

Dinamička interakcija temeljnog tlo-konstrukcija: geotehnički aspekti

Zavrtnik, Andrija

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:471042>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI
FAKULTET

ANDRIJA ZAVRTNIK

DINAMIČKA INTERAKCIJA TEMELJNOG TLO - KONSTRUKCIJA:
GEOTEHNIČKI ASPEKTI

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2021.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva
za 20. 09. 2021. u 9 sa
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu
Varaždin, 06. 09. 2021.

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

izr. prof. dr. sc. Saša Koreić

Članovi povjerenstva

- 1) *Doc. dr. sc. Mario Gazdek*
- 2) *Doc. dr. sc. Davor Štambor*
- 3) *izr. prof. dr. sc. Boris Kanur*

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI
FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

DINAMIČKA INTERAKCIJA TEMELJNOG TLO - KONSTRUKCIJA:
GEOTEHNIČKI ASPEKTI

KANDIDAT:
ANDRIJA ZAVRTNIK
Andrija Zavrtnik

MENTOR:
Doc.dr.sc. Mario Gazdek

KOMENTOR:
Doc.dr.sc. Davor Stanko

VARAŽDIN, 2021.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: ANDRIJA ZAVRTNIK
Matični broj: 257 - 2019./2020.
Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

DINAMIČKA INTERAKCIJA TEMELJNOG TLO-KONSTRUKCIJA:
GEOTEHNIČKI ASPEKTI

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Pregled povijesti i teoretske osnove dinamičke interakcije temeljnog sustava
3. Modeliranje interaktivnog sustava
4. Metode analize interakcije temeljnog tla i konstrukcije
5. Primjer primjene direktne SSI metode
6. Zaključak

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 08.03.2021.

Rok predaje: 06.09.2021.

Mentor:

Doc.dr.sc. Mario Gazdek

Drugi mentor/komentor:

Doc.dr.sc. Davor Stanke

Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv.prof.dr.sc. Sanja Kovač



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

DINAMIČKA INTERAKCIJA TEMELJNOG TLO – KONSTRUKCIJA: GEOTEHNIČKI ASPEKTI

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Maria Gazdeka** i **doc.dr.sc. Davora Stanka**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 30.08.2021.

ANDRISA ZAVRTNIK

(Ime i prezime)

Zavrtnik

(Vlastoručni potpis)

**IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ
OBJAVLJENIM RADOVIMA**

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

DINAMIČKA INTERAKCIJA TEMELJNOG TLO – KONSTRUKCIJA: GEOTEHNIČKI
ASPEKTI

pregledan anti-plagijjat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 30.08.2021.

doc.dr.sc. Mario Graždek
(Mentor)

M. Graždek
(Vlastoručni potpis)

Ime i prezime ANDRIJA ZAVRTNIK

Naslov rada DINAMIČKA INTERAKCIJA TEMELJNOG TLA I KONSTRUKCIJE:
GEOTEHNIČKI ASPEKTI

Sažetak Prilikom seizmičke pobude tlo i kruta konstrukcija koja se nalazi u tlu ponašaju se na određen, njima svojstven način. Trenutak kada se temeljno tlo i temeljna konstrukcija ne mogu uskladiti i sinkronizirati na način na koji se deformiraju zove se interakcija temeljnog tla i konstrukcije. Rješenja interakcije traže se preko direktne i indirektna metode.. Direktna metoda koristi se češće u akademskoj zajednici, dok indirektna metoda češće svoju primjenu nalazi u inženjerskoj praksi.

Ovaj rad predstavlja pregled teoretske osnove interakcije temeljnog tla i konstrukcije. Također su prikazani konkretni načini rješavanja interakcije, prvo pomoću modela opruga i prigušivača, a nakon toga pomoću računalnog softvera indirektnom metodom. U petom poglavlju prikazan je rad u „free to use“ programu ADONIS, koji se često koristi u rješavanju inženjerskih problema.

Ključne riječi: Interakcija, temeljno tlo, konstrukcija, kinematička i inercijska interakcija, prigušenje, interaktivni sustav

Name and surname

ANDRIJA ZAVRTNIK

Title of graduate thesis

DYNAMIC SOIL – STRUCTURE INTERACTION: GEOTECHNICAL ASPECTS

Abstract:

During seismic excitation soil and a rigid structure located in it behave in a certain, inherent way. The moment when foundation soil and a structure in it are unable to align and synchronize in such a way that they both deform is called soil – structure interaction. There are two main methods for solving soil – structure interaction, a direct and an indirect method. The former is more often used in the academic community, while the latter is more often used in an engineering practice.

This paper represents an overview of the theoretical basis of a soil structure interaction. Also, this paper gives an example of modeling soil and structure with a system of springs and dashpots and it also shows how a computer software is used for solving interaction with a direct method. The fifth chapter presents a computer program ADONIS, which is often used for solving problems in geotechnical engineering.

Keywords:

interaction, foundation soil, structure, kinematic and inertial interaction, damping, interaction system.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Pregled povijesti i teoretske osnove dinamičke interakcije temeljnog sustava.....	3
2.1. Povijest dinamičke interakcije temeljnog tla i konstrukcije	3
2.2. Teoretska osnova interakcije temeljnog tla i konstrukcije.....	4
3. Modeliranje interaktivnog sustava	7
3.1. Primjer modeliranja interaktivnog sustava.....	11
3.2. Prigušenje interaktivnog sustava	16
3.3. Širenje seizmičkih valova kroz interaktivni sustav	20
3.4. Sukus poglavlja.....	21
4. Metode analize interakcije temeljnog tla i konstrukcije.....	23
4.1. Direktna metoda.....	23
4.2. Indirektna metoda.....	27
4.3. Sukus poglavlja	31
5. Primjer primjene direktne SSI metode.....	33
5.1. Modeliranje u ADONISU	46
6. Zaključak.....	53
7. Literatura.....	55

1. Uvod

U jeku nedavnih potresa na području Republike Hrvatske i regije (Italija, Albanija, Grčka) podiže se svijest o životu na trusnom i seizmički aktivnom području. Potres je događaj kojeg ne možemo predvidjeti niti ga možemo spriječiti, ali možemo ublažiti njegove posljedice. Jedini stvaran način na koji ljudi mogu ublažiti posljedice potresa jest poboljšanje temeljnog tla i protupotresna gradnja. Protupotresna gradnja nije izazov samo za konstrukcijske inženjere i arhitekta već i za geotehničke inženjere. Sve tri inženjerske discipline bi trebale biti zastupljene u protupotresnom inženjerstvu. Svaka je građevina, bez obzira na svoju funkciju i način izvedbe, u svojoj osnovi geotehnička građevina stoga i geotehnički inženjeri imaju vrlo važnu ulogu u protupotresnoj gradnji. Drugim riječima, sigurnost građevine ne počinje dodavanjem armature u zidove već počinje utvrđivanjem svojstva tla, poboljšanjem tih svojstava ako je potrebno i pravilnom izvedbom temeljne konstrukcije koja se nalazi u tlu.

Analiza interakcije temeljnog tla i konstrukcije (engl. Soil – Structure Interaction, SSI) vrlo je važan dio protupotresne gradnje. Tijekom potresa seizmički valovi deformiraju okolno tlo i na taj način prenose naprezanja na konstrukciju. Fundamentalni zadatak analize interakcije jest utvrditi režim naprezanja koji djeluje na interaktivni sustav te odrediti dinamički odziv konstrukcije i tla. U SSI analizi gleda se na tri osnovna elementa: temeljno tlo, – temelj (temeljna konstrukcija) i (nad)konstrukcija kao na spojeni sustav, ali svaka od komponenti sustava može se promatrati i analizirati zasebno. SSI analiza se provodi samo za određene situacije, ali tamo gdje se provodi je vrlo potrebna. Ako se konstrukcija nalazi na čvrstoj stijeni, odziv konstrukcije ovisi samo o svojstvima konstrukcije, ne i o temeljnoj podlozi pa stoga SSI analiza nije potrebna. S druge strane, ako se konstrukcija nalazi na mekom, uslojenom, sedimentiranom tlu analiza se mora provesti. Nekada to ovisi o razini sigurnosti koju je potrebno zadovoljiti, pa se provodi vrlo detaljno (ako se radi o građevinama koje moraju ostati funkcionalne i tijekom potresa, kao što su bolnice ili nuklearne elektrane). Povećanje broja stanovništva i širenje gradova predstavlja izazov za geotehničke inženjere, nešto što je prije bilo ruralno, nenaseljeno područje, danas je gradilište i dio gradskog naselja. Problem predstavlja tlo na tim lokacijama koje nije nužno prikladno da se na njemu grade masivne, visoke zgrade. Za seizmički aktivno područje to može biti problem s katastrofalnim

posljedicama. Interakcija temeljnog tla i konstrukcije može imati i pozitivan efekt zato što se u nekim slučajevima smanjuje iznos sila koje djeluju na konstrukciju, najčešće kroz prigušenje i produljenje perioda, pa inženjeri znaju previdjeti ili zanemariti interakcijski efekt. No ta generalizacija nije uvijek ispravna i može dovesti do nesigurnog i nestabilnog dizajna konstrukcije. Zato je najsigurnije rješenje puno razumijevanje interakcijskog efekta: proces u kojem odziv temeljnog tla na dinamičku silu utječe na gibanje i mehaničko ponašanje konstrukcije, a gibanje konstrukcije onda povratno utječe na mehaničko (dinamičko) stanje temeljnog tla.

2. Pregled povijesti i teoretske osnove dinamičke interakcije temeljnog sustava

2.1. Povijest dinamičke interakcije temeljnog tla i konstrukcije

Povijest dinamičke interakcije tla i konstrukcije počinje 30. ih godina XX. stoljeća, ali prije te "službene" povijesti postoji cijeli niz znanstvenih radova u kojima su razvijeni fundamentalni teoretski principi. Oni su se između ostalog koristili za rješavanje fenomena interakcije temeljnog tla i građevine. U početku su se znanstvenici bavili proučavanjem djelovanja naprezanja na elastično tijelo koje se nalazi na ili u beskonačnom ili polubeskonačnom prostoru. Nakon nekoliko neuspješnih pokušaja prvo konkretno rješenje pronalazi Sir William Thomson koji 1848. godine izvodi izraz za pomak uzrokovan djelovanjem koncentrirane statičke sile koja djeluje na elastično, beskonačno tijelo. Godinu poslije, 1849., profesor matematike Sir Stokes iskoristio je Thomsonovo rješenje kako bi izveo izraz za vremenski promjenjive sile koje djeluju u beskonačnom mediju. To rješenje predstavlja prekretnicu i kamen temeljac za razvitak metode konačnih elemenata, metode koja se vrlo često koristi u analizi interakcije temeljnog tla i konstrukcije. Sljedeći značajan znanstveni napredak ostvario je Sir Horace Lamb, profesor matematike koji je pronašao rješenje za dinamičko naprezanje koje djeluje na homogen poluprostor.

Povijest dinamičke interakcije temeljnog tla i konstrukcije stvarno počinje s Erichom Reissnerom (1936.) godine i objavljivanjem znanstvenog rada u kojem objašnjava ponašanje kružnih diskova u elastičnom poluprostoru kada su izloženi harmoničkim vertikalnim naprezanjima. Reissner je u svojem radu pretpostavio da je kontakt između ploče i tla gladak, bez trenja. Nije uspio riješiti stvarni problem prijenosa opterećenja na kontaktu tla i konstrukcije. Reissner i Sagoci (1944) godine nude rješenje za stvarni problem prijenosa opterećenja na kontaktu dinamički opterećene ploče. Koristeći prostorne ortogonalne koordinate uspjeli su pronaći odgovarajuće izraze za krute kružne ploče opterećene torzijom pri visokim frekvencijama.

Sredinom XX. stoljeća, 1950. ih i 1960. ih dolazi do naglog povećanja broja objavljenih znanstvenih radova koji istražuju interakciju temeljnog tla i konstrukcije. Radovi iz tog razdoblja bili su isključivo koncentrirani na temelje i djelovanja na temelje, ali istodobno

učinak temelja na tlo vrlo često se zanemario. Također, vrlo često su se analizirala dinamička opterećenja koja djeluju na kružnu ploču. Tek su Thomson i Kobori (1963) godine analizirali pravokutne temelje pod vertikalnim naprezanjima. Svi radovi iz tog razdoblja davali su rezultate pri niskim frekvencijama djelujućih dinamičkih sila.

2.2. Teoretska osnova interakcije temeljnog tla i konstrukcije

Interakcija temeljnog tla i konstrukcije (engl. Soil – Structure Interaction ili skraćeno SSI) je koncept koji se odnosi na temeljno tlo, temelj različitih oblika i vrsta te konstrukciju, građevinski objekt bilo koje namjene. Iako se te tri komponente najčešće promatraju odvojeno u kontekstu SSI-a, one čine sustav i na taj način ih se promatra i tretira. To znači da tijekom dinamičkog opterećenja ponašanje temeljnog tla utječe na konstrukciju i obratno te je stoga bitno sjedinjenje znanja o geofizici, strukturalnom i geotehničkom inženjerstvu kako bi analiza interakcije bila što kvalitetnija.

Kada se seizmički valovi šire kroz tlo u kojem se ne nalazi nikakvo strano tijelo, onda se tlo ponaša na određen način ovisno o svojim svojstvima. No kada se u tom tlu nalazi neko strano tijelo (u ovom slučaju temeljna konstrukcija) određene krutosti, tlo će mijenjati svoje ponašanje ovisno o svojstvima konstrukcije, a također će i svojstva tla utjecati na ponašanje konstrukcije. Pojava u kojoj konstrukcija i tlo mijenjaju svoje ponašanje, jedan ovisno o drugome, zove se interakcija temeljnog tla i konstrukcije. Postoji statička i dinamička interakcija, a dinamička interakcija se još dijeli na kinematičku i inercijsku. Ako se konstrukcija nalazi na čvrstoj stijeni učinci interakcije se vrlo često zanemaruju, ali ukoliko se visoka, masivna konstrukcija nalazi na mekom, uslojenom tlu, tada je interakcijski efekt značajan i obavezno se mora uzeti u obzir.

Interakcija temeljnog tla i konstrukcije je u funkciji krutosti konstrukcije u odnosu na krutost tla. Važan je dakle, odnos širine ili vitkosti konstrukcije s obzirom na širinu temelja, ali i masa konstrukcije u odnosu na masu tla. Postoje dvije metode rješavanja interakcije, direktna i indirektna. Direktna metoda je pristup u kojem se cijeli sustav analizira u jednom koraku pomoću računalnog softvera. Ova metoda koristi metodu konačnih elemenata, kompleksnija je od indirektna, ali i preciznija. Obično se koristi u akademskim krugovima za znanstvena istraživanja. Kod indirektna metode prvo se zasebno analiziraju kinematička i inercijska

interakcija, a nakon toga se interakcije zbroje da bi se dobila cjelokupna analiza. Ova metoda se češće koristi u inženjerskoj praksi. Moguće je provesti linearnu analizu, a za nelinearne sustave provodi se ekvivalentna linearna analiza. U oba slučaja potrebno je kvantificirati promjene dinamičkih svojstava tla kao što su modul posmika G , prigušenje ξ i brzina posmičnih valova V_s .

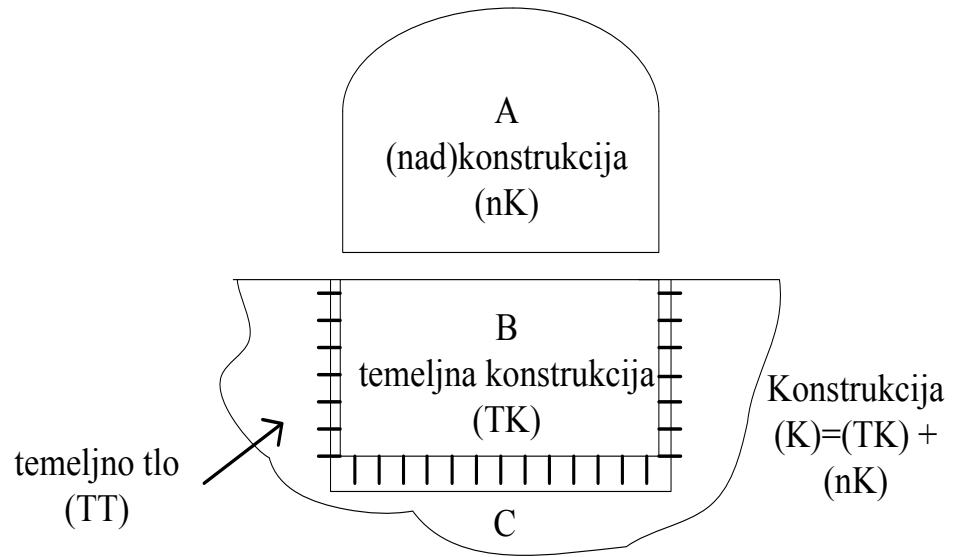
Za utvrđivanje režima naprezanja koji djeluju na konstrukciju koristi se dinamički model s konačnim brojem stupnjeva slobode gibanja. Konstrukcija će biti u interakciji s tlom, stoga je nedovoljno analizirati samo konstrukciju, već je potrebno u analizu i model uključiti i temeljno tlo. Pri stvaranju modela za statičko naprezanje, tlo je polubeskonačni prostor s neograničenom domenom. Zato se za takvu analizu uzima fiktivna granica koja je dovoljno udaljena od konstrukcije da na toj granici učinak od naprezanja prestaje. Isti način analize ne može se koristiti za dinamička naprezanja, jer kad bi ti isti valovi došli do fiktivne granice oni bi se reflektirali u tlo i počeli se širiti nazad prema konstrukciji. U statičkoj analizi valovi prolaze kroz fiktivnu granicu i dalje se šire u beskonačni poluprostor. Zato je važno u dinamičkoj analizi razlučiti dio analize koji se odnosi na dinamiku tla i onaj koji se odnosi na dinamiku konstrukcije. Fundamentalni cilj dinamičke analize interakcije temeljnog tla i konstrukcije je odrediti dinamički odziv konstrukcije i tla koji su izloženi naprezanjima.

Postoji nekoliko različitih dinamičkih djelovanja koja mogu opteretiti interaktivni sustav, ali nijedno ne može biti toliko značajno kao što je to potres. Potres je iznenadno oslobođenje velike količine energije na mjestu dodira tektonskih ploča različitih veličina. Potresi se obično događaju na nekoliko desetaka kilometara dubine, oni na 10 km smatraju se vrlo plitki. Stoga, volumen geomedija kroz kojeg se potresni valovi šire od epicentra do površine tla je vrlo velik. Čak i da postoji točan zapis potresa i da je točno poznat način na koji se seizmički valovi šire kroz geomedij, iako to nikada nije slučaj, nepotrebno je uzeti toliko volumen geomedija u analizu. Zato je za inženjersku analizu interakcije dovoljno poznavati svojstva i značajke lokalnog tla neposredno u okolini građevine.

Odziv konstrukcije je uvjetovan interakcijom TT – K. Sila interakcije djeluje kao „udar“ na konstrukciju (K). Interakcija je oblik seizmičke ekscitacije. Odziv konstrukcije na potres ovisi o interakciji između 3 elementa vezanog sustava:

- A (nad)konstrukcija = nK

- B temelj = TK
- C temeljno tlo = TT



Slika 1 Dijelovi interaktivnog sustava

3. Modeliranje interaktivnog sustava

Modeliranje interakcije temeljnog tla i konstrukcije je način brzog računanja odziva interaktivnog sustava pomoću simplificiranog diskretnog sustava. Takvi modeli široko variraju ovisno o razini kompleksnosti i mogućnosti primjene. Na primjer, plitki temelji se često aproksimiraju pomoću sustava opruga i prigušivača, a za geomedij se pretpostavlja da je homogen, elastičan i polubeskonačan prostor (Gazetas, 1991.; Wolf, 1997.). Razvoj modeliranja interaktivnog sustava počeo je s radom Lysmera i Richarta koji su (1966) razvili i opisali sustav s jednim stupnjem slobode gibanja. Za računanje vertikalnog dinamičkog odziva temelja Luco je (1974) izveo izraze za dinamičku krutost kružnog, trakastog i pravokutnog temelja koji se nalazi na površini uslojenog elastičnog poluprostora. Parmelee (1967), Veletsos (1977), Meek (1974) i Veletsos (1977) analizirali su jednostavnu konstrukciju na krutom kružnom površinskom temelju i jasno dokazali važnost analize interakcije tla i konstrukcije u konstrukcijskom inženjerstvu. Alves i Perez – Rocha (1996) i (1998) koristili su diskretni model da bi utvrdili utjecaj interakcije na period i prigušenje konstrukcije kada su te karakteristike u funkciji dubine ukopa konstrukcije i sveopće dubine volumena tla. Mulliken i Karabalis (1998), razvili su diskretni model za računanje dinamičke interakcije između krutog temelja koji se nalazi na elastičnom poluprostoru koristeći opruge i prigušivača neovisno o frekvenciji sile pobude.

Kada je temeljna konstrukcija kruta, a seizmička pobuda nedovoljno snažna da prouzroči neelastično ponašanje tla blizu temeljne konstrukcije, tlo i temelj mogu biti predstavljeni pomoću linearnih elastičnih opruga i viskoznih prigušivača. Opruge predstavljaju deformabilnost, odnosno svojstvo slijeganja tla, a prigušivačima se opisuje disipacija energije u tlu. Budući da je tlo kontinuum, krutost i prigušenje temelja je u funkciji frekvencije. Stoga se govori o ovisnosti prigušenja i krutosti o frekvenciji pobude ili funkciji dinamičke impedancije (kontinuum). Generalnu jednadžbu dinamičke impedancije S dao je (Gazetas 1983.):

$$S = K (k(\omega, \nu) + I \alpha_0 c(\omega, \nu)) (1 + 2 I \xi)$$

K = statička krutost

k = dinamička krutost

ω = frekvencija pobude

ν = Poissonov koeficijent

a_0 = bezdimenzijski faktor ($a_0 = \omega_B / V_S$)

B = karakteristična dimenzija temelja

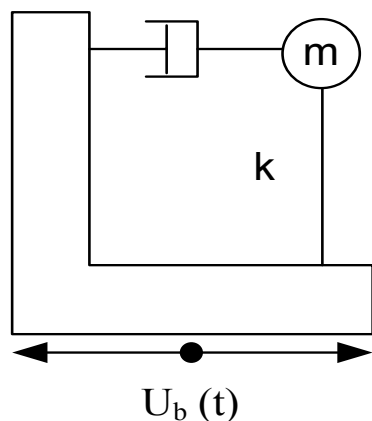
V_s = brzina posmičnih valova

c = koeficijent prigušenja

ξ = histerežno prigušenje ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode gibanja

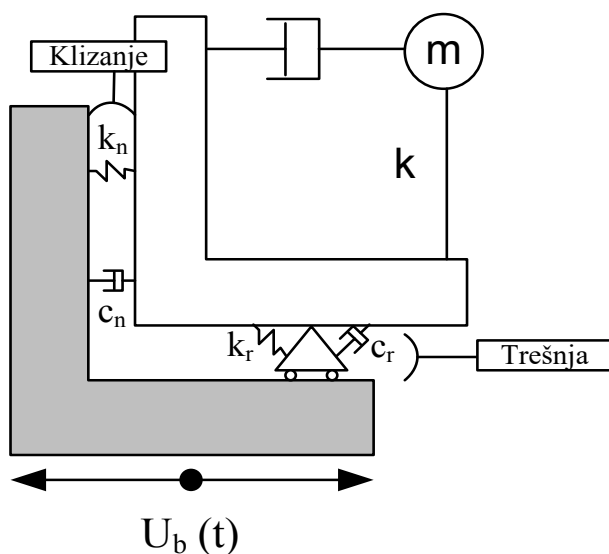
Statička krutost K temelja ovisi o inicijalnoj vrijednosti G i ν . Dinamička krutost k i koeficijent prigušenja ξ ovise o frekvenciji pobude. Histerežno materijalno prigušenje ξ ovisi o linearnim svojstvima tla. Suprotno od idealiziranog linearnog ponašanja tla prilikom nelinearnog ponašanja tla dinamička svojstva tog istog tla nisu konstantna. G i V_s se mijenjaju ovisno o amplitudi i frekvenciji seizmičke pobude. Stoga jednadžba dinamičke impedancije ne može biti direktno implementirana kada se tlo ponaša nelinearno. Zato je funkcija dinamičke impedancije izračunata s obzirom na svojstva modificiranog interaktivnog sustava, odnosno implementira se ekvivalentni linearni pristup za potrebe izračuna dinamičke impedancije temeljne konstrukcije.

Za najjednostavniju ilustraciju SSI efekta koristi se sustav s jednim stupnjem slobode gibanja kojeg predstavlja: kruti temelj K , opruga ili štap krutosti k , tijelo (konstrukcija) mase m . Takav sustav nalazi se na beskonačno krutoj podlozi koja se ne deformira.

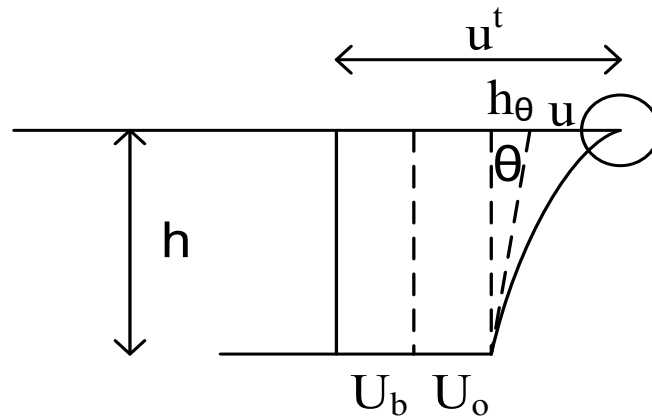


Slika 2 Sustav s jednim stupnjem slobode gibanja

Ilustracija s beskonačno krutom podlogom nije dovoljna jer se SSI efekt javlja na uslojenom, mekom tlu koje se deformira. Stoga bi vjerodostojnija ilustracija bila sustav horizontalnih, vertikalnih i rotacijskih opruga i prigušivača koji imitiraju rotaciju i translaciju. Sada se sustav sastoji se od tri komponente: translacija - klizanje, rotacija - trešnja i ukupni odziv sustava.



Slika 3 Sustav s tri stupnja slobode gibanja



Slika 4 Idealizirani prikaz pomaka konstrukcije tijekom njene interakcije s tlom

U_b = trajni pomak uzrokovan potresom (trešnjom)

U_o = trajni pomak zbog klizanja

$h\theta$ = reverzibilni pomak zbog trešnje

u = reverzibilni pomak zbog odziva konstrukcije

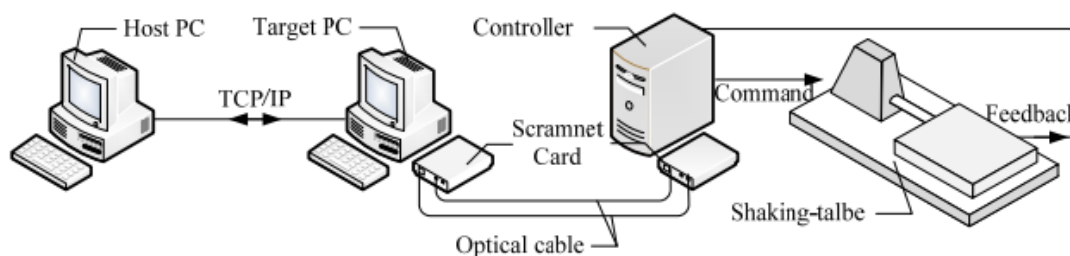
Količina (iznos) pomaka na vrhu (na površini terena): $U^t = U_b + U_o + h\theta + u$

Količina (iznos) pomaka na dnu (na dubini temeljenja): $U^b = U_b + U_o$

3.1. Primjer modeliranja interaktivnog sustava

Wang i suradnici su (2011) proveli realni vremenski dinamički hibridni test za analizu interakcije temeljnog tla i konstrukcije. Fundamentalna ideja dinamičkog hibridnog testiranja u stvarnom vremenu je podijeliti cijeli sustav u dva dijela. Prvi dio je numerička (virtualna V) podkonstrukcija koja se određuje u računalu pomoću numeričkih modela. Druga (realna, R) podkonstrukcija testira se dinamičkom testnom opremom, u ovom slučaju na potresnom stolu (engl. shaking table). Koristeći ideju dinamičkog hibridnog testiranja u stvarnom vremenu, teoretski analitički model polubeskonačnog tla se može uvesti u numeričku podkonstrukciju RTDHT sustava (engl. Real Time Dynamic Hybrid Testing), dok se model interaktivnog sustava može izgraditi i testirati na stolu. Na kraju odziv te dvije podkonstrukcije se zbraja i dobije se odziv cijelog sustava ($S = V + R$).

RTDHT sustav se sastoji od host računala i target računala. Host računalo ima Windows operativni sustav i koristi se za kontrolu početka i kraja testa i kontrolu tijekom testa. Target računalo razvija i provodi sustave i prototipove u stvarnom vremenu. Računala su povezana mrežnim kablom. Zajednička RAM mreža optimizirana je za vrlo brzi prijenos podataka unutar više platforma koje rješavaju dijelove istog problema u realnom vremenu. Optički kabel povezuje host računalo i stol. Brzina prijenosa podataka između host računala i kontrolne stanice je 16,7 MB/s (RTDHT sustav ima 2 potresna stola, svaki ima površinu 1,5 * 1,5 m i nosivost 2 t), raspon frekvencija je između 0 i 50 Hz, maksimalno ubrzanje može biti 3,6 g kada je stol prazan i 1,2 g kada se stol koristi pri maksimalnom kapacitetu (2t). Kontrolna stanica koristi se kako bi se omogućio samostalni rad stola ili simultani rad oba stola na 2 različita testa. Također je moguće neovisno prikupljanje informacija.



Slika 5. Prikaz RTDHT sustava

Parametarski model tla napravljen je s 2 stupnja slobode gibanja. Model se sastoji od 2 bloka poznate mase, 3 opruge i 3 prigušivača. Blokovi su postavljeni kao na slici 5, a jednadžba gibanja parametarskog modela tla pri djelovanju vanjske pobude na njega glasi:

$$M_f U_f^{(2)} + C_f U_f^{(1)} + K_f U_f^{(0)} = P_f$$

M_f = matrica mase

C_f = matrica prigušenja

K_f = matrica krutosti

$U_f^{(2)}$ = vektor ubrzanja

$U_f^{(1)}$ = vektor brzine

$U_f^{(0)}$ = vektor pomaka

P_f = vektor vanjske sile

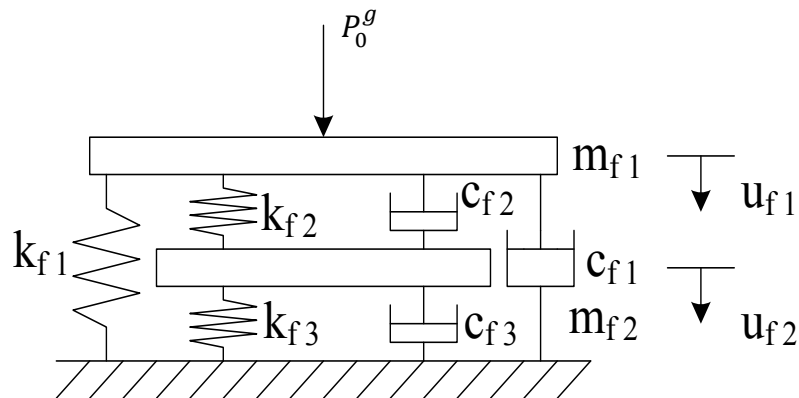
Dinamički koeficijent krutosti $K(a_0)$ je određen s 8 parametara: $\{m_{f1}, m_{f2}, k_{f1}, k_{f2}, k_{f3}, c_{f1}, c_{f2}, c_{f3}\}$.

Seizmička pobuda (vanjska sila $P_0^g(t)$) se može konvertirati u ekvivalentno naprezanje koje djeluje na volumen tla u kojem se događa interakcija:

$$P_0^g(t) = K_d U_0^g(t)$$

K_d = dinamička krutost sustava tla i temelja koja je ovdje ekvivalentna dinamičkoj krutosti parametarskog modela s oprugama

$U_0^g(t)$ = pomak modela (sustava) u vremenu t

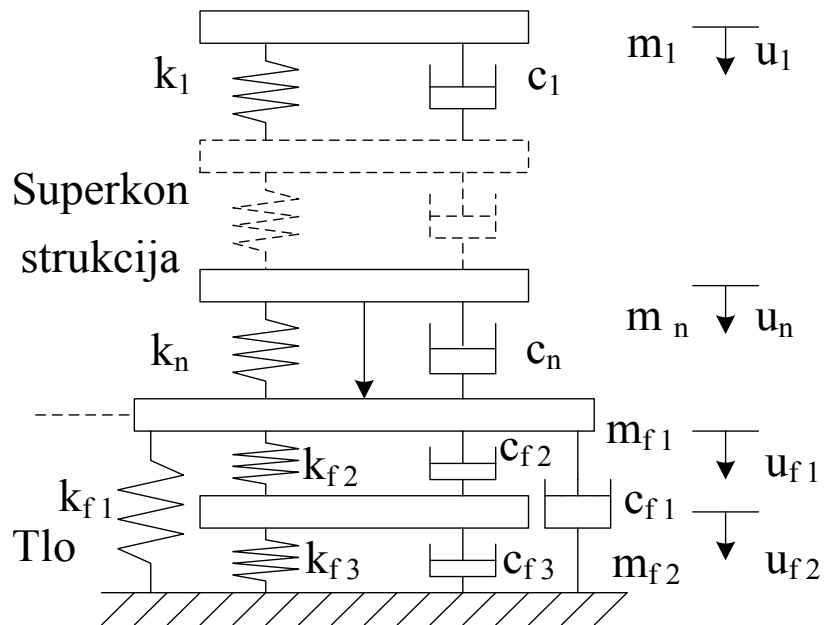


Slika 6 Parametarski model tla

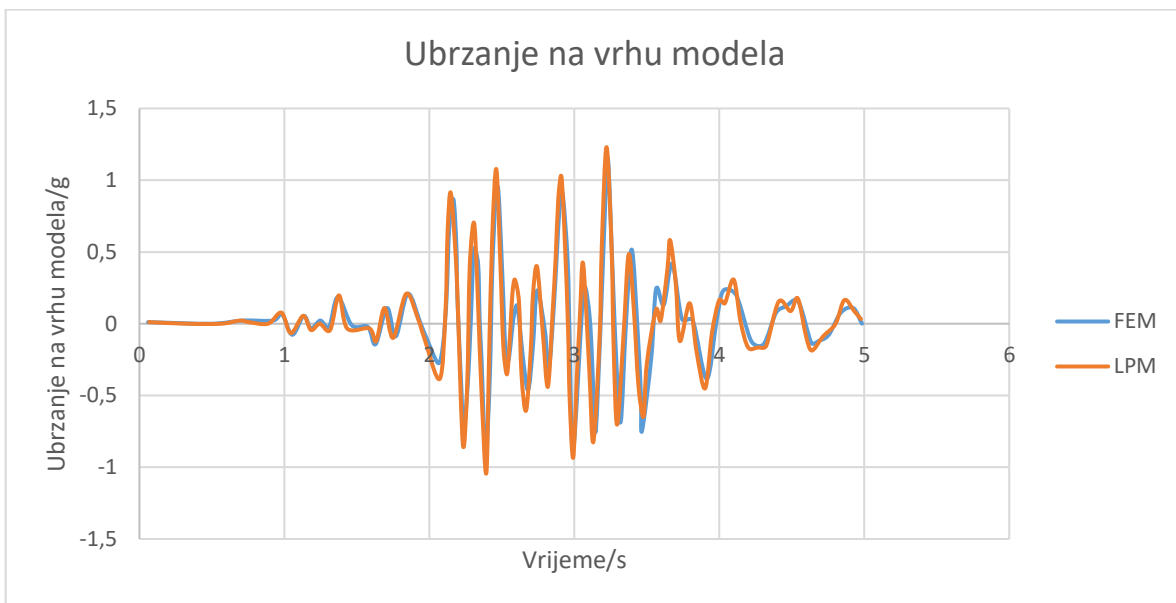
Prema ideji RTDHT- a, cijeli sustav je podijeljen u 2 dijela. Prilikom interakcije vrlo je teško modelirati polubeskonačno tlo i temelj u obliku fizičkog uzorka (kao realni sustav). Iz tog se razloga tlo i temeljna konstrukcija tretiraju kao numerička (virtualna, V) podkonstrukcija. Superkonstrukcija (nadkonstrukcija) služi kao fizikalna podkonstrukcija (realna, R), slika 6. Radi provjere rezultata usporedno je provedena analiza interaktivnog sustava pomoću FEM analize.

Graf 1 pokazuje usporedbu ubrzanja dobivenih FEM analizom i parametarskim modelom tla (engl. LPM – Lumped Parametar Model). Dvije krivulje se vrlo dobro podudaraju u amplitudi i frekvenciji. Vršna akceleracija dobivena LPM metodom je 1,226g, dok je točna vrijednost dobivena FEM analizom iznosi 1,147g. Za donji dio konstrukcije vršno ubrzanje iznosi 0,793g, a točna vrijednost je 0,773g. Greške iznose 6,9 % i 2,6 %.

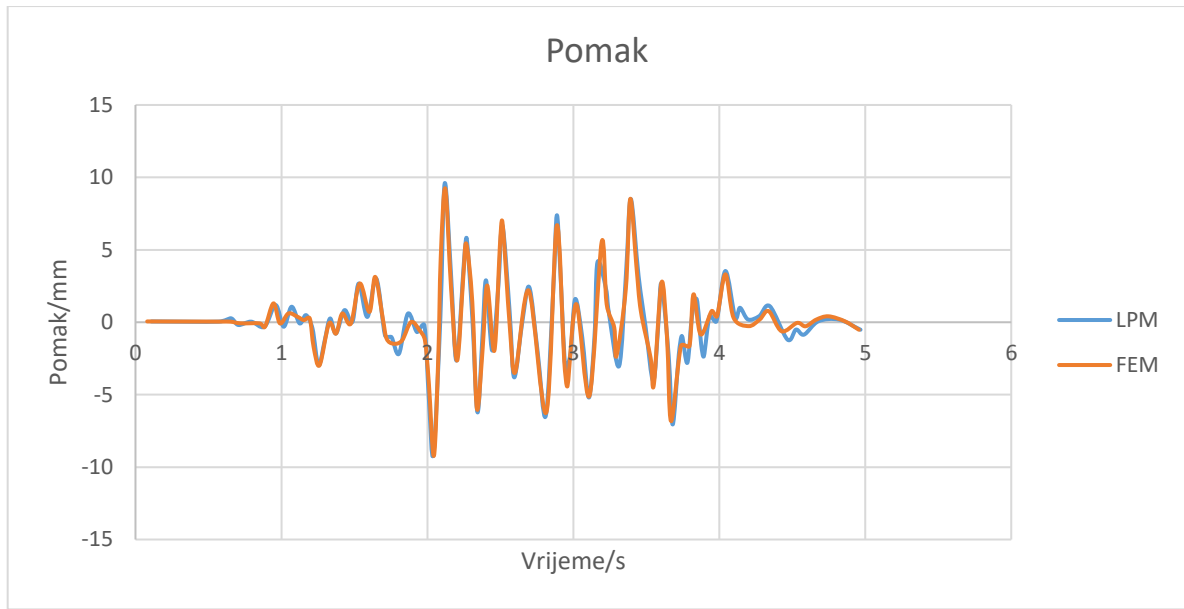
Graf 2 pokazuje usporedbu pomaka i može se vidjeti da obje metode daju gotovo identičan rezultat. Točna (izmjerena) vrijednost je 9,594 mm, a rezultat koji model daje je 9,751 mm, odnosno greška je 1,6 %. Za iznos posmičnih sila stvarni rezultat na vrhu modela je 597,3 kN, a rezultat testa je 635,1 kN ili greška od 6,3 %. Za donji dio modela točno rješenje (izmjerena vrijednost) je 689,6 kN, dok je rezultat testa 688,7 kN što daje grešku od 0,13 %. Rezultati pokazuju da ovakav model tla daje zadovoljavajuće rezultate dinamičke krutosti sustava temeljnog tla i temeljne konstrukcije.



Slika 7 Interaktivni sustav napravljen na temelju parametarskog modela

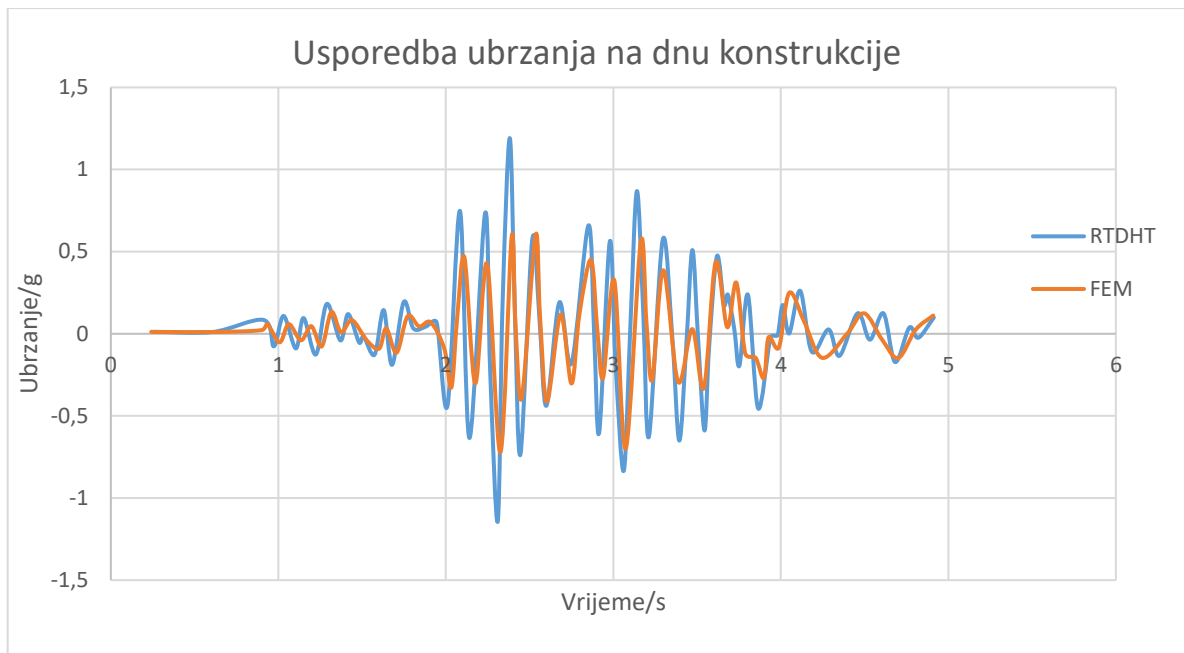


Graf 1 Usporedba podataka ubrzanja na vrhu modela dobivenih FEM i LPM metodama

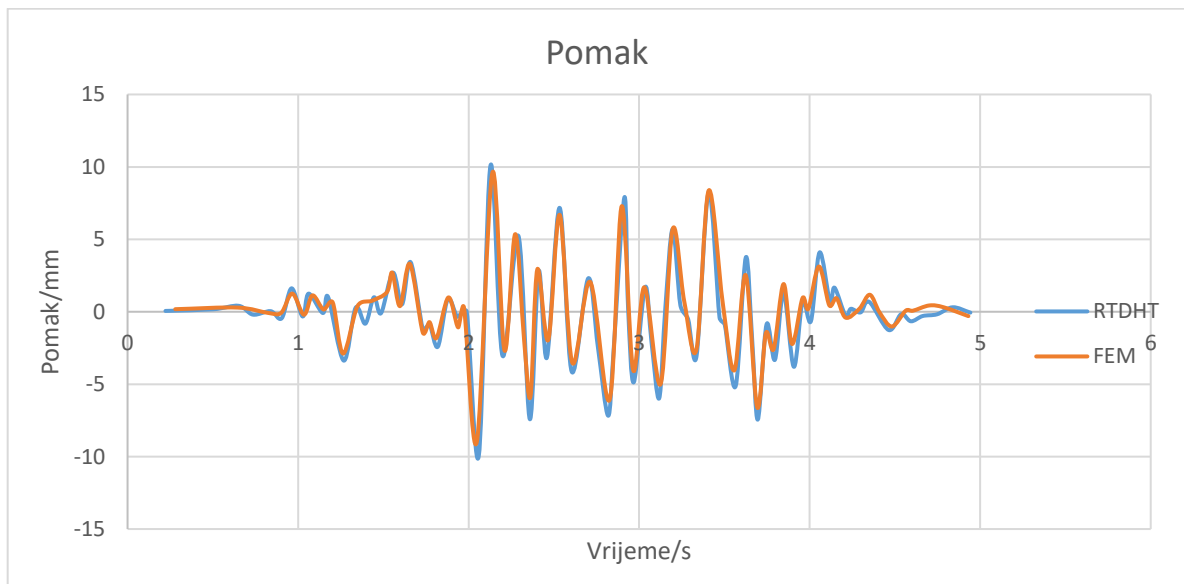


Graf 2 Usporedba pomaka dobivenih LPM i FEM metodama

Nakon što je model tla aproksimiran oprugama dao dovoljno dobre rezultate, slijedilo je ispitivanje RTDHT testom koji je baziran na spomenutom parametarskom modelu. Cilj ovog testa bio je ispitati odziv konstrukcije. Usporedba ubrzanja prikazana na grafu 3 pokazuje da RTDHT test u usporedbi s FEM daje dovoljno dobre rezultate za frekvenciju, ali postoji veća razlika u amplitudama. Rezultati ubrzanja na vrhu modela je 1,317g s greškom od 14,8 %, na dnu konstrukcije greška iznosi 52,5 %. Rezultat za pomak iznosi 10,39 mm, a točan rezultat je 9,594 mm s greškom od 8,3 %. Iznos posmične sile na vrhu konstrukcije je 597,3 kN dok je rezultat testa 659,7 kN s greškom od 10,4 %. Na dnu konstrukcije točan rezultat je 689,6 kN, a rezultat koji je dobiven testom iznosi 728,2 kN, što daje grešku od 5,6 %. Rezultati RTDHT testa pokazuju zadovoljavajuće rezultate, ali u usporedbi s rezultatima parametarskog modela greške su značajnije.



Graf 3 Usporedba podataka o ubrzanju dobivenih RTDHT i FEM metodama



Graf 4 Usporedba pomaka dobivenih RTDHT i FEM metodama

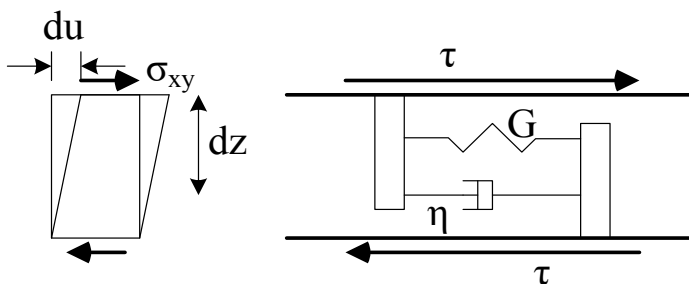
3.2. Prigušenje interaktivnog sustava

Prigušenje je gubitak energije u sustavu koji vibrira ili je izložen cikličkim naprezanjima. Prigušenje se događa u različitim građevinskim materijalima, a u tlu najčešći mehanizmi prigušenja su viskozno i histerežno ponašanje. Općenito, prigušenje može biti podijeljeno u

dvije kategorije: međučestično, materijalno ili unutarnje i geometrijsko, radijalno ili vanjsko prigušenje. Unutarnje prigušenje označava disipaciju energije u samom materijalu, gubitak energije između čestica tla, međučestično trenje. Vanjsko prigušenje označava gubitak energije unutar konstrukcije ili dijelova konstrukcije. Vanjsko prigušenje za razliku od unutarnjeg nije inherentno svojstvo materijala. Unutarnje prigušenje dalje se može podijeliti na intrinzično i ekstrinzično. Kod intrinzičnog prigušenja događa se gubitak energije u specifičnom mjestu unutar materijala, dok se kod ekstrinzičnog prigušenja gubitak energije odnosi na ukupni volumen. Kod materijalnog ili međučestičnog prigušenja dio elastične energije valova koji se šire kroz određeni medij se pretvara u toplinu. Konverzija je potpomognuta smanjenjem amplitude vala.

Viskozno prigušenje se često koristi za reprezentiranje disipacije elastične energije. U svrhu viskoznoelastičnog širenja valova tla su modelirana kao Kelvin – Voigtove čestice (najmanji dio kontinuuma). Za takve čestice otpornost na posmične deformacije je suma elastične i viskozne komponente. Odnos naprezanja i deformacije za Kelvin – Voigtovu česticu može se izraziti kao:

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t}$$



Slika 8 Element Kelvin - Voigtove čestice izložene naprezanju (Kramer, 1996).

$\tau (= \sigma_{xy}) =$ posmično naprezanje

G = modul posmika

$\gamma \left(= \frac{\partial u}{\partial z} \right)$ = posmična deformacija

η = viskoznost materijala

Elastična energija koja disipira u jednom ciklusu je izražena površinom elipse:

$$\Delta W = \int_{t_0}^{t_0 + 2\pi/\omega} \tau \frac{\partial \gamma}{\partial t} dt = \pi \eta \omega \gamma_0^2$$

Izraz za ΔW sugerira da je disipacija energije proporcionalna naprezanju, odnosno viskoznosti, frekvenciji pobude i posmičnoj deformaciji.

Tlo također elastičnu energiju disipira histerežno (Slika 8). Histerežno ponašanje tla znači da se tlo ponaša različito, ovisno o smjeru promjene ulaznih parametara (promjena smjera i intenziteta ekscitacije), a rezultati (posljedice) nekog djelovanja traju i po uklanjanju uzročnika toga djelovanja. Za diskretni Kelvin – Voigtov sustav omjer prigušenja ξ povezan je s krivuljom naprezanja i deformacije. Izraz za prigušenje je:

$$\xi = \pi \eta \omega \gamma_0^2 \cdot (4\pi \cdot 0.5 G \gamma_0^2)^{-1} = 0.5 \eta \omega / G$$

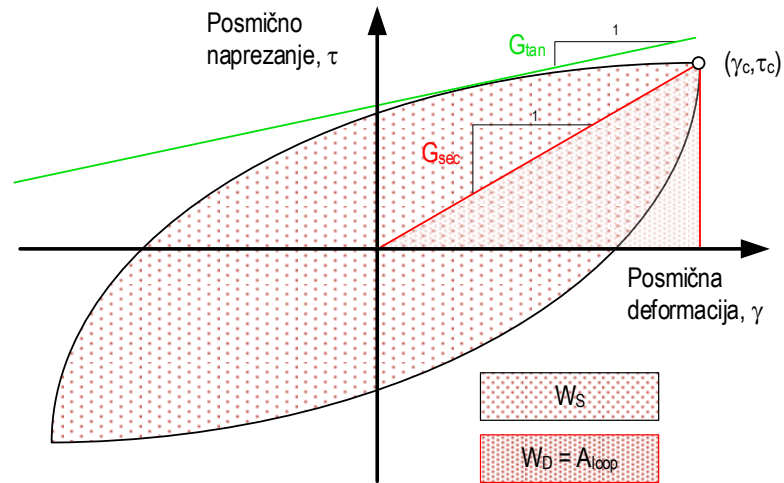
Budući da međučestično prigušenje apsorbira dio elastične energije potresnog vala, specifična energija (elastična energija po jedinici volumena) smanjuje se kako se val širi kroz medij. Redukcija specifične energije uzrokuje smanjivanje amplitude vala s povećanjem frekvencije (smanjenjem valne duljine). Ova redukcija amplitude zbog gubitka energije unutar velikog volumena se često zove radijalno ili geometrijsko prigušenje ili geometrijska atenuacija.

Geometrijsko prigušenje uzrokuje i smanjenje amplitude površinskih valova, drugim riječima: površinski valovi (većih valnih duljina) oslabe sporije nego P i S valovi. Stoga u nekim slučajevima efekti geometrijskog prigušenja dominiraju nad efektima materijalnog prigušenja (Bullen, 1953).

Izraz za ovu vrstu histereznog prigušenja je:

$$\xi = W_D \cdot (4\pi W_S)^{-1}$$

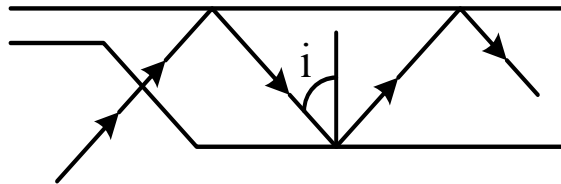
Prigušenje se određuje grafički pri interpretaciji rezultata laboratorijskih testova. Prigušenje je jednako površini histerezne krivulje podijeljene s površinom trokuta i sve podijeljeno s 4π .



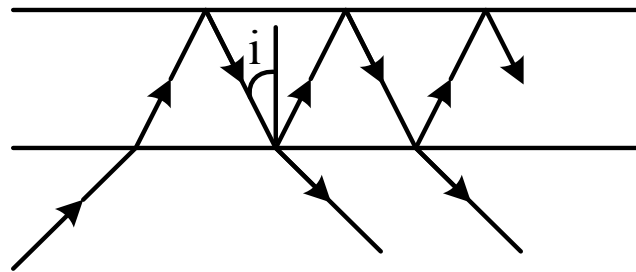
Slika 9 Grafička procjena vrijednosti prigušenja (F = sila vanjske pobude, u = pomak tla)

3.3. Širenje seizmičkih valova kroz interaktivni sustav

Seizmički valovi koji ulaze u „bazen“ sedimentiranog tla kreću se u smjeru u kojem se tlo najviše „zgušnjava“ (područje veće seizmičke impedancije). Valovi mogu ostati zarobljeni ako ulaze kroz granicu (dvije seizmički različite vrste geomedija) pod kritičnim kutom i_c , zbog velikog impedancijskog kontrasta između mekih sedimenata i čvrste temeljne stijene. Seizmički valovi koji ostanu zarobljeni stvaraju jaku amplifikaciju pri srednjim i niskim frekvencijama što značajno može produljiti vrijeme trešnje. Kada su slojevi tla horizontalno uslojeni, samo P i S valovi ostaju zarobljeni, a u slučaju lateralne heterogenosti površinski valovi također mogu ostati zarobljeni.



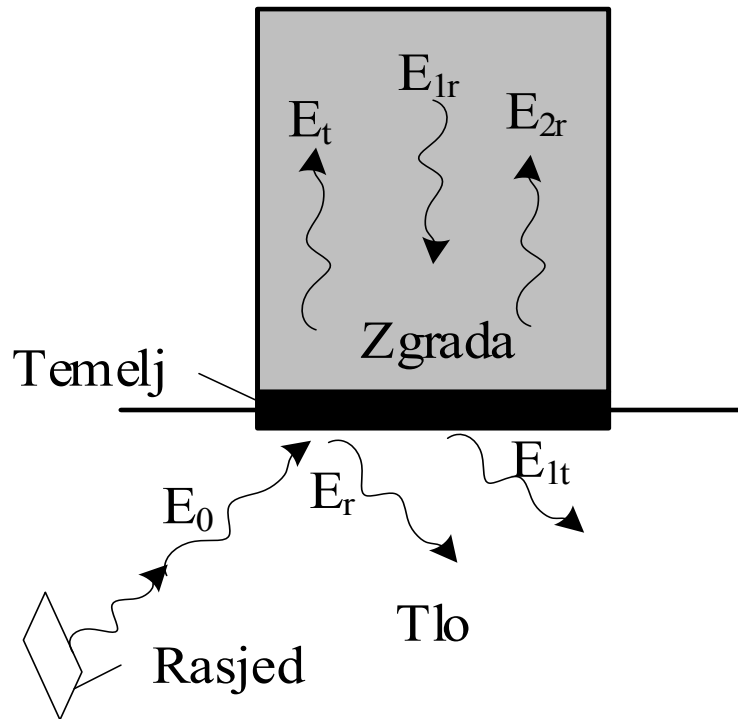
Slika 10 Seizmički val ulazi u sloj tla i ostaje zarobljen (sva energija ostaje između granica sloja)



Slika 11 Seizmički val ulazi u sloj tla, ali ne ostaje zarobljen (veći dio energije se transmitira natrag u podinu)

Kada seizmički val energije E_0 dosegne konstrukciju u tlu, on se razlaže u dvije vrste: transmisijski i refleksijski val. Transmisijski valovi energije E_1 ulaze u zgradu E_1 , a refleksijski valovi E_r se reflektiraju natrag u tlo. Transmisijski valovi koji ulaze u konstrukciju (zgradu), širenjem kroz nju izazivaju vibracije (počinje trešnja zgrade). Kada valovi dosegnu vrh konstrukcije, reflektiraju se i vraćaju prema dnu noseći energiju E_r . U toj situaciji događa se interakcija konstrukcije i temeljnog tla. Dio valova E_{1t} ponovno se

transmitira u tlo, dok se ostatak E_{2r} nanovo reflektira i počinje kretati prema vrhu konstrukcije. Valovi koji se transmitiraju u tlo zovu se radijacijski valovi.



Slika 12 Širenje seizmičkih valova kroz tlo i konstrukciju

3.4. Sukus poglavlja

Interakciju temeljnog tla i konstrukcije moguće je modelirati pomoću sustava opruga i prigušivača koji simuliraju stvarno ponašanje temeljnog tla i temeljne konstrukcije. U stvarnosti interaktivni sustav ima 6 stupnjeva slobode gibanja: vertikalna deformacija, klizanje u 2 smjera, rotacija u 2 smjera i torzija. Stupnjevi slobode gibanja su oblici preuzimanja seizmičke energije, to preuzimanje energije vodi prigušenju koje pak smanjuje oštećenje konstrukcije.

Interakcija temeljnog tla i konstrukcije je vrlo često uzrok kolapsa (osobito velikih konstrukcija) prilikom potresa. Faktori koji utječu na kolaps su:

1. Krutost i prigušenje temeljne konstrukcije:

- Tijekom vibracije konstrukcija razvija inercijske sile što povećava momente, torzijske i posmične sile u njenoj bazi
 - Momenti sile dovode do pomaka i rotacije na kontaktu temeljne konstrukcije i temeljnog tla
 - Fleksibilnost je osnovni uvjet za stabilnost cijelog sustava (ABC)
 - Nastali pomaci dovode do disipacije energije, a to utječe na prigušenje cijelog sustava
 - Ti su efekti jače povezani s inercijom (masom) konstrukcije
2. Varijacije između postojećeg $f-f$ gibanja i pobudnog gibanja temeljne konstrukcije razlikuju se s obzirom na utjecaj kinematičke interakcije i relativnog pomaka temeljne konstrukcije – temeljnog tla i $f-f$
3. Deformacija temeljne konstrukcije
- Sile i pomaci na elemente temeljne konstrukcije koje stvara konstrukcija ili temeljno tlo dovode do torzijskih, aksijalnih i posmičnih deformacija. One su bitne radi projektiranja komponenata temeljne konstrukcije, posebice ploče i piloti.

4. Metode analize interakcije temeljnog tla i konstrukcije

Postoji nekoliko različitih metoda modeliranja interaktivnog sustava koje se temelje na različitim konceptima. Ali, iako se ti pristupi razlikuju, i dalje su međusobno matematički ekvivalentni i vode istom rješenju te u tom smislu i nisu toliko različiti. Interaktivni sustav može se analizirati ovisno o nivou nelinearnosti pojedinih komponenti, traženom nivou točnosti, broju nepoznanica koje su vezane uz ulazne parametre te o dostupnosti i kvaliteti računalnih softvera. Ovisno o tome kako se nelinearnost uzima u obzir, metode analize mogu se kategorizirati kao nelinearne analize i ekvivalentne linearne analize. Vremenska analiza je preporučljiva kod nelinearne analize. Frekvencijska i vremenska analiza može se koristiti ako je moguće sustav modelirati kao ekvivalentni linearni. Pri frekvencijskoj analizi sustav se analizira na svakoj frekvenciji seizmičkog odziva. Jednom kada se utvrdi odziv na svim frekvencijama uvodi se princip superpozicije u svrhu utvrđivanja sveukupnog odziva. Iz 1 D analize odziva lokalnog tla u frekvencijskoj domeni mogu se odrediti posmični modul G i prigušenje tla ξ pomoću ekvivalentne linearne aproksimacije. Nakon što su modul i prigušenje utvrđeni, odnosi između ulazne pobude i odziva konstrukcije se evaluiraju pri svakoj frekvenciji. Odnosi između ulaza i izlaza pri svakoj frekvenciji se zovu prijenosne funkcije (transfer funkcije). Kada su prijenosne funkcije napokon određene, odziv konstrukcije za dano gibanje može se odrediti u frekvencijskoj domeni. Frekvencijska analiza pretpostavlja da se tlo i konstrukcija ponašaju linearno elastično pa je zato teško primijeniti frekvencijsku analizu pri značajnim nelinearnostima i plastičnim deformacijama sustava. U vremenskoj analizi interaktivni sustav rješava se numeričkom integracijom pri svakom koraku seizmičke pobude. Neelastično ponašanje komponenti interakcijskog sustava može se točno prikazati vremenskom analizom zato što je ravnoteža sila zadovoljena na svakom koraku.

4.1. Direktna metoda

U direktnoj metodi tlo, temelj i konstrukcija modeliraju se zajedno pomoću metode konačnih elemenata (engl. Finite Element Method ili FEM) u jednom koraku. Metoda konačnih

elemenata je numerička metoda za rješavanje kompleksnih inženjerskih problema kao npr. određivanja režima dinamičkih napreznja koji djeluju na tijelo kompleksne geometrije sastavljeno od različitih materijala. Ta se metoda široko koristi u svim granama inženjerstva. Metoda konačnih elemenata pristupa rješavanju problema tako da podijeli neko tijelo ili kontinuum na konačni broj podpodručja ili elemenata, a ti elementi su međusobno spojeni čvorovima. Taj proces zove se diskretizacija, a skup čvorova i elemenata zove se mreža. Svrha podjele na manje elemente je da se izračunavaju djelovanja samo unutar tih malih elemenata, a ne konstantno na području cijelog kontinuuma. Elementi su najčešće u obliku trokuta, kvadrata ili su linijski. Za analizu napreznja najvažnija varijabla koju je potrebno izračunati jest pomak svakog čvora. Za svaki element moguće je definirati vektor $\{u\}$ koji sadrži sve moguće pomake za taj konkretni čvor. Svaki od mogućih pomaka zove se stupanj slobode gibanja. Pomak svakog čvora u mreži računa se preko matrice krutosti $[k]$ kojom se materijal odupire deformaciji.

$$\{f\} = [k] \{u\}$$

$\{f\}$ = vektor sila i momenata u čvorovima

$\{u\}$ = vektor pomaka čvorova

$[k]$ = matrica krutosti elemenata

Dvodimenzionalni (2 D) gredni element ima 6 stupnjeva slobode gibanja pa kompletna matrica izgleda kao:

$$\begin{bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ m_1 \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ m_1 \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & \frac{AE}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$



Slika 13 Stupnjevi slobode gibanja za 2 D gredu

Rješavanjem sustava linearnih jednadžbi prikazanih u matrici može se utvrditi iznos pomaka čvorova u mreži. Matrica krutosti određuje koliko će se pomaknuti svaki čvor elementa ovisno o naprezanjima i momentima koji djeluju na njega i stoga je ključna za rješavanje pomaka svakog čvora u mreži. Korištenje metode konačnih elemenata danas je gotovo nemoguće i neisplativo bez računalnih programa koji omogućuju preciznije i brže računanje velikog broja jednadžbi.

Pri modeliranju tlo je neograničen medij stoga je potrebno postaviti granične uvjete. U direktnoj metodi dio tla oko konstrukcije modelira se s upijajućim granicama, a u metodi konačnih elemenata najčešće korištena granica je viskozna granica. Ovaj pristup može se koristiti i za vremensku i za frekvencijsku analizu. Dinamički odziv je određen jednadžbom gibanja cijelog interaktivnog sustava, a ta jednadžba glasi:

$$\mathbf{M} \mathbf{u}^{(2)} + \mathbf{C} \mathbf{u}^{(1)} + \mathbf{K}_f \mathbf{u}^{(0)} = -\mathbf{M}_{st} \mathbf{I} \mathbf{u}_g^{(2)}$$

M = matrica mase sustava: temelj i tlo

C = međučestično prigušenje sustava: temelj i tlo

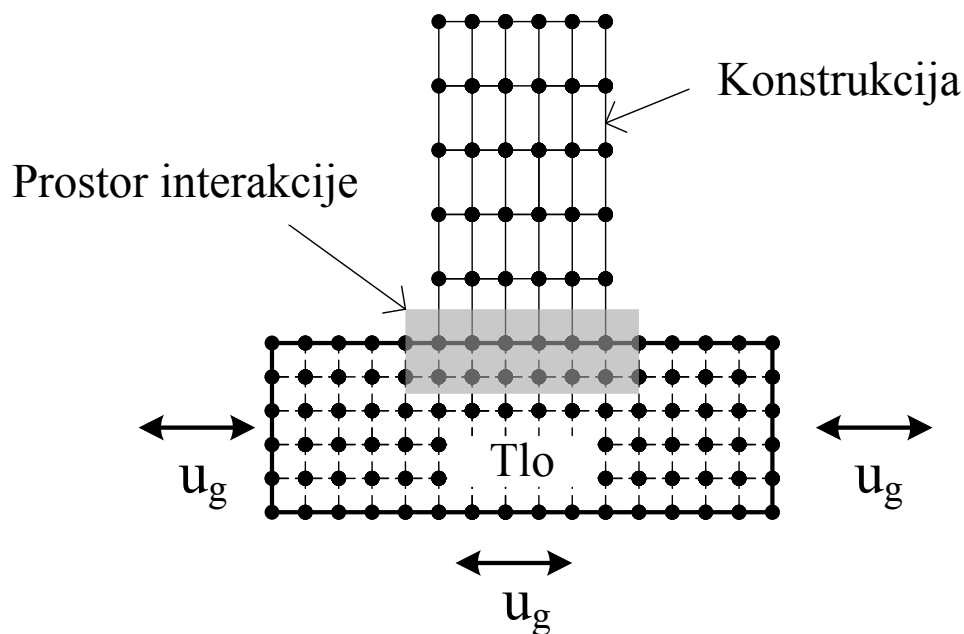
K = matrica krutosti sveukupnog sustava

M_{st} = matrica mase konstrukcije bez mase

$\mathbf{u}_g^{(2)}$ = gravitacijsko ubrzanje (jakost gravitacijskog) polja

$\mathbf{u}^{(0)}$ = vektor relativnog pomaka tla u odnosu na temelj

Desna strana jednadžbe pokazuje inercijske sile koje nastoje deformirati tlo kada su transferirane u temelj u obliku poprečnih sila i momenata. Ta ista deformacija tla zbog inercijskih sila uzrokuje geometrijsko prigušenje koje na odziv sustava utječe više nego međučestično prigušenje. Postoji nekoliko problema i izazova u direktnoj metodi o kojima raspravljaju (Elnashai i Di Sarno, 2015). Jedan od problema direktne metode je pravilno definiranje granica volumena tla koji se modelira, jer u protivnom može doći do povećanja kompleksnosti problema. Veličina mreže elemenata tla trebala bi biti uređena tako da najviša frekvencija koja je bitna za analizu bude prenesena kroz mrežu konačnih elemenata. Veličina mreže mora biti između $1/8$ do $1/6$ valne duljine vala maksimalne frekvencije kojeg se promatra. Ako se tlo ponaša neelastično, onda i valna duljina postaje manja pa i veličina mreže mora biti manja. Veličina domene treba biti dovoljno velika, jer čak i da postoje apsorpcijske granice, pojedini seizmički valovi mogu se reflektirati nazad u tlo. Stoga je potrebno granice staviti na dovoljnu udaljenost da seizmički valovi „imaju vremena“ disipirati. Model tla s konačnim brojem elemenata uključuje mnogo stupnjeva slobode što rezultira s mnogo frekvencija viših modova. U uvjetno slobodnoj shemi numeričke integracije viših modova mogu uzrokovati numerički nestabilan odziv, zato je potrebna stabilna shema numeričke integracije. Sljedeći nedostatak je vremenski interval integracijske sheme koji treba trajati dovoljno dugo da se maksimalna frekvencija pravilno prenese. Na kraju, posljednji nedostatak direktne metode koju navode Elnashai i Di Sarno je vezan uz pravilan i pažljiv način definiranja inherentnog prigušenja interakcijskog sustava.



Slika 14 Model interakcijskog sustava u metodi konačnih elemenata

4.2. Indirektna metoda

Indirektnom metodom analize interaktivni sustav dijeli se na dva podsustava koja se analiziraju odvojeno, ovisno o učincima inercijske i kinematičke interakcije. Nakon toga se učinci podsustava zbrajaju i dobiva se odziv sveukupnog sustava pomoću metode superpozicije. Indirektna metoda se najčešće koristi za linearne ili ekvivalentne linearne analize, ali u nekim slučajevima može se koristiti za analizu tla koja se ponašaju umjereno nelinearno. Kada je konstrukcija ugrađena u tlo, krutost temeljne konstrukcije ometa širenje seizmičkih valova. U tom trenutku, kada seizmički val stigne do temelja, njegovo se gibanje razlikuje od gibanja tla. Interakcija koja potječe zbog razlike u krutosti dvaju medija (temeljno tlo i temelj) i nemogućnosti da se njihova gibanja usklade zove se kinematička interakcija. Inercijska interakcija javlja se zbog vibriranja konstrukcije. Inercijska interakcija povećava period konstrukcije zbog već navedene nemogućnosti usklađenja gibanja tla i

temeljne konstrukcije, ali i zbog disipacije energije prigušenjem i vibracijama koje se od konstrukcije dalje šire u tlo. Stewart, Seed i Fenves (1999) proučavali su kakav utjecaj ima interakcija temeljnog tla i konstrukcije na period konstrukcije. Zaključili su da primarni faktor utjecaja može se sažeti u izrazu koji glasi:

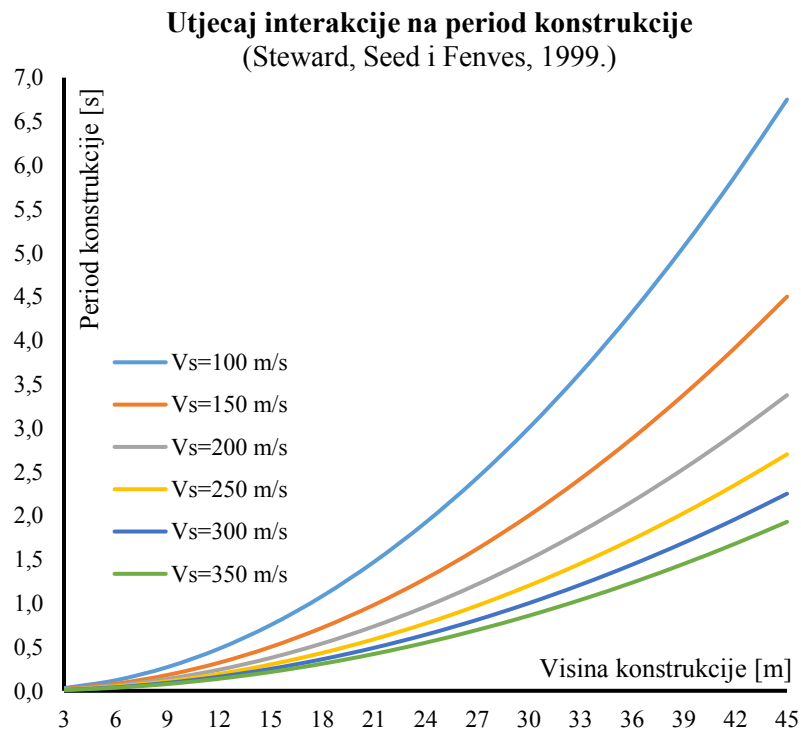
$$\frac{h}{V_s * T}$$

h = visina konstrukcije

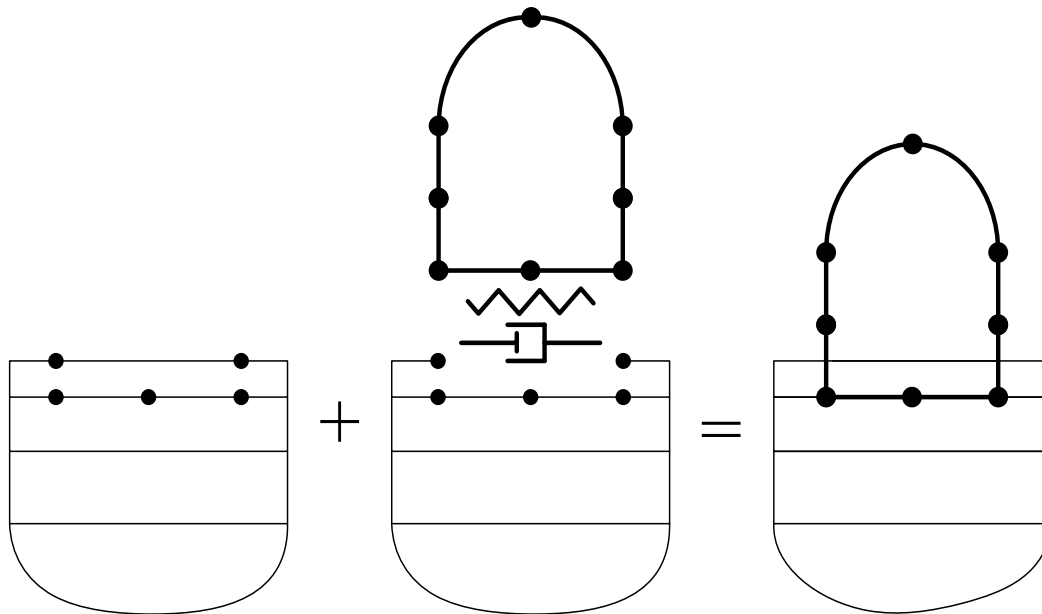
V_s = brzina posmičnih valova

T = prirodni period konstrukcije

Interakcijski efekt taj period može produžiti i do nekoliko puta. Stewart 2003. utvrdio je da je interakcijski efekt izraženiji kod kratkih i krutih konstrukcija dok kod onih fleksibilnijih je puno manji.



Graf 5 Utjecaj interakcije na period konstrukcije



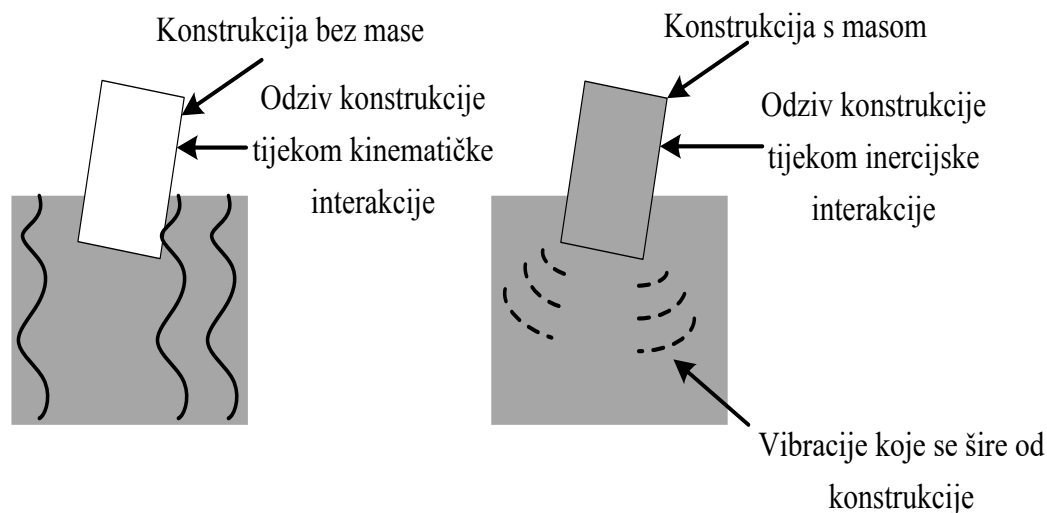
Slika 15 Ilustracija indirektno metode gdje se interakcijski sustav dijeli na dva podsustava.

Prvo se utvrdi djelovanje svakog pojedinog podsustava, a kasnije se ta dva djelovanja zbroje da se dobije sveukupan odziv (Wolf, 1985).

Odziv interaktivnog sustava obično se može utvrditi u 3 koraka (Lai, Martinelli, 2013).:

1. U prvom koraku računa se ulazno gibanje temelja (engl. Foundation Input Motion, FIM) koje se razlikuje od gibanja slobodnog volumena tla zbog razlike u krutosti tla i temelja
2. Računanje dinamičkog odziva podsustava tlo – temelj kada je taj podsustav odvojen od superkonstrukcije. Dinamički odziv je predstavljen matricom dinamičke impedancije koja je u funkciji frekvencije. Realni dio matrice impedancije reflektira usklađenost interaktivnog sustava i može biti predstavljen s oprugama. Imaginarni dio pohranjuje energiju nastalu geometrijskim i međučestičnim prigušenjem zbog neelastičnog tla koji je izložen dinamičkom naprezanju.

3. Računanje dinamičkog odziva cijelog sustava podvrgnutog ulaznom gibanju temelja izračunatog u 1. koraku. Analiza se provodi spajanjem modela superstrukture s podsustavom tlo – temelj pomoću matrice dinamičke impedancije izračunate u 2. koraku. U ovom koraku se razmatra i inercijska interakcija.



Slika 16 Ilustracija kinematičke i inercijske interakcije

Tijekom kinematičke interakcije pretpostavlja se da je konstrukcija bez mase, ali zadržava svoju krutost. Jednadžba gibanja za interakcijski sustav glasi:

$$\underline{M}_{TLO} \ddot{U}_{KI} + \underline{K} U_{KI} = - \underline{M}_{TLO} \mathbf{I} \ddot{U}_b$$

\underline{M}_{TLO} = matrica mase koja uključuje masu tla koje sudjeluje u interakciji, ne masu cijelog volumena tla

\underline{K} = matrica krutosti tla i konstrukcije

\ddot{U}_{KI} = ubrzanje uzrokovano kinematičkom interakcijom

\ddot{U}_b = ubrzanje na bazi tla (kontaktna ploha)

Dodavanjem matrice mase konstrukcije (\underline{M}_{KONST}) pomnožene s ubrzanjem odziva (\ddot{U}_{KI}) uzrokovano kinematičkom interakcijom ($\underline{M}_{KONST} \ddot{U}_{KI}$) daje jednadžbu:

$$\underline{M} \ddot{U}_{II} + \underline{K} U_{II} = - \underline{M}_{KONST} \mathbf{I} \{ \ddot{U}_{KI} + \ddot{U}_b \}$$

\ddot{U}_{II} = ubrzanje odziva nastalog inercijskom interakcijom

$$\underline{M} = \underline{M}_{TLO} + \underline{M}_{KONST}$$

Zbrajanjem dviju gornjih jednadžbi dobije se:

$$\underline{M} \{ \ddot{U}_{II} + \ddot{U}_{KI} \} + \underline{K} \{ U_{II} + U_{KI} \} = - \underline{M} I \ddot{U}_b$$

Posljednja jednačica jednaka je onoj za odziv u direktnoj metodi $\underline{M}\ddot{U} + \underline{K}U = - \underline{M}I \ddot{U}_b$ pa, je stoga sveukupni odziv interaktivnog sustava:

$$U = U_{KI} + U_{II}$$

4.3. Sukus poglavlja

U direktnoj metodi tlo i konstrukcija čine jedinstveni sustav i analiziraju se kao jedinstven sustav u jednom koraku, a tlo se promatra kao kontinuum. Elementi interaktivnog sustava u direktnoj analizi su: temelj, konstrukcijski elementi, granice opterećenja i elementi kontaktne plohe (temelj – tlo). Direktna metoda se ne koristi često u praksi jer zahtijeva mnogo proračuna, složenu analizu i mnogo vremena. Neke detaljne i kvalitetne analize mogu trajati i do nekoliko tjedana. Sub – konstrukcijski pristup ili indirektna metoda se provodi u 2 faze i rezultati se spajaju u cjelovito rješenje. Uvjeti za analiziranje interaktivnog modela indirektnom metodom:

- f – f gibanje i svojstva tla su prethodno određena
- transferna funkcija je definirana (konverzija f – f gibanja u ulazno gibanje temeljne konstrukcije)
- uključivanje Kelvin – Voigtov modela (krutost + viskoznost/prigušenje) na kontaktnoj plohi temeljnog tla – temeljne konstrukcije
- uvodi se analiza odziva kompozitne konstrukcije

Dizajn temeljen na SSI može povećati T konstrukcije, no to nije uvijek korisno. To može dovesti do produljenja djelovanja seizmičkih valova ako je konstrukcija temeljena na mekim sedimentima. Posljedica produljenja djelovanja seizmičkih valova je rezonancija sustava ako su vibracije dugotrajne što u krajnjoj liniji vodi do trajnih deformacija konstrukcije i slom temeljnog tla što dalje pogoršava seizmički odziv sustava.

Konstrukcija izložena seizmičkoj ekscitaciji ili sili naziva se interakcijom između temeljnog tla i temeljne konstrukcije koja povratno unosi promjene gibanja temeljnog tla. postoje tri tipa SSI efekta:

- kinematički interakcija
- inercijska interakcija
- efekt fleksibilnosti temeljnog tla

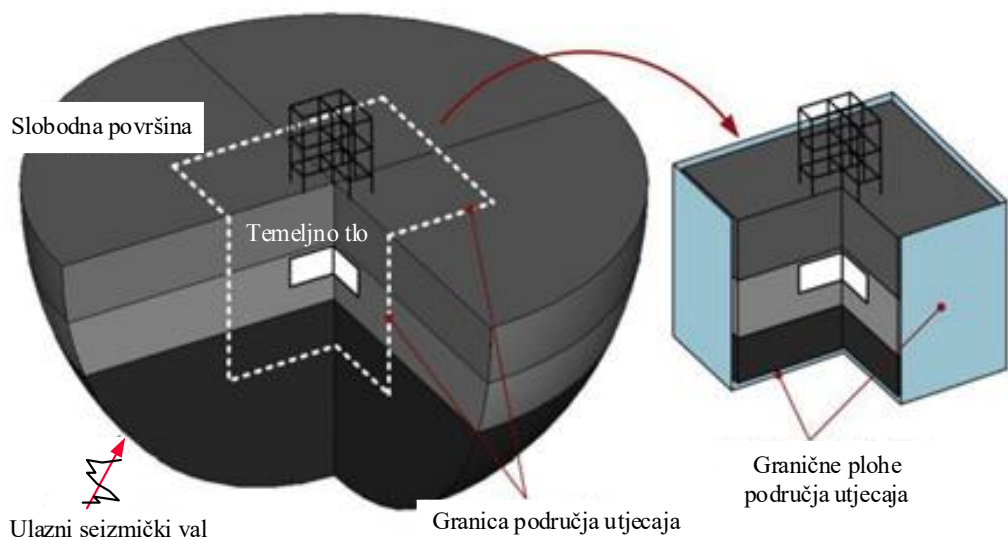
Kinematička interakcija je pomak tla uzrokovan potresnim gibanjem, $f - f$ gibanje sprječava temeljna konstrukcija ugrađena u tlo. Kinematička interakcija nastaje zbog nemogućnosti da se gibanje temeljne konstrukcije sinkronizira s $f - f$ gibanje temeljnog tla. inercijska interakcija je deformacija tla izazvana transmisijom inercijalne sile konstrukcije. Ako su potresne varijable male kinematički efekt je dominantan, a to onda produljuje period i povećava se geometrijsko prigušenje. Kod jačih potresa geometrijsko prigušenje limitira degradacija tla u okolini temeljne konstrukcije i stvaranje diskontinuiteta. Inercijska interakcija je dominantan, a to povećava materijalno prigušenje i izaziva znatne pomake blizu površine tla i oštećenja temeljne konstrukcije. Na ukupni odziv konstrukcije utječe: odziv temeljne konstrukcije i odziv temeljnog tla.

U poglavljima 4.1. i 4.2. prikazane osnovne jednačbe za gibanje interaktivnog sustava. Detaljnije informacije o načinu opisivanja gibanja interaktivnog sustava mogu se pronaći kod autora kao što su Roberto Villaverde (2009) ili Elnashai Amr i Di Sarno Luigi (2015).

5. Primjer primjene direktne SSI metode

Metoda unutrašnje podkonstrukcije (ISM, engl. Internal Substructure Method) Xin B., Tan H (2019) jedna je od suvremenijih direktnih SSI numeričkih metoda u kojoj je uveden poseban model granice utjecaja u geomediju. Granica se definira između slobodnog poluprostora (zone ili područja) u kojem ne postoji utjecaj opterećenja inženjerske konstrukcije na temeljno tlo (engl. Free-Field) i prostora koje je pod njenim neposrednim djelovanjem. Ta je zona nazvana unutrašnja podkonstrukcija, Slika 17.

U osnovi metode je teorija širenja seizmičkih valova i koncept unutrašnje podkonstrukcije. Prema teoriji propagacije valova, incidentni seizmički valovi se mogu transformirati u ekvivalentna upadna seizmička naprezanja (dinamičko opterećenje), a ta se naprezanja određuju pomoću onih valova koji dolaze iz poluprostora koji nije pod utjecajem konstrukcije (engl. Free-Field) pa su zato o njoj neovisna. Ekvivalentna ulazna seizmička naprezanja djeluju unutar promatrane zone (izdvojenog područja) u numeričkom modelu. Osim u homogenom poluprostoru ta se metoda može primijeniti za SSI analize u uslojenom mediju ili u homogenom mediju u kojem se nalazi diskontinuitet kao što je šupljina oblika polusfere.

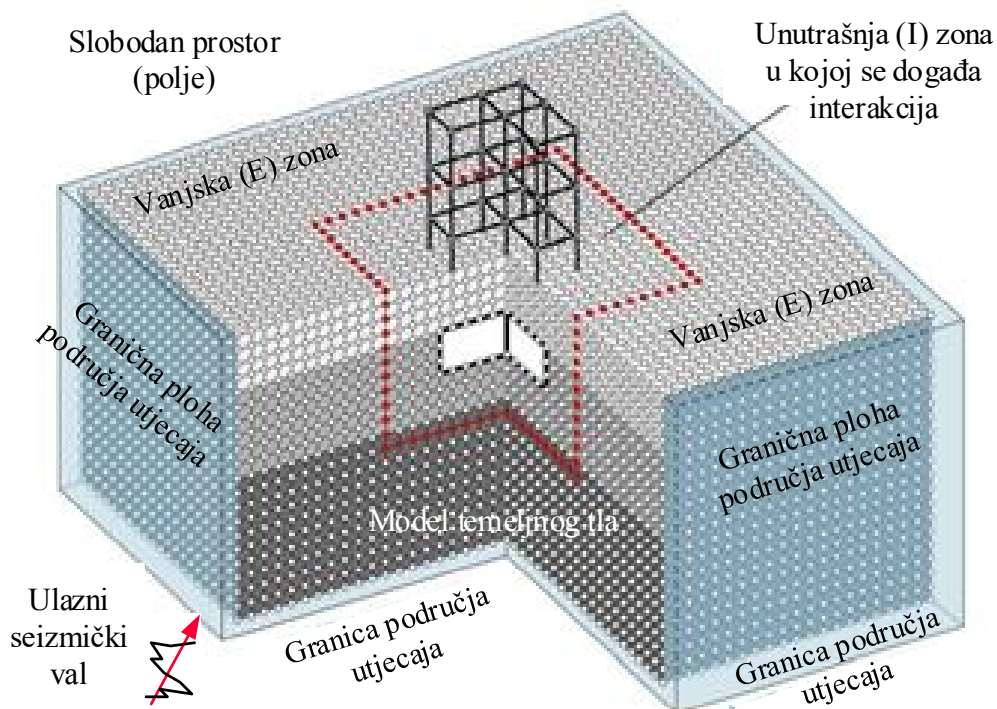


Slika 17 Model za metodu unutrašnje podkonstrukcije (ISM)

Koncept numeričkog modela metode unutrašnje podkonstrukcije za analizu 3D modela interaktivnog sustava temeljno tlo - konstrukcija prikazuje Slika 18.

Čvorovi u numeričkom modelu klasificirani su u 5 tipova ovisno o njihovoj poziciji, Slika 20:

- unutarnji čvorovi (I) podkonstrukcije
- vanjski čvorovi (E) podkonstrukcije
- troslojni unutarnji čvorovi podkonstrukcije (crveni, zeleni i plavi označeni s A, B i C) predstavljaju kategorije (vrste) granica interakcije temeljnog tla i konstrukcije.



Slika 18 Interakcijski model – FEM matrica s istaknutim područjem interakcije

Usljed seizmičke ekscitacije, proces širenja valova se može razložiti na (dekompozicija):

- i) ulaz (upad) seizmičkih valova kroz granicu utjecaja
- ii) širenje ulaznih valova kroz vanjsku zonu (E), granicu interakcije (A_B_C) i unutrašnju zonu (I)
- iii. a) interakciju konstrukcije i temeljnog tla
- iii. b) generiranje valova odziva (reakcije) konstrukcije
- iv. a) širenje valova odziva kroz temeljno tlo
- iv. b) apsorpciju valova odziva na granicama utjecaja.

Točke iii) i iv) su ključne točke SSI problematike, jer definiraju (opisuju) interakciju konstrukcije i tla na kojem je temeljena, zbog djelovanja ulaznih seizmičkih valova. Domena u kojoj se interakcija zbiva je upravo područje interesa proračuna, zona koju omeđuju čvorovi A - granice interakcije A_B_C i zona (I). Vanjsko područje (E) se prostire od čvorova A prema granici utjecaja, koja se postavlja dovoljno daleko od granice interakcije. U tom se

području potpuno apsorbiraju valovi odziva pa izvan te granice postoji samo slobodno polje (Free-Field).

Svojstva geomedija su u svakom području identična su svojstvima geomedija u slobodnom polju.

Proračun djelovanja seizmičkih valova unutar granica utjecaja i simulacija širenja valova kroz tako izdvojeni prostor sa zadanim svojstvima geomedija traži znatne procesorske i memorijske resurse, zahtijeva dosta vremena pa je zbog toga skup i neprikladan. Rješenje koje se metodom unutrašnje podkonstrukcije (ISM) predlaže je približavanje granice utjecaja samoj konstrukciji (smanjivanje volumena za proračun). Inženjerski opravdanim pojednostavljenjem koje je matematički korektno definirano se proces širenja i djelovanja seizmičkih valova iz točaka i) i ii) može dovesti neposredno u blizinu konstrukcije. Prema teoriji širenja elastičnih valova kroz medij, ulazni seizmički val se može prikazati kao ekvivalentno seizmičko opterećenje, jer je na granicama očuvan uvjet transformacije brzine i naprezanja. Seizmičko opterećenje val (potresa) donosi iz slobodnog prostora pa stoga nije pod djelovanjem konstrukcije niti je o njoj ovisan. Osnovni uvjet tranzijencije brzine i naprezanja jest da na granici interakcije, čvorovi A_B_C, ekvivalentno seizmičko opterećenje omogućava (osigurava) gibanja i naprezanja koje uzrokuje ulazni seizmički val: ukupno djelovanje mora biti konzistentno bez obzira na oblik dekompozicije, odnosno opterećenje unutar zone utjecaja koje dolazi zbog djelovanja-gibanja iz slobodnog polja mora biti ekvivalentno odzivu-gibanju modela podkonstrukcije ISM u cijelom prostoru E_A_B_C_I.

Numerički model 3D SSI opisuje Slika 20. Zona interakcije A_B_C je peteroslojna, mehanička svojstva čvorova imaju istoimene indekse (\square_{AA} , \square_{BB} , \square_{CC}), dok svojstva geomedija među tim čvorovima imaju raznoimene indekse (\square_{AB} , \square_{BC} , \square_{CB} , \square_{BA}). Mehaničko ponašanje unutar domene interakcije (omeđeno čvorovima A) može biti linearno ili nelinearno, dok se ponašanje izvan nje, u vanjskoj zoni (E) modelira kao linearno elastično, da bi se zadovoljio uvjet superponiranja valova odziva (simuliranje propagacije seizmičkog vala). Ta je hipoteza utemeljena na činjenici da se amplituda valova odziva smanjuje geometrijski (s udaljenošću od izvora-konstrukcije). Svojstva geomedija među čvorovima A, B i C su ista kao i u zoni (I).

Konzistencija modela slobodnog polja i modela unutrašnje podkonstrukcije (MSP ~ ISM)

Mreža čvorova se oblikuje na isti način, a mehanička svojstva su identična za oba modela.

Jednadžba gibanja modela slobodnog polja za postavljenu mrežu čvorova je (1):

$$\begin{bmatrix} M_{EE} & M_{EA} & 0 & 0 & 0 \\ M_{AE} & M_{AA} & M_{AB} & 0 & 0 \\ 0 & M_{BA} & M_{BB} & M_{BC} & 0 \\ 0 & 0 & M_{CB} & M_{CC} & M_{CI} \\ 0 & 0 & 0 & M_{IC} & M_{II} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_E \\ \ddot{u}_A \\ \ddot{u}_B \\ \ddot{u}_C \\ \ddot{u}_I \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{EE} & K_{EA} & 0 & 0 & 0 \\ K_{AE} & K_{AA} & K_{AB} & 0 & 0 \\ 0 & K_{BA} & K_{BB} & K_{BC} & 0 \\ 0 & 0 & K_{CB} & K_{CC} & K_{CI} \\ 0 & 0 & 0 & K_{IC} & K_{II} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_E \\ u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_I \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_E \\ F_A \\ F_B \\ F_C \\ F_I \end{Bmatrix}$$

\mathbf{M} i \mathbf{K} su matrice mase i krutosti modela slobodnog polja u čvorovima i među njima, a \mathbf{u} i $\ddot{\mathbf{u}}$ su vektori pomaka i ubrzanja čvorova. \mathbf{F} je vektor sila u čvorovima.

U MSP se pretpostavlja da zona (E) nije izložena djelovanju seizmičke ekscitacije (nema ulaznih valova), a također se u toj zoni ne pojavljuju valovi odziva konstrukcije (jer konstrukcija realno ni ne postoji). Zbog toga se može pretpostaviti da su čvorovi E i A stacionarni u proračunu (2):

$$\mathbf{u}_A = \mathbf{u}_E = 0 \rightarrow \ddot{\mathbf{u}}_A = \ddot{\mathbf{u}}_B = 0$$

Prema inicijalnoj formaciji prostora koji se sastoji od dva izolirana tijela (međusobno neovisna i odvojena granicom interakcije), gibanje unutrašnjeg tijela (zona (I)) treba biti identično gibanju u slobodnom polju (zona (E) se ponaša kao slobodno polje). Zbog toga na granici koju čine čvorovi B vrijede identiteti (oznaka \square^0 se odnosi na slobodno polje) (3) :

$$\mathbf{u}_B = \mathbf{u}_B^0, \mathbf{u}_C = \mathbf{u}_C^0, \mathbf{u}_I = \mathbf{u}_I^0, \mathbf{F}_C = 0, \mathbf{F}_I = 0$$

Uvedu li se stanja i uvjeti (2) i (3) u jednadžbu gibanja MSP (1), onda se može izraziti ekvivalentno seizmičko opterećenje kao (4) :

$$\mathbf{F}_E = 0$$

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{M}_{AB} \ddot{\mathbf{u}}_B^0 + \mathbf{K}_{AB} \mathbf{u}_B^0$$

$$\mathbf{F}_B = \mathbf{M}_{BB} \ddot{\mathbf{u}}_B^0 + \mathbf{M}_{BC} \ddot{\mathbf{u}}_C^0 + \mathbf{K}_{BB} \mathbf{u}_B^0 + \mathbf{K}_{BC} \mathbf{u}_C^0$$

Definiranje (izračun) seizmičkog opterećenja je naravno neophodno da bi se uopće mogla proračunati interakcija konstrukcije i tla. Oblik izraza (4) zahtijeva dinamičku analizu metodom konačnih elemenata u svakom MSP čvoru pa je nužno pojednostavljenje koje donosi ISM. Dakle, prema izrazima (3) i (4), ekvivalentno seizmičko opterećenje ne postoji nigdje osim u čvorovima A i B. Osim toga, za njihov je proračun dovoljno definirati jednadžbe gibanja čvorova B i C u modelu slobodnog polja (MSP). Zbog toga se uveo ISM koji se sastoji od tri reda (sloja) čvorova A, B i C te dva reda (sloja) elemenata A_B i B_C među njima ($A_B \equiv B_A$, $B_C \equiv C_B$).

Jednadžba gibanja u tako definiranom modelu se može zapisati kao (5):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{AA}^{sub} & \mathbf{M}_{AB}^{sub} & 0 \\ \mathbf{M}_{BA}^{sub} & \mathbf{M}_{BB}^{sub} & \mathbf{M}_{BC}^{sub} \\ 0 & \mathbf{M}_{CB}^{sub} & \mathbf{M}_{CC}^{sub} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_A^{sub} \\ \ddot{\mathbf{u}}_B^{sub} \\ \ddot{\mathbf{u}}_C^{sub} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{AA}^{sub} & \mathbf{K}_{AB}^{sub} & 0 \\ \mathbf{K}_{BA}^{sub} & \mathbf{K}_{BB}^{sub} & \mathbf{K}_{BC}^{sub} \\ 0 & \mathbf{K}_{CB}^{sub} & \mathbf{K}_{CC}^{sub} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_A^{sub} \\ \mathbf{u}_B^{sub} \\ \mathbf{u}_C^{sub} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_A^{sub} \\ \mathbf{F}_B^{sub} \\ \mathbf{F}_C^{sub} \end{Bmatrix}$$

Oznaka \square^{sub} se odnosi na model unutrašnje podkonstrukcije (ISM).

S obzirom na diskretizaciju polja konačnih elemenata, kada su generirana mreža i svojstva geometrija MSP i ISM sustava korespondentna, onda se konačno može zapisati jednačba (7):

$$\mathbf{F}_A^{\text{sub}} = \mathbf{M}_{AB} \ddot{\mathbf{u}}_B^0 + \mathbf{K}_{AB} \mathbf{u}_B^0$$

$$\mathbf{F}_B^{\text{sub}} = \mathbf{M}_{BB} \ddot{\mathbf{u}}_B^0 + \mathbf{M}_{BC} \ddot{\mathbf{u}}_C^0 + \mathbf{K}_{BB} \mathbf{u}_B^0 + \mathbf{K}_{BC} \mathbf{u}_C^0$$

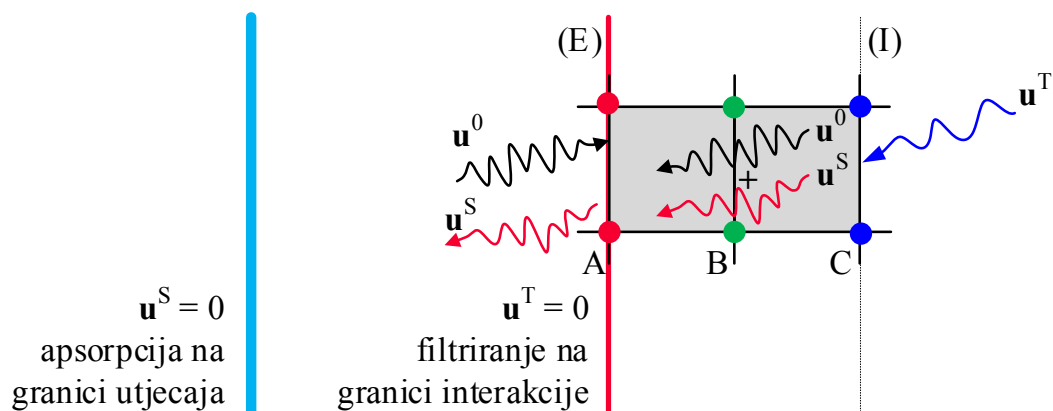
$$\mathbf{F}_C^{\text{sub}} = 0$$

Ta jednačba proizlazi iz (5) uz uvjet da su čvorovi A nepomični: $\mathbf{u}_A^{\text{sub}} = 0$, a da je gibanje čvorova B i C određeno iz modela slobodnog polja: $\mathbf{u}_B^{\text{sub}} = \mathbf{u}_B^0$ i $\mathbf{u}_C^{\text{sub}} = \mathbf{u}_C^0$.

Konačni oblik jednačbe gibanja čvorova A i B u ISM pokazuje da je identičan obliku jednačbe gibanja u MSP, ali ima ISM znatno manje čvorova za računanje.

Ekvivalentno ulazno seizmičko opterećenje je sada: $\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_A^{\text{sub}}$ i $\mathbf{F}_B = \mathbf{F}_B^{\text{sub}}$ pa se može odrediti ulazni seizmički val \mathbf{u}^0 u prostor interakcije. Val se širi od granice utjecaja prema konstrukciji s kojom među-djeluje (interakcija) pri čemu nastaju valovi odziva konstrukcije \mathbf{u}^S . Koncept dekompozicije valova omogućava da se valno polje u unutrašnjoj zoni (I) promatra kao suma upadnog valnog polja \mathbf{u}^0 i valnog polja odziva \mathbf{u}^S (8):

$$\mathbf{u}^T = \mathbf{u}^0 + \mathbf{u}^S$$

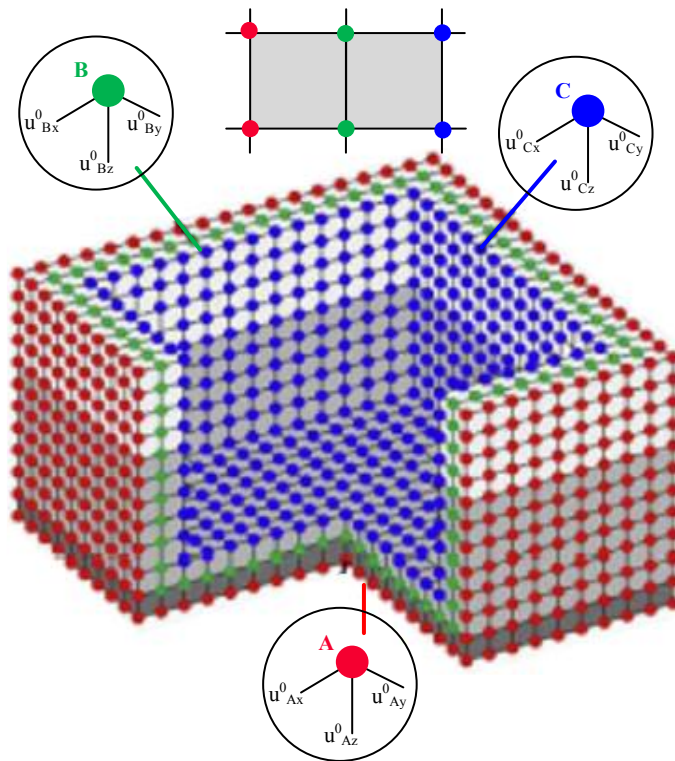


Slika 19 Filtriranje i apsorpcija vala odziva na granicama

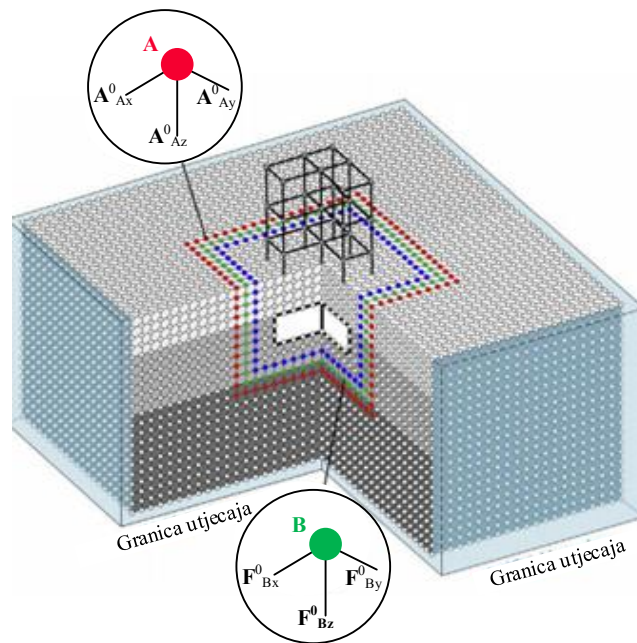
Kada sumarni val \mathbf{u}^T napušta zonu (I), na granici čvorova A utjecaj gibanja \mathbf{u}^0 iščezava (s druge strane granice je isto takvo polje), a val odziva \mathbf{u}^S prolazi kroz tu granicu i širi se dalje kroz zonu (E). Njegovo se djelovanje (energija) potpuno apsorbira na granici utjecaja. Slika 5 prikazuje širenje totalnog valnog polja i filtriranje valova na pojedinim granicama. Zbog toga se problematika ulaznog seizmičkog vala u SSI transformira u unutrašnje zbivanje: emitiranje seizmičkih valova iz unutrašnjeg izvora. Transformaciju omogućava primjena odgovarajućeg ekvivalentnog seizmičkog opterećenja na unutrašnje područje interesa (I).

Koraci u implementaciji ISM (metode unutarnje podkonstrukcije):

1. Definira se 3D mreža konačnih elemenata u prostoru koji obuhvaća utjecajnu zonu (Slika 18). Prostorne dimenzije te zone se mogu odrediti u odnosu prema poziciji (lokaciji) konstrukcije (granica crvenih čvorova A). U taj prostor ulaze seizmički valovi. Nakon toga se uklone svi čvorovi u zonama (E) i (I), osim čvorova koji čine granicu interakcije: troslojni čvorovi A, B i C te dvoslojni elementi između njih (Slika 4).
2. Iz upadnih seizmičkih valova definira se model slobodnog polja (MSP) (jednadžbe gibanja iz nekog 1D modela, \mathbf{u}^0). Čvorovi A se fiksiraju, a gibanje iz MSP se prenosi na čvorove B i C (Slika 20). Potom se rješava ISM sustav jednadžbi (dinamička analiza unutarnje podkonstrukcije) i određuju se sile $\mathbf{F}_A^{\text{sub}}$ i $\mathbf{F}_B^{\text{sub}}$ (sile u čvorovima A i B).
3. Ekvivalentna ulazna seizmička opterećenja \mathbf{F}_A i \mathbf{F}_B se nanose na odgovarajuće elemente: \square_{AB} , \square_{BB} , \square_{BC} (Slika 21). Nakon toga se dinamičkom analizom određuje SSI: $\mathbf{u}^T = \mathbf{u}^0 + \mathbf{u}^S$.



Slika 20 Model sastavljen od troslojnih čvorova (A, B i C)

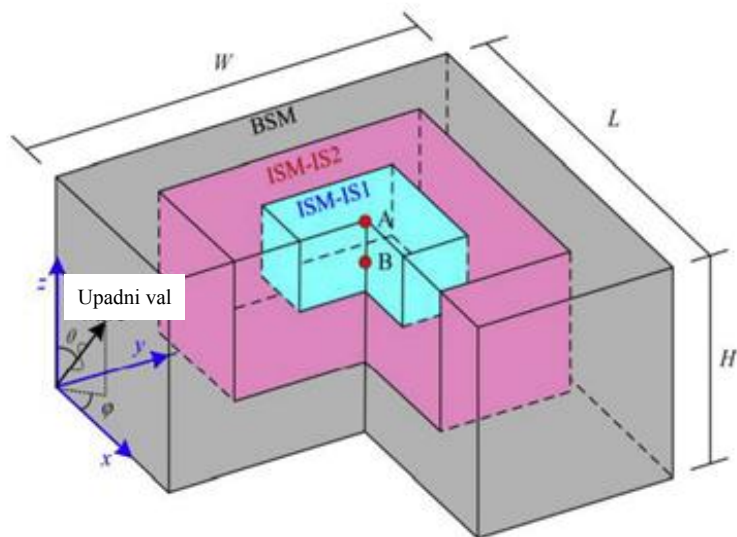


Slika 21 Prikaz interaktivnog modela s ekvivalentnim seizmičkim naprezanjima

Primjeri

Proces „unos“ ulaznih seizmičkih valova u numerički model ISM je neovisan o SSI efektu i efektu apsorpcije valova na umjetnim granicama – kontaktima zona (E) i (I). Povezan je jedino s lokalnim uvjetima tla u kojem se događa interakcija, upadnim valovima i upadnim kutovima. U svrhu procjene efikasnosti i točnosti ISM-a bez utjecaja SSI efekta, seizmički valovi uneseni su u inženjersku lokaciju u kojoj se ne nalaze nikakve konstrukcije i numerički rezultati uspoređeni su s odgovarajućim teoretskim rješenjima. Razmatrane su 3 vrste inženjerskih lokacija: homogeni poluprostor, uslojen poluprostor i homogeni poluprostor s hemisfernom šupljinom. Također, razmatrane su 3 vrste upadnih valova: P, SH i SV. Svaki od tih valova imao je drugačiji upadni kut.

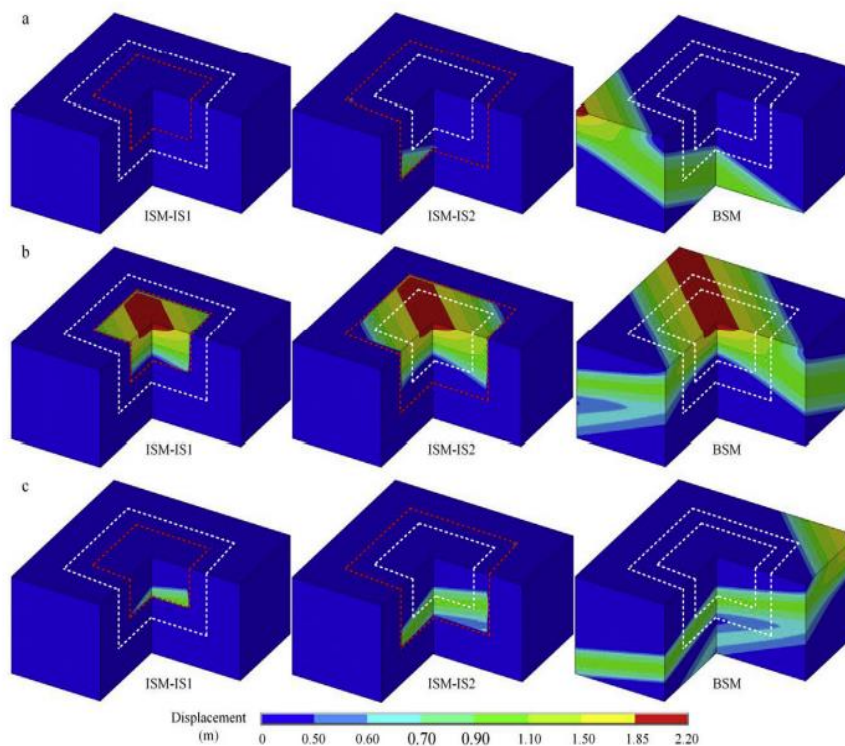
Prvo se razmatra unos seizmičkih valova u ravni homogeni poluprostor. L , W i H su duljina, širina i visina modela, θ je kut između smjera širenja valova i z osi, a ϕ je kut između projekcije smjera širenja valova u horizontalnoj ravnini i X osi. Crveno i zeleno područje na fotografiji 8 označavaju dvije unutarnje podkonstrukcije koje su označene s IS1 i IS2. Svojstva materijala homogenog poluprostora su $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$, brzina posmičnih valova $C_s = 200 \text{ m/s}$. Duljina i širina modela iznose $L=W= 100\text{m}$, a visina $H=50 \text{ m}$. Dimenzije unutarnje podkonstrukcije su $L_1 = W_1 = 40 \text{ m}$, $H_1 = 20 \text{ m}$. $L_2 = W_2 = 60 \text{ m}$, $H_2 = 30 \text{ m}$. Upadni kutovi su $\theta = 30^\circ$ i $\phi = 45^\circ$.



Slika 22 Model homogenog poluprostora

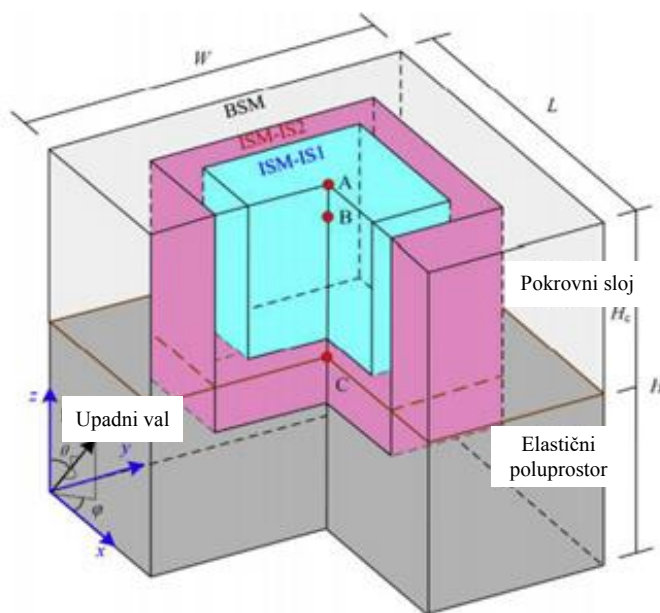
Rezultati pomaka točaka A i B pokazuju da dinamički odziv izračunat pomoću ISM je u skladu s teoretskim rješenjima (Huang, 2016). Veličina unutarnje podkonstrukcije nema utjecaja na preciznost izračuna. Tablica 1 uspoređuje broj elemenata i čvorova za ISM i BSM metodu (engl. Boundray Substructure Method). Broj elemenata i čvorova u ISM – IS1 i ISM – IS2 reduciran je za 84 i 64 % u odnosu na broj elemenata i čvorova u BSM modelu. Redukcija u broju čvorova i elemenata doprinosi značajnoj vremenskoj uštedi pri izračunu pomaka čvorova i elemenata, a također izračun je efikasniji i precizniji.

Slika 23 pokazuje pomake valnog polja pod koso upadajućim P valovima. Na fotografiji su prikazana pročelja upadnog P vala, reflektiran P i SV val. Važno je napomenuti da distribucija valnog polja označenog crvenom bojom izračunatog ISM metodom odgovara vrijednosti dobivenom BSM metodom.



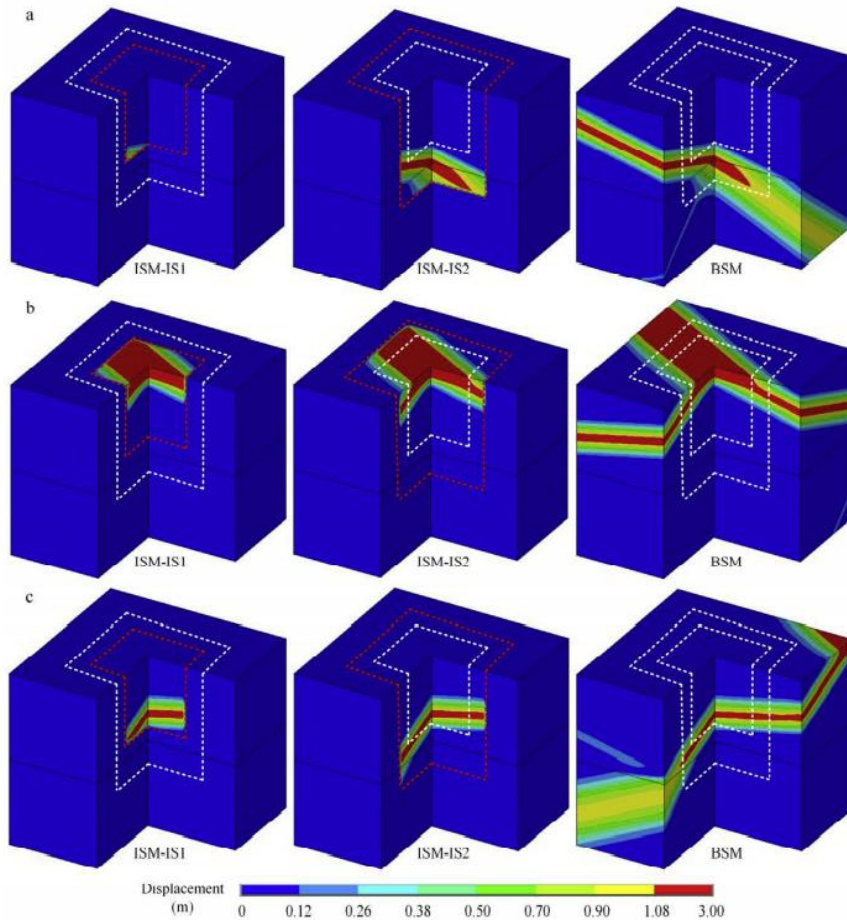
Slika 23 Prikaz upadnog P vala u homogenom poluprostoru

Uslojeni poluprostor uzima u obzir uvjete lokalnog tla i praktičniji je od homogenog poluprostora. Teorija širenja valova govori da različiti slojevi tla mijenjaju amplitudu i frekvenciju ulaznih seizmičkih valova pri prolasku kroz slojeve tla što može imati presudan učinak na seizmički odziv konstrukcije i kretanje slobodnog tla (Fatahi, 2014). Zbog transmisije i refleksije valova na dodiru različitih slojeva, distribucija valnog polja je kompleksna i unos seizmičkih valova u takvo inženjersko okruženje je vrlo izazovno. Na slici 24 vidi se dvoslojni sustav s elastičnim poluprostorom i pokrovnim slojem. Dimenzije modela su $L = W = H = 100$ m, a debljina pokrovnog sloja je $H_c = 50$ m. Zeleni i crveni prostor označava dvije unutarnje podkonstrukcije IS1 i IS2. Dimenzije tih podkonstrukcija su $L_1 = W_1 = H_1 = 40$ m i $L_2 = W_2 = H_2 = 60$ m. parametri slojeva su $\rho_1 = \rho_2 = 2000$ kg/m³, brzina posmičnih valova $C_{S1} = 200$ m/s, $C_{S2} = 100$ m/s. Poissonov koeficijent jednak je $\nu_1 = \nu_2 = 0,25$. Upadni kutovi iznose $\theta = 45^\circ$ i $\phi = 60^\circ$.



Slika 24 Model uslojenog poluprostora

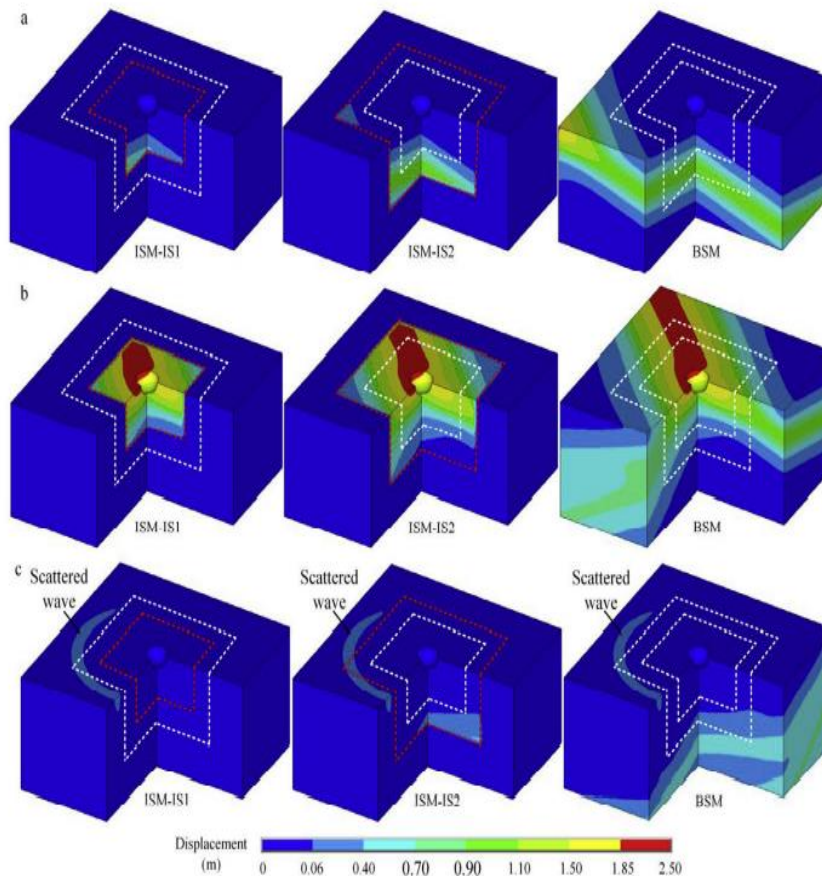
Na fotografiji 25 prikazani su pomaci SH valova. Distribucija valnog polja u unutarnjim regijama (označene crvenim točkama) jednaka je za ISM i BSM.



Slika 25 Prikaz pomaka promatranih točaka na uslojenom poluprostoru pri upadu SH valova

U 3. slučaju razmatra se slučaj homogenog poluprostora s hemisfernom šupljinom. Parametri materijala poluprostora identični su onom u 1. slučaju s dodatkom šupljine koja ima polumjer $R = 6$ m. Upadni kutovi iznose $\theta = 20^\circ$ i $\phi = 45^\circ$. Slika 26 pokazuje pomak valnog polja ispod ravnine SV vala. Unutar promatrane regije, valovi slobodnog polja i raspršeni valovi zajedno čine ukupno valno polje. Kada ukupni odlazni valovi dosegnu unutarnju podkonstrukciju, valovi slobodnog polja su potpuno apsorbirani, dok raspršeni valovi prolaze kroz podkonstrukciju i šire se dalje. Razlog zašto su izračuni ISM metodom vrlo slični izračunima s BSM metodom je zato što ISM promatra ulaz seizmičkih valova u promatranu regiju kao događaj koji ne utječe na generiranje i širenje raspršenih valova.

ISM metoda ne zahtijeva implementiranje umjetnih granica u procesu unosa seizmičkih valova. Stoga, ograničenost klasičnih metoda izborom umjetnih granica ovdje ne postoje, što ovu metodu čini univerzalno primjenjivom.



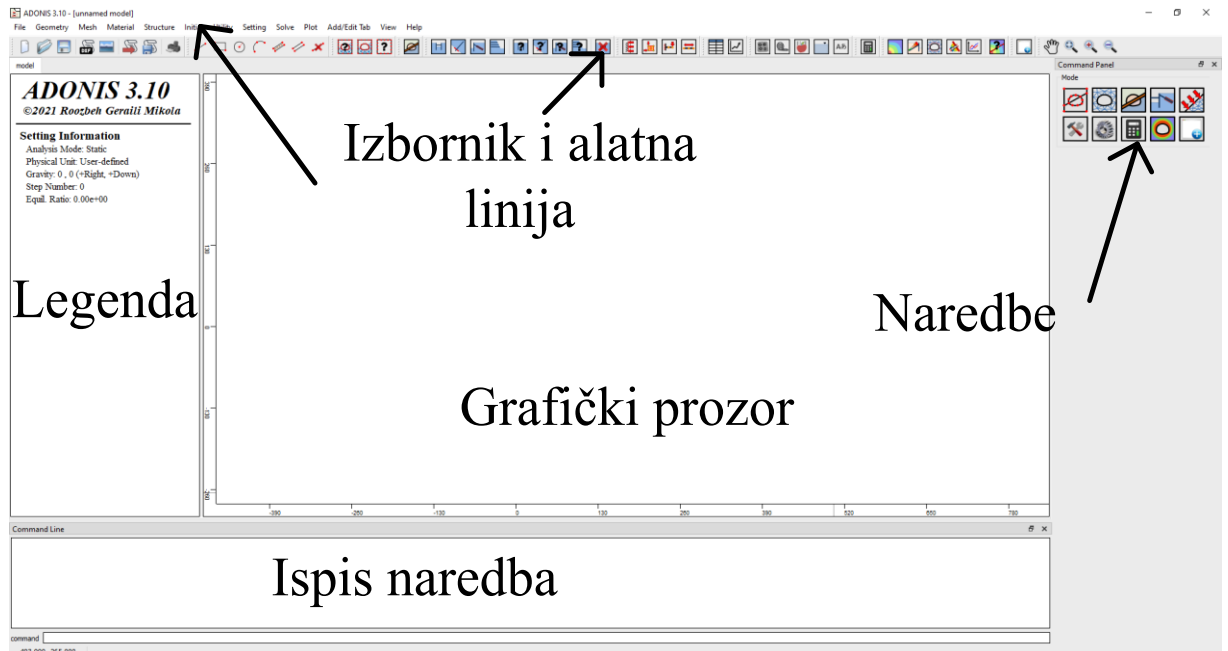
Slika 26 Model homogenog poluprostora s šupljinom polumjera $R = 6$ m

5.1. Modeliranje u ADONISU

ADONIS je softver konačnih elemenata koji ima široku primjenu u geotehničkom inženjerstvu. Razvio ga je inženjer i doktor znanosti Roozbeh Geraili Mikola koji trenutačno radi na Kalifornijskom Sveučilištu u Barkleyu. Softver je jednostavan za uporabu i namijenjen je inženjerima i studentima. Zbog svojeg širokog spektra primjene predstavlja moćan alat za geotehničke analize. Cilj i svrha ADONISA je razvoj i poboljšanje tehnika modeliranja i rješavanja raznih problema kojima se susreću inženjeri u svojoj praksi i studenti

tijekom svog studiranja. ADONIS pruža mogućnost korištenja različitih graničnih stanja i konstitutivnih modela u svrhu simuliranja interakcije materijala koji su relevantni u geotehničkom inženjerstvu. ADONIS-om moguće je provesti linearnu i nelinearnu analizu geotehničkih problema, koristi se grafičko sučelje za obradu podataka i generiranje kompleksnih mreža konačnih elemenata. Postoji širok niz strukturalnih elemenata koji omogućuju stvaranje oblika koji predstavljaju različite geotehničke objekte i građevine. Crtanje oblika ili modela u ADONISU moguće je na tri načina: crtanje pomoću pokazivača, pomoću unosa koordinata i korištenjem naredba za crtanje. ADONIS uključuje generiranje dvodimenzionalne automatske mreže trokutastog obila. Prije nego što se generira mreža potrebno je diskretizirati granice. Taj proces formira okvir mreže konačnih elemenata.

Građa ADONISA sastoji se od nekoliko apstraktnih razreda: Node, Element, Constitutive Model, Analysis, Structure, Domain, Action. Element je virtualni razred koji sadrži definiciju svakog elementa. Ovaj razred služi kao osnovna klasa za brojne druge razreda, ovisno o prirodi potrebnih elemenata. Constitutive model je razred koji se koristi za definiciju svojstva materijala i ponašanje tla i stijena. The Analysis razred formira i rješava jednadžbe za model konačnih elemenata, Structure razred je virtualni razred koji sadrži definiciju svakog strukturalnog elementa. Domain razred je spremnik koji sadrži sve komponente modela konačnih elemenata – čvorove, elemente i strukturalne objekte. Action razred upravlja svim napucima koje daje korisnik, sve naredbe pokazivačem i tipkovnicom.



Slika 27 Glavni dijelovi sučelja ADONIS programa

U svrhu SSI analize u softveru je razvijen model kosine i provedene su 3 analize. Svaki model se sastoji od 3 različita sloja tla koja su u međusobnoj interakciji kada na njih djeluje dinamička sila kao što je potres, uostalom kao i tijekom interakcije temeljnog tla i konstrukcije. Gornji slojevi koji se nalaze na sloju temeljnog tla također mogu biti konstrukcija. Analiza stabilnosti kosine u ADONIS-u se izvodi pomoću SSR metode (engl. Shear Strength Reduction). SSR metoda je dio metode konačnih elemenata implementirana je u ADONIS u svrhu automatskog provođenja analize konačnih elemenata i izračun faktora sigurnosti modela kosine. Model tla korišten u analizi određen je Mohr – Coulomb parametrima. Model kosine je nehomogen i sastoji se od 3 sloja tla različitih svojstava koji su određeni sljedećim parametrima: Modul elastičnosti E , Poissonov koeficijent ν , kohezija C , kut unutrašnjeg trenja ϕ i gustoća tla.

U programu ADONIS (V3.10) moguća su dva oblika interakcije: interakcija temeljno tlo – konstrukcija (SSI, soil-structure interaction) i interakcija stijena – stijena (RRI, rock-rock interaction). Osnovni princip za modeliranje interakcije je uveden pomoću koncepta granice

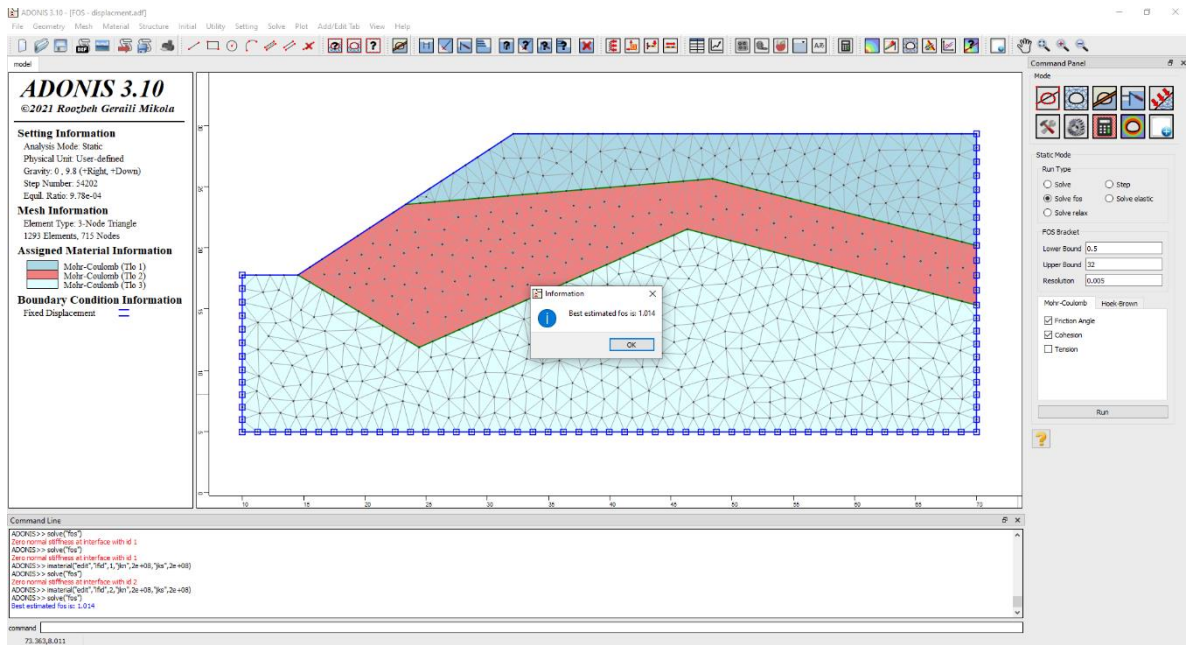
kontakta dvaju struktura (engl. joint/interface element). Element kontakta/sučelja ima dvije strane (različitih fizičko-mehaničkih svojstava) koje povezuju čvorovi. Čvorovi mogu imati svojstva sustava opruga koje primaju vertikalne (normalne) i lateralne (posmične) deformacije, odnosno naprezanja. Kontakt se opisuje/simulira Columbovim modelom klizanja i/ili vlačnog razdvajanja (engl. Coulomb sliding and/or tensile separation) (Mikola, 2017, Bolla i Paronuzzi, 2019). Plastično ponašanje na kontaktu upravo omogućava klizanje/razdvajanje. Elementi kontakta se koriste kao simulacija kontaktne zone male debljine koja ima određenu posmičnu čvrstoću. Preporuka je da se kontakt modelira s inženjerski opravdanim brojem različitih vrsta kontakata (ograničen broj kontakata dobro definiranih F-M svojstava).

Dakle, SSI u programi ADONIS se modelira izborom modela kontakta/sučelja: Interface Properties > Joint Model Type: Mohr-Coulomb u kojem se unose osnovni geotehnički parametri (kohezija, kut trenja, jedinična težina) te iznos najveće vlačne sile dozvoljene iz krivulje čvrstoće.

Analizom 1 utvrđen je faktor sigurnosti od 1,014. U analizi 2 korištena je ista geometrija modela, ali su izmijenjeni parametri slojeva tla. Faktor sigurnosti u toj analizi iznosi 1,002. U analizi 3 korišteni su isti parametri kao i u analizi 1, ali izmijenjena je geometrija modela kosine. Faktor sigurnosti za tu analizu iznosi 1,623.

Tablica 1 Prikaz parametara tla za analizu 1

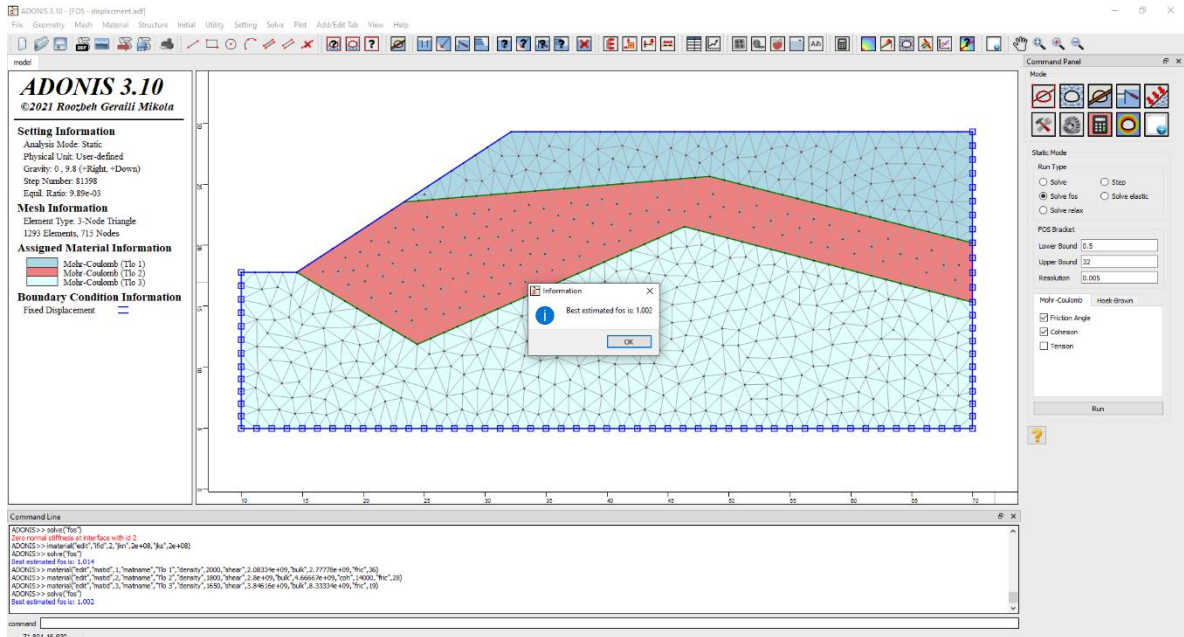
	E (MN/m ²)	ν	C (kN/m ²)	ϕ (°)	Gustoća tla (kN/m ²)
Tlo 1	5 000	0,21	0	34	21
Tlo 2	5 000	0,21	11	22	19
Tlo 3	5 000	0,21	16	17	18



Slika 28 Faktor sigurnosti za analizu 1 iznosi 1,014

Tablica 2 Prikaz parametara tla za analizu 2

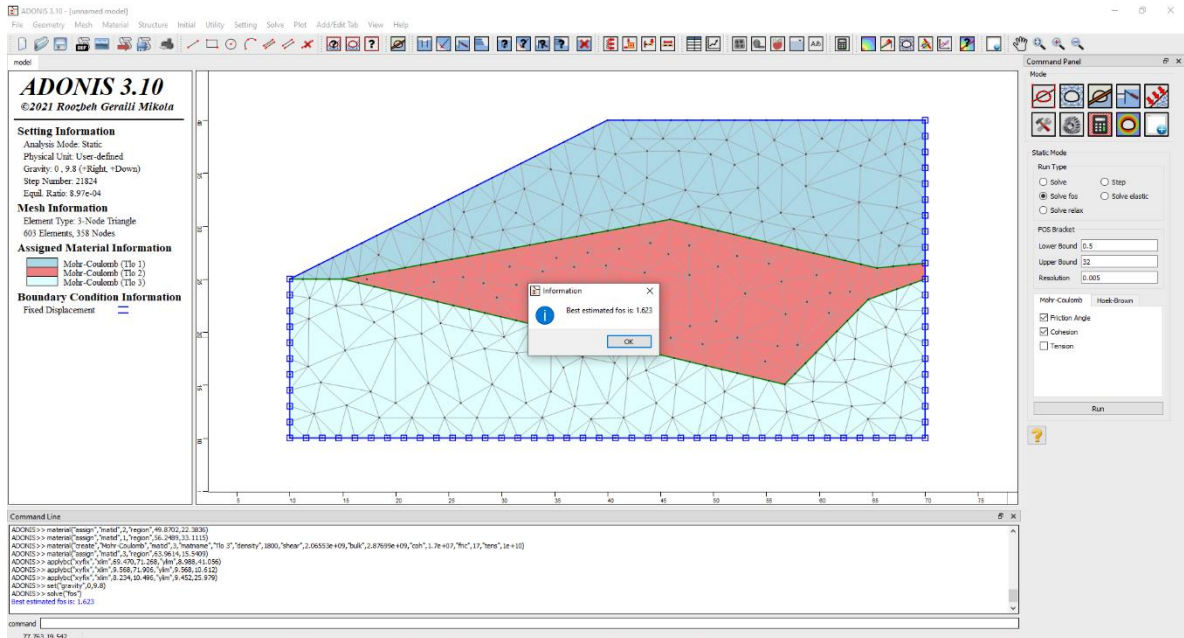
	E (MN/m ²)	ν	C (kN/m ²)	φ (°)	Gustoća tla (kN/m ²)
Tlo 1	5 000	0,20	0	36	20
Tlo 2	7 000	0,25	14	28	18
Tlo 3	10 000	0,30	25	19	16,5



Slika 29 Procjena faktora sigurnosti za analizu 2 iznosi 1,002

Tablica 3 Prikaz parametara tla za analizu 3

	E (MN/m ²)	ν	C (kN/m ²)	φ (°)	Gustoća tla (kN/m ²)
Tlo 1	5 000	0,21	0	34	21
Tlo 2	5 000	0,21	11	22	19
Tlo 3	5 000	0,21	16	17	18



Slika 30 Faktor sigurnosti za analizu 3 iznosi 1,623.

6. Zaključak

Interakcija temeljnog tla i konstrukcije ima vrlo važnu ulogu u protupotresnom inženjerstvu. U krajnjoj liniji nije važna objektivna snaga potresa, važne su posljedice koje potres ostavlja na objekte koji se nalaze na površini. To osobito važno postaje za potrese koji se događaju na Mediteranu, ti potresi nisu toliko snažni kao npr. oni u Južnoj Americi i njihove posljedice se u određenoj mjeri mogu ublažiti. Poznavanje i razumijevanje geneze potresa, poznavanje teorije tektonike ploča vrlo je fascinantno, atraktivno i vrlo važno, ali nije jedina ili najvažnija stvar u adresiranju merituma problema. Jer, vrijeme nastanka potresa ne možemo predvidjeti niti potres možemo spriječiti, jedinu konkretnu stvar koju možemo napraviti je ublažiti posljedice potresa pravilnom protupotresnom gradnjom, a poznavanje, negdje i detaljno, interakcije temeljnog tla i konstrukcije jedan je od načina ublažavanja posljedica potresa. Unesrećenim ljudima pogođenim potresom neće nužno previše značiti teorija o potresu, potrebna su konkretna rješenja. I to je uloga primijenjene znanosti, na jednostavan, ali efikasan način objasniti kompleksne znanstvene koncepte i primijeniti adekvatna rješenja u svrhu poboljšanja života ljudi.

Potresni valovi prema površini putuju i po nekoliko desetaka kilometara, a opet za kvalitetnu analizu interakcije temeljnog tla i konstrukcije potrebno je proučavati volumen tla koji je minoran u veličini u usporedbi s ukupnim volumenom geomedija koji je zahvaćen potresom. Stoga, potrebno je utvrditi i unaprijediti postojeća znanja i ulagati u stjecanje novih koja će nam omogućiti bolje razumijevanje jednog od rijetkih načina na koji se doista efikasno možemo utjecati na to kakve će posljedice potres ostaviti na objekte na površini, a to je interakcija temeljnog tla i konstrukcije.

Seizmička pobuda koja djeluje na konstrukcije na površini u funkciji je: potresa, učinaka lokalnih uvjeta tla i interakcije temeljnog tla i konstrukcije. Interakcija temeljnog tla i konstrukcije je model kombiniranog sustava kojim se matematički i fizikalno može opisati promjene u krutosti ili fleksibilnosti temeljnog tla i način disipacije seizmičke energije u tlu. Interakcija temeljnog tla i konstrukcije je funkcija: krutosti konstrukcije relativno prema krutosti tla, visine (vitkosti) konstrukcije relativno prema širini temeljne konstrukcije, mase konstrukcije relativno prema masi temeljnog tla koje podupire temeljnu konstrukciju.

Konvencionalne teorije govore o tome kako je interakcijski efekt pozitivan ili koristan za odziv konstrukcije te se u nekim analizama preporuča njegovo zanemarivanje. Ali to je pogrešan pristup koji može dovesti do nesigurnog dizajna. Istina jest da su interakcijski efekti u određenim situacijama neznatni, ali postoje građevine i uvjeti lokalnog tla koji ne dopuštaju kalkulacije, stoga samo detaljno poznavanje interakcije temeljnog tla i konstrukcije je garancija uspješnog i sigurnog dizajna.

7. Literatura

Alberto Bolla, Paolo Paronuzzi (2019). Numerical Investigation of the Pre collapse Behavior and Internal Damage of an Unstable Rock Slope. *Rock Mechanics and Rock Engineering* (2020) 53:2279–2300.

Elnashai S. Amr., Di Sarno Luigi. (2015). *Fundamentals of Earthquake Engineering – from source to fragility*. Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd.

Kausel E. (2010). Early history of soil – structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30 822 – 832.

Kramer L. Steven. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. 1st edition. Prentice Hall

Lai C.G., Martinelli M. (2013). *Soil – Structure Interaction under Earthquake loading: Theoretical framework*. ALERT Doctoral School.

Mikola R. G. (2017). ADONIS: A free finite element analysis software with an interactive graphical user interface for geoengineers. Conference Paper. October.

Pitilakis D., Clouteau D. (2007). The Role of the Soil Stiffness on the Dynamic Impedance Functions. Conference: Proceedings of the 2nd Greece – Japan Workshop on Seismic Design of Foundations, Innovations in Seismic Design and Protection of Cultural Heritage.

Ramos A. N. (2018). *Dynamic Soil – Structure interaction using shallow foundations*. Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental. 30/05/.

Qiang W., Jinting W., Fudong C., Feng J., Chuhan Z. (2011). Real – Time Dynamic hybrid testing for Soil – Structure Interaction Analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. December 2011. 31(12). 1690 – 1702.

Villaverde R. (2009). *Fundamental concepts of earthquake engineering*. CRC Press.

Wolf P. John. (1985). *Dynamic Soil – Structure Interaction*. Prentice – Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

Xin B., Tan H. (2019). The internal substructure method for seismic wave input in 3D dynamic soil – structure interaction analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 127.

Popis slika

Slika 1 Dijelovi interaktivnog sustava

Slika 2 Sustav s jednim stupnjem slobode gibanja

Slika 3 Sustav s tri stupnja slobode gibanja

Slika 4 Idealizirani prikaz pomaka konstrukcije tijekom njene interakcije s tlom

Slika 5. Prikaz RTDHT sustava

Slika 6 Parametarski model tla

Slika 7 Interaktivni sustav napravljen na temelju parametarskog modela

Slika 8 Element Kelvin - Voigtove čestice izložene naprezanju (Kramer, 1996).

Slika 9 Grafička procjena vrijednosti prigušenja (F = sila vanjske pobude, u = pomak tla)

Slika 10 Seizmički val ulazi u sloj tla i ostaje zarobljen (sva energija ostaje između granica sloja)

Slika 11 Seizmički val ulazi u sloj tla, ali ne ostaje zarobljen (veći dio energije se transmitira natrag u podinu)

Slika 12 Širenje seizmičkih valova kroz tlo i konstrukciju

Slika 13 Stupnjevi slobode gibanja za 2 D gredu

Slika 14 Model interakcijskog sustava u metodi konačnih elemenata

Slika 15 Ilustracija indirektno metode gdje se interakcijski sustav dijeli na dva podsustava. Prvo se utvrdi djelovanje svakog pojedinog podsustava, a kasnije se ta dva djelovanja zbroje da se dobije sveukupan odziv (Wolf, 1985).

- Slika 16 Ilustracija kinematičke i inercijske interakcije
- Slika 17 Model za metodu unutrašnje podkonstrukcije (ISM)
- Slika 18 Interakcijski model – FEM matrica s istaknutim područjem interakcije
- Slika 19 Filtriranje i apsorpcija vala odziva na granicama
- Slika 20 Model sastavljen od troslojnih čvorova (A, B i C)
- Slika 21 Prikaz interaktivnog modela s ekvivalentnim seizmičkim naprežanjima
- Slika 22 Model homogenog poluprostora
- Slika 23 Prikaz upadnog P vala u homogenom poluprostoru
- Slika 24 Model uslojenog poluprostora
- Slika 25 Prikaz pomaka promatranih točaka na uslojenom poluprostoru pri upadu SH valova
- Slika 26 Model homogenog poluprostora s šupljinom polumjera $R = 6$ m
- Slika 27 Glavni dijelovi sučelja ADONIS programa
- Slika 28 Faktor sigurnosti za analizu 1 iznosi 1,014
- Slika 29 Procjena faktora sigurnosti za analizu 2 iznosi 1,002
- Slika 30 Faktor sigurnosti za analizu 3 iznosi 1,623.

Popis grafova

Graf 1 Usporedba podataka ubrzanja na vrhu modela dobivenih FEM i LPM metodama

Graf 2 Usporedba pomaka dobivenih LPM i FEM metodama

Graf 3 Usporedba podataka o ubrzanju dobivenih RTDHT i FEM metodama

Graf 4 Usporedba pomaka dobivenih RTDHT i FEM metodama

Graf 5 Utjecaj interakcije na period konstrukcije

Popis tablica

Tablica 1 Prikaz parametara tla za analizu 1

Tablica 2 Prikaz parametara tla za analizu 2

Tablica 3 Prikaz parametara tla za analizu 3