (toranj upet u krutoj podlozi, toranj slobodnostojeći na elastičnoj podlozi, toranj slobodnostojeći na krutoj podlozi i toranj ukopan u elastičnoj podlozi) s ciljem usporedbe te dobivanja najoptimalnijeg i najrealističnijeg rješenja rubnog uvjeta.

Na temelju rezultata numeričke analize provedenih u radu može se uočiti da su pomaci najveći kada je toranj slobodno oslonjen na elastičnoj podlozi, a najmanji kada je ukopan u elastičnoj podlozi. Može se zaključiti da je najpovoljniji rubni uvjet kada je toranj ukopan u elastičnoj podlozi, tj. u stišljivom tlu, što najrealnije simulira ponašanje konstrukcije. Također, pokazalo se da su pri potresu Petrovac pomaci primjetno manji za razliku od ostalih potresa te da najbrže dolazi do pojave pukotina i sloma konstrukcije, dok su pri potresu Campano Lucano pomaci najveći, čak i do 60 cm. U radu su prikazane i simulacije pojave pukotina, njihovog širenja te konačnog sloma konstrukcije.



## 5. Literatura

- [1] Zubović, E., Smoljanović, H., Trogrlić, B., 2015. Analiza stabilnosti suho zidanih kamenih nadvoja kombiniranom metodom konačno-diskretnih elemenata. *Građevinar*, 67(03.), pp.259-268.
- [2] Smoljanović, H., Živaljić, N., Nikolić, Ž., 2013. Nelinearna analiza građevinskih konstrukcija kombiniranom metodom konačnodiskretnih elemenata. *Građevinar*, 65(4), pp.331-344.
- [3] Hazay, M., Munjiza, A., 2016. Introduction to the combined finite-discrete element method. In *Computational Modeling of Masonry Structures Using the Discrete Element Method* (pp. 123-145). IGI Global.
- [4] Munjiza, A. *The Combined Finite-Discrete Element Method*; John Wiley & Sons: Oxford, UK, 2004.
- [5] 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
- [6] Casolo, S., Milani, G., Uva, G. and Alessandri, C., 2013. Comparative seismic vulnerability analysis on ten masonry towers in the coastal Po Valley in Italy. *Engineering Structures*, 49, pp.465-490.
- [7] Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities, (2014) Version 2.8.5
- [8] Y: FEM/DEM COMPUTER PROGRAM, Copyright (C) 2000, Dr. Antonio Munjiza