

**SEMINARSKI RAD
IZ PREDMETA
NUMERIČKE METODE**

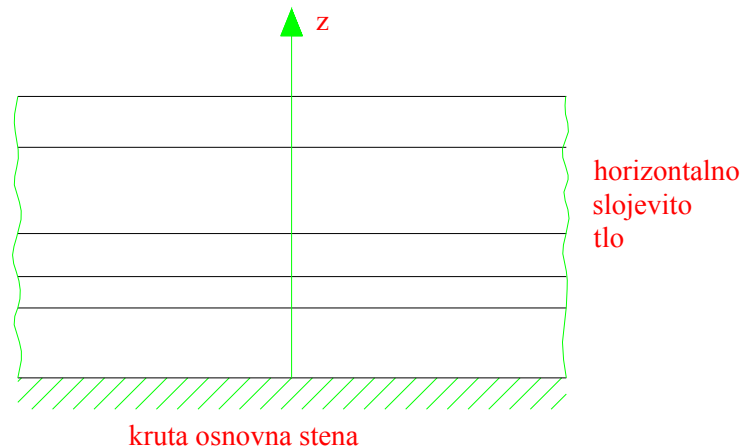
**UTICAJ INTERAKCIJE SA TLOM
NA DINAMIČKO PONAŠANJE
KONSTRUKCIJE NA PRIMERU
MOSTA FUNDIRANOG NA
ŠIPOVIMA**

**IVAN TOMOVIĆ
MILAN PETROVIĆ**

1. Uticaj tla na seizmičke pokrete

Kada se tlo posmatra bez konstrukcije, može se utvrditi njegov uticaj na karakteristike seizmičkih talasa koji se kreću od osnovne stene prema površini tla. Rezultujući zapis ubrzanja koji se dobija za površinu tla zove se *free-field motions* (u slobodnom prevodu – *kretanja slobodne površine tla*).

Da bi se taj zapis dobio tlo se mora na odgovarajući način matematički modelirati. Najčešći slučaj, horizontalno slojevitog tla, može se modelirati prostim jednodimenzionalnim sistemom, kao na slici 1.1.

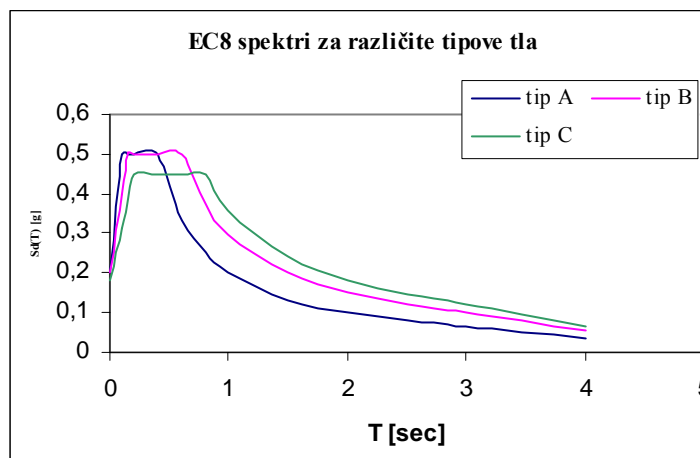


SLIKA 1.1.

Uticaj tla na frekventni sadržaj zemljotresa mora biti sadržan u zapisu zemljotresa, odnosno u odgovarajućem spektru, kao što je to u propisima urađeno. Pravilnik EC8 za projektovanje seizmički otpornih konstrukcija, propisuje 3 kategorije tla:

- kategorija A- čvrste stene
- kategorija B- srednje čvrste stene
- kategorija C- meke stene

i za njih odgovarajuće spektre:



SLIKA 1.2.

Medjutim, ove kategorije ne opisuju u dovoljno dobroj meri sve uticaje tla na osobine zemljotresa. Zahvaljujući matematičkom modelu, taj uticaj se može kvalitetno definisati. Ako ne postoje ili se veštački ne mogu generisati zapisi koji odgovaraju uslovima lokalnog tla, tada se tlo mora uzeti u obzir pri proračunu putem direktne analize.

Ako su poznata kretanja usled zemljotresa u osnovnoj steni, iznad koje se nalaze slojevi tla, *free-field* kretanja mogu se odrediti tretirajući tlo kao konstrukciju za koju su poznata kretanja u osloncima. Korišćenjem odgovarajućeg diskretizovanog modela koji odgovara geometriji i rasporedu slojeva tla i posmatrajući seizmičke pokrete kao pomeranja krutog oslonca, odgovor na površini tla može se dobiti polazeći od jednačina kretanja sistema, s tim da se za rešavanje ove jednačine mora upotrebiti direktna integracija, odn. *time-history* analiza. U ovakvim slučajevima, najbolje je formirati jedan model i u njega uključiti i tlo i konstrukciju, čime se u obzir, pored zasebnog uticaja tla na seizmičke pokrete, uzima u obzir i sadejstvo tla i konstrukcije.

Drugi slučaj je kada postoji zapis za tlo koje se značajno razlikuje od tla koje se u datom slučaju razmatra. Tada se sprovodi zasebna analiza uticaja tla na seizmičke talase, koja se sastoji od dva sukcesivna koraka. Prvi je određivanje kretanja osnovne stene iz zadatog zapisa inverznom (naniže) analizom. Zatim se iz dobijenog zapisa za osnovnu stenu direktnom (naviše) analizom dobija zapis za površinu tla.

Najefikasnije je analizu izvršiti integracijom u frekventnom domenu, s obzirom da je ona najpogodnija metoda za ovu vrstu problema.

Ako ne postoji odgovarajući zapis za zadatu vrstu tla, mogu se iskoristiti i tzv. *sintetički akcelerogrami*. Generisanje veštačkih akcelerograma se vrši ako se želi dobiti zapis za određeni tip tla, odnosno ako postojeći nisu odgovarajući za analizu problema (na primer ako se analizira nelinearni odgovor konstrukcije). Prema definiciji Pravilnika EC-8/2, veštački generisani akcelerogrami mogu biti stacionarni i nestacionarni. Stacionarni mogu biti generisani kao realizacije stacionarnog (Gausovog) stohastičkog procesa kvantifikovanog pomoću spektra snage zavisnog od terena. Nestacionarni akcelerogrami mogu biti generisani direktno kao realizacije odgovarajućih nestacionarnih stohastičkih procesa ili množenjem stacionarnog akcelerograma funkcijom modulacije vremena, čiji oblik zavisi od seizmičko-tektonskih karakteristika regiona. Putem generisanja akcelerograma može se opisati doprinos ne jednog, već više mogućih zemljotresa, variranjem frekventnog sastava. Na primer, visoki frekventni sastav odražava karakteristike obližnjih zemljotresa, a niski frekventni sastav odražava karakteristike udaljenih zemljotresa sa velikim jačinama. Pošto se u analizi vremenske istorije (*time-history analysis*) rezultati interpretiraju odgovarajućim statističkim tehnikama, skup veštačkih akcelerograma je, u principu, bolji od skupa stvarnih, jer omogućava bolje korišćenje tih tehnika.

Takođe, da bi se dati akcelerogram prilagodio problemu koji se posmatra, on se može *skalirati*, odn. njegove ordinate se mogu pomnožiti odgovarajućim faktorom razmere, koji, prema Pravilniku EC-8/2 može biti u rasponu od 0,5 do 2.

Konačno, kao rezultat analize efekta tla na seizmičke talase, dobija se zapis (akcelerogram) koji opisuje *free-field* kretanja na mestu na kome se objekat gradi.

Skup akcelerograma koji se koriste u analizi mora biti verifikovan odgovarajućim statističkim metodama. S obzirom na to da se rezultati tretiraju kao slučajne promenljive,

veza između pouzdanosti rezultata i broja korišćenih akceleroograma dobija se poznatim statističkim metodama. Minimalni broj akceleroograma koji se koriste u analizi je pet, prema Pravilniku EC-8/2. Ako ih ima više od deset, korekcija je nepotrebna, a ako ih je manje, onda se rezultati koriguju na način koji propisuje Pravilnik EC-8/2:

Equation Section 1

$$E = \left(1 + \frac{0,352}{\sqrt{N}}\right) E_a \quad (1.1)$$

gde je E uticaj usled zemljotresa, a E_a prosek ekstremnih odgovora sračunatih za N akceleroograma.

2. Interakcija tlo-temelj –konstrukcija

Uprkos uobičajenoj pretpostavci, jasno je da mostovske konstrukcije, odn. njihovi stubovi nisu totalno uklješteni u oslonačkim tačkama i da je temeljna konstrukcija u određenoj meri fleksibilna. Stoga, deformacije i pomeranja konstrukcije tokom zemljotresa zavise od interakcije tri povezana sistema: same konstrukcije, temelja i geološke sredine u kojoj se temelj nalazi.

Dva fizička fenomena opisuju mehanizam interakcije između konstrukcije, temelja i tla:

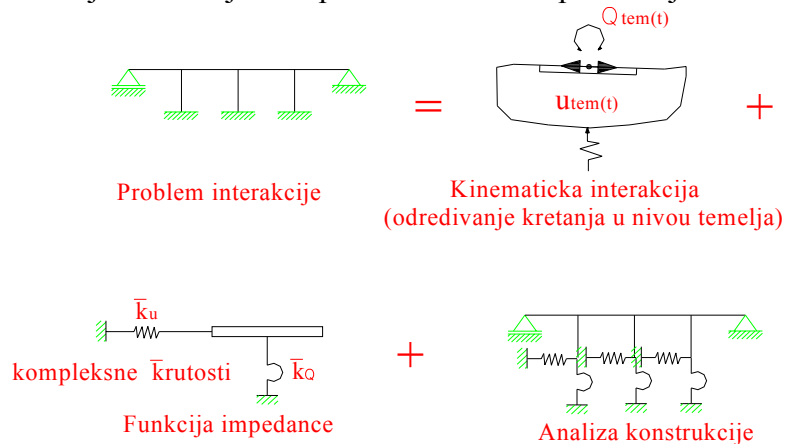
- **Kinematička interakcija:** prisustvo krute temeljne konstrukcije u ili na tlu prouzrokuje razliku između kretanja temelja i okolnog tla. Ovaj fenomen je analogan problemu modifikacije seizmičkih talasa uticajem tla i na sličan način se opisuje i rešava.
- **Inercijalna interakcija:** inercijalne sile koje se razvijaju u konstrukciji usled njenih oscilacija povećavaju sile i momente u temelju, što za posledicu ima pomeranja temelja u odnosu na okolno tlo

Efekat ovih fenomena se najčešće opisuje kompleksnom funkcijom transfera, koja povezuje kretanje tla i temelja, odnosno kompleksnom funkcijom impedance koja kvantifikuje krutost i prigušenje koji karakterišu interakciju tlo-temelj. I jedna i druga funkcija posledica su konačne krutosti i prigušenja okolnog tla. U pretpostavci o savršeno krutom tlu, koja je uobičajena, krutost tla je beskonačna, amplituda funkcije transfera je jedinica, a faza nula, što znači da su kretanja temelja i tla identična. Takođe, funkcija impedance ima beskonačno veliki realni deo, dok je imaginarni deo nula.

Problem interakcije tlo-temelj-konstrukcija može se razdvojiti na tri zasebne celine, da bi se kombinacijom pojedinačnih došlo do kompletnog rešenja(sl. 2.1.):

- 1) Određivanje seizmičkog inputa u nivou temelja, koji prikazuje kretanja koja bi se javila u nivou temelja kada konstrukcija i temelj ne bi imali masu. Ova kretanja zavise od krutosti i geometrije temelja i okolnog tla. Zanemarivanjem inercijalnih efekata postizemo da ovo rešenje opisuje samo kinematičku interakciju.

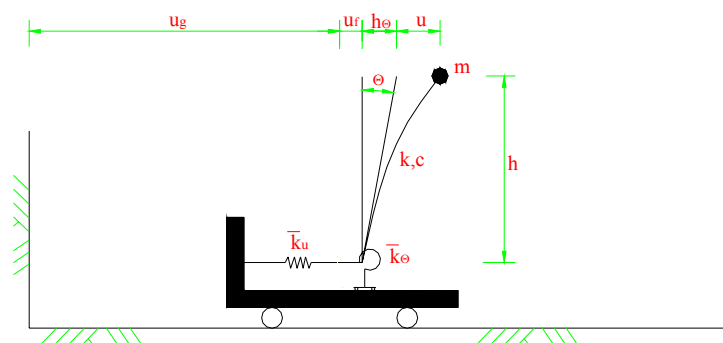
- 2) Određivanje funkcije impedance. Ona opisuje krutost i prigušenje sistema tlo-temelj, odnosno njihove interakcije i uzima u obzir karakteristike tla i krutost i geometriju temeljne konstrukcije.
- 3) Dinamička analiza konstrukcije oslonjene na pomerljive oslonce, koji su predstavljeni funkcijom impedance i izloženi pomeranjima u nivou temelja.



SLIKA 2.1.

Kinematička interakcija biće u ovom radu zanemarena, s obzirom na složenu matematičku proceduru potrebnu za njeno opisivanje. Takav je slučaj i u većini svetskih propisa, uključujući i Pravilnik EC8, u kojima se pretpostavlja da su *free-field* pomeranja jednaka pomeranjima u nivou temelja.

Suština **inercijalne interakcije** može se prikazati na primeru sistema sa jednim stepenom slobode (SDOF sistem), slika 2.2.



SLIKA 2.2.

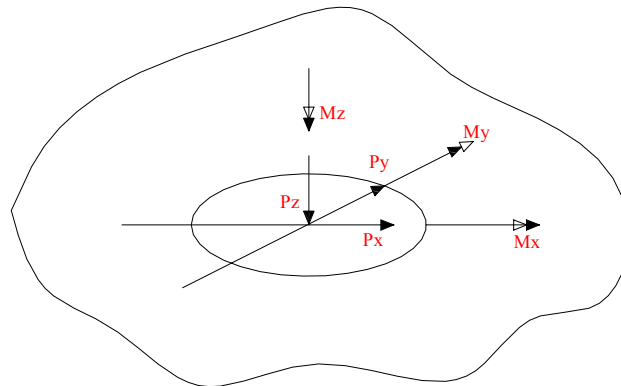
Sistem predstavlja konstrukciju visine h , krutosti k , prigušenja c , sa koncentrisanom masom na vrhu m . U temelju, konstrukcija može da se pomera translatorno za veličinu u_f i da rotira za veličinu θ . Funkcija impedance predstavljena je podužnim i rotacionim

oprugama, sa kompleksnim krutostima \bar{k}_u i \bar{k}_θ . Imaginarne komponente kompleksnih krutosti predstavljaju prigušenje.

Određivanje funkcije impedance je najosetljiviji korak u formiranju modela. Kao što je rečeno, ona fizički predstavlja krutost i prigušenje sistema tlo-temelj, odnosno karakteriše njihovo sadejstvo uz pomoć te dve fizičke veličine. Matematički, funkcija impedance jeste matrica koja daje vezu između sila u temelju konstrukcije i odgovarajućih generalisanih pomeranja temelja u odnosu na površinu tla. Članovi funkcije impedance su kompleksni brojevi i zavise od frekvencije.

Prvi problem koji se javlja pri određivanju funkcije impedance je formiranje matematičkog modela sistema tlo-temelj. Važno ograničenje kod formiranja modela je to što on mora imati konačne granice. Kada postoje jasne fizičke granice u prirodi, kao što je čvrsta stena ispod sloja mekog tla, tada je veličina modela jasna i može se očekivati da on kvalitetno simulira ponašanje realnog sistema. S druge strane, ako se temeljna konstrukcija nalazi na širokom, dubokom i uniformnom sloju tla, granice matematičkog modela moraju se udaljiti od konstrukcije. Razlog za to je taj što granice modela zadržavaju energiju oscilacija unutar sistema i usled refleksije seizmičkih talasa izazivaju dodatni, fiktivan, odgovor sistema. Da bi se to izbeglo, granice moraju biti jako udaljene od same konstrukcije, što stvara model tla sa ogromnim brojem stepeni slobode, daleko većim nego što ih ima sama konstrukcija. Jedno od rešenja za ovaj problem je formiranje tzv. 'mekih granica', koje apsorbiraju deo seizmičke energije.

Ako je temeljna sredina relativno uniformna u okviru šire zone, i ako se kontaktna površina između konstrukcije i tla može smatrati krutom pločom, tada se tlo može prikazati u obliku modela elastičnog poluprostora. Prilikom zemljotresa, kruta temeljna ploča može biti izložena pomeranjima u šest mogućih pravaca, a otpor tla se daje u vidu šest odgovarajućih komponenta rezultujuće sile, kako je prikazano na slici 2.3.



SLIKA 2.3.

Tako je ponašanje elastičnog poluprostora u potpunosti opisano odgovarajućim relacijama sila-pomeranje za svih šest raspoloživih stepeni slobode. Stoga se i dinamičko ponašanje elastičnog poluprostora može modelirati sa šest opruga u pravcima datih SSP.

U slučaju SDOF sistema u ravni sa slike 2.2, pobuđenom samo u jednom, poprečnom, pravcu, dovoljne su dve opruge da bi opisale interakciju sa tлом. To znači da funkcija, odn. matrica impedance ima samo dva člana:

$$\begin{bmatrix} V \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{k}_u & 0 \\ 0 & \bar{k}_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Equation Chapter 2 Section 1 (2.1)}$$

U ovom slučaju su zanemareni vertikalna pobuda i torzija, kao i vandijagonalni elementi matrice impedance, jer je njihov uticaj dovoljno mali. Za slučaj krute ploče na poluprostoru članovi matrice impedance imaju sledeći oblik:

$$\bar{k}_j = k_j(a_0, \nu) + i\omega c_j(a_0, \nu) \quad (2.2)$$

gde je ω kružna frekvencija, a_0 bezdimenzionalna frekvencija definisana kao $a_0 = \omega r / V_s$, r je poluprečnik temelja, V_s brzina prostiranja transverzalnih talasa kroz dato tlo, a ν Poisson-ov koeficijent.

Matrica impedance je, dakle, u funkciji geometrijskih i mehaničkih karakteristika temelja i okolnog tla, ali i frekvencije. U području nelinearne analize, analiza u frekventnom domenu je neprimenljiva, te stoga elastični poluprostor treba predstaviti elementima koji neće biti u funkciji frekvencije, a čije će karakteristike dovoljno verno prikazati istinsku, frekventno-zavisnu prirodu poluprostora. Kada opruge sa kompleksnom krutošću zamenimo sistemom opruga-prigušivač (*damper*), možemo primeniti neko od empirijskih ili analitičkih rešenja za njihove karakteristike. Jedno od njih je dato u Tabeli 2.1.

Stepen slobode	Krutost opruge*	Prigušenje dampera	Pripadajuća masa
Vertikalni	$K \equiv \frac{4Gr}{1-\nu}$	$1.79\sqrt{K\rho r^3}$	$1.50\rho r^3$
Horizontalni	$18.2Gr \frac{1-\nu^2}{(2-\nu^2)}$	$1.08\sqrt{K\rho r^3}$	$0.28\rho r^3$
Rotacioni	$2.7Gr^3 (\nu = 0)$	$0.47\sqrt{K\rho r^3}$	$0.49\rho r^3$
Torzioni	$5.3Gr^3$	$1.11\sqrt{K\rho r^3}$	$0.70\rho r^3$

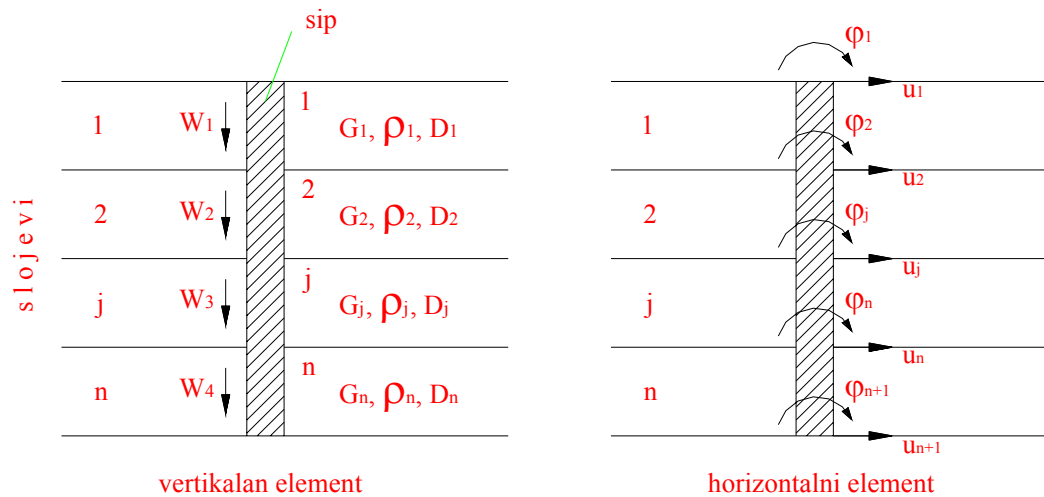
Tabela 2.1.- Ekvivalentne diskretne karakteristike elastičnog poluprostora (*Newmark and Rosenblueth, Fundamentals of Earthquake Engineering*)

* r = poluprečnik temelja; G = modul klizanja; ν = Poisson-ov koeficijent; ρ = gustina

U ovoj uprošćenoj analizi prisustvo šipova ne može biti uzeto u obzir. Za takvu analizu, na raspolaganju su razne analitičke tehnike za dobijanje matrice impedance za temelje na šipovima. Ključni parametar u tom slučaju je odnos krutosti šipova i okolnog tla. U tom

smislu, treba uzeti u obzir i neelastično ponašanje AB šipova kao i samog tla, u obliku poznatog pojma efektivne krutosti. Njihove inicijalne krutosti mogu se redukovati i do 50% za šipove, odn. 65% za tlo, zavisno od očekivanog nivoa deformacija. Takva redukcija krutosti može se smatrati neophodnom, s obzirom na činjenicu da se u tlu pri deformaciji reda veličine 10^{-2} modul klizanja G može smanjiti i do 20% svoje početne vrednosti.

U ovom radu, matrica impedance dobijena je na rešavanjem diferencijalne jednačine kretanja u frekventnom domenu. Svaki šip je podeljen na niz konačnih elemenata, koji se prostiru u zasebnim slojevima, sl. 2.4.



SLIKA 2.4.

Svaki konačan element opisan je kompleksnom matricom krutosti, tj. matricom impedance, koja u sebi sadrži karakteristike i šipa i okolnog tla. Zahvaljujući osnoj simetriji šipa kompleksna matrica krutosti može se razdvojiti na dve nezavisne matrice: matricu krutosti elementa za vertikalnu vibraciju i matricu krutosti elementa za horizontalnu vibraciju. Za određivanje ovih matrica krutosti polazi se od jednačina kretanja viskoelastične sredine sa histerezisnim tipom prigušenja.

Za kretanje u verikalnom pravcu, diferencijalna jednačina kretanja dobija sledeći oblik:

$$\mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} - EF \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + k_w w = 0 \quad (2.3)$$

gde su:

- μ - masa šipa po jedinici dužine
- c - koeficijent unutrašnjeg prigušenja šipa
- E - Jungov modul elastičnosti šipa
- F - površina poprečnog preseka šipa
- $w = w(z)e^{i\omega t}$ - vertikalno pomeranje šipa
- k_w - krutost tla za vertikalnu vibraciju

Horizontalna vibracija izaziva horizontalnu translaciju i rotaciju elementa, i diferencijalna jednačina kretanja za taj slučaj ima sledeći oblik:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} + k_u u + N_{st} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} = 0 \quad (2.4)$$

gde su:

N_{st} - statička aksijalna sila u šipu

EI - krutost šipa na savijanje

$u = u(z)e^{i\omega t}$ - harmonijsko horizontalno kretanje

c - unutrašnje prigušenje šipa

k_u - krutost tla za horizontalnu vibraciju

Polazeći od opštih rešenja jednačina (2.3) i (2.4), kao i odgovarajućih graničnih uslova, dobijaju se kompleksne krutosti konačnih elemenata za vertikalnu vibraciju - \bar{k}_w , i za horizontalnu translaciju i rotaciju - \bar{k}_u . Sabiranjem krutosti elemenata na mestu spajanja, na način poznat iz MKE, dobija se matrica krutosti šipa \bar{k}_o , koja se koristi za dobijanje matrice krutosti glave šipa \bar{k}_g , nakon zadavanja odgovarajućih jediničnih pomeranja u nivou glave šipa. Matrica \bar{k}_g ima sledeći oblik:

$$\bar{\mathbf{k}}_g = \begin{bmatrix} \bar{k}_{ww} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{k}_{uu} & \bar{k}_{u\varphi} \\ 0 & \bar{k}_{\varphi u} & \bar{k}_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

\bar{k}_{ww} je vertikalna krutost glave šipa, koja se može rastaviti na realan deo, koji predstavlja stvarnu krutost i imaginaran deo, koja predstavlja prigušenje:

$$\begin{aligned} \bar{k}_{ww} &= k_{ww} + i\omega c_{ww} \\ k_{ww} &= \text{Re}(\bar{k}_{ww}) = \frac{EF_1}{r_1} f_{w1} \\ c_{ww} &= \frac{I}{\omega} \text{Im}(\bar{k}_{ww}) = \frac{EF_1}{V_s} f_{w2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

gde su F_1 i r_1 površina poprečnog preseka i poluprečnik šipa u prvom sloju, a V_s brzina prostiranja transverzalnih talasa kroz poslednji sloj.

Na identičan način na realan i imaginaran deo razdvajaju se i horizontalna krutost glave šipa \bar{k}_{uu} :

$$\begin{aligned}
\bar{k}_{uu} &= k_{uu} + i\omega c_{uu} \\
k_{uu} &= \operatorname{Re}(\bar{k}_{uu}) = \frac{EI_1}{r_1^3} f_{u1} \\
c_{uu} &= \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}(\bar{k}_{uu}) = \frac{EI_1}{r_1^2 V_s} f_{u2}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

zatim rotaciona krutost glave šipa:

$$\begin{aligned}
\bar{k}_{\varphi\varphi} &= k_{\varphi\varphi} + i\omega c_{\varphi\varphi} \\
k_{\varphi\varphi} &= \operatorname{Re}(\bar{k}_{\varphi\varphi}) = \frac{EI_1}{r_1} f_{\varphi1} \\
c_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}(\bar{k}_{\varphi\varphi}) = \frac{EI_1}{V_s} f_{\varphi2}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

i kombinovani član:

$$\begin{aligned}
\bar{k}_{u\varphi} &= k_{u\varphi} + i\omega c_{u\varphi} \\
k_{u\varphi} &= \operatorname{Re}(\bar{k}_{u\varphi}) = \frac{EI_1}{r_1^2} f_{c1} \\
c_{u\varphi} &= \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}(\bar{k}_{u\varphi}) = \frac{EI_1}{r_1 V_s} f_{s2}
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Koeficijenti f predstavljaju bezdimenzionalne parametre krutosti, koji su u funkciji frekvencije, geometrijskih i mehaničkih karakteristika šipova i tla.

Na bazi ovog algoritma, program DKGS izračunava matricu $\bar{\mathbf{K}}_g$, tako da se u dinamičkom proračunu sistem šipovi-tlo može zameniti sistemom zamenjujućih opruga krutosti $k_{uu}, k_{ww}, k_{\varphi\varphi}, k_{u\varphi}$ i prigušivača sa prigušenjima $c_{uu}, c_{ww}, c_{\varphi\varphi}, c_{u\varphi}$.

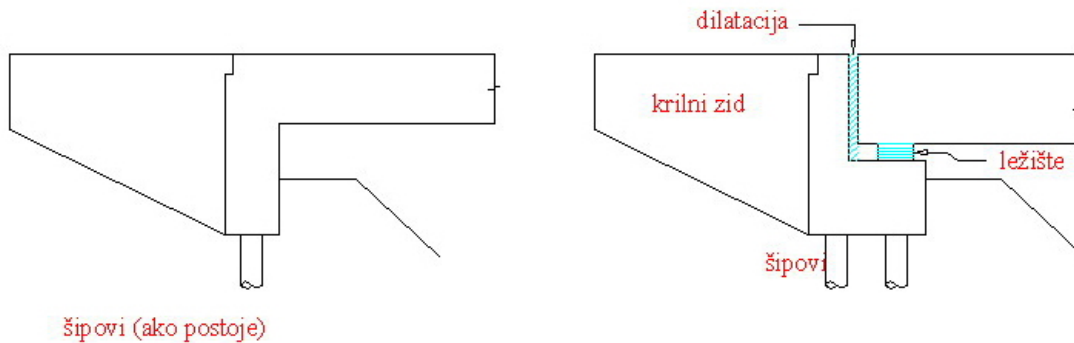
Ovde su zanemareni uticaji torzije, koji mogu biti značajni samo kod debelih šipova, a mogu se zanemariti i vandijagonalni članovi matrice $\bar{\mathbf{K}}_g$ - $k_{u\varphi} = k_{\varphi u}$, čiji je uticaj dovoljno mali. Takođe, u obzir nije uzeto sadejstvo grupe šipova, već se proračun vrši za jedan, rezultujući, šip.

3. Uticaj potpornog zida na dinamičko ponašanje konstrukcije

Poseban slučaj interakcije tlo-temelj-konstrukcija jeste uticaj potpornih zidova, odn. tla iza njih. Uticaj te interakcije zavisi od vrste potpornog zida prisutnog u datoj konstrukciji. Za potrebe seizmičke analize, dovoljna je podela na dva osnovna tipa:

- 1) Monolitni tip
- 2) Naležući (sedeći) tip

Dispozicija ova dva tipa potpornih zidova prikazana je na sl. 3.1.



SLIKA 3.1.

Monolitni potporni zidovi teže da mobilišu otpor tla i absorbuju, odnosno rasipaju seizmičku energiju u podužnom i poprečnom pravcu. Korisni su u slučajevima kada je poželjno da se velike sile prenesu na tlo u zoni potpornog zida. Njihovo korišćenje je ograničeno velikim mogućnostima oštećenja i problemima sa održavanjem.

Naležući tip je mnogo češći u praksi jer dozvoljava veću kontrolu nad stepenom mobilizacije otpora tla i mogućim oštećenjem. U podužnom pravcu postavlja se dilatacija između konstrukcije i zida, čija širina treba da bude što manja, da bi se omogućila mobilizacija otpora tla. U poprečnom pravcu, konstrukciji pomeranje može biti dopušteno ili sprečeno, od čega zavisi i interakcija sa potpornim zidom.

Dokaz o velikom uticaju ove interakcije daju izveštaji o šteti na mostovskim konstrukcijama nakon velikih zemljotresa, u kojima su oštećenja potpornih zidova navedena kao jedina. To upućuje na zaključak da potporni zidovi na sebe navlače veliki deo seizmičke energije. Stoga, uvođenje krutosti tla iza potpornog zida u dinamički model će taj model približiti realnom ponašanju konstrukcije u značajnoj meri, naročito u podužnom pravcu.

Pri uvođenju potpornog zida u model, na osnovu preporuka *Caltrans Bridge Design Aids*, usvajaju se sledeće pretpostavke:

- 1) U podužnom pravcu, kada se konstrukcija kreće prema tlu, tlo se ponaša linearno sve dok se ne dostigne vrednost punog pasivnog otpora tla. Nakon toga, javlja se tečenje. Kada se konstrukcija kreće u suprotnom pravcu, od tla, otpori u tlu neće postojati. U slučaju simetričnih uslova oslanjanja na oba kraja mosta u podužnom pravcu, korišćenje punih vrednosti pasivnog pritiska tla na oba potporna zida u modelu dovodi do velikog povećanja krutosti konstrukcije, pa se usvaja polovina te vrednosti, da bi se nakon proračuna dobijene vrednosti sila u potpornim zidovima pomnožile sa dva. Za nesimetrične granične uslove sprovodi se odgovarajuća parametarska analiza.
- 2) U poprečnom pravcu, otpor tla se retko mobiliše, čak i kada je konstrukciji u zoni potpornih zidova pomeranje u poprečnom pravcu sprečeno, što je redak slučaj. Kod dugačkih mostova, krutost tla u poprečnom pravcu vrlo malo utiče na promenu perioda oscilovanja, pa se može zanemariti.

U ovom radu, potporni zid je modeliran na osnovu preporuka *Caltrans Bridge Design Practice*. Prema tim preporukama, krutost tla iza potpornog zida u podužnom pravcu se dobija iz empirijskog obrasca:

$$k_l = 47000 \cdot l \cdot h + 7000 \cdot n \quad [kN / m] \quad (2.10)$$

gde su: l - širina potpornog zida, h - visina potpornog zida a n - broj šipova na kojima je fundiran potporni zid (ako ih ima).

Ova krutost je izrazito nelinearna. Prema *Caltrans*-ovom modelu, potporni zid se ponaša linearno sve dok nivo opterećenja ne dostigne vrednost od $370 kN / m^2$, kada počinje da se ponaša idealno plastično. Lom nastaje pri vrednostima pomeranja od 6 inča, odn. oko 15 centimetara.

Ovom modelu može se lako dodati i prigušenje, na osnovu neke od standardnih formula.

Napomena:

- Posebno ćemo vam poslati kod pisan u MATLAB-u za dobijanje matrica krutosti i prigušenja, dopunu u vezi primene kompleksne analize na ovaj problem i primer dobijenih rezultata u SAP - u

