

Primljen / Received: 1.12.2023.
Ispravljen / Corrected: 22.5.2024.
Prihvaćen / Accepted: 20.6.2024.
Dostupno online / Available online: 10.8.2024.

Učinci kinematičke interakcije između tla i konstrukcije na seizmičko ponašanje armiranobetonskih konstrukcija

Autori:



Nikola Petrov, dipl.ing.građ.

Institut za inženjersku seizmologiju i seizmičko inženjerstvo - IZiIS

Sjeverna Makedonija

petrovnikola93@gmail.com

Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Julijana Bojadjieva**, dipl.ing.građ.

Institut za inženjersku seizmologiju i seizmičko inženjerstvo - IZiIS

Sjeverna Makedonija

jule@iziis.ukim.edu.mk



Doc.dr.sc. **Jordan Bojadziev**, dipl.ing.građ.

Međunarodno balkansko sveučilište, Skopje

Sjeverna Makedonija

bojadziev@gmail.com

Stručni rad

Nikola Petrov, Julijana Bojadjieva, Jordan Bojadziev

Učinci kinematičke interakcije između tla i konstrukcije na seizmičko ponašanje armiranobetonskih konstrukcija

Interakcija između tla i konstrukcije može biti od osobite važnosti u seizmički aktivnim područjima. U ovom radu, uz pomoć američkih normi, analizirana je interakcija šesterokatne armiranobetonske okvirne konstrukcije i tla tipa B i C prema Eurokodu 8. Usporedbom odgovora na seizmičku pobudu te konstrukcije, temeljene na različitim tipovima tla i s različitim konfiguracijama ukopavanja, prikazuje se utjecaj interakcije tla i konstrukcije. Iz rezultata dobivenih linearno elastičnom analizom može se uočiti da uključivanje lokalnih uvjeta tla i ukopavanja temelja, doprinosi smanjenju seizmičkih sila, ali istodobno povećava ukupne horizontalne i međukatne pomake. Ovaj rad naglašava potrebu za uključivanjem lokalnih uvjeta tla i ukopavanja temelja u analizu kako bi se osigurala sigurnost i izbjegle nepredviđene deformacije tijekom seizmičkih djelovanja.

Ključne riječi:

interakcija tlo-konstrukcija, kinematička interakcija, produženje perioda, linearna analiza, ukopavanje

Professional paper

Nikola Petrov, Julijana Bojadjieva, Jordan Bojadziev

Kinematic SSI effects on seismic performance of RC structures

In seismic regions, understanding soil–structure interaction (SSI) is crucial. This study examines the SSI effects on a six-storey RC-frame building using American guidelines for soil types B and C as per Eurocode 8. Structural responses of a constant structural system under various soil types and embedment conditions are compared, revealing significant influences on seismic behaviour. The study employs linear-elastic analysis to demonstrate that local soil and embedment conditions decrease base shear forces but increase total horizontal displacements and inter-storey drifts. This study highlights the importance of considering local soil conditions and embedment configurations to ensure structural resilience in earthquake-prone areas.

Key words:

soil-structure interaction, kinematic interaction, period lengthening, linear analysis, embedding

1. Uvod

Razvojem potresnog inženjerstva povećana je potražnja za projektiranjem konstrukcija koje mogu izdržati posebno snažne potrese uz pretrpljene štete, ali bez rušenja. Svaka konstrukcija izložena djelovanju seizmičke pobude, ovisno o njezinim konstrukcijskim karakteristikama, ostvaruje određene sile i pomake. Međutim, u posljednjih nekoliko godina brojna istraživanja i stručnjaci iz područja konstrukcijskog i geotehničkog inženjerstva [1, 2] potvrđuju činjenicu da odgovor konstrukcije tijekom seizmičkih djelovanja ne ovisi samo o konstrukcijskom sustavu, već i o vezi između tri međusobno povezana sustava, a to su: a) konstrukcija, b) temelji i c) tlo.

Ova veza u literaturi je poznata kao "interakcija tla i konstrukcije" i bavi se cjelokupnim odgovorom ovog složenog sustava tijekom potresa [3-6]. U Eurokodu 8 - dio 5, u poglavlju 6 i Anexu D [7], daju se informacije povezane s utjecajem interakcije tla i konstrukcija na objekte. U njemu se ističe koji su tipovi konstrukcija i tla pogodniji za pojavu učinka interakcije tla i konstrukcije. Međutim, nije uzet u obzir utjecaj tipa temeljne konstrukcije, kao ni dubina ukopavanja objekta. Ovo je slučaj u većini propisa za projektiranje što ističu i mnogi istraživači u ovom području [8-11].

Za razliku od Eurokoda 8, američka istraživanja i smjernice prije donošenja normi dublje ulaze u ovu problematiku. Smjernice NIST-a pod nazivom "Interakcija tla i konstrukcije za građevinske objekte" [12], kao i FEMA P-2019 – "Praktični vodič za interakciju tla i konstrukcije" [13], pružaju temeljitije smjernice za uključivanje uvjeta tla u analizu, kao i njihov utjecaj na odgovor konstrukcije. Između ostalog, u Eurokodu 8 – dio 5 naglašeno je da interakcija tla i konstrukcije ima značajan utjecaj u uvjetima kada su objekti temeljeni na izuzetno lošim tlima s vrijednostima brzine posmičnih valova $V_s \leq 100$ m/s. U američkim istraživanjima i pravilima, kao osnovni preliminarni uvjet za magnitudu utjecaja interakcije tla i konstrukcije uzima se izraz

$$\frac{h'}{v_s \cdot T} \quad (1)$$

gdje je:

h' – efektivna visina konstrukcije

v_s – brzina seizmičkih valova

T – period vlastitih vibracija.

Vrijednosti veće od 0,1 [13] upućuju na mogućnost značajnih utjecaja interakcije tla i konstrukcije na odgovor konstrukcije.

Iz ovoga se može zaključiti da utjecaj interakcije tla i konstrukcije na seizmički odgovor konstrukcije ne ovisi samo o tipu tla već i o visini objekta te o periodu vlastitih vibracija.

Uzimajući u obzir detaljne smjernice za ovu problematiku obuhvaćene u američkim propisima i vodičima, za potrebe

ovog rada primijenjene su kvantitativne preporuke kako bi se modelirao i analizirao sustav konstrukcije, temeljen na tlu tipa B i tlu tipa C prema Eurokodu 8. To je učinjeno kako bi se shvatilo utjecaj učinaka interakcije između tla i konstrukcije na odgovor konstrukcije, s ciljem da se naglasi važnost tih učinaka i da primjena navedenih smjernica postane dio projektantske prakse. Cilj je sveobuhvatno i realistično analizirati konstrukciju te uzimajući u obzir interakcije tla i konstrukcije izbjeći potencijalno neželjene učinke i posljedice. Posebnu pozornost treba obratiti na učinke kinematičke interakcije između tla i konstrukcije, kako bi se shvatilo utjecaj ukopavanja i tipa temeljne konstrukcije na odgovor konstrukcije. Iako interakcija tla i konstrukcije može imati utjecaj i u slučaju tla s dobrim nosivim karakteristikama (tlo tipa A), to nije uzeto u obzir u ovom radu jer tlo tipa A osigurava gotovo potpunu krutost temelja. Kao rezultat toga, ne očekuje se značajno oslobađanje rotacija i translacija na razini temelja, što vodi ka minimalnim razlikama u pogledu seizmičke sile i momenata izazvanih tom silom, u odnosu na model analiziran na krutim temeljima.

U radu je prikazana temeljita analiza odgovora jednog nepromijenjenog konstrukcijskog sustava pod djelovanjem seizmičkih sila u različitim uvjetima temeljenja i konfiguracijama ukopavanja. Primijenjena je linearna analiza kako bi se istražilo ponašanje konstrukcije. Seizmičke sile su izračunane pomoću spektralne analize prema Eurokodu 8. Odgovor konstrukcije je analiziran iz aspekta katnih pomaka, međukatnih pomaka, katnih momenata i katnih sila izazvanih potresnim djelovanjem. Također, detaljno su analizirani i objašnjeni učinci promjene lokalnih uvjeta temeljenja i konfiguracije ukopavanja objekta.

2. Metode za modeliranje interakcije tla i konstrukcije

Prema literaturi [13, 14], postoje dvije osnovne metode za modeliranje veze između konstrukcije, temelja i tla, a to su: simulacija potkonstrukcije i direktna analiza.

Metodom potkonstrukcije, tlo se predstavlja uz pomoć opruga [13, 15], kojima se definiraju takve krutosti kako bi se simulirala prisutnost i ponašanje tla na kojem je temeljena konstrukcija. Ovisno o stupnju u kojem je potrebno uključiti uvjete tla, ove opruge mogu biti postavljene samo na dnu temeljne konstrukcije (postavljene okomito na plohu kontakta), pri čemu je kruto spriječena horizontalna translacija temeljne konstrukcije. U slučaju ukopanih objekata, kako bi se prikazala mogućnost horizontalne translacije temeljne konstrukcije u odnosu na okolno tlo, koriste se i horizontalne opruge (postavljene okomito na podrumске zidove).

Za razliku od navedenog, metoda direktne analize temelji se na modeliranju pomoću konačnih elemenata [16, 17], kako konstrukcije tako i elastičnog poluprostora koji simulira tlo. Modeliranje tla proteže se u dovoljnoj mjeri ispod i oko

konstrukcije kako bi se što preciznije simuliralo stvarno stanje. U obje metode, u seizmičkom proračunu sila se zadaje na kraju tlačnog medija (opruge) kroz koji se seizmički valovi kreću i pobuđuju konstrukciju. Pri tome, i konstrukcija sa svojom težinom i karakteristikama utječe na ponašanje tla.

Zasad je u praksi najčešća metoda potkonstrukcije, dok se metoda direktne analize primjenjuje samo za veće objekte od vitalnog značaja, kao što su nuklearne elektrane, veliki infrastrukturni objekti (mostovi, tuneli) i sl.

Za potrebe rada provedene su dvije analize. Modalna analiza s 12 oblika tonova provedena je kako bi se dobile osnovne dinamičke karakteristike sustava (periodi oscilacija i oblici tonova). Pomoću linearne elastične analize izračunane su seizmičke sile koje djeluju na konstrukciju. Tom analizom dobivene su vrijednosti seizmičkih sila, kao i katni momenti i deformacije konstrukcijskih elemenata. Kako bi se obuhvatio utjecaj interakcije tla i konstrukcije, primjenjena je metoda potkonstrukcije.

3. Učinci interakcije tla i konstrukcije

Pomicanje tla koji se simulira na krajevima krutih opruga razlikuje se od pravog pomaka tla na kontaktu s temeljnom konstrukcijom. Ovo proizlazi iz utjecaja same konstrukcije na tlo, kao i zbog deformacija u oprugama [21]. Naime, kako se povećavaju deformacije u tlu, tako se povećava i disipacija seizmičke energije. To je posljedica interakcije tla i konstrukcije, odnosno učinaka kinematičke i inercijske interakcije između tla i konstrukcije. Osnovni učinci kinematičke interakcije su:

- uprosječavanje pomaka zbog temeljne ploče/učinci temeljne konstrukcije
- redukcija seizmičke pobude zbog ukopavanja.

Uprosjčavanje pomaka zbog temeljne ploče događa se zbog nejednakog širenja seizmičkih valova po površini temelja. Što se tiče ukopavanja, pobuda na razini temeljne konstrukcije se reducira s povećanjem dubine, kao posljedica smanjenja gibanja tla sa povećanjem dubine ispod površine zemlje.

Osim kinematičke interakcije, koja predstavlja vezu između pobude i konstrukcije, postoji i inercijska interakcija. Inercijska interakcija je dinamička interakcija između konstrukcije, temelja i tla. Učinci inercijske interakcije su:

- povećanje perioda vlastitih vibracija
- prigušenje temelja
- radijalno prigušenje
- prigušenje tla

Povećanje perioda vlastitih vibracija događa se zbog povećane fleksibilnosti temelja i zamjene krutih rubnih uvjeta s elastičnim medijem. Radijalno prigušenje je prigušenje u sustavu tla i konstrukcije koje se stvara zbog širenja seizmičkih valova izvan temelja, a koje se događa zbog dinamičkog pomicanja temeljne konstrukcije u odnosu na tlo. Prigušenje tla je materijalno i slično je viskoznom prigušenju konstrukcija, koje se stvara kao posljedica

linearnih i nelinearnih deformacija u tlu [12]. Kao što je ranije spomenuto, u određenim situacijama interakcija tla i konstrukcije može imati značajan utjecaj i uvelike promijeniti ponašanje konstrukcija tijekom potresa, kao i projektne veličine seizmičkih sila. Ovi učinci [22] su izraženiji kod objekata s temeljnim konstrukcijama velikih površina, kod ukopanih objekata i kod konstrukcija čiji je omjer između vlastite krutosti i krutosti tla na kojem su temeljene velik. Prva dva slučaja su učinci kinematičke interakcije, a zadnji učinak je inercijske interakcije između tla i konstrukcije.

3.1 Učinci kinematičke interakcije

3.1.1. Učinci temeljne konstrukcije

Učinci temeljne konstrukcije su prvi tip učinaka kinematičke interakcije između tla i konstrukcije. Taj učinak ovisi samo o konstrukciji i geometriji temelja. Pod utjecajem tih učinaka dolazi do smanjenja spektralnog ubrzanja zbog neusklađenosti u pomacima tla ispod temeljne konstrukcije. To može biti uzrokovano razlikama u vremenskim intervalima u kojima valovi stižu do različitih točaka temeljne konstrukcije, kao i njihovim karakteristikama zbog moguće prisutnosti različitih uvjeta tla ispod različitih dijelova objekta. Zbog toga, može se dogoditi da se jedna strana konstrukcije pomakne u jednom smjeru, a druga se strana pomiče u suprotnom smjeru, što rezultira suprotnim deformacijama i manjim ukupnim deformacijama.

U američkim smjernicama i preporukama usvojeni su izrazi prema kojima se izračunava koeficijent smanjenja spektra pod utjecajem ovog fenomena. Za njegov izračun uzima se u obzir samo površina temeljne konstrukcije A_{base} kao i prosječna brzina širenja seizmičkih valova u efektivnom profilu tla v_s .

Polazište pri izračunu ovog koeficijenta je određivanje efektivne veličine stranice temeljne konstrukcije [23], $b_e = \sqrt{A_{base}}$. Maksimalna vrijednost za efektivnu veličinu stranice ograničena je na 80 m [13, 24] zbog toga što su istraživanja, koja su provedena kako bi se došlo do ovih vrijednosti, rađena na stvarnim objektima čije su maksimalne ekvivalentne dimenzije temeljne konstrukcije 80 m. Sljedeći korak je izračun koeficijenta b_o , prema izrazu (2):

$$b_o = 0,0023 \left(\frac{b_e}{T} \right) \quad (2)$$

Minimalna vrijednost za T (period vlastitih oscilacija) je ograničena na 0,2 s [13]. Nakon što je izračunan b_o , sljedeće se izračunava koeficijent B_{bsa} :

$$B_{bsa} = 1 + b_o^2 + b_o^4 + \frac{b_o^6}{2} + \frac{b_o^8}{4} + \frac{b_o^{10}}{12} \quad \text{za } b_o \leq 1 \quad (3.1)$$

$$B_{bsa} = \exp(2 \cdot b_o^2) \left[\frac{1}{\sqrt{\pi \cdot b_o}} \left(1 - \frac{1}{16 \cdot b_o^2} \right) \right] \quad \text{za } b_o > 1 \quad (3.2)$$

Na kraju se izračunavaju vrijednosti koeficijenta za redukciju za svaku vrijednost perioda spektra prema sljedećem izrazu (4):

$$RRS_{bsa} = 0,25 + 0,75 \left\{ \frac{1}{b_0^2} \left[1 - \left(\exp(-2 \cdot b_0^2) \right) \cdot B_{bsa} \right] \right\} \quad (4)$$

Vrijednost ovog koeficijenta ograničava se na 0,7, kako bi bili na strani sigurnosti [13].

3.1.2. Učinci ukopavanja

Isto kao površina temeljne konstrukcije, tako i ukopavanje objekata utječe na smanjenje spektralnog ubrzanja. U principu, što je dublje ukopavanje, to je veće smanjenje spektralnog ubrzanja [25]. Ovo je također rezultat učinaka kinematičke interakcije tla i konstrukcije te proizlazi iz činjenice da se amplitude seizmičkih valova smanjuju s povećanjem dubine temeljenja. Taj učinak smanjuje intenzitet pomicanja tla na razini temelja, što rezultira smanjenjem same seizmičke sile koja pobuđuje objekt. Za izračun koeficijenta redukcije spektra, potrebna je dubina temeljenja "e" i prosječna brzina širenja seizmičkih valova u učinkovnom tlu, v_s .

$$RRS_e = 0,25 + 0,75 \cdot \cos\left(\frac{2\pi e}{Tv_s}\right) \quad (5)$$

gdje je:

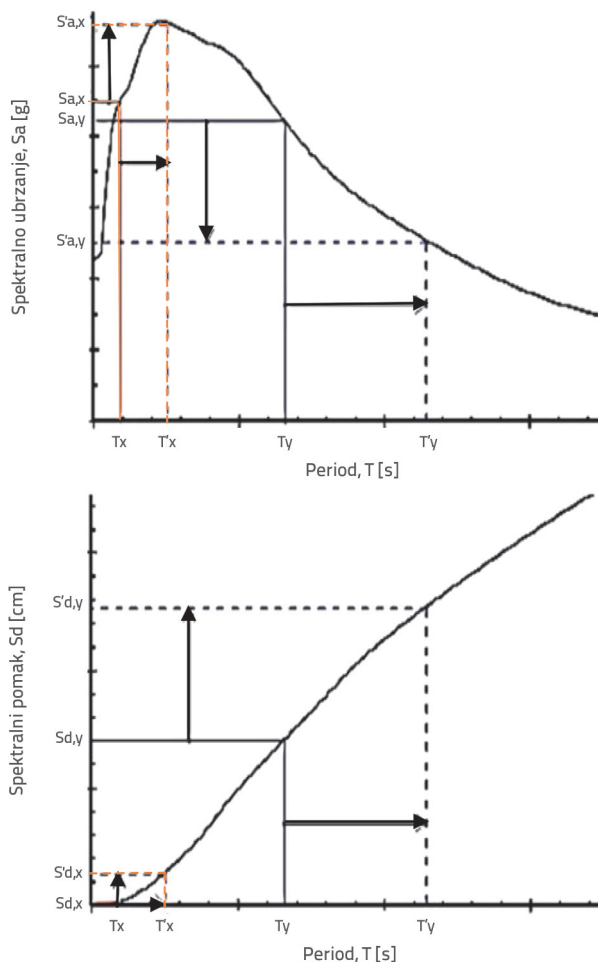
- e - dubina temeljenja, i njezina vrijednost je ograničena na 6 metara. Uvjet je da najmanje 75 % temeljne konstrukcije bude na razini koja se uzima kao razina ukopavanja. Za objekte koji se nalaze na nagnutom terenu, kao dubina temeljenja uzima se najmanja dubina;
- v_s - prosječna efektivna brzina širenja seizmičkih valova u zadanom tlu slojeva u kojima je provedeno ukopavanje i ne smije biti manja od 200 m/s;
- T - period vlastitih vibracija spektra koji se analizira, i njegova minimalna vrijednost je ograničena na 0,2 s.

Kao i za prvi učinak kinematičke interakcije, vrijednost ovog koeficijenta je ograničena na 0,7 kako bi se bilo na strani sigurnosti [13].

3.2. Učinci inercijske interakcije

U slučaju kada konstrukcija ima značajno veliku krutost u usporedbi s krutošću tla, dolazi do oslobađanja rotacija i translacija temeljne konstrukcije, što dovodi do dodatnih pomaka konstrukcije uz istovremeno povećanje perioda vlastitih vibracija sustava [26, 27]. To povećanje perioda vlastitih vibracija izravno utječe na vrijednost spektralnog ubrzanja kojim se izračunava projektna seizmička sila. Ovisno o tome u kojem se dijelu spektra nalazi period matematičkog modela analiziranog na uklještenoj osnovi, povećanje perioda vlastitih vibracija

modela s uključenim uvjetima tla može dovesti do povećanja ili smanjenja vrijednosti spektralnog ubrzanja [12], kao što je prikazano na slici 1.

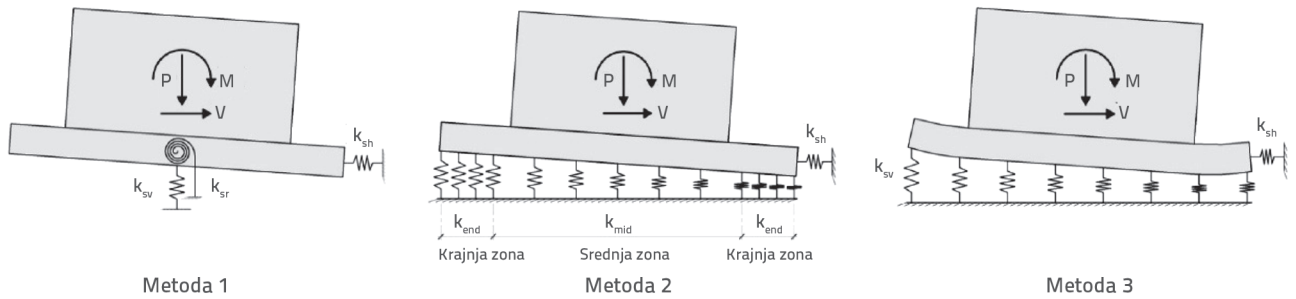


Slika 1. Spektar ubrzanja i pomaka

Za krute konstrukcije, s malim vrijednostima perioda vlastitih vibracija, uključivanje lokalnih uvjeta tla obično povećava vrijednost spektralnog ubrzanja. Suprotno tome, konstrukcije čiji se period nalazi u dijelu nakon maksimalnih vrijednosti za ubrzanje spektra, uključivanje lokalnih uvjeta tla i povećanje perioda vlastitih vibracija pridonose smanjenju vrijednosti ubrzanja. Bez obzira hoće li doći do povećanja ili smanjenja spektralnog ubrzanja, povećanje perioda vlastitih vibracija uvijek pridonosi povećanju spektralnih pomaka.

4. Metode za izračun krutosti zamjenskih opruga

Vertikalne opruge uvjetuju vertikalnu krutost temelja te na rotaciju sustava oko njegove osnove. Rotacija sustava u osnovi rezultira većim deformacijama sustava pod utjecajem horizontalnih (seizmičkih) sila. Postoje tri metode za izračun krutih karakteristika ovih krutih opruga [12], ovisno o namjeni i vrsti analize koja će se provoditi, i to:



Slika 2. Metode za izračun krutih karakteristika krutih opruga prema ASCE/SEI 41 iz FEMA (2018)

- metoda 1: kruti temelji i meko tlo
- metoda 2: elastični temelji i nelinearno elastično (meko) tlo
- metoda 3: elastični temelji i linearno elastično (meko) tlo.

$$\hat{\eta}_z = \left[1.0 + \left(0.25 + \frac{0.25}{\frac{L}{B}} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.8} \right] \quad (7.1)$$

Za potrebe ovog rada krutosti vertikalnih opruga izračunane su prema metodi 1, a njihova vrijednost je potom modificirana jer su u matematički model unesene kao ravnomjerno raspoređene opruge ispod cijele temeljne ploče. Na slici 2. slikovito su prikazane različite metode koje se primjenjuju za izračun krutih karakteristika vertikalnih krutih opruga. U ASCE/SEI 41-17 [15] prikazani su izrazi kojima se izračunavaju krutosti vertikalnih opruga za šest stupnjeva slobode. Krutosti vertikalnih opruga koje su primijenjene za model koji je predmet studije u ovom radu izračunane su prema sljedećim izrazima [12, 28]:

$$\hat{\eta}_y \approx \hat{\eta}_x = \left[1.0 + \left(0.33 + \frac{1.34}{1 + \frac{L}{B}} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.8} \right] \quad (7.2)$$

$$\hat{\eta}_{zz} = \left[1.0 + \left(1.3 + \frac{1.32}{\frac{L}{B}} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.9} \right] \quad (7.3)$$

$$K_{z,sur} = \frac{G \cdot B}{1-\nu} \left[3.1 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.75} + 1.6 \right] \quad (6.1)$$

$$\hat{\eta}_{yy} = \left[1.0 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1.6}{0.35 + \frac{L^4}{B}} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right] \quad (7.4)$$

$$K_{y,sur} = \frac{G \cdot B}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.8 \left(\frac{L}{B} \right) + 1.6 \right] \quad (6.2)$$

$$\hat{\eta}_{xx} = \left[1.0 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1.6}{0.35 + \frac{L}{B}} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right] \quad (7.5)$$

$$K_{x,sur} = \frac{G \cdot B}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right] \quad (6.3)$$

$$K_{zz,sur} = G \cdot B^3 \left[4.25 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.45} + 4.06 \right] \quad (6.4)$$

$$K_{xx,sur} = \frac{G \cdot B^3}{1-\nu} \left[3.2 \left(\frac{L}{B} \right) + 0.8 \right] \quad (6.5)$$

$$K_{yy,sur} = \frac{G \cdot B^3}{1-\nu} \left[3.73 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.27 \right] \quad (6.6)$$

Gdje su $\hat{\eta}_z$, $\hat{\eta}_y$ i $\hat{\eta}_x$ koeficijenti za korekciju translacijskih krutosti izračunani prema prethodnim izrazima, a $\hat{\eta}_{zz}$, $\hat{\eta}_{yy}$ i $\hat{\eta}_{xx}$ su koeficijenti za korekciju rotacijskih krutosti..

5. Studija slučaja

U navedenim izrazima $K_{z,sur}$, $K_{y,sur}$ i $K_{x,sur}$ predstavljaju translacijsku krutost krutih opruga, a $K_{zz,sur}$, $K_{yy,sur}$ i $K_{xx,sur}$ predstavljaju rotacijsku krutost oko odgovarajućih osi. B i L u izrazima se odnose na polovinu vrijednosti širine i duljine temeljne konstrukcije. Isti autori (Pais i Kussel, 1998) [12, 27, 28] predvidjeli su i izraze za izračun koeficijenata za korekciju, koji služe za povećanje krutosti krutih opruga zbog ukopavanja objekata [29, 30]. Oni se izračunavaju pomoću sljedećih izraza [12, 28]:

Konstrukcija analizirana u ovom radu, prikazana na slici 3., armiranobetonska je okvirna konstrukcija [31] s podrumom, prizemljem i četiri kata (Po+P+4). Ovaj sustav konstrukcije je odabran kao reprezentativan i najčešće primjenjivan u državi. Dimenzije temelja na razini podruma su 27,00 m x 26,00 m, a na katovima 17,00 m x 16,00 m. Visina kata je 3 m. Osnova konstrukcije je simetrična u odnosu na X i Y os. Rasponi su 5 m – 6 m – 5 m – 6 m – 5 m u X smjeru i 5 m – 6 m – 4 m – 6 m – 5 m u Y-smjeru. Stupovi su dimenzija 50/50 cm, osim centralnih stupova, koji su dimenzije 60/60 cm. Presjek greda je 35/50 cm. Međukatne ploče su debljine 16 cm.

Podrumski dio konstrukcije je potpuno ukopan u tlo i po njegovom perimetru cijelom visinom su predviđeni podrumski armiranobetonski zidovi debljine 20 cm. Temeljna konstrukcija je armiranobetonska temeljna ploča debljine 80 cm. Dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata je izvedeno u skladu s PBAB '87 [32] i PIOVS '81 [33]. Ovi propisi su korišteni za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata jer su gotovo svi objekti iz proteklih nekoliko desetljeća projektirani u skladu s tim propisima. Posljednjih godina je započela tranzicija prema Eurokodovima. Ipak, tranzicija se odvija prilično sporo i paralelno je dopuštena primjena i nacionalnih propisa i Eurokodova. Linearni proračun je proveden uz pomoć računalnog programa CSI ETABS 20 [34]. Proračun seizmičkih sila je napravljen primjenom spektralne analize u skladu s Eurokodom 8 [32], primjenom spektra tipa 1, za tlo tipa B i C, s $A_g = 0.24g$ i faktorom ponašanja $q = 3,9$, vrijednost utvrđena prema karakteristikama konstrukcijskog sustava. Primijenjen je spektar tipa 1 prema članku 3.2.2.2(P) iz Eurokoda 8. Prema ovom radu, ako su potresi koji čine hazard za određenu lokaciju magnitude Ms

veće od 5,5, potrebno je primijeniti spektar tipa 1. Vrijednost $A_g = 0.24g$ je odabrana kao vrijednost koja odgovara razmatranoj lokaciji.

Za potrebe rada napravljene su četiri pod-varijante modela konstrukcije (Slika 4.):

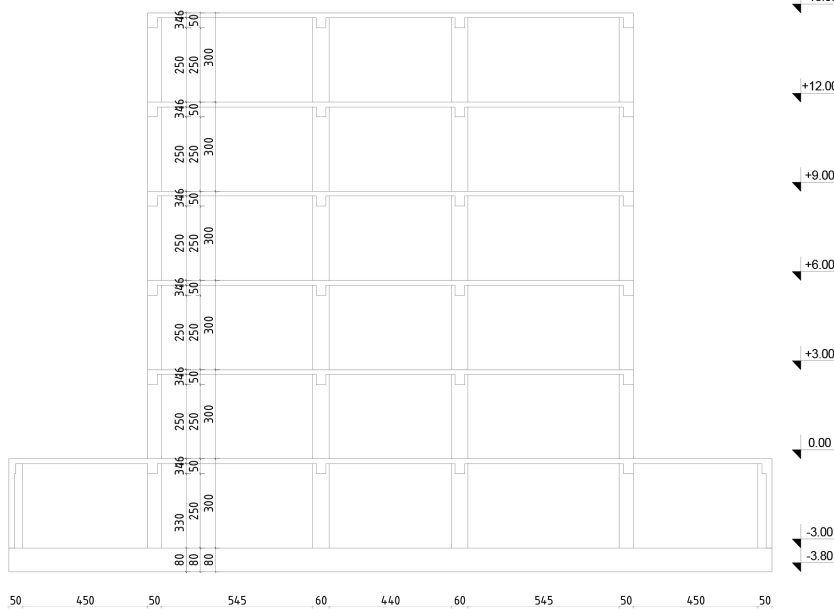
- model 1: model s nepomičnom temeljnom konstrukcijom
- model 2: model s temeljnom konstrukcijom postavljenom na vertikalne opruge
- model 3: model s temeljnom konstrukcijom postavljenom na vertikalne opruge i horizontalnim oprugama na podrumskim zidovima
- model 4: model s temeljnom konstrukcijom postavljenom na vertikalne opruge i horizontalnim oprugama na podrumskim zidovima, čija je seizmička sila izračunana iz projektnog spektra smanjenog prema pravilima za učinke kinematičke interakcije.

U nastavku, svakoj pod-varijanti je dodano /B ili /C ovisno o tipu tla za koji je model analiziran. U tom kontekstu su napravljene sljedeće varijante modela:

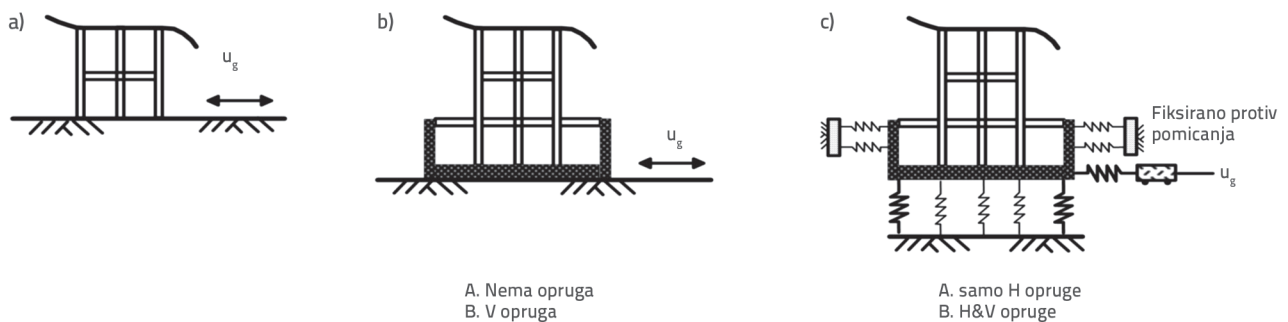
- model 1/B, Model 2/B, model 3/B i model 4/B analizirani za tlo tipa B,
- model 1/C, model 2/C, model 3/C i model 4/C analizirani za tlo tipa C.

6. Izračun krutosti opruga

U skladu s priloženim izrazima za izračun krutosti opruga za sve tri translacije i rotacije, kao i izrazima za izračun koeficijenata za redukciju zbog ukopavanja objekata, izveden je njihov izračun za tlo tipa B i tlo tipa C [35, 36] prema Eurokodu 8. Iako interakcija tla i konstrukcije ima značajan utjecaj kod konstrukcija temeljenih na tlu tipa D, ona nije analizirana jer takav tip tla ne postoji na lokaciji koja se analizira. Vrijednosti V_s i G , koje su osnovni parametri za izračun krutosti opruga, hipotetički su odabrane za tip tla B i C kako bi se prikazale



Slika 3. Presjek konstrukcijskog sustava



Slika 4. Podvarijante modela: a) Model 1; b) Model 2; c) Model 3 i Model 4

razlike koje njihove vrijednosti čine na utjecaj interakcije tla i konstrukcije. Dubina ukopavanja od 3 m odabrana je jer je najčešći slučaj u promatranoj državi, gdje je jedan kat potpuno ukopan ispod zemlje.

6.1. Tlo tipa B

Za tlo tipa B, hipotetički su uzete sljedeće karakteristike tla: $V_s = 400$ m/s i $G = 70000$ kN/m². Dubina ukopavanja je $e = 3,00$ m. Na temelju navedenih ulaznih parametara izračunana je krutost opruga, kao i faktor za korekciju zbog učinaka ukopavanja, a vrijednosti za njih prikazane su u tablici 1.

6.2. Tlo tipa C

Isti izračuni su napravljeni za tlo tipa C sa sljedećim karakteristikama: $V_s = 250$ m/s i $G = 14000$ kN/m². Dubina ukopavanja je $e = 3,00$ m.

Na temelju navedenih ulaznih parametara izračuna je krutost opruga, kao i faktora za korekciju zbog učinaka ukopavanja, a vrijednosti su prikazane su u tablici 2.

Tablica 1. Krutost krutih opruga i faktor za korekciju – tlo tipa B

Pais i Kussel (1988) [28]	Krutost [kN/m] / [(kN/m)/rad]	Faktor za korekciju zbog učinaka ukopavanja
Stupanj slobode		
Translacija u smjeru z	6225700	1,32
Translacija u smjeru y	5031574	1,53
Translacija u smjeru x	5015104	1,53
Rotacija oko osi z	1341312106	2,64
Rotacija oko osi y	956491364	1,29
Rotacija oko osi x	905840000	1,29

Tablica 2. Krutost krutih opruga i faktor za korekciju – tlo tipa C

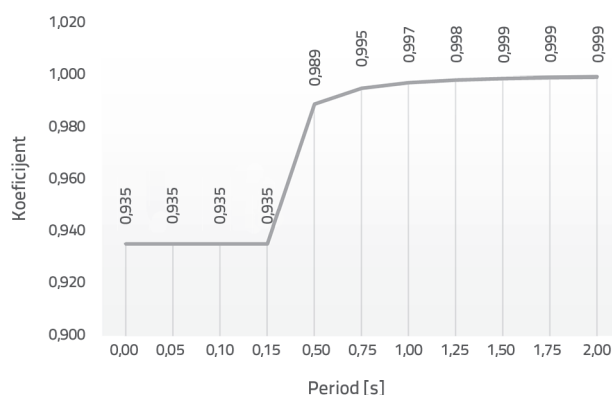
Pais i Kussel (1988) [28]	Krutost [kN/m] / [(kN/m)/rad]	Faktor za korekciju zbog učinaka ukopavanja
Stupanj slobode		
Translacija u smjeru z	1245140	1,32
Translacija u smjeru y	1006315	1,53
Translacija u smjeru x	1003021	1,53
Rotacija oko osi z	268262421	2,64
Rotacija oko osi y	191298273	1,29
Rotacija oko osi x	181168000	1,29

7. Koeficijenti za redukciju spektra

7.1. Učinak prosječne temeljne ploče

7.1.1. Tlo tipa B

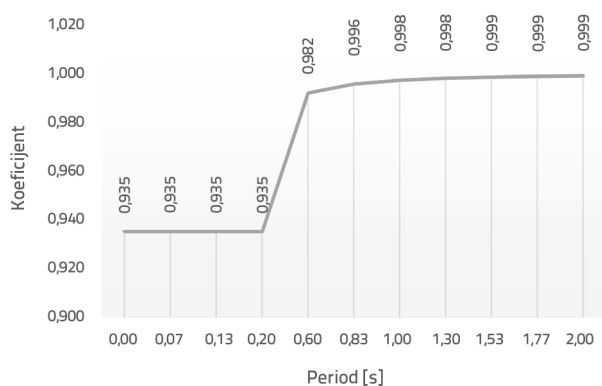
Primjenom izraza priloženih u dijelu 3.1.1, izračunani su svi parametri koji su potrebni za dobivanje vrijednosti koeficijenta za redukciju spektra pod utjecajem prvog učinaka kinematičke interakcije. Vrijednosti su izračunane za svaki period spektra, pridržavajući se uvjeta da najniža vrijednost spektra koja se reducira bude 0,2 s. Izračunane vrijednosti prikazane su grafički na slici 5., gdje se može uočiti da je udio ovog učinaka u redukciji seizmičke sile značajan samo kod objekata s manjim periodima vlastitih vibracija. Ipak, ovo se odnosi samo na vrijednosti koeficijenta dobivene izračunom prema dimenzijama konkretne temeljne konstrukcije.



Slika 5. Vrijednosti koeficijenta za redukciju spektra – Srednja vrijednost temeljne ploče – tlo tipa B

7.1.2. Tlo tipa C

Isti izračuni su napravljeni za temeljnu konstrukciju s istim dimenzijama, ali za tlo tipa C. To znači da će se koeficijenti za redukciju spektra množiti sa spektralnim vrijednostima Spektra tipa 1, za tlo tipa C, prema Eurokodu 8. Zbog toga su uzete u obzir različite vrijednosti za period 7. Prema izračunu, dobivene vrijednosti su prikazane grafički na slici 6.

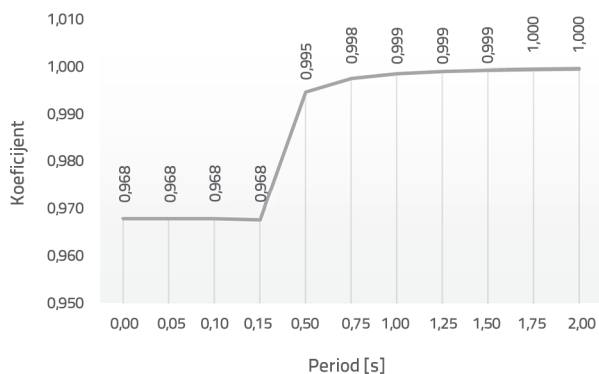


Slika 6. Vrijednosti koeficijenta za redukciju spektra – Srednja vrijednost temeljne ploče – tlo tipa C

7.2. Učinci ukopavanja

7.2.1. Tlo tipa B

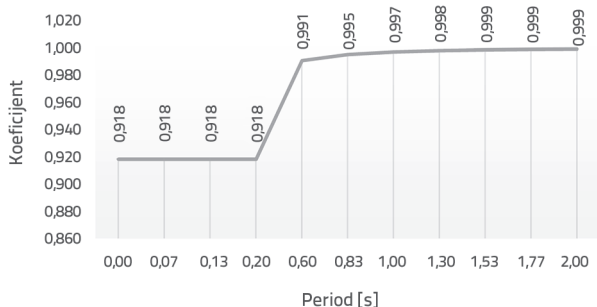
Na isti način, na temelju priloženih izraza u 3.1.2, napravljeni su izračuni i utvrđene su vrijednosti koeficijenta za redukciju spektralnog ubrzanja pod utjecajem drugog kinematičkog učinaka, odnosno učinak ukopavanja objekta. Prema uvjetima konstrukcije koja je predmet analize, dubina temeljenja je utvrđena na 3 m. S tim u skladu, vrijednosti koeficijenta redukcije spektralnog ubrzanja su izračunane i za tlo tipa B te prikazane na slici 7.



Slika 7. Vrijednosti koeficijenta za redukciju spektra – učinci ukopavanja – tlo tipa B

7.2.2. Tlo tipa C

Izračuni koeficijenta za redukciju spektralnih vrijednosti ubrzanja na isti način kao za tlo tipa B napravljeni su i za tlo tipa C, a dobivene vrijednosti prikazane su na slici 8.



Slika 8. Vrijednosti koeficijenta za redukciju spektra – učinci ukopavanja – tlo tipa C

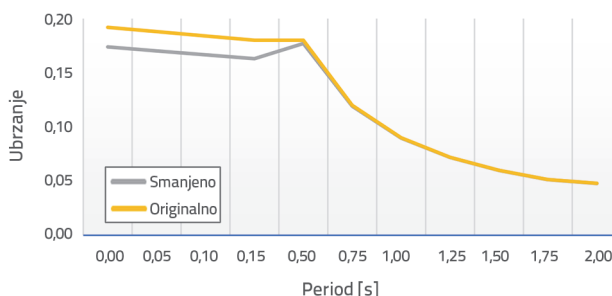
7.3. Reducirane spektralne vrijednosti

Umnožak izračunanih vrijednosti koeficijenta za redukciju Spektra tipa 1 za tlo tipa B od oba efekta kinematičke interakcije (RRS_{bsa} i RRS_e) i vrijednosti ubrzanja za odgovarajući period

spektra predstavljaju reduciranu vrijednost spektralnog ubrzanja ($A_{g,red}$):

$$A_{g,red} = RRS_{bsa} \cdot RRS_e \cdot A_{g,ori} \tag{8}$$

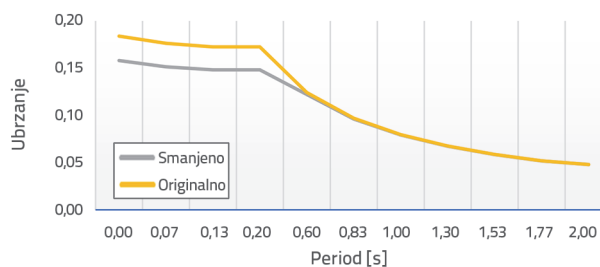
Vrijednosti spektralnog ubrzanja za spektar tipa 1, za tlo tipa B, kao i njihove reducirane vrijednosti prikazane su uzastopno na slici 9. Iz uporednog prikaza spektralnih vrijednosti prikazanog na slici 9. mogu se uočiti razlike u spektralnim vrijednostima ubrzanja za spektar tipa 1, za tlo tipa B. Reducirane spektralne vrijednosti koje su rezultat učinaka kinematičke interakcije između tla i konstrukcije imaju utjecaj na objekte čiji je osnovni period vlastitih vibracija kreće u granicama od 0,20s do 0,50s. Za objekte s većim osnovnim periodima vlastitih vibracija, učinci kinematičke interakcije ne bi imali udjela u dodatnoj redukciji seizmičke sile.



Slika 9. Originalni i reducirani spektar – tlo tipa B

Na isti način, množenjem odgovarajućih koeficijenta za redukciju od kinematičkih učinaka za tlo tipa C sa spektralnim ubrzanjem iz spektra tipa 1, za tlo tipa C, dobivene su reducirane vrijednosti za spektralno ubrzanje koje su prikazane tablično i grafički na slici 10.

Iz ovoga se može zaključiti da se veća redukcija spektralnog ubrzanja postiže za nepovoljnije uvjete tla, u ovom slučaju za tlo tipa C. Iz toga proizlazi da će pri seizmičkoj analizi modela biti dobivene manje vrijednosti za seizmičku silu za model analiziran s krutim oprugama izračunanim za tlo tipa C. To proizlazi iz činjenice da se seizmička sila izračunava primjenom spektralne analize gdje se seizmička težina objekta množi sa spektralnim ubrzanjem za svaki od izračunanih perioda vlastitih vibracija.



Slika 10. Originalni i reducirani spektar – tlo tipa C

8. Linearna analiza s uključivanjem interakcije tla i konstrukcije

Na definiranom konstrukcijskom modelu [36] izvedena je linearna analiza s ciljem dobivanja osnovnih statičkih veličina (momenti i sile), dinamičkih karakteristika, horizontalne (seizmičke) sile dobivene iz izvedena spektralne seizmičke analize te minimalnih i maksimalnih pomaka pod djelovanjem izračunane seizmičke sile [37-39].

Linearni proračun je izveden uz pomoć korisničkog računalnog programa ETABS, na četiri odvojene podvarijante modela za tlo tipa B i tlo tipa C.

Modalna analiza provedena je s 12 modalnih oblika. Broj modalnih oblika odabran je kako bi se zadovoljio zahtjev u članku 4.3.3.3.1 (2)P i 4.3.3.3.1 (3) u Eurokodu 8 [35]. Prema tom zahtjevu, potrebno je uzeti u obzir odgovor konstrukcije iz svih tonova forme koji imaju značajan udio u ponašanju konstrukcije. Ovaj zahtjev može biti zadovoljen ako je efektivna seizmička težina modalnih oblika uzetih u obzir najmanje 90 % ukupne mase objekta ili ako su uzeti u obzir svi tonovi oblika u kojima je angažirano više od 5 % ukupne mase objekta. U ovom slučaju, uključivanjem 12 modalnih oblika, efektivna masa objekta je 93,56 % u X-smjeru i 95,67 % u Y-smjeru od ukupne mase objekta.

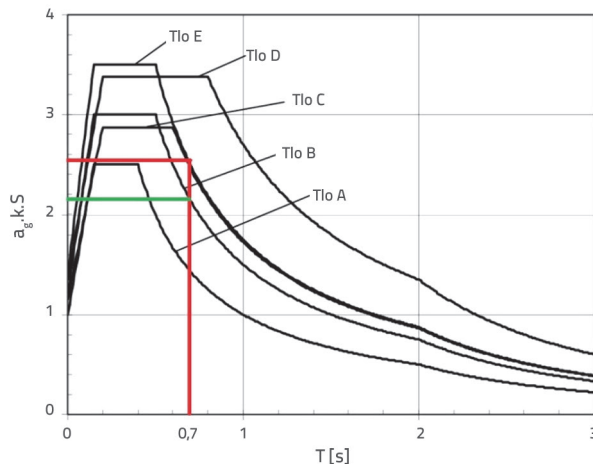
Pomoću izračunanih perioda vlastitih vibracija, primjenom spektralne analize prema Eurokodu 8 [35], provedena je seizmička analiza matematičkih modela. Nakon što su izračunane vrijednosti seizmičkih sila, provjeren je pomak u osnovi i na vrhu konstrukcije, kao i momenti u osnovi pod djelovanjem seizmičkih sila.

Na slici 11. prikazani su elastični spektri tipa 1 za odgovor konstrukcija prema Eurokodu 8 u skladu s tipom tla na kojem se nalaze. Modeli koji su analizirani kao ukliješteni u temeljima, bez uključene interakcije tlo-konstrukcija, imaju iste dinamičke karakteristike. Jedina razlika kod tih modela očekuje se u seizmičkom odgovoru, zbog činjenice da je spektralna analiza izvršena sa Spektrom tipa 1, za tlo tipa B za model 1/B i spektrom tipa 1, za tlo tipa C za model 1/C. Razlike u periodima vlastitih vibracija kod modela s uključenim lokalnim uvjetima tla proizlaze iz učinaka inercijske interakcije između tla i konstrukcije [40]. Oslobođanje rotacija i translacija doprinosi većoj fleksibilnosti sustava, što rezultira povećanjem perioda vlastitih vibracija [26, 27].

Prema položaju osnovnih perioda prethodno prikazanih spektara, očekuje se da će za sve modele povećanje perioda vlastitih vibracija dovesti do smanjenja seizmičke sile (slika 11.). Na toj slici, zelena linija prikazuje spektralno ubrzanje za period od 0,7 s za tlo tipa B, a crvena linija prikazuje spektralno ubrzanje za period od 0,7 s za tlo tipa C. Ipak, smanjenje seizmičke sile prati

povećanje fleksibilnosti sustava i razvoj većih deformacija zbog povećanja perioda vlastitih vibracija.

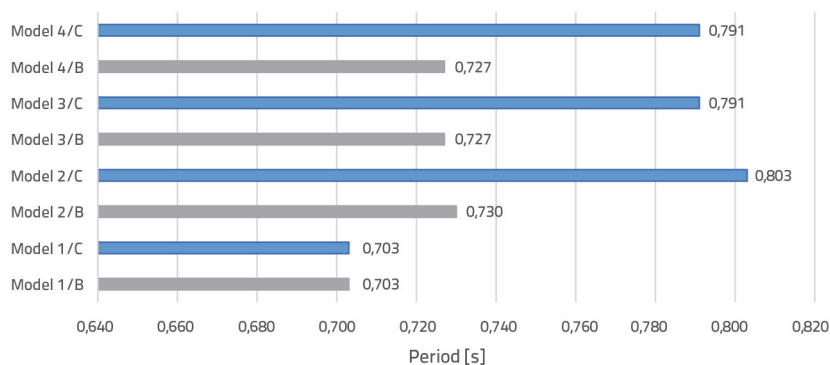
Za bolji pregled, kao posljedica interakcije, na slici 12. prikazane su vrijednosti perioda vlastitih vibracija za sve analizirane modele.



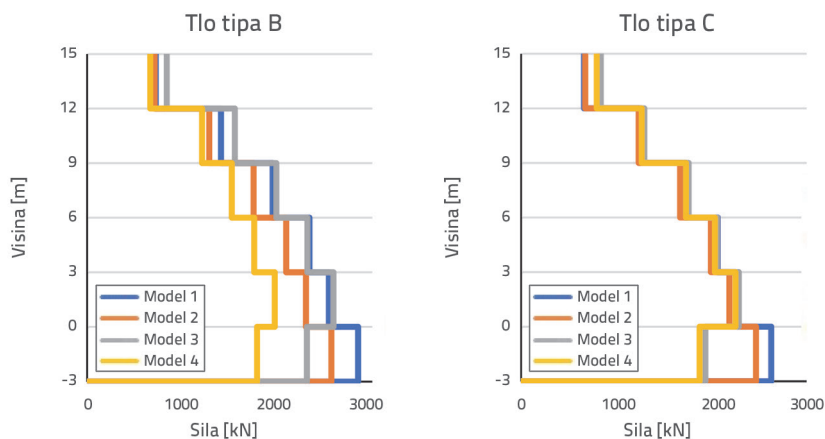
Slika 11. Elastični spektri – Eurokod 8

Razlike u pogledu produženja perioda su značajnije za sustav konstrukcije koji se nalazi na tlu tipa C, rezultat su i do 14 % veći periodi zbog oslobađanja translacija i rotacija. Što se tiče modela konstrukcije koji se nalazi na tlu tipa B, zbog njegovih karakteristika koje su sličnije krutoj podlozi, povećanje perioda iznosi 4 %. Posljedično, veće razlike u seizmičkim silama, momentima, katnim i međukatnim pomacima očekuju se za modele analizirane na tlu tipa C.

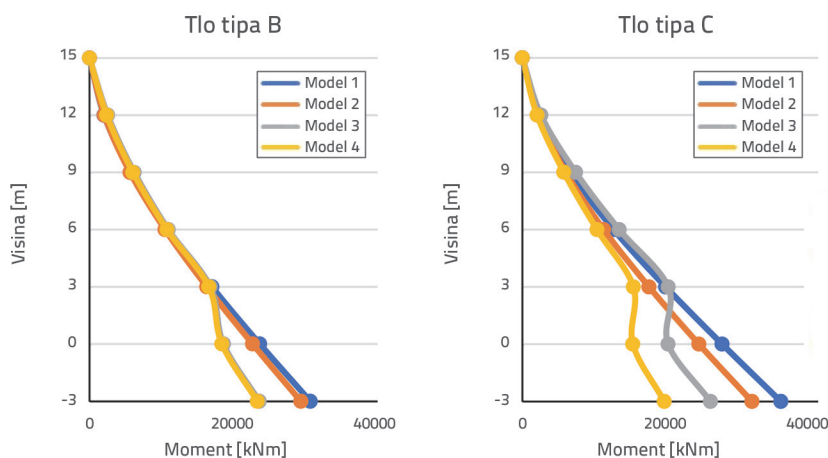
U nastavku su prikazani rezultati dobiveni linearnom analizom modela, s naglaskom na vrijednosti seizmičkih sila, momenata, katnih i međukatnih pomaka (slike 13. do 16.). Vrijednosti za svaki model prikazane su različitim bojama radi bolje vizualizacije. Zbog simetričnosti konstrukcijskog sustava u osnovi, prikazani su samo rezultati za X smjer. Iz rezultata se može vidjeti razlika u odgovoru konstrukcije svakog od modela kao posljedica uključivanja lokalnih uvjeta tla i učinaka kinematičke interakcije tla i konstrukcije [36].



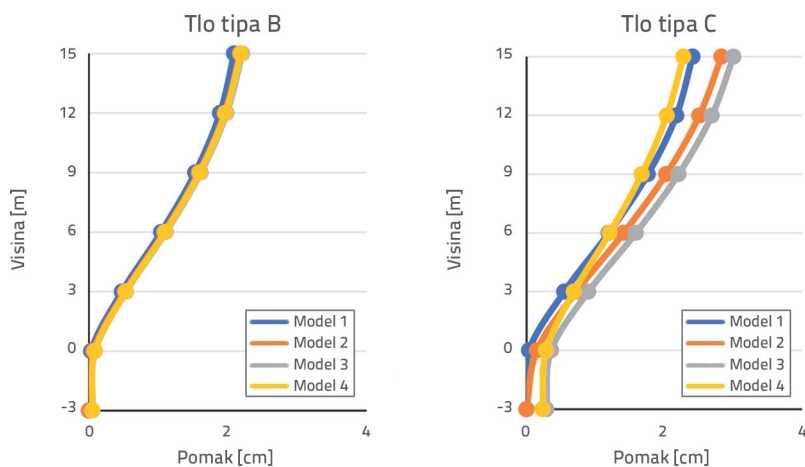
Slika 12. Period vlastitih vibracija za prvi ton forme



Slika 13. Horizontalne sile



Slika 14. Momenti



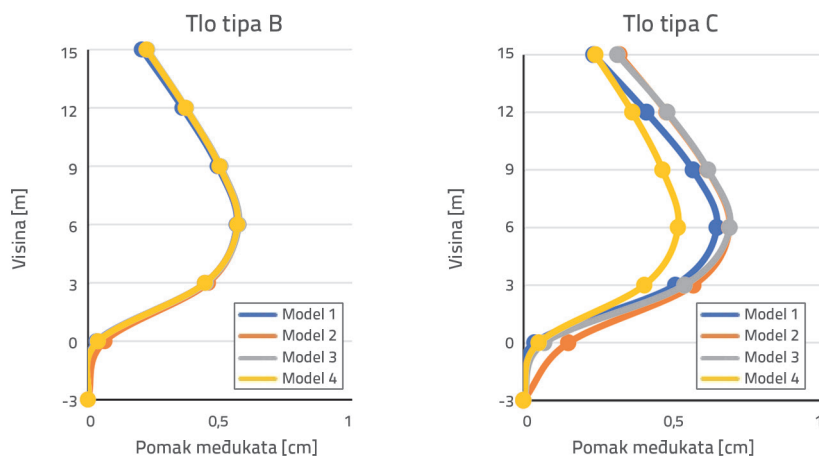
Slika 15. Katni pomaci

9. Zaključak

Kako bi se utvrdio utjecaj interakcije tla i konstrukcije, kao i utjecaji kinematičkih učinaka između tla i konstrukcija prema američkim propisima i pravilima za modeliranje tlačnih uvjeta, izrađeni su matematički modeli armiranobetonske okvirne konstrukcije. Armiranobetonska okvirna konstrukcija koja je predmet istraživanja sastoji se od šest katova i pravilna je u tlocrtu i po visini. Na modelima je izvedena modalna i linearno elastična analiza uz pomoć računalnog programa ETABS. Najprije su prema američkim propisima izračunane krute karakteristike krutih opruga koje simuliraju uvjete tla tipa B i tipa C prema Eurokodu 8.

Iz provedene linearne analize modela, za koje su spektralnom analizom izračunane seizmičke sile, može se zaključiti sljedeće:

- Uključivanje uvjeta tla utječe na dužinu perioda vlastitih vibracija za sve modele. Kod ukopavanja, horizontalne opruge po površini podruma u manjoj mjeri smanjuju period u odnosu na modele koji se analiziraju samo s vertikalnim oprugama.
- Uključivanje lokalnih uvjeta tla za tlo tipa B osigurava dodatno ukrućenje objekta po visini ukopanog kata zbog povoljnih tlačnih karakteristika, čime se drastično smanjuje vrijednost seizmičke sile. Povoljni uvjeti tla za tlo tipa B izraženi su kroz višu vrijednost modula smicanja G, koji je ključni parametar u izračunu krutosti krutih opruga. Konkretno, za tlo tipa B zadana je vrijednost 70000 kN/m², a za tlo tipa C 14000 kN/m².
- Uključivanje lokalnih uvjeta tla i ukopavanje za tlo tipa C ne smanjuje drastično seizmičku silu kao što je slučaj kada su lokalni uvjeti tla uzeti u obzir samo ispod temeljne konstrukcije. To je zbog činjenice da tlo tipa C ima veću elastičnost



Slika 16. Međukatni pomaci

i deformabilnost u odnosu na tlo tipa B, izraženo kroz vrijednost modula smicanja G , što znači da ne može u tolikoj mjeri spriječiti pomicanje ukopanog kata, a istodobno vrši amplifikaciju seizmičkih valova i neznatno povećava seizmičku silu.

- Veća fleksibilnost i deformabilnost tla tipa C u većoj mjeri oslobađa rotacije na razini temeljne konstrukcije kod objekata, zbog čega proizlaze znatno manje vrijednosti za momente. Ipak, momenti na gornjim katovima ostaju gotovo isti jer se promjene odnose na lokalne uvjete tla i ukopavanje podruma.
- Uključivanje uvjeta tla utječe na vrijednost horizontalnih pomaka konstrukcija, kao i na njihove međukatne pomake, u odnosu na one analizirane na ukrućenoj osnovi, osobito za tlo tipa C. Maksimalni horizontalni pomak modela analiziranog za tlo tipa B je 3,27 % veći u odnosu na model na ukrućenoj osnovi, dok su za tlo tipa C maksimalni horizontalni pomaci 21,46 % veći u odnosu na model na ukrućenoj osnovi, iako je uzeta u obzir manja vrijednost seizmičke sile.

- Iako su vrijednosti spektralnog ubrzanja različite za tlo tipa B i C i uzete su u obzir pri izračunu seizmičkih sila i pomaka, uključivanje lokalnih uvjeta tla rezultira većim deformacijama u odnosu na modele analizirane na ukrućenoj osnovi.

Iz cjelokupnog istraživanja i analiza provedenih za potrebe ovog rada može se zaključiti da je potreban ozbiljniji i sveobuhvatniji pristup interakciji tla i konstrukcije, uključivo s učincima kinematičke interakcije. Glavna motivacija jest činjenica da konstrukcije imaju različit odgovor i ponašanje tijekom potresa kada su temeljene na povoljnim tlima u odnosu na odgovor i ponašanje koje imaju ako se analiziraju kao uklještenje u temeljima. Stoga se nameće nužnost uključivanja lokalnih uvjeta tla u analizu konstrukcija, čak i u slučajevima povoljnih tala, prije svega zbog prisutnosti učinaka kinematičke interakcije. Ovo je različito od gotovo svih propisa, gdje se modeliranje lokalnih uvjeta tla uzimaju u obzir samo u prisutnosti tla s vrlo slabom nosivošću. Modeliranje i uključivanje lokalnih uvjeta tla nužno je kako bi se osigurala sigurnost, ne samo s aspekta promjene intenziteta seizmičke sile, već prije svega s aspekta ukupnih deformacija koje konstrukcija ostvari pod djelovanjem modificirane seizmičke sile. Ipak, ovo istraživanje je ograničeno na odabrani tip konstrukcije, seizmički hazard i odabrane parametre tla, izražene kroz modul smicanja (G) i brzinu seizmičkih valova (V_s). Stoga se rezultati ne mogu generalizirati za tla tipa B i C. Daljnjim istraživanjima trebali bi se razmotriti i drugi konstrukcijski sustavi, s nepravilnostima u tlocrtu i po visini. Osim toga, od izuzetne važnosti bi bilo provesti nelinearne analize kako bi se izračunao kapacitet konstrukcija za različite tipove tla i konfiguracije ukopavanja.

LITERATURA

- [1] Kraus, I., Džakić, D., Papić, J., Cerovečki, A.: Influence of foundation contact pressure on response spectrum-based design, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 1, pp. 11-20, <https://doi.org/10.14256/JCE.2365.2018>
- [2] Bačić, M., Ivšić, T., Kovačević, M.S.: Geotechnics as an unavoidable segment of earthquake engineering, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 10, pp. 923-936, <https://doi.org/10.14256/JCE.2968.2020>
- [3] Borghei, A., Ghayoomi, M.: The role of kinematic interaction on measured seismic response of soil-foundation-structure systems, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 125 (2019) 105674.
- [4] Lulayehu Tadesse, Z., Krishna Padavala, H., Koteswara Rao P.V.: Effect of subterranean levels on the foundation input motions for dynamic response analysis of building structure, Asian Journal of Civil Engineering, 24 (2022), pp. 793-808.
- [5] Zogh, P., Motamed, R., Ryan, K.: Empirical evaluation of kinematic soil-structure interaction effects in structures with large footprints and embedment depths, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 149 (2021), p. 106893.
- [6] Abdulaziz, M., Hamood, M., Fattah, M.: A review study on seismic behavior of individual and adjacent structures considering the soil - Structure interaction, Structures, 52 (2023), pp. 348-369.
- [7] European Committee for Standardization: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects, CEN, Brussels, 2004.
- [8] Bararnia, M., Hassani, N., Ganjavi, B., Amiri, G.: Estimation of inelastic displacement ratios for soil-structure systems with embedded foundation considering kinematic and inertial interaction effects, Engineering Structures, 159 (2018), pp. 252-264.

- [9] Asadi-Ghoozhi, H., Attarnejad, R.: A Winkler-based model for inelastic response of soil–structure systems with embedded foundation considering kinematic and inertial interaction effects, *Structures*, 28 (2020), pp. 589–603.
- [10] Vishwajit, A.: Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review, *Structures*, 16 (2018), pp. 317–326.
- [11] Mekkiab, M., Elachachia, S.M., Breysser, D., Nedjarb, D., Zoutat, M.: Soil-structure interaction effects on RC structures within a performance-based earthquake engineering framework, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18 (2014) 8, pp. 945–962.
- [12] NEHRP Consultants Joint Venture: Soil-Structure Interaction for Building Structures, First edition, U.S. Department of Commerce - National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2012.
- [13] Applied technology council: A Practical Guide to Soil-Structure Interaction, First edition, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, DC, 2020.
- [14] Dhehbiya, G., Salah, K.: Effects and dynamic behaviour of soil - framed structure interaction, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 1, pp. 9–20, <https://doi.org/10.14256/JCE.2301.2017>
- [15] Sanghai, S.S., Pawade, P.Y.: Effectiveness of friction dampers on seismic response of structure considering soil-structure interaction, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 1, pp. 33–44, <https://doi.org/10.14256/JCE.1982.2017>
- [16] Edip, K., Garevski, M., Sheshov, V., Bojadjeva, J.: Boundary effects in simulation of soil–structure interaction problems, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54 (2017) 4, pp. 239–243
- [17] Sheshov, V., Talaganov, K.: Relevant Aspects of Applying Soil Improvement Method for Liquefaction Mitigation – Case Study, Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Rolla (MO), 2001.
- [18] Sheshov, V.: Lecture Notes: Dynamic Soil structure Interaction, Institute of earthquake engineering and engineering seismology, Skopje, 2010.
- [19] Lou, M., Wang, H., Chen, X., Zhai, Y.: Structure–soil–structure interaction: Literature review, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31 (2011) 12, pp. 1724–1731.
- [20] Petrov, N.: Experimental and numerical methods in earthquake geotechnical engineering, Seminar work, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Skopje, 2024.
- [21] ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, Second edition, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2017.
- [22] Oliver, S., Hare, J., Harwood, N.: Soil Structure Interaction Starts With Engineers, Same Risks – New Realities – New Zealand Society for Earthquake Engineering, Wellington, 2013.
- [23] ASCE/SEI 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2017.
- [24] Seunghyun, K., Jonathan, S.: Kinematic soil-structure interaction from strong motion recordings, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (2003) 4, pp. 323–335.
- [25] Thusoo, S., Modi, K., Kumar, A., Kumar, R.: Dynamic Soil Structure Interaction in Buildings, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 10 (2016) 5, pp. 617–622.
- [26] Khalil, L., Sadek, M., Shahrour, I.: Influence of the soil–structure interaction on the fundamental period of buildings, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 36 (2007) 15, pp. 2445–2453.
- [27] Mercado, J., Arboleda-Monsalve, L., Mackie, K.: IFCEE: International Foundations Congress & Equipment Expo. (Chapter) Study of Period Lengthening Effects in Soil–Structure Interaction Systems, Dallas, 2021.
- [28] Pais, A.; Kausel, E.: Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7 (1988) 4, pp. 213–227.
- [29] Brandis, A., Kraus, I., Petrovčič, S.: Simplified Numerical Analysis of Soil–Structure Systems Subjected to Monotonically Increasing Lateral Load, *Applied Sciences*, 11 (2021) 9, <https://doi.org/10.3390/app11094219>
- [30] Brandis, A., Kraus, I., Petrovčič, S.: Nonlinear Static Seismic Analysis and Its Application to Shallow Founded Buildings with Soil-Structure Interaction, *Buildings*, 12 (2022) 11, <https://doi.org/10.3390/buildings12112014>
- [31] Apostolska, R., Necevska-Cvetanovska, G., Bojadjiev, J., Bojadjeva, J.: Seismic performance of RC high-rise buildings-a case study of 44 storey structure in Skopje (Macedonia), *Technical Gazette*, 23 (2016) 4, pp.1177–1183
- [32] Sojuzen zavod za standardizacija: Pravilnik za tehničke normative za beton I armiran beton, *Služben list na SFRJ*, 11 (1987), pp.309–352.
- [33] Sojuzen zavod za standardizacija: Pravilnik za tehničke normative za izgradba na objektima na visokogradnja vo seizmički područja, *Služben list na SFRJ*, 31 (1981), pp. 844–854.
- [34] Computers and Structures, Inc.: ETABS 20.0, Version 20.0. Walnut Creek, CA.
- [35] IEEE Style: European Committee for Standardization: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, CEN, Brussels, 2004.
- [36] Petrov, N.: Kinematic Soil – Structure interaction effects on seismic performance of RC frames, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Skopje, 2023.
- [37] Kostikj, I.: Nonlinear static analysis of RC building with incorporation of local soil conditions according to EC8, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Skopje, 2020.
- [38] IZIS: IZIS – In-Situ Geo –Laboratorija, Izvestaj 2021-62, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Skopje, 2021.
- [39] Kausel, E., Whitman, R., Morray, J., Elsabee, F.: The spring method for embedded foundations, *Nuclear Engineering and Design*, 48 (1978) 1-2, pp. 377–392.
- [40] Zanwar, K., Hosur, V.: Study on Soil Structure Interaction, *International Journal for Scientific Research & Development*, 4 (2016) 5, pp. 1645–1649.