

DINAMIČKA ANALIZA NASUTIH BRANA IZLOŽENIH DEJSTVU ZEMLJOTRESA

0352-2733, 56 (2024), p. 25-68
doi: 10.5937/GK24056025V

UDK: 627.824.042
PREGLEDNI RAD

Rezime

Nasute brane, nasipi kao i deponije jalovišta i pepela visine veće od 15 m spadaju u visoke brane i objekte sa najvećim stepenom rizika (ICOLD bilten 72). Da bi se obezbedila sigurnost ovih objekata, pored ostalih proračuna, neophodno je izvršiti proračune stabilnosti u statičkim i dinamičkim uslovima. Vrlo često, kritično opterećenje koje utiče na stabilnost visokih brana jeste dinamičko opterećenje.

Najčešće se primenjuju tri proračunske metode dinamičke analize: (1). pseudostatička analiza, (2). pojednostavljena 2D dinamička analiza i (3). 2D i 3D dinamička deformaciona analiza.

Pseudostatička analiza se zasniva na proračunu faktora sigurnosti metodom granične ravnoteže za usvojenu vrednost ubrzanja PGA i usvojene parametre smičuće čvrstoće materijala u dinamičkim uslovima. Predstavlja indikator za sprovođenje ostalih dinamičkih analiza.

Dinamička analiza uvodi vremenski zapis ubrzanja zemljotresa u proračun. Stabilnost brane određuje se preko faktora sigurnosti dobijenih metodom konačnih elemenata. Za proračun se mogu usvojiti tri konstitutivna zakona: elastični linearni zakon (LA), ekvivalentni linearni elastični zakon (ELA) i nelinearni hiperbolički zakon (NA). **Uprošćenom dinamičkom analizom** dobijaju se permanentna pomeranja koja su tipično ograničena na pomeranja Newmark-ovog krutog kliznog bloka.

Dinamička deformaciona analiza je najkompleksnija i daje širu sliku o ponašanju brane tokom zemljotresa. Ova analiza ima za cilj utvrđivanje trajnih pomeranja geotehničke konstrukcije, koja zavise od dinamičke pobude u njenim temeljima (maksimalno ubrzanje temeljnog tla-PGA), vremenske istorije ubrzanja i frekventnog sastava zemljotresa

¹ BSc Civil eng., Energoprojekt-Hidroinženjering a.d. Belgrade, Serbia,
natasa_vorotovic@yahoo.com

² MSc Civil eng., Energoprojekt-Hidroinženjering a.d. Belgrade, Serbia,
jstanic@ephydro.com

(akceleroogram) i dinamičkih karakteristika materijala. Dinamičkom deformacionom analizom se dobijaju pomeranja bilo koje tačke u bilo kom trenutku tokom trajanja i nakon završetka zemljotresa. 3D analiza uzima u obzir oblik doline i uticaj pomeranja bokova doline na pomeranje brane.

U okviru rada prikazan je metodološki pristup proračuna stabilnosti i naponsko deformacijska analiza (2D analiza) prilikom dinamičkog opterećenja nasutih brana za različite projektne zemljotrese Operating Basis Earthquake(OBE) and Maximum Creadible Earthquake(MCE), različite vremenske zapise zemljotresa i konstitutivne modele (LA i ELA model). Posebna pažnja je posvećena likvefakciji prašinasto-peskovitih materijala i njenom definisanju kod visokih brana. Prikazana su dva primera brana za koje je rađena dinamička analiza: 1. brana Slupčanka – kamena brana sa betonskim ekranom i 2. deponija jalovine Gradac - telo deponije je izgrađeno od prašinastog peska pa je podložno likvefakciji. Proračuni su rađeni u programskom paketu Geostudio odnsono alatima SLOPE/W, SIGMA/W i QUAKE/W.

U radu je data uporedna analiza metoda i predloženo je koja je metoda odgovarajuća za primenu u različitim fazama projekta.

Ključne reči: dinamička analiza, kamene nasute brane, deponije pepela i jalovine od prašinastog peska, naponi i deformacije, vremenski zapisi zemljotresa (akcelogrami), likvefakcija, permanentna pomeranja, QUAKE/W, OBE zemljotres, MCE zemljotres, konstitutivni modeli LA, ELA i NA, krutost materijal, generisanje pornih pritisaka

DYNAMIC ANALYSIS OF EMBANKMENT DAMS UNDER THE EARTHQUAKE IMPACT

Summary

Embankment dams, embankments, tailing dams, eartfill and landfills higher than 15 meters are classified as high dams and high risk structures, in accordance with the ICOLD recommendations (ICOLD bulletin 72). To ensure safety of the objects it is necessary to perform static and dynamic calculations. Dynamic load is very often one of the critical factors for stability of high dams.

Most commonly used are three methods of calculating dynamical analysis: **(1) Pseudostatic analysis** is based on calculating safety factor by using limit equilibrium method for the adopted values of PGA acceleration and shear strength parameter of the material. It represents the indicator to perform other dynamical analysis. Dynamical analysis introduces the accelerograms to the calculation. Dam stability is determined through a

safety factor calculated by using the finite element method. Three different constitutive analyses can be adopted for the calculation: elastic linear analysis (LA), equivalent linear elastic analysis (ELA) and nonlinear hyperbolic analysis (NA). **(2) Simplified dynamical analysis** provides information on permanent movements, typically limited to the movement of Newmark's sliding block. **(3) Dynamic deformation analysis** (2D and 3D) is the most complex and provides more data of dam's behavior during an earthquake. This analysis determines geotechnical construction's permanent movements, which depend on dynamical impact at its foundation (peak ground acceleration - PGA), history of acceleration in the time & earthquake's frequency (accelerogram) and dynamical properties of the materials. This analysis provides information of the dam movements in any point in object during and after the earthquake. 3D analysis takes into the consideration shape of the river valley and the impact from movement of the slopes to the dam.

This study provides a methodological approach to calculate stability and stress-strain analysis during dynamical load of embankment dams for different predicted earthquakes, Operating Basis Earthquake(OBE) and Maximum Credible Earthquake(MCE), different earthquake accelerograms and constitutive models (LA and ELA). Attention was given to the liquefaction of silty and sandy materials and its occurrence and behavior within high dams. Two examples of dams are presented where dynamical analysis was performed: 1. Slupčanka - concrete face rock filled dam (CFRD) and 2. tailing dam Gradac – which has the embankment built of sandy and gravely material susceptible to liquefaction. Calculations have been performed by software GeoStudio, with software tools SLOPE/W, SIGMA/W and QUAKE/W.

Methods' comparative analysis was provided and it was suggested which method was suitable to use for different phases of the project.

Keywords: dynamical analysis, rock fill dam, tailing dumps and landfills, stresses and strain, accelerogram, liquefaction, permanent movements, QUAKE/W, OBE earthquake, MCE earthquake, LA, ELA and NA constitutive models, material stiffness, pore pressure generation

1. UVOD

Proračuni stabilnosti u statičkim i dinamičkim uslovima brane i deponije sprovode se kako bi se potvrdili ili odredili nagibi kosina brane i deformacije, tako da stabilnost i funkcionalnost brane i deponije za usvojene parametre materijala od kojih će se izgraditi telo brane ne budu ugroženi.

Hidrotehnički sistemi brana sa akumulacijama kao i deponije pepela i jalovine spadaju u kategoriju objekata sa najvećim stepenom rizika po životnu sredinu (ICOLD bulletin 72). U slučaju nekontrolisanog proloma brane i pražnjenja akumulacije, postojale bi ogromne posledice po društvenu zajednicu nizvodno od njih. Iz ovih razloga, svrha proračuna je da se obezbedi stabilnost konstrukcije, filtraciona i hidraulička stabilnost brane i pribranskih objekata kao i stabilnost deponija. Svrha dinamičke analize je da se utvrdi ponašanje brane ili deponije pod dejstvom seizmičkih sila. Seizmička analiza treba da obezbedi podatke za ocenu ponašanja brane ili deponije tokom zemljotresa, kao i da obezbedi podatke o stabilnosti brane ili deponije pri seizmičkim dejstvima za usvojenu geometriju, raspored materijala i usvojene dinamičke i geomehničke parametre materijala. Takođe, ovom analizom moguće je odrediti intervale vrednosti geotehničkih parametara (krutosti materijala, mogula stišljivosti) u zavisnosti od dinamičkog odgovora objekata. Tako dobijene vrednosti mogu se uporediti sa izmerenim vrednostima mernih veličina na uređajima za oskultaciju (instrumenati za registrovanje intenziteta zemljotresa, geodetski reperi isl.), čime bi se izvršila provera i potvrda vrednosti dobijenih dinamičkom analizom kao i tariranje i uspostavljanje novog matematičkog modela. Dinamičkom analizom se utvrđuje pomeranje brane ili deponije za usvojene projektne zemljotrese. Na osnovu rezultata dinamičke analize zaključuje se da li je stabilnost i funkcionalnost objekata ugrožena u slučaju projektnih zemljotresa.

Dinamička analiza započinje proračunom inicijalnog stanja napona u brani, u slučaju izgradnje brane do njene krajnje kote, dok se kao kritičan slučaj za proračun stabilnosti brane u dinamičkim uslovima izdvaja slučaj stacionarnog stanja sa nivoom vode u akumulaciji koji odgovara koti normalnog uspora. Prilikom izrade dinamičke analize potrebno je koristiti sve raspoložive podatke i zapise zemljotresa, sve raspoložive geotehničke i seizmološke osnove kako za materijale i lokaciju barijere, tako i za širi region. Za izbor projektnih parametara zemljotresa i dinamičkih karakteristika materijala potrebno je koristiti svetska iskustva, srpske,

evropske i svetske norme i standarde, a posebno primeniti najnovija saznanja o dinamičkim analizama nasutih brana.

Analiza stabilnosti brana i deponija izloženih dinamičkim uticajima, prikazana u ovom radu, predstavlja analizu, koja ima za cilj ne samo određivanje položaja potencijalnih kritičnih kliznih površi, odnosno definisanje verovatnog mehanizma po kome bi došlo do klizanja i pomeranja, već i utvrđivanje pomeranja bilo koje tačke u objektu i temelju koja nastaju usled dinamičke pobude tokom vremena. Takođe za slučaj objekata izgrađenih od peskovitih materijala podložnih likvefakciji, prikazan je pristup određivanja zona u kojima bi došlo do razvoja pomeranja (tečenja materijala-likvefakcije) u telu brane ili deponije usled dinamičkog uticaja, što bi moglo kompromitovati njihovu stabilnost i funkcionalnost. Nekoherentni prašinasto-peskoviti materijali su podložni likvefakciji za razliku od krupnozrnih koherentnih drenažnih materijala (šljunak i kamen) kao i materijala kod kojih je kohezija značajna (glina).

U okviru ovog rada prikazan je metodološki pristup proračunima stabilnosti i naponsko deformacijska analiza prilikom dinamičkog opterećenja nasutih brana. Stabilnost brane određena je proračunom faktora sigurnosti (F_s) dobijenih metodom konačnih elemenata (MKE), dok su trajna pomeranja određena na dva načina:

- Newmark-ov metod (klizanje krutog bloka)
- Metodom dinamičke deformacione analize

Proračun stabilnosti se vrši kroz takozvanu punu dinamičku analizu, koja se sastoji od utvrđivanja trajnih pomeranja geotehničke konstrukcije, koja zavise od dinamičke pobude u njenim temeljima (maksimalno ubrzanje temeljnog tla, vremenska istorija ubrzanja i frekventni sastav zemljotresa) i dinamičkih karakteristika materijala. Za proračun se mogu usvojiti tri konstitutivna zakona elastičnosti: elastični linearni zakon (LA), ekvivalentni linearni elastični zakon (ELA) i nelinearni hiperbolički zakon (NA) koji nije detaljno obrađen u ovom radu.

Vrednosti dinamičkih parametara lokalnih materijala se odredjuju prema svojstvima materijala i empirijskim zavisnostima preuzetim iz tehničke literature iz oblasti geotehničkog zemljotresnog inženjerstva, poređenjem sa parametrima materijala iz dinamičkih istraživanja nasutih brana. Najrealističnija procena dinamičkih parametara materijala ugrađenih u branu može se dobiti kalibracijom matematičkog modela koji se koristi za vremensku istoriju (pobuda u osnovi i odziv na kruni) za zabeležene zemljotrese. Matematički model za odziv brane nasipa korišćenjem konstitutivnih (LA, ELA i NA) zakona loma predstavlja prvi korak u dinamičkoj analizi u vremenskom domenu. Zbog toga se dobijenim

rezultatima za raspodelu napona tokom zemljotresa procenjuje dinamička stabilnost i trajne deformacije konstrukcije. Za procenu stabilnosti konstrukcije koristi se faktor sigurnosti F_s koji zavisi od raspodele napona i utvrđuje se primenom metode konačnih elemenata (MKE).

Vrednosti $F_s < 1.0$ se javljaju za delić sekunde i ne odnose se na stabilnost celog nagiba. Međutim, to znači da je za te veoma kratke vremenske intervale došlo do trajnih deformacija. Kumulativni efekat ovih deformacija predstavlja trajno pomeranje potencijalnog kliznog tela tokom seizmičkog delovanja, što se može odrediti Newmark metodom.

Drugi pristup koji se primenjuje za određivanje veličine trajnih pomeranja tokom seizmičkih pobuda, ne samo za potencijalno klizno telo, već za bilo koju tačku u telu brane je „Dinamička deformaciona analiza“. Ova analiza predstavlja sukcesivnu nelinearnu preraspodelu napona koja se definiše kroz više koraka. U nastavku dinamičke analize vrši se aproksimacija pomeranja u kruni brane pri slabljenju lokalnog materijala izloženog cikličnom delovanju. Ova pomeranja posle zemljotresa (sleganje krune brane) određuju se smanjenjem parametara krutosti za 20%-30% u zavisnosti od nivoa dinamičke pobude i tipa brane.

Prikazan je i primer primene metode na slučajeve brane Slupčanka u Severnoj Makedoniji – brana sa betonskim ekranom i potpornim telom od kamena (CFRD-Concrete Face Rock Fill Dam) i za deponiju jalovišta Gradac u Pljevljima, Crna Gora (telo deponije izgrađeno od prašinastog-peskovitog materijala podložnog likvefakciji).

2. DINAMIČKA ANALIZA BRANE

2.1 Parametri projektnih zemljotresa

2.1.1 *Jačina, magnitude, maksimalno ubrzanje i vreme trajanja zemljotresa*

Dinamička analiza stabilnosti brana u Republici Srbiji radi se u skladu sa važećim Standardima i Pravilnicima za seizmičko projektovanje Republike Srbije koji su preuzeti od ranijih SFRJ standarda (1986 година) kao i prema preporukama ICOLD-a (International Commission Of Large Dams). Prema članu 5 standarda sve brane i nasipi viši od 15 m spadaju u kategoriju visokih brana čiji kolaps može izazvati katastrofalne posledice po ljudstvo i naneti velike materijalne štete celoj zajednici. Samim tim ovi objekti spadaju u objekte „van kategorije“.

Kao kritičan slučaj opterećenja brane u dinamičkim uslovima usvaja se slučaj pune akumulacije do kote normalnog uspora iz razloga što pri punoj

akumulaciji usled seizmičkog dejstva postoji najveća potencijalna opasnost u nizvodnoj rečnoj dolini.

Prema Članu 7 Pravilnika - projektni zemljotres tipa Z1 je zemljotres povratnog perioda 200 godina sa verovatnoćom pojave od 70 %. Prema članu 8 Pravilnika, projektni zemljotres Z2 je zemljotres povratnog perioda 1000 godina sa verovatnoćom pojave od 70%.

Međutim imajući u vidu nova saznanja i preporuke ICOLD-a, seizmičko projektovanje brana treba bazirati na zemljotresima OBE i MCE:

OBE – Operating Basic Earthquake –osnovni operativni zemljotres koji predstavlja nivo seizmičkog ubrzanja u fundamentu brane koji kao rezultat ima mala i prihvatljiva oštećenja brane. Pri ovom zemljotresu stabilnost i funkcionalnost brane nije ugrožena. Kriterijum inteziteta OBE zemljotresa nije jednoznačno definisan pa se najčešće usvaja prema preporukama ICOLD-a. Najčešće se usvaja OBE zemljotres za povratni period od $T=145$ godina (verovatnoća pojave na godišnjem nivou $P=1/T=0.7\%$), odnosno $T=100$ godina (verovatnoća pojave na godišnjem nivou $P=1/T=0.5\%$). Koji zemljotres će se usvojiti zavisi od karakteristika brane, njene visine, geoloških i morfoloških karakteristika i sl. OBE zemljotres u zavisnosti od rizika može se usvojiti i za povratni period $T=200$ godina ($P=0.5\%$) ili $T=500$ godina ($P=0.2\%$).

MCE=SEE – Maximum Credible Earthquake = Safety Evaluation Earthquake (ICOLD bulletin 148) – maksimalni mogući zemljotres, predstavlja maksimalni zemljotres koji se definiše determinističkim pristupom i predstavlja maksimalni realni zemljotres koji se može javiti u blizini detektovanih raseda ili na definisanim seizmički aktivnim zonama, sa definisanim ili pretpostavljenim tektonskim pojavama. MCE definiše gornju granicu očekivane magnitude. Umesto MCE(SEE) se koristi MDE – Maximum Design Earthquake (najveći projektovani zemljotres za koji se vrši proračun i analiza brana). Najčešće MDE odgovara MCE zemljotresu. U nedostatku preciznih podataka o ponašanju tla u seizmičkim uslovima, MCE zemljotres se usvaja na osnovu verovatnoće pojave i za projektovanje branu se preporučuje povratni period $T=10.000$ godina.

U zavisnosti od dimenzija brane, tipa brane, rizika i drugih faktora, na osnovu izrađenih studija hazarda biraju se povratni periodi tzv. zemljotresa Z1 i Z2 za koji se vrši projektovanje brana.

Prema preporukama ICOLD-a i IZZIS-ove Studije hazarda (koja je u skladu sa Eurocodom 8) za pregradno mesto **Slupčanka** usvojeni su sledeći projektni zemljotresi:

- Zemljotres Z1 (OBE) za povratni period 145 godina ($P=1/T=0.7\%$)
 $k_{x,max}=0.165g$ i

- Zemljotres Z2 (MCE) za povratni period 10 000 godina ($P=1/T=0.01\%$) $k_{x,max}=0.275g$.

Za **deponiju Gradac** nije rađena Seizmička studija hazarda pa je seizmičnost terena na području deponije Gradac usvojena na osnovu važećih karata seizmičke mikroneonizacije Crne Gore. Maksimalno ubrzanje tla za zemljotres Z2 usvojeno je u skladu sa Eurocod-om 8, povratnog perioda 475 godina, sa vjerovatnoćom realizacije od 70 % ($k_x=0,18g$).

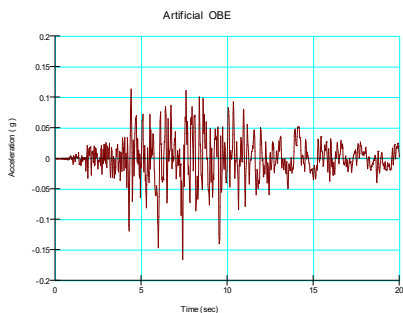
Saglasno Eurocod-u, vreme trajanja zemljotresa se usvaja $t \approx \pm 5s$ u zavisnosti od PGA. Usvojeno vreme trajanja za predmetnu analizu je $t=20s$.

Projektni sprekti za aktuelne zemljotrese

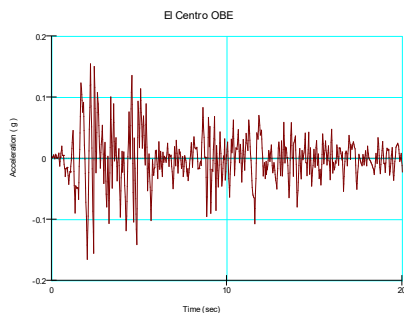
Osnovni parametri zemljotresa - intenzitet, magnituda, maksimalno ubrzanje u tlu, trajanje seizmičkih impulsa, tip objekta, njegov značaj za širu okolinu, lokacija objekta, predstavljaju ulazne parametre za dinamičku analizu. Da bi se izvršila dinamička analiza u vremenskom domenu, potrebno je znati učestalost projektnog zemljotresa (trajanje-ubrzanje) za koju će se definisati odgovor brane na dejstvo seizmičke sile.

Za branu Slupčanka usvojena su tri projektna zemljotresa-akcelograma:

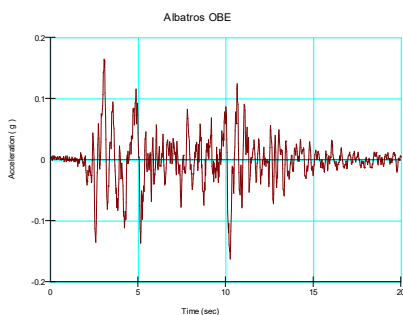
- (1) sintetički zemljotres za branu Slupčanka (Студија за сеизмички хазард за профилот на брана Слупчанка, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје-Институт за земјотресно инженерство и инженерска сеизмологија-Скопје),
- (2) zemljotres EL Centro (Imperial valley Calif. earthquake May 18, 1940 El Centro site, $PGA=0.3483g$), primenjen za analizu na mnogim konstrukcijama kao aktuelan zapis za komparativnu analizu i
- (3) zemljotres Albatros (Montenegro earthquake april 15, 1979 hotel Ulcinj Albatros, $PGA=0.2222g$), realni skaliran zemljotres, registrovan na Balkanu najbliži predmetnoj lokaciji. Za potrebe dinamičke analize objekta generisana je istorija vremena veštačkog ubrzanja. Kreirane vremenske istorije su skalirane prema usvojenim projektnim zemljotresima (akcelogram).



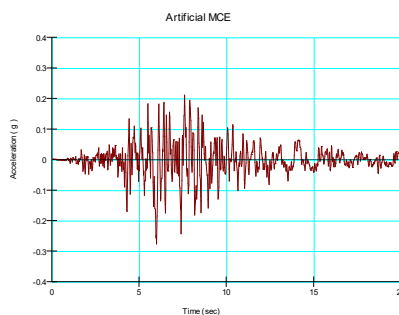
Slika 2-1. Sintetički zemljotres, $a_{max}=0.165g$ – OBE (Z1)



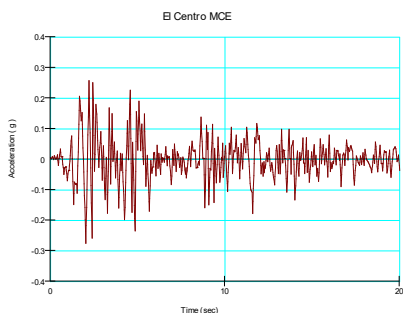
Slika 2-2. El Cento, $a_{max}=0.165g$ – OBE (Z1)



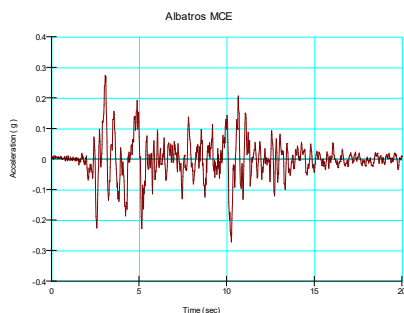
Slika 2-3. Albatros- Ulcinj, $a_{max}=0.165g$ – OBE (Z1)



Slika 2-4. Sintetički zemljotres, $a_{max}=0.275g$ – MCE (Z2)

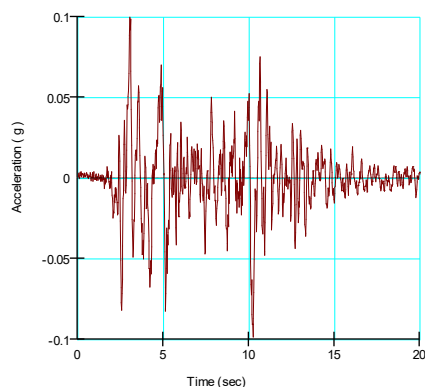


Slika 2-5. El Cento, $a_{max}=0.275g$ – MCE



Slika 2-6. Albatros- Ulcinj, $a_{max}=0.275g$ – MCE (Z2)

Za **deponiju Gradac** u nedostatku podataka odnosno seizmičke studije hazarda, kao referentan usvojen je vremenski zapis geografski najbližeg zemljotresa koji se dogodio na Crnogorskom primorju 1979 god- Ulcinj Albatros $PGA=0.2222g$.

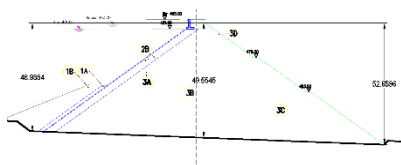


Slika 2-7. Vremenski zapis Akcelogram-Albatros skaliran na $kx=0.1g$ -Deponija Gradac Pljevlja

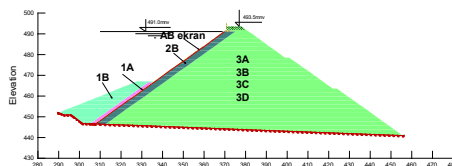
3. OSNOVNI PARAMETRI ZA DINAMIČKU ANALIZU

3.1 Reprezentativni poprečni preseki

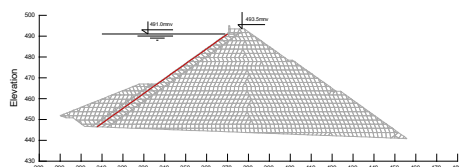
Za proračun pri dinamičko opterećenju usvaja se presek maksimalne visine, Za branu Slupčanka usvojen je kombinovani presek maksimalne visine uzvodne kosine i središnjeg dela brane od 46.9m i nizvodne kosine od 52.6 m. Mreža konačnih elemenata je reda veličine 2.0m, dovoljne tačnosti.



Slika 3-1. Karakteristični presek



Slika 3-2. Matematički model brane



Slika 3-3. Mreža konačnih elemenata

Proračun deponije i brane Gradac rađen je na više karakterističnih poprečnih preseka.

3.2 Matematički model za dinamičku analizu

3.2.1 Metode za analizu ponašanja brana u seizmičkim uslovima

U geotehničkoj literaturi i inženjerskoj praksi primenjuje se nekoliko metoda za analizu seizmičkog ponašanja brana i nasipa. Ove metode se mogu klasifikovati na nekoliko načina: (1) na osnovu konstitutivnog zakona između napona i deformacije materijala (linearni elastični, nelinearno elastični, elastoplastični i dr. modeli), (2) na osnovu usvojene geometrije analiziranog objekta (jednodimenzionalna, dvodimenzionalna ili trodimenzionalna analiza) ili (3) na osnovu definisanja seizmičkog opterećenja, (maksimalno ubrzanje na tlo- *peak ground acceleration PGA*), seizmički spektar odgovora – *seismic response spectra*, vremenska istorija ubrzanja-akcelrogram - *acceleration time history*);

Jedna od podela razdvaja sve predstavljene metode u tri grupe:

- Metoda ekvivalentnog statičkog opterećenja (pseudostatička metoda). Određivanje faktora sigurnosti metodom granične ravnoteže (MGR). Proračun stabilnosti kosina brana odnosno deponije svodi se na određivanje faktora sigurnosti kao odnosa između smičuće čvrstoće tla i prosečnog smičućeg napona duž pretpostavljenih kliznih površina;

- Pojednostavljena metoda dinamičke analize koja omogućava izračunavanje seizmički indukovanih pomeranja bazirana na pretpostavljenom modelu loma analizirane konstrukcije (na primer, Newmarkova metoda krutog kliznog bloka ili približna metoda *Makdisi and Seed*);

- Metoda dinamičke deformacione analize omogućava proračun veličine pomeranja i načina sloma pri seizmičkom delovanju;

Metoda pseudostatičke analize je donedavno bila najčešće korišćena metoda za analizu seizmičke stabilnosti brana, nasipa i drugih geotehničkih objekata, jer je davala konzervativne rezultate. U pseudostatičkoj analizi, dinamičko dejstvo zemljotresa se zamenjuje inercijskom silom, kao ekvivalentnom statičkom silom, koja deluje na potencijalno klizno telo i jednaka je proizvodu težine kliznog tela i seizmičkog koeficijenta. Vrednost seizmičkog koeficijenta se utvrđuje na osnovu očekivanog maksimalnog ubrzanja temeljnog tla (Peak Ground Acceleration) analiziranog objekta. Za ovo definisano seizmičko opterećenje objekta, stabilnost klizanja potencijalnih kliznih tela se izračunava metodom granične ravnoteže (MGR), odnosno za pretpostavljene položaje potencijalnih kliznih tela faktor sigurnosti klizanja se izračunava kao odnos između čvrstoće materijala na smicanje i prosečnih smičnjih napona duž potencijalnih kliznih površi. U slučaju kada pseudostatička analiza daje faktor sigurnosti manji

od jedinice ($F_s < 1$), to znači da je došlo do gubitka stabilnosti i loma duž kritične klizne površi. Nedostatak ove metode je što se zanemaruje oscilatorni i vremenski ograničen karakter seizmičke pobude – ubrzanja tokom dejstva zemljotresa. Iako pseudostatička analiza daje faktor sigurnosti manje od 1, kosina brane ostaje stabilna uprkos razvoju određenih pomeranja kliznog tela. Pomeranja su obično ograničana na malom lokalnom kliznom telu a najčešće se određuju na osnovu Newmark-ove analize.

Pojednostavljene dinamičke metode za proračun deformacija pri seizmičkom opterećenju (uključujući Newmarkova metodu) zasnivaju se na idealizaciji geotehničkog objekta kao krutog bloka koji klizi duž nagnute ravni. Metoda omogućava izračunavanje pomeranja krutog bloka dvostrukom integracijom vremenske istorije ubrzanja za vrednosti ubrzanja veće od tzv. kritično ubrzanje. Dobijen pomeranja predstavljaju trajna pomeranja kliznog tela, a seizmička stabilnost konstrukcije se procenjuje upoređivanjem dobijenih vrednosti trajnih pomeranjima sa maksimalno prihvatljivim pomeranjima, koja ne ugrožavaju globalnu stabilnost konstrukcije.

Dinamička deformaciona analiza se sastoji u određivanju trajnih pomeranja geotehničke konstrukcije, koja zavise od dinamičke pobude u njenom temelju (maksimalnog ubrzanja tla -PGA), vremenske istorije ubrzanja i frekventnosti zemljotresa (akcelogram) kao i dinamičkih karakteristika materijala konstrukcije. Za usvojene vremenske zapise ubrzanja, primenom dinamičke analize dobija se seizmički odgovor konstrukcije. Matematički model za proračun seizmičkog odziva konstrukcije formira se diskretizacijom konstrukcije i proračun se vrši metodom konačnih elemenata (MKE). Za materijale u telu brane usvajaju se različiti konstitutivni zakoni naponi-deformacije: linearno elastičan model-LA, ekvivalentan linearno elastičan model-ELA i nelinearni model (NA). Proračun se zasniva na određivanju inicijalnog naponskog stanja. Za tako dobijeno stanje uvodi se vremenski zapis ubrzanja (akcelogram) za koji se vrši proračun. Rezultati proračuna predstavljaju preraspodelu napona i deformacija u konstrukciji tokom trajanja i nakon prestanka zemljotresa. Tokom trajanja pobude najčešće se javljaju elastične deformacije, a ukoliko dodje do pojave plastičnih deformacija, u konstrukciji se javljaju trajna pomeranja koja se akumuliraju tokom trajanja zemljotresa i na kraju se dobija kumulativna vrednost ovih trajnih pomeranja.

- **Linearna analiza (LA)**- proračun se radi primenom linearnog konstitutivnog zakona napona i deformacija, pri čemu je napon (σ) direktno proporcionalan deformaciji (ϵ), a konstanta proporcionalnosti je *Young*-ov

modul elastičnosti (E). Modul elastičnosti se dobija na osnovu korelacije sa tangencijalnim modulom smicanja (*shear modulus* G) i *Poisson*-ovog koeficijenta (ν). Proračuni rađeni ovom analizom nisu iterativni, tako da ne postoji problem sa konvergencijom.

- **Ekvivalentna linearna analiza (ELA)** je slična linearnoj analizi, s tom razlikom da je tangencijalni modul smicanja (G) promenljiv, u funkciji je dobijenih deformacija. Postupak je iterativan i u svakoj iteraciji se vrši proračun maksimalnih smičućih napona za ceo zapis zemljotresa (istorija vremena ubrzanja). U prvoj iteraciji, proračun se vrši sa navedenom vrednošću modula smicanja G. U narednim iteracijama, vrednost modula smicanja G se modifikuje u skladu sa definisanim koeficijentom prigušenja (*G reduction function*). Modul smicanja G i koeficijent prigušenja su funkcija cikličnih tangencijalnih dilatacija (*Cyclic shear strain* - γ_{xy}). U svakoj od iteracija proračun se vrši sa konstantnom vrednošću modula smicanja G, koji se menja u svakoj novoj iteraciji. Iterativni postupak se nastavlja sve dok se između dve uzastopne iteracije ne dobije modifikacija vrednosti G u okviru zadate tolerancije.

- U **nelinearnoj analizi (NA)** zavisnost napona i deformacije se opisuje nelinearnom hiperboličkom funkcijom, koja se definiše modulom smicanja G_{max} za dilataciju $\gamma = \pm 0.1\%$ i smičućom čvrstoćom τ_{max} za $\gamma = \pm 2\%$. Sa porastom tangencijalnih deformacija smanjuje se krutost materijala. U hiperboličkom modelu osim G_{max} potrebni je definisati parametre smičuće čvrstoće preko Mohr-Coulomb-ovog zakona – efektivna kohezija (c') i efektivni ugao unutrašnjeg trenja (ϕ'). Nelinearna analiza nije obrađena u predmetnom radu.

Metoda konačnih elemenata je numerički postupak koji se sastoji od sledećeg:

- a) Sredina je diskretizovana na konačan broj delova čije ponašanje se specificira određenim brojem parametara i

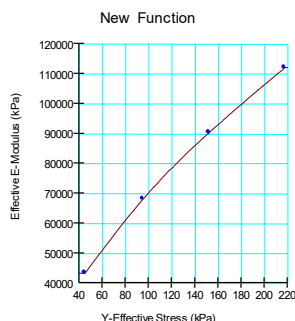
- b) rešenje celog sistema, kao skup njegovih elemenata, prati ista pravila, koja važe za diskretizovani problem.

Za dinamičku analizu nasutih brana za vremenski zapis zemljotresa moguće je koristiti razne sofisticirane programe. Jedan od njih jeste i softver QuakeW (Geo Studio). Program se bazira na metodi konačnih elemenata (MKE) gde se koristi Gaus_Lagender numerička integracija za formiranje matrica krutosti. Za integraciju jednačine kretanja u vremenskom domenu, kada su parametri materijala promenljivi tokom vremena, koristi se Vilsonova θ metoda. Za rešavanje jednačina konačnih elemenata primenjena je tehnika faktORIZACIJE Choleskija, koja je bliska Gausovoj metodi eliminacije;

Dinamičke analize brane Slupčanka i deponije Gradac urađene su primenom metode konačnih elemenata u programu QUAKE-W koji je deo programskog paketa Geostudio. Proračun Slupčanke urađen je za dva konstitutivna modela : linearni LA i ekvivalentni linearni model (ELA) dok je za Gradac rađen za linearni model (LA).

Inicijalno naponsko stanje

Primarni proračuni u okviru dinamičke analize podrazumevaju procenu početnog (pre seizmičkog) stanja napona u brani. Ovo početno stanje napona kreirano je elastičnim konstitutivnim zakonom za zavisnost napon-deformacija u slučaju hidrostatskog pritiska koji odgovara povišenju normalnog nivoa u akumulaciji. Za analizu početnog naponskog stanja, za statičku analizu, parametri materijala u telu brane Slupčanka i deponije Gradac kao i fundamenta usvojeni su na osnovu podataka datih u okviru Geotehničkih i i dokumentacionih elaborata dok su parametri sanacionih materijala usvojeni na osnovu literaturnih podataka za zastupljene materijale.

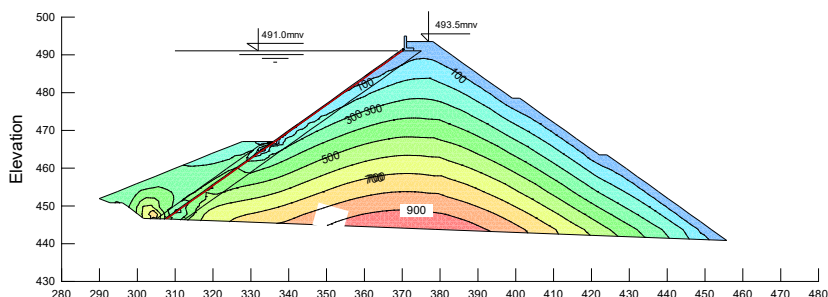


Slika 3-4. Modul elastičnosti $E(KPa)$ u zavisnosti od efektivnih vertikalnih napona za statičko opterećenje

Tabela 1. Osnovni geomehanički parametri materijala – brana Slupčanka

Broj	Materijal	γ (kN/m^3)	c' (kN/m^2)	ϕ' ($^\circ$)	E (MPa)	ν
1	AB ekran	25	250	45	31 500	0.2
2B	Filterski sloj	22	0	36	55	0.33
3A,3B, 3C,3D	Potporno telo-kamen	23.5	0	41	f-ja	0.3
1A	Polupropustljiv-nepropustljiv sloj	20	8	24	7.5	0.3
1B	Neselektovani nasuti materijal ($D_{max} = 40cm$)	22	0	36	50	0.22

Inicijalni naponi, koji predstavljaju raspodelu efektivnih napona, kao početna raspodela za proračun dejstva seizmičkih sila za branu Slupčanka, prikazani su na sledećem dijagramu:



Slika 3-5. Raspodela efektivnih vertikalnih napona nakon punjenja akumulacije do kote normalnog uspora

**Napomena: Imajući u vidu tip brane Slupčanka- CFRD gde je potporno telo od kamena porni pritisci nisu uzeti u obzir prilikom određivanja inicijalnih napona.*

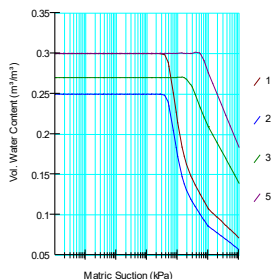
Tabela 2. Karakteristike materijala deponije i fundamenta - Gradac

MATERIJAL	γ [kN/m ³]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]
SREDINA GT1-p	16.5	0	25
SREDINA GT2-p-pr	17.3	0	21.7
SREDINA GT3-pr	21	13	20
SREDINA GT5-al	21	4	28
SREDINA GT6-kr	25	1000	30
Gabioni	23.5	0	42
Prekrivka nakon sanacije	20	5	29

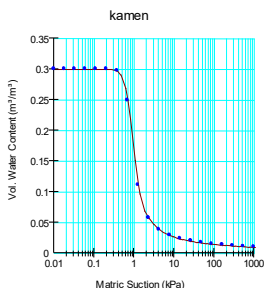
Kod **deponije Gradac** obzirom da je telo deponije izrađeno od prašnasto peskovitog materijala porni pritisci su bitan ulazni parametar. Proračun mogućnosti pojave likvefakcije deponije Gradac urađena je dinamičkom analizom korišćenjem programskog paketa QuakeW. Program QuakeW omogućava uvođenje pornih pritisaka proračunatih u okviru paketa SeepW (koji je sastavni deo softverskog paketa Geostudio). Za takvo stanje pornih pritisaka u okviru QuakeW određuje se inicijalno stanje napona. Parametri materijala u SeepW za proračune pornih pritisaka usvojeni su na osnovu rezultata istražnih radova I laboratorijskih opita kao

i na osnovu literaturnih podataka za zastupljene materijale. Proračun filtracije je urađen korišćenjem funkcija: volumetric water content I hydraulic conductivity.

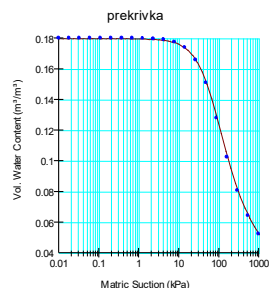
- Volumetric water content je f-ja pornog pritiska: $\theta_w = f(pwp)$



Slika 3-6. θ_w –
geotehničke sredine
zastupljene na deponiji

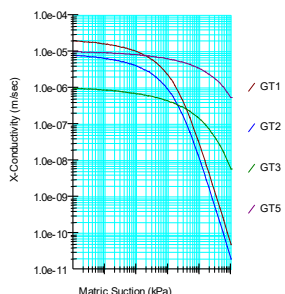


Slika 3-7. Sanacioni
materijal- Kamen

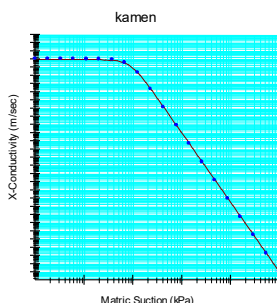


Slika 3-8. Prekrivka

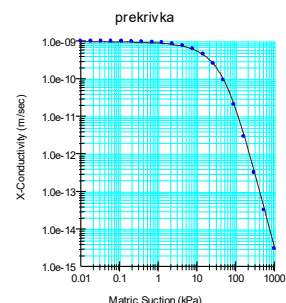
- Hydraulic conductivity je f-ja pornog pritiska: $K = g(pwp)$



Slika 3-9. θ_w –
geotehničke sredine
zastupljene na deponiji

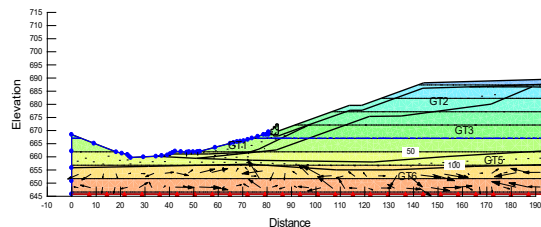


Slika 3-10. Sanacioni
materijal- Kamen

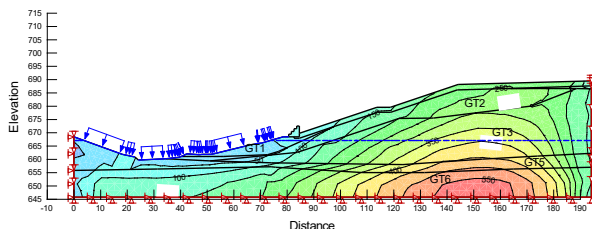


Slika 3-11. Prekrivka

Inicijalno stanje napona deponije Gradac određeno je za raspodelu pornih pritisaka dobijenu iz SEEPW-a.



Slika 3-12. Proračun filtracije-porni pritisci



Slika 3-13. Inicijalno stanje napona Efektivni naponi $\sigma' = 578.8 \text{ kN}$

3.4 Karakteristike materijala za dinamičku analizu brane

Generalno, za potrebe izrade dinamičke analize nasutih brana potrebno je definisati dve grupe parametara: Prva grupa parametara se odnosi na krutost materijala u telu brane a druga grupa parametara se odnosi na generisanje pornih pritisaka u telu brane tokom dinamičke pobude.

Za definisanje krutosti materijala u dinamičkoj analizi se koristi modul smicanja G (shear modulus). Povećanje pornih pritisaka u telu brane izazvano dejstvom zemljotresa se definiše preko parametra pornog pritiska (ru) koji u slučaju dinamičke analize nije konstanta već je funkcija ekvivaleantnog broja ciklusa (N) za konkretan zemljotres i broja ciklusa (NL) koji izazivaju likvefakciju tela brane. Likvefakcija predstavlja tečenje materijala u telu brane i/ili temelju nastalo usled povećanja pornih pritisaka i gubitka dela smičuće čvrstoće materijala brane izazvanih zemljotresom. Podložni likvefakciji su sitnozrni nekoherentni prašinasto-peskoviti materijali koji nemaju koheziju (c), za razliku od materijala kod kojih je kohezija značajna (glina). Takođe, drenažni materijali kao što su nekoherentni krupnozrno šljunkoviti i kameni materijala nisu podložni likvefakciji jer i ako nemaju koheziju zbog svoje strukture nisu podložni generisanju pornih pritisaka.

Da li će u telu brane doći do generisanja pornih pritisaka zavisi od tipa nasute brane:

1. Kod kamenih brana sa betonskim ekranom ili geomembranom kao i kod zoniranih brane sa glinenim jezgrom i potpornim telima od šljunkovitog ili kamenog materijala – u telu brane ne dolazi do generisanja pornih pritisaka pa se ovaj ulazni parametar zanemaruje

2. Kod brana čija su potporna tela od peska (koji nema koheziju) može doći do porasta pornih pritisaka usled dinamičke popude pa postoji verovatnoća pojave likvefakcije. Kod takvih tipova brane ovaj parametar se uzima u obzir i unosi se ili kao ru dobijen na osnovu laboratorijskih ispitivanja materijala a moguće je izvršiti proračune filtracije brane u nekom od softverskih paketa i takav model usvojiti kao ulazni parametar u dinamičkoj analizi.

Modul smicanja G može da se definiše kao konstanta, ali je realniji model koji ga definiše kao funkciju u zavisnosti od napona u materijalu (σ_m').

Za Linearnu Analizu (LA) i Ekvivalentnu Linearnu Analizu (ELA) za nekoherentne materijale funkcija zavisnosti modula smicanja od glavnog efektivnog napona se bazira na sledećoj jednačini: $G_{max} = K\sqrt{\sigma_m'}$, gde su:

K – koeficijent proporcionalnosti (K modulus)

σ_m' – glavni efektivni napon

Koeficijent K se usvaja u zavisnosti od vrste materijala ugrađenog u telo brane. Prema literaturnim podacima vrednost K za karakteristične nekoherentne materijale iznosi: Loose sand - 30 ; Medium dense sand - 50 ; Dense sand - 70 ; Loose gravel - 80 ; Medium dense gravel - 130 ; Dense gravel – 180. Ove vrednosti se baziraju na rad Seed-a i Idrissa (1970), a opisane su od strane Kramer-a (1996).

Glavni efektivni naponi (σ_m') se proračunavaju prema formuli:

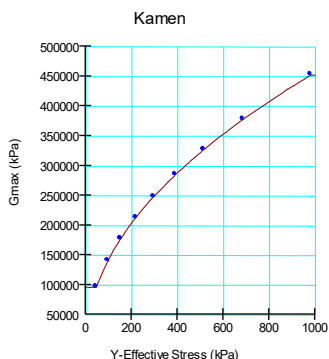
$$\sigma_m' = \frac{\sigma_v + 2 K_0 \sigma_v}{3}, \text{ gde su}$$

σ_v – vertikalni napon

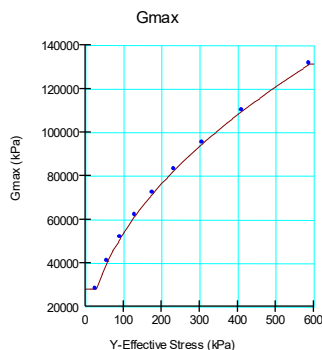
K_0 – koeficijent pritiska tla u stanju mirovanja

Za visinu nasipa, usvojenu vrednost modula K i vrednost koeficijenta pritiska tla u mirovanju K_0 , izračunava se vrednost modula smicanja G_{max} (prikazano na sledećim dijagramima):

Kriva zavisnosti $G_{max} = f(\sigma_v')$ za Linearnu (LA) i Ekvivalentnu linearnu analizu (ELA)



Slika 3-14. Shipčanka



Slika 3-15. Gradac

Za ekvivalentnu linearnu analizu usvojene su vrednosti redukcionog faktora G prigušenja kao **funkcija redukcije modula smicanja (G-reduction function)**.

Materijal izložen dinamičkom opterećenju ima tendenciju da „omekša“, kao odgovor na ciklične smičuće deformacije. U Ekvivalentnoj linearnoj analizi (ELA) ovo „omekšavanje“ materijala je definisano korišćenjem funkcije smanjenja modula smicanja G i predstavljeno je odnosom $G/G_{\max}$. Ciklična smičuća deformacija proizilazi iz analize konačnih elemenata. Izračunata smičuća deformacija zajedno sa funkcijom i navedenim $G_{\max}$ se koriste za izračunavanje novih G vrednosti za svaku od iteracija. Dve osnovne varijable koje utiču na ovu funkciju su PI (indeks plastičnosti) i normalni napon. Rešenje koje je Kramer definisao je:

$$\frac{G}{G_{\max}} = K(\gamma, PI) (\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0}$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\}$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3})$$

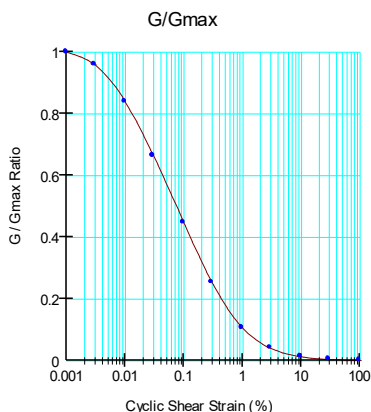
$$n(PI) = 0.00 \quad \text{for } PI = 0$$

$$n(PI) = 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} \quad \text{for } 0 < PI < 15$$

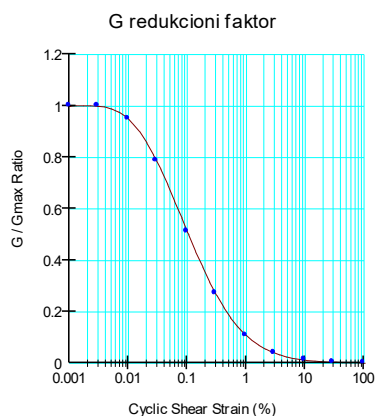
$$n(PI) = 7.00 \times 10^{-7} PI^{1.976} \quad \text{for } 15 < PI < 70$$

$$n(PI) = 2.70 \times 10^{-5} PI^{1.115} \quad \text{for } PI > 70$$

Funkcija smanjenja modula smicanja u zavisnosti od veličine cikličnih smičućih deformacija (γ) data je na sledećim dijagramima.



Slika 3-16. Kamen - Slupčanka

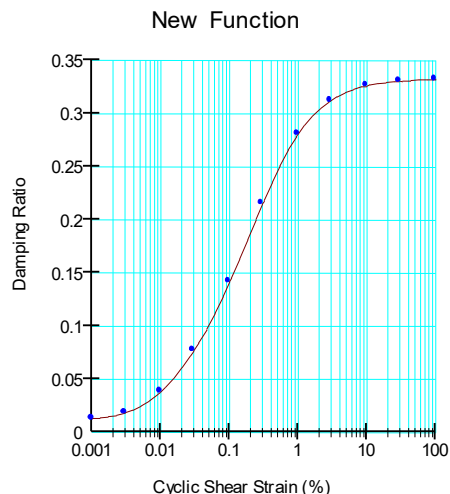


Slika 3-17. Gradac

Koeficijent prigušenja (Damping ratio)

Kao i modul smicanja G_{max} , koeficijent prigušenja se može definisati kao konstanta ili funkcija. Koeficijent prigušenja je funkcija cikličkih smičućih deformacija (kao i funkcija smanjenja modula smicanja). U LA analizi koeficijent prigušenja je usvojen kao konstanta. Kod brane Slupčanka za zemljotres Z1 usvijena je vrednost prigušenja DR=5% dok je za zemljotres Z2 usvojeno prigušenje DR=15%. Kod deponije Gradac usvojeno je prigušenje DR=10%. U ELA analizi primenjuje se rešenje Kramera (1996; pp. 234-240), pri čemu je koeficijent prigušenja (ξ) definisan kao funkcija indeksa plastičnosti materijala (PI) i funkcija smanjenja modula smicanja (G/G_{max}).

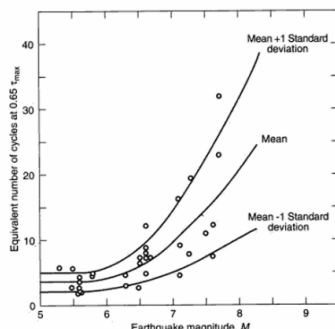
$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{1.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right]$$



Slika 3-18. Funkcija koeficijenta prigušenja ELA-Slupčanka

Kod materijala gde dolazi do generisanja pornih pritisaka u telu brane ili deponije odnosno koji su podnožni likvefakciji definišu se i sledeći koeficijenti i funkcije:

Equivalent cyclic stresses - Ekvivalentni ciklični naponi - Potresi zemljotresa su veoma promenljivi i nepravilni, što prouzrokuje promenljiva i nepravilna smičuća naprezanja u tlu. Da bi se izvršila interpretiratacija zapisa nepravilnog smicanja napona u smislu ekvivalentnog broja jednoličnih ciklusa naprezanja koriste se korelacije Seeda (1975b). Koja podrazumeva postavljanje uniformne ciklične amplitude smicanja na 65% vršnog smičućeg napona u istoriji vremena nepravilnog smicanja. U obliku jednačine: $\tau_{\text{cycle}} = 0.65 \tau_{\text{peak}}$. Seed je takođe proučavao stvarna kretanja tla i rezultirajuće povećanje pornog pritisaka, a zatim ih je povezao sa brojem jednoličnih ciklusa naprezanja od $0,65\tau$ koji su proizveli slične porne pritiske. Krajnji rezultat je predstavljen dijagramom koji je reprodukovano iz Kramer-ovog dijagrama, 1996. Podešavanje uniformne amplitude ciklusa na $0,65\tau_{\text{peak}}$ je podrazumevano u QUAKEW-u.



Slika 3-19. Ekvivalentni uniformni ciklusi u odnosu na magnitude zemljotresa

Excess pore-pressures from CSR – Porast pornog pritiska od CSR-a -

Povezan sa Ekvivalentnim linearnim modelom tla je model generisanja pornog pritiska zasnovan na konceptu **cikličniog koeficijenta napona (CSR)**. Pretpostavka je da će određeni broj ciklusa smičućih napona pri datoj amplitudi smicanja generisati dovoljan porast pritiska u porama da izazove tečenje tla. Dakle, jedna od svrha dinamičke analize konačnih elemenata je pronalaženje vršnih CSR vrednosti koje će se razviti tokom zemljotresa. Jednom kada je CSR poznat za svaki element, porast pornih pritisaka može se izračunati u QUAKEW-u preko sledeće korelacije:

$$CSR = \frac{q_d}{2\sigma'_{v(static)}}$$

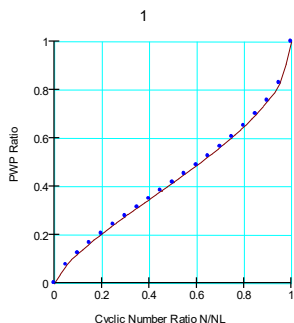
gde je:

- q_d – ciklični devijator napona definisan formulom:

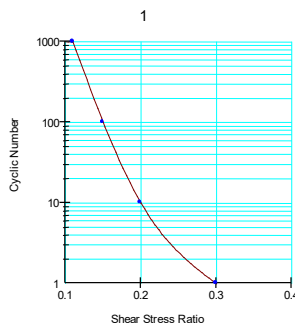
$$q_d = \sqrt{\frac{(\sigma_x^d - \sigma_y^d)^2 + (\sigma_y^d - \sigma_z^d)^2 + (\sigma_z^d - \sigma_x^d)^2 + 6(\tau_{xy}^d)^2}{2}}$$

$\sigma'_{v(static)}$ - je inicijalni statički efektivni vertikalni napon. Odnos napona smicanja postaje $\sigma_d/2\sigma_{3(static)}$ pod uslovima triaksijalnog laboratorijskog testa a σ_d je ukupna amplituda primenjenog cikličnog aksijalnog napona. CSR vrednosti su vršne vrednosti dok su konačne vrednosti predstavljene izlaznim podacima za poslednji i finalni vremenski korak u analizi.

Za deponiju Gradac prikazane su sledeće funkcije PWP I CSR:



Slika 3-20. F-ja PWP ratio-Gradac

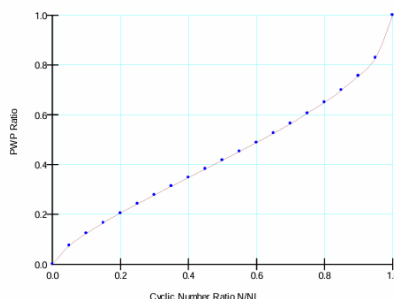


Slika 3-21. Cyclic stress ratio - Gradac

Pore-pressure Ratio (r_u) Function – Koeficijent pornog pritiska (r_u) -

Generisanje pornih pritisaka koji nastaju tokom potresa su funkcija ekvivalentnog broja ujednačenih ciklusa N za određeni zemljotres i broja ciklusa N_L , koji izazivaju tečenje (likvefakciju) dela tla pod određenim naponima. Odnos N/N_L je zavisan od koeficijenta pornog pritiska r_u (više detalja opisuje Kramer (1996, p.376)). Lee i Albaisa (1974) i DeAlba et al. (1975) opisuju funkciju koeficijenta pornog pritiska jednačinom koja je integrisana u programu QuakeW.

$$r_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/\alpha} - 1 \right]$$



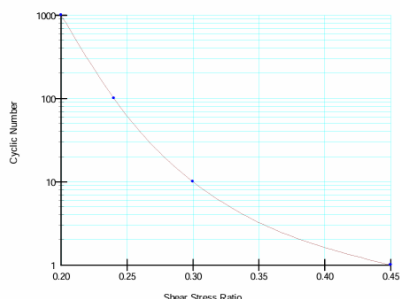
Slika 3-22. Koeficijent N/N_L u zavisnosti od r_u

U QuakeW se N_L određuje preko funkcije cikličnog broja (Cyclic Number function). N je specificirano na osnovu magnitude zemljotresa. Na osnovu poznatih N i N_L preko funkcije pornog pritiska u QuakeW određuje se porni pritisak za efektivne normalne napone:

$$u = r_u \times \sigma'_{3(static)}$$

Ukoliko je $r_u=1$, efektivni normalni napon $\sigma'_3=0$, smatra se da je došlo do tečenja (likvefakcije) materijala. Drugi metod definisanja likvefakcije je zavisnost gubitka čvrstoće i čvrstoće u stanju ravnoteže (*collapse surface and a steady-state strength*).

Cyclic number function – Funkcija cikličnog broja. Ključno svojstvo tla povezano sa konceptom CSR-a je odnos između CSR-a i broja ciklusa potrebnih da izazovu likvefakciju. Zavisnost je opisana funkcijom cikličnog broja. Ovi podaci se uobičajeno dobijaju iz cikličnog laboratorijskog opita. Sees and Lee (1965) su objavili rezultate cikličnog testiranja peska iz reke Sacramento dok ih je Kramer (1996) sumirao i predstavio dijagramom. Podaci su implementirani u okviru QuakeW gde su formirana 4 primera f-je (Loose Sand, Medium Loose Sand, Medium Dense Sand and Dense Sand). Podaci su informativni a prilikom izrade projekta usvajaju se na osnovu stvarnih vrednosti.



Slika 3-23. Cyclic number function

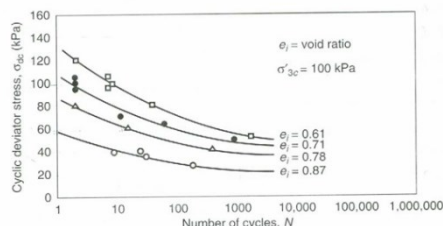
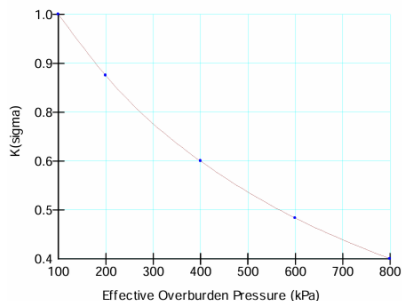


Figure 9.27 Cyclic stresses required to produce initial liquefaction and 20% axial strain in isotropically consolidated Sacramento River Sand triaxial specimens. (After Seed and Lee, 1965.)

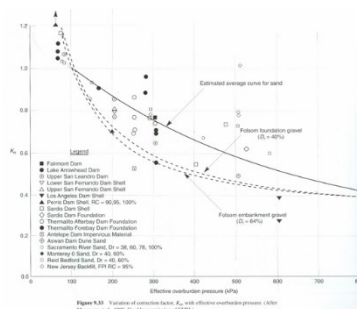
Slika 3-24. Cyclic test results on Sacramento River Sand (Kramer, 1996)

Overburden correction function, K_s - Funkcija korekcije preopterećenja

Korišćenjem CSR vrednosti za procenu generisanja pornih pritisaka ustanovljeno je da magnituda graničnog napona ima uticaj na odgovor tla. Da bi se kvantifikovalo prethodno definisan je faktor korekcije preopterećenja koji je u QuakeW označen kao K_s (s -od stress ili sigma). Ciklični smičući napon koji je potreban za aktiviranje likvefakcije raste kako granični napon raste (Kramer, 1996). U QuakeW se kvantifikuje preko funkcije K_s za pesak i šljunak. Funkcije su usaglašene sa Kramerovim podacima (1996). Ove funkcije kao i sve ostale funkcije definisane u QuakeW, mogu se prilagoditi specifičnim uslovima lokacije.



Slika 3-25. Karakteristična korekciona funkcija K_s



Slika 3-26. Korekциони factor preopterećenja

Izračunati dinamički naponi u QuakeW mogu se smatrati naponima nakon korekcija ($CSR_{\text{field corrected}}$). Korisnički specificirana funkcija cikličkog broja generalno predstavlja element koeficijenta cikličkog napona (CSR_{field}) pre korekcije. U QuakeW, izračunate CSR vrednosti konačnih elemenata se dele sa K_s da bi se dobila vrednost koja odgovara navedenim vrednostima u funkciji cikličkog broja u obliku jednačine:

$$CSR_{fn} = \frac{CSR_{FE}}{K_s}$$

Kada se izračunati CSR konačnih elemenata podeli sa K_s , QuakeW koristi Ciclic Number funkciju za određivanje NL.

Shear stress correction function, K_a – Korekciona funkcija smičućeg napona

Kao što i preopterećenje napona utiče na likvefakciju i inicijalni statički smičući naponi takođe utiču na ciklični napon potreban da se izazve tečenje (Kramer, str. 1938). Seed ovu zavisnost definiše preko koeficijenta α kao:

$$\alpha = \frac{\tau_{h(\text{static})}}{\sigma'_{v0}}$$

Da bi bili u skladu sa sličnim parametrima, pri primeni 2D analize, QuakeW koristi varijaciju parametra α kao:

$$\alpha = \frac{q_{(\text{static})}}{2 \sigma'_{v0}}$$

gde je: $q_{(\text{static})}$ – devijator napona.. U triaksijalnom opitu $\tau_{\text{max}} = q/2$

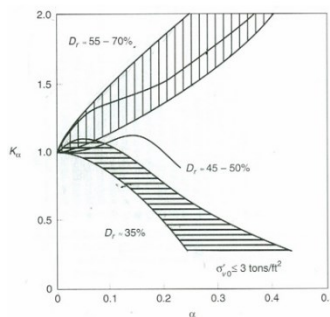
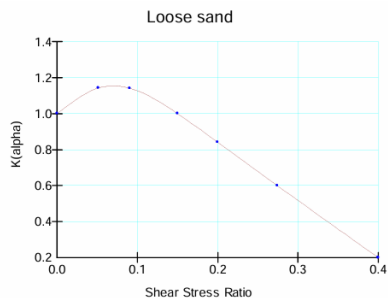


Figure 9.32 Variation of correction factor, K_{α} , with initial shear/normal stress ratio. (After Seed and Harder, 1990. *H. Bolton Seed Memorial Symposium Proceedings*, Vol. 2, p. 364. Used by permission of B/Tech Publishers, Ltd.)

Slika 3-27. Shear stress corrections
(Kramer, 1996)



Slika 3-28. Shear stress correction function

Prema podacima sa slike 3-27 definisane su 4 funkcije (Very Loose Sand, Loose Sand, Medium Dense Sand and Dense Sand. Primer funkcije za Loose Sand prikazan je na slici 3-28. Korigovana vrednost koeficijenta smičuće čvrstoće je definisana kao K_a . Proračunati dinamički napon u QuakeW može se smatrati naponom nakon korekcije ($CSR_{\text{field corrected}}$). Korisnički specificirana funkcija cikličkog broja generalno predstavlja odnos koeficijenta cikličnog napona polja (CSR_{field}) pre korekcije. U QuakeW izračunate vrednosti CSR-a konačnih elemenata se dele sa K_a da bi se dobila vrednost koja odgovara navedenim vrednostima u funkciji cikličkog broja, u obliku jednačine:

$$CSR_{fn} = \frac{CSR_{FE}}{K_a}$$

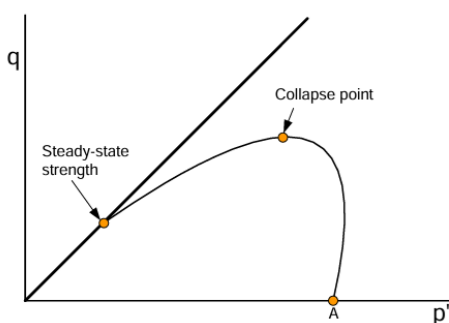
Kada se izračunati CSR konačnih elemenata podeli sa K_a , QuakeW prelazi na Ciclic Number funkciju da odredi NL.

Korekcionni faktori a naročito K_a se teško mogu definisati i koristiti u terenskim uslovima.. Pristup koji se više koristi kod materijala podložnih likvefakciji usled cikličnog opterećenja jeste gubitak čvrstoće (linija loma) i čvrstoća u stanju ravnoteže.

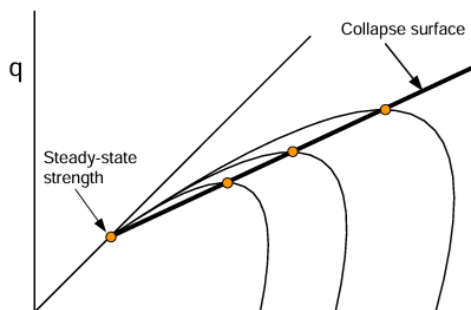
Gubitak čvrstoće (linija loma) i čvrstoća u stanju ravnoteže

Mnogo faktora utiče na gubitak nosivosti peskovitih materijala koji počinju da teku (likvefakcija). U zavisnosti od karakteristika materijala kao što je granulometrijski sastav, zapreminska težina, poroznost i raspodele naponi zavisi i potencijal nastanka likvefakcije. Različita inicijalna stanja napona mogu imati veliki uticaj na ponašanje tla kada je podvrgnuto jednoličnom ili cikličnom opterećenju. Ponašanje se najbolje može opisati

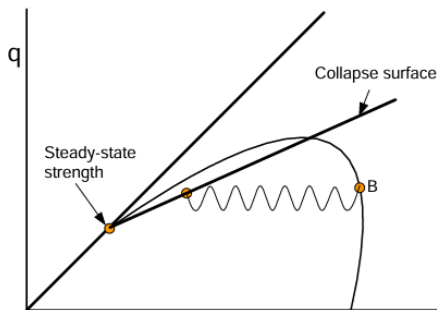
u kontekstu q - p' dijagrama (zavisnost smičućeg napona i srednjeg normalnog napona). Tačke gubitka čvrstoće (collapse points) iz serije testova formiraju liniju loma (collapse surface). Povećanje pornih pritisaka usled cikličnog opterećenja može prouzrokovati promenu raspodele napona koji se pomeraju do linije loma. U gustom pesku takođe može doći do porasta pornih pritisaka tokom cikličnog opterećenja ali ne pokazuje nagli gubitak čvrstoće.



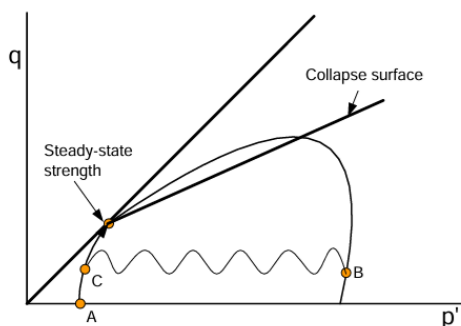
Slika 3-29. Putanja napona za rastresiti pesak usled jednoličnog opterećenja



Slika 3-30. Linija loma (collapse surface)



Slika 3-31. Putanja napona ka liniji loma (collapse surface) tokom cikličnog opterećenja



Slika 3-32. Putanja napona za guste peskove tokom cikličnog opterećenja

Ova analiza se opciono može koristiti u okviru QuakeW gde označava elemente kao 'liquefied' i dodeljuje ovim elementima čvrstoću u stanju ravnoteže u analizi stabilnosti SlopeW ili naponsko-deformacijskoj analizi SigmaW.

Pri izboru ove analize, procedure i kriterijumi su sledeći:

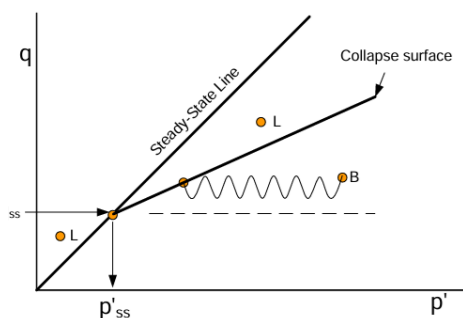
- Odnos q/p' je proračunat za svaki za svaki Gaussov region integracije unutar svakog elementa korišćenjem inicijalnih statičkih napona;

- Sve tačke na dijagramu q/p' iznad linije loma ili levo od linije ravnotežnog stanja (Steady State Line) su označene kao „liquefied“ pre nego što dinamička analiza počne (Tačke L, na slici 3-33).

- Tačke iznad q_{ss} , a ispod linije loma (iznad isprekidane linije na slici 3-33) mogu da se pomeraju ka liniji loma ili pored nje usled porasta pornih pritisaka pa se element označava kao ‘liquefied - tečenje’.

- Tačke napona ispod q_{ss} (ispod isprekidane linije na slici 3-27) nikada nisu označeno kao „liquefied - tečenje“ iako može doći do porasta pornih pritisaka. Implikacija je da se čvrstoća u stanju ravnoteže ne koristi za ove tačke naponskog stanja – efektivni parametri napona c' i ϕ' i koriste se umesto toga.

Generisanje pornih pritisaka je ograničeno tako da srednji efektivni napon p' nikada ne postane manji od p'_{ss} .



Slika 3-33. Zone likvefakcije u q - p' dijagramu

U programu QuakeW specificiraju se nagib linije loma i čvrstoća u stanju ravnoteže C_{ss} . Za ova dva parametra QuakeW proračunava q_{ss} , p'_{ss} i nagibe linije stanja ravnoteže - steady-state line (M) i linije loma (collapse surface line). Nagib linije ravnoteže (M) računa se prema formuli

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'}$$

Vrednost q_{ss} je 2 puta veća od navedenog C_{ss} . U QuakeW moguće je odrediti konture p' - q dijagrama za inicijalna stanja napona i odrediti zone likvefakcije. Neki elementi se označavaju kao ‘liquefied - tečenje’ pre dinamičke analize što ukazuje da ova područja imaju tako visok potencijal likvefakcije da bi bilo koja dinamička pobuda prouzrokovala tečenje materijala. Kramer i Seed (1988) su eksperimentalno utvrdili da material koji je izložen velikom inicijalnom smičućem naponu pri maloj dinamičkoj pobudi počinje da teče.

Fond podataka o nagibu linije loma je ograničen. U nedostatku podataka Kramer za čisti pesak, predlaže da se nagib linije loma usvoji kao $2/3 \phi'$. Nagib linije loma obično nije kritičan za dobijanje rešenja – rešenja su mnogo osetljivija na čvrstoću u stanju ravnoteže.

Pristup linije loma uzima u obzir inicijalno stanje napona i početno statičko smicanje na jasniji i logičniji način od faktora korekcije K_s i K_a .

U okviru QuakeW linija loma i čvrstoća u stanju ravnoteže se koriste za označavanje elemenata kod kojih se čvrstoća u stanju ravnoteže koristi u analizi stabilnosti SlopeW ili u analizi preraspodele napona SigmaW.

Usvajanje parametara za branu Slupčanka i deponiju Gradac

Za AB ekran i filterski materijal usvojeni su linearno elastični modeli za module smicanja za obe analize (LA i ELA), dok su za materijale u telu brane (kameni materijali 3B,3C,3D) moduli smicanja usvojeni kao zavisnost od vertikalnih efektivnih napona za konstitutivne modele LA i ELA. Za proračun stabilnosti brane pri dinamičkim uslovima, usvojeni su parametri smicanja kao linearno elastični model za sve materijale. – brana Slupčanka.

Tabela 3. Usvojeni parametri materijala-Brane Slupčanka

Br.	Zone tipskog poprečnog preseka	γ	Poason-ov koeficijent	G [MPa]	
		[kN/m ³]	ν	LA	ELA
1	AB ekran	25	0.2	12.5×10^6	12.5×10^6
2B	Filterski sloj	22	0.33	37	37
3A,3B,3C,3D	Potporno telo-kamen	23.5	0.3	Slika 3-16	Slika 3-14, Slika 3-16, Slika 3-18
1A	Polupropustljivo-nepropustljivo tlo	20	0.3	48	48
1B	Neselektovani nasuti materijal ($D_{max} = 40\text{cm}$)	22	0.22	25	25

Materijali u proračunu dinamičke analize usvojeni su kao linearno elastični konstitutivni model. Parametri materijala usvojeni su na osnovu istražnih radova i prikazani su u sledećoj tabeli:

Tabela 4. Parametri materijala – Linearno-elastični konstitutivni model (LA)
Gradac

GS	Ms (kPa)	E (kPa)	y (kN/m ³)	G [MPa]
GT1	19700	14600	16.5	Slika 3-15; Slika 3-17; Slika 3-20; Slika 3-21
GT2	14300	10600	17.3	
GT3	21000	15600	21	
GT5	16000	11900	21	
GT6	80000		25	
gabion	80000		23.5	
prekrivka	25000		20	

3.5 Matematički model za seizmičku otpornost brane

Do kraja 20. veka pseudostatička metoda je bila standardna metoda za procenu seizmičke otpornosti brane (metoda granične ravnoteže MGR). Analiza se svodi na određivanje faktora sigurnosti koji predstavlja odnos smičućeg napona τ_f i mobilisane smičuće čvrstoće τ_m ; $F_s = \tau_f / \tau_m$. U pseudostatičkoj analizi, opterećenje u slučaju zemljotresa definisano je preko seizmičkog koeficijenta a_g , koji predstavlja odnos između koeficijenta seizmičkog ubrzanja osnove a_g i ubrzanja tla g , tj: $k_s = a_g / g$. Ovaj pristup je primenljiv kod nižih faza projektovanja do nivoa Idejnog projekta (IDP-a). Predstavlja ulazni prametar za dalje analize odnosno utvrđivanje vrednosti pomeranja ukoliko su dobijeni niži F_s od 1.0.

Ukoliko se dobiju koeficijenti sigurnosti, primenom pseudostatičkog pristupa niži od 1.0 ne znači da je neophodno izvršiti ublažavanje kosia već je pseudostatikom ukazano na potrebu određivanja pomeranja. U tom slučaju potvrda sigurnosti brane u seizmičkim uslovima zavisi od permanentnih pomeranja koja je potrebno uraditi primenom dinamičke metode. Trajne deformacije nasutih brana, merodavne za procenu seizmičke otpornosti, zavise od dinamičke pobude u osnovi (maksimalno ubrzanje u osnovi, vreme trajanja i frekventni sastav zemljotresa) i dinamičkih karakteristika brane. iz tog razloga potvrda dinamičke stabilnosti brane za usvojeni poprečni presek (geometrija i raspored materijala) je moguća primenom dinamičke analize u vremenskom domenu, čime se dobija realan odgovor konstrukcije na seizmičku pobudu. Matematički model za seizmički odgovor nasutih brana za linearni konstitutivni zakon (LA i ELA) predstavlja prvi korak dinamičke analize u vremenskom domenu. Zatim rezultati napona za vreme trajanja zemljotresa treba da se koriste u matematičkom modelu za određivanje stabilnosti, da se utvrdi stabilnost i permanentna pomeranja konstrukcije.

Za ocenu stabilnosti konstrukcije pri dejstvu zemljotresa koristi se faktor sigurnosti F_s , koji zavisi od raspodele napona, koja se dobijaju metodom konačnih elemenata (MKE). Faktor sigurnosti predstavlja odnos sume raspoložive tangencijalne sile i mobilisane tangencijalne sile po površini klizanja potencijalnog kliznog tela:

$$F_s = \frac{\sum T_r}{\sum T_m} = \frac{\sum l\tau_r}{\sum l\tau_m}; \quad \tau_r = C + (\sigma_n - P) \tan \varphi$$

Normalni naponi (σ_n) i mobilisani naponi (τ_m) u centru lamele dužine "l" se računa kao f-ja komponentalnih normalnih i tangencijalnih ($\sigma_x \sigma_y \sigma_{xy}$) интерполирано из расподеле напона добијене са МКЕ, коришћењем sledećih formula:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\tau_m = \tau_{xy} \cos 2\theta - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta$$

Određivanje faktora sigurnosti primenom linearnog modela, raspoloživa tangencijalna čvrstoća duž površine klizanja se dobija od inicijalne statičke raspodele napona i održava se konstantna tokom seizmičke pobude. Primenom elastičnog modela (LA i ELA) ne može da se prati razvoj pornih pritisaka (pa ni efektivnih napona) tokom trajanja zemljotresa, tako da su parametri za lokalne materijale pretpostavljeni za totalne napone (u nedreniranim uslovima).

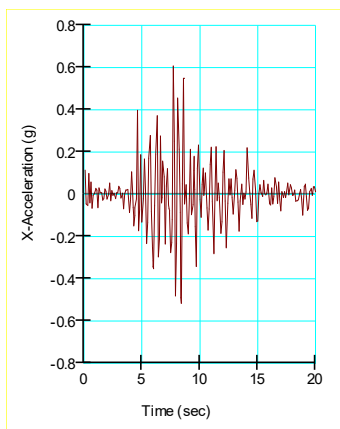
Mehanizam koji uslovljava klizanje kod nasutih brana formira se od povećanja smičućih napona, koji se generišu od dinamičke inercijalne sile za vreme trajanja zemljotresa. Ukoliko tangencijalni naponi prevazilaze otpornost na smicanje (duž karakteristične površine klizanja), faktor sigurnosti potencijalnog kliznog tjela je niži od 1.0. Međutim, ove vrednosti F_s manje od 1.0 koje su u funkciji vremena (u delovima sekunde), nemoraju značiti da je nestabilna cela kosina ukoliko su deformacije male i u prihvatljivim granicama. Ovako dobijene vrednosti ukazuju da je u kratkim vremenskim intervalima trajanja zemljotresa došlo do trajnih pomeranja. Kumulativni efekat ovih deformacija je trajno pomeranje potencijalnog kliznog tela tokom seizmičke pobude koje se može odrediti primenom Newmark-ove metode.

Drugi pristup se odnosi na određivanje trajnih deformacija tokom seizmičke pobude, ne samo za potencijalnu kliznu površ, već za bilo koju tačku u telu brane primenom metode „Dinamička deformaciona analiza“. Primenom nelinearnog modela u svakom vremenskom trenutku od dinamičkog odgovora konstrukcije se dobija nova raspodela napona.

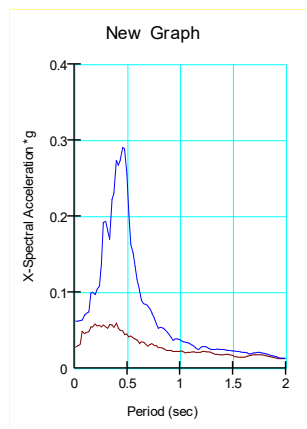
Razlikom napona u dva sukcesivna vremenska trenutka dobijaju se inkrementalne sile koje rezultiraju deformacijom, u saglasnosti sa izabranim konstitutivnim zakonom naponi-deformacije. Svaki slučaj opterećenja tokom dinamičkog odgovora brane izaziva elastične ili eventualno plastične deformacije. Trajna (permanentna) pomeranja bilo koje tačke u telu brane na kraju seizmičke pobude predstavljaju kumulativnu sumu plastičnih deformacija. Prednost primene dinamičke metode jeste što se može odrediti pomeranje u bilo kojoj tački objekta i tla tokom vremena kao i nakon prestanka zemljotresa.

4. DINAMIČKI ODGOVOR BRANE PRI DEJSTVU ZEMLJOTRESA

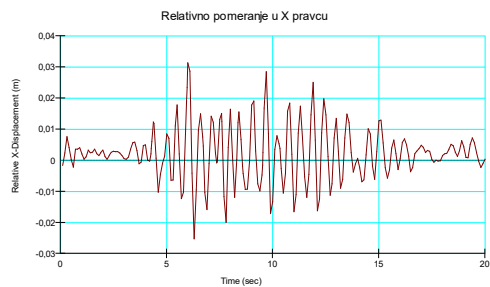
Za branu Slupčanka izvršeni su proračuni dinamičke analize za zemljotrese Z1 (OBE) i Z2 (MCE) za tri vremenska zapisa i za dva konstitutivna modela (LA i ELA). U okviru ovog rada prikazani su rezultati dinamičkog odgovora brane pri dejstvu sintetičkog zemljotresa za zemljotres Z2 (MCE) za Ekvivalentni linearni model (ELA).



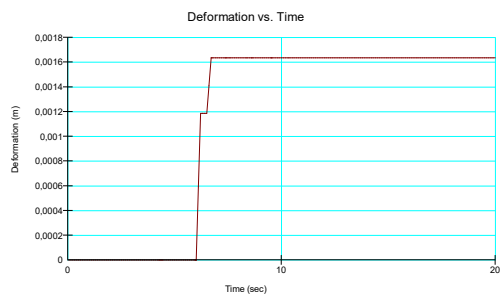
Slika 4-1. Akcelogram – apsolutno ubrzanje u f-ji vremena na krani brane u horizontalnom pravcu, PCA=0.606



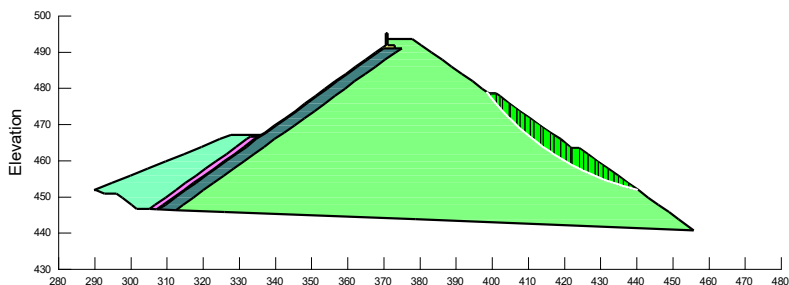
Slika 4-2. Spektar odgovora na mestu temeljnog tla (crvena linija) in a krani brane (plava linija)



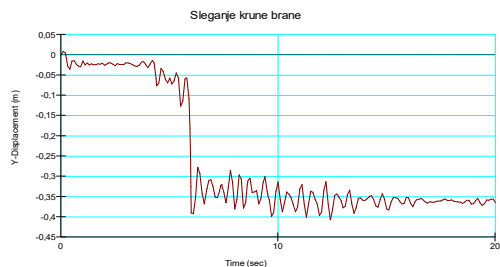
Slika 4-3. Relativno pomeranje krune brane u horizontalnom pravcu $x(m) \div t(s)$



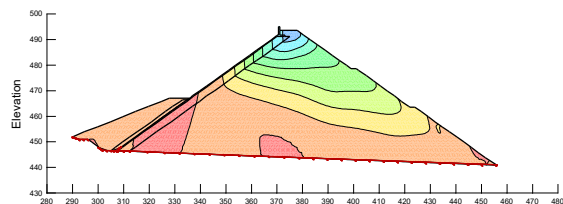
Slika 4-4. Permanentna pomeranja na nizvodnoj kosini – metoda Newmark-a
 $0.00163m$



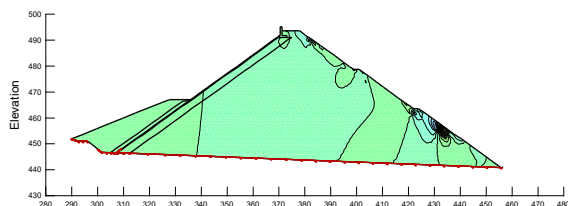
Slika 4-5. Kritična površina klizanja na nizvodnoj kosini



Slika 4-6. Permanentna sleganja $Y(m)-0.407 m \div t(s)$

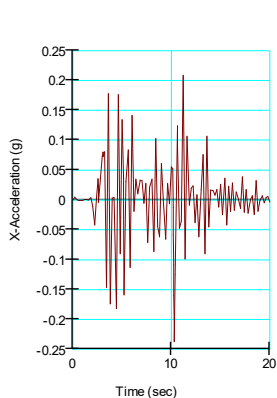


Slika 4-7. Sleganje $Y(m) \div t(s)$

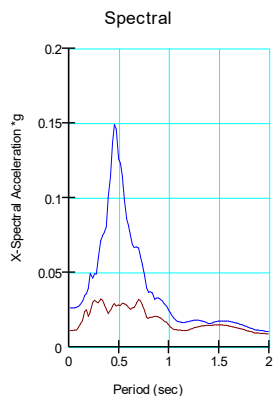


Slika 4-8. Posle zemljotresno sleganje nakon 30 % redukcije čvrstoće $Y(m)-0.00027m \div t(s)$

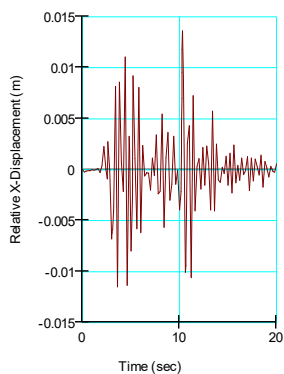
Za deponiju Gradac izvršeni su proračuni dinamičke analize za zemljotrese Z2 (MCE) za vremenski zapis Albatros i konstitutivni model (LA)



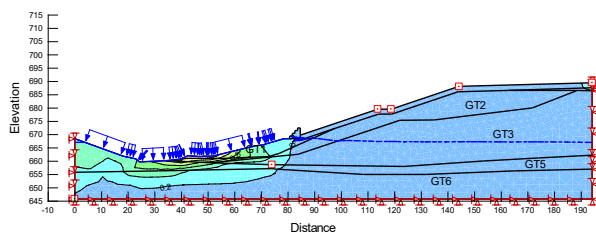
Slika 4-9. Akcelogram –ubrzanje u f-ji vremena na kruni brane u horizontalnom pravcu,



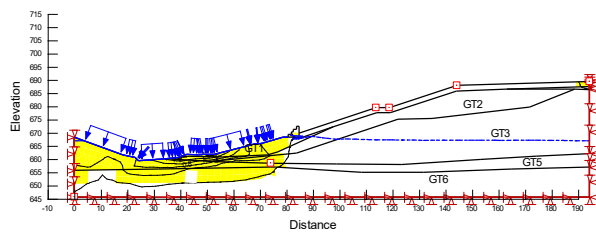
Slika 4-10. Spektar odgovora na mestu temeljnog tla (crvena linija) i na kruni brane (plava linija)



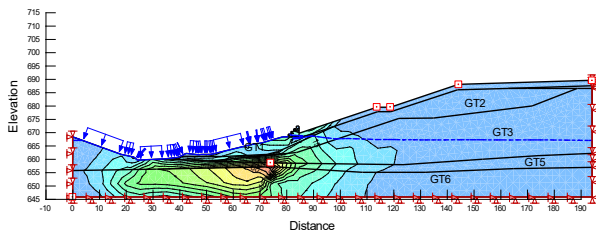
Slika 4-11. Relativno pomeranje krune brane u X pravcu Presek 3-3



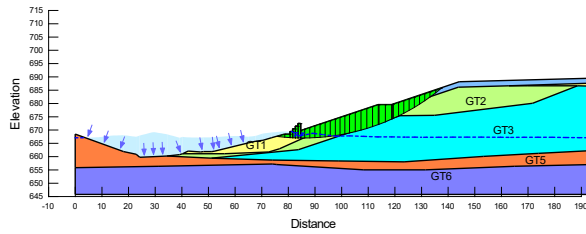
Slika 4-12. Cyclic Stress Ratio



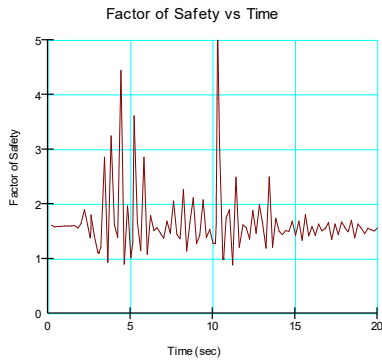
Slika 4-13. Moguće zone pojave likvefakcije



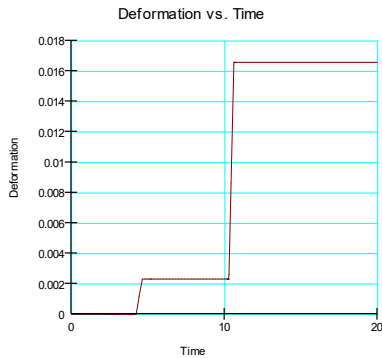
Slika 4-14. Porast pornog pritiska usled uticaja zemljotresa



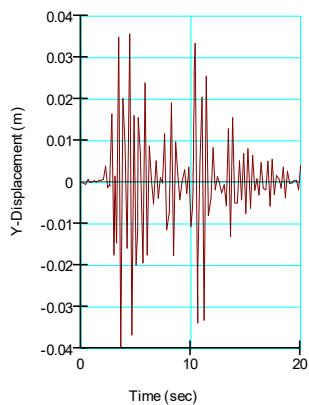
Slika 4-15. Kritična klizna površ –MKE (dinamički uslovi)



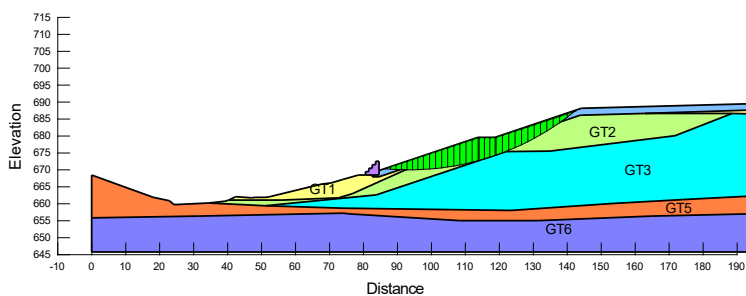
Slika 4-16. Faktor sigurnosti proračunat usled uticaja zemljotresa MKE,



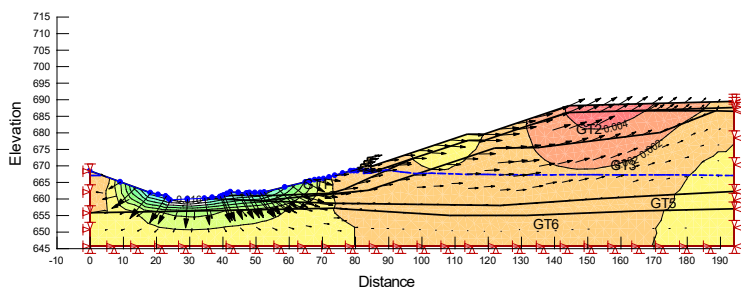
Slika 4-17. Newmark-ova pomeranja krutog bloka 1.6 cm



Slika 4-18. Permanentna sleganja krune brane $Y=3.96\text{cm}$



Slika 4-19. Kritična klizna površ za maksimalna Newmark-ova pomeranja



Slika 4-20. Permanentna pomeranja izazvana dejstvom zemljotresa

4.1 Zaključci dinamičke analize

Poređenje metoda proračuna pri seizmičkom dejstvu sumirano je u narednoj tabeli

	Pseudostatička analiza	Pojednostavljena dinamička analiza	Dinamička deformaciona analiza
Metoda proračuna stabilnosti određivanje F_s	Metoda granične ravnoteže	Metoda konačnih elemenata (MKE)	Metoda konačnih elemenata (MKE)
Opterećenje odnosno Inicijalno stanje	dinamičko dejstvo zemljotresa se zamenjuje inercijskom silom, kao ekvivalentnom statičkom silom, koja deluje na potencijalno klizno telo i jednaka je proizvodu težine kliznog tela i seizmičkog koeficijenta	Naponsko-deformacijski model Preraspodela napona tokom vremena	Naponsko-deformacijski model Preraspodela napona tokom vremena
Ubrzanje usled zemljotresa	Konstantna vrednost ubrzanja u zavisnosti od PGA	Akcelerogram (pobuda usled zemljotresa u funkciji vremena)	Akcelerogram (pobuda usled zemljotresa u funkciji vremena)
materijali	Smičuća čvrstoća (c' i ϕ')	Konstitutivni modeli EA, ELA i NA	Konstitutivni modeli EA, ELA i NA
Mogućnost proračuna pomeranja	NE	Permanentna pomeranje Newmark-ovog krutog bloka dvostrukom integracijom vremenske istorije ubrzanja za vrednosti ubrzanja veće od	Permanentna pomeranja bilo koje tačke tokom vremena. Određivanje pomeranja pre zemljotresa, tokom pobude i nakon prestanka zemljotresa za

		tzv. kritičnog ubrzanje	oslabljene karakteristike materijala
Proračun likvefakcije	NE	NE	DA
Primena za nivo projekta	Zaključno sa IDP-om	PGD i PZI	PGD i PZI
Rezultati proračuna	Dobijanje F_s za potencijalne klizne ravni. Nemogućnost uvođenja naponsko-deformacione analize kao i vremenskog zapisa zemljotresa. Daju indicaciju za proračunom pomeranja.	Određivanje F_s i trajnih pomeranja ograničeno za potencijalni klizni kruti blok. Proračini stabilnosti za naponsko – deformacijski model	Određivanje F_s i trajnih pomeranja u bilo kojoj tački tokom vremena.. Rezultati proračuna predstavljaju preraspodelu napona i deformacija u konstrukciji tokom trajanja i nakon prestanka zemljotresa. Dobijaju se kumulativna trajna pomeranja

Najpreciznija metoda određivanja stabilnosti konstrukcije i pomeranja usled dinamičkog opterećenja jeste Dinamička deformaciona analiza.

Dinamička analiza brane Slupčanka i deponije Gradac prikazana u ovom radu, rađena je kao potvrda stabilnosti brane pri dejstvu dinamičkih sila a primenjena je i za utvrđivanje mogućih zona likvefakcije unutar tela deponije Gradac usled seizmičkih uticaja. Odgovor heterogene geotehničke sredine na dejstvo zemljotresa, koja predstavlja složenu inženjersku konstrukciju najpreciznije se može odrediti primenom dinamičke metode.

Nezavisno od pseudostatičke analize proračunima prikazanim u okviru ovog rada procenjena je stabilnost brana u dinamičkim uslovima.

Za uticaj zemljotresa usvojen je kriterijum da minimalni faktori bezbednosti za kritičnu površinu klizišta moraju biti veći ili jednaki:

- Dozvoljeni faktor sigurnosti $F_{s,dop}=1.10$ za zemljotres OBE,
- Dozvoljeni faktor sigurnosti $F_{s,dop}=1.00$ za zemljotres MCE, ali pomeranja treba da budu u prihvatljivim granicama.

Ovakav kriterijum ne dozvoljava pomeranje nasutih brana ni za zemljotres MCE povratnog perioda 10 000 godina čime se obezbeđuje stabilnost i funkcionalnost brana.

Prema Pravilniku, dozvoljeni faktori sigurnosti $F_{s,dop}$ u dinamičkim uslovima mogu biti i niži od 1.0, s tim što pomeranja tela brane moraju biti u prihvatljivim granicama.

Proračuni za dinamičku analizu brane Slupčanka rađeni su za dva tipa zemljotresa: OBE (Z1) i MCE (Z2) a za deponiju Gradac za MCE (Z2). Razvijene su dve dinamičke analize: Linearna analiza i Ekvivalentna linearna analiza. U okviru dva zemljotresa Z1 i Z2 za branu Slupčanka analizirana su tri seizmička zapisa: sintetički zapis dobijen za profil (dat u Studiji seizmičkog hazarda od strane IZZIS-a), zapis El Centro i Albatros. Proračuni dinamičke stabilnosti brana na deponiji Gradac urađeni su za zemljotresai MCE (Z2). Rađene je linearna analiza (LA). U okviru zemljotresa Z2 razmatran je seizmički zapis Albatros-Ulcinj.

Rezultati odgovora brane i deponije pri dejstvu zemljotresa dati su u narednim tabelama. Oznake koje su prikazane u tabeli imaju sledeće značenje:

- **OBE (Z1) и MCE (Z2)** – predstavlja tipove analiziranih zemljotresa (amplitude i vreme trajanja) za različite povratne periode OBE(Z1) – Osnovni operativni zemljotres (Operating Basic Earthquake) sa povratnim periodom $T=145$ godina (Slupčanka),. MCE (Z2) – Maksimalan mogući zemljotres (Maximum Credible Eartquake) sa povratnim periodom od $T=10.000$ godina (Slupčanka) odnosno 475 godina (Gradac).

- **Sintetički El Centro и Албатрос zapisi** – vremenski zapis zemljotresa (akcelogram) za sintetički OBE-Z1 ($PGA=0.165$ g) i MCE-Z2 ($PGA=0.275$ g) zemljotres, $t=20$ s; vremenski zapis (akcelogram) za EL CENTRO zemljotres, OBE-Z1 ($PGA=0.165$ g) i MCE-Z2 ($PGA=0.275$ g), $t=20$ s; i vremenski zapis zemljotresaa (akcelogram) za Albatros zemljotres, OBE-Z1 ($PGA=0.165$ g) i MCE-Z2 ($PGA=0.275$ g), $t=20$ s

- **LA i ELA**– Tipovi dinamičke analize: LA linearna analiza i ELA - Ekvivalentna dinamička linearna analiza

- **PCA**-ubrzanje u kruni brane (u horizontalnom pravcu)-Peak Crest Acceleration

- **DAF – Dynamic Amplification Factor** $DAF=PCA/PGA$, PGA – Peak Ground Accelaration

- **X_N** –Horizontalno pomeranje kosine posmatrano po metodi Newmarkovog krutog bloka za kritični klizni krug (za maksimalna trajna pomeranja) izazvana seizmičkom silom tokom zemljotresa;

- **Y_{din}**. – Maksimalno permanentno sleganje krune brane dobijeno dinamičkom analizom izazvano od razlike napona u dva sukcesivna vremenska trenutka tokom seizmičke pobude
- **Y_r**– maksimalno pos-zemljotresno sleganje krune brane računato za preraspodeljene napone izazvane redukcijom čvrstoće materijala izloženog cikličnom dejstvu zemljotresa;
- **Y**– sumarno sleganje krune brane, sumarno permanentno sleganje i sleganje od preraspdele napona prouzrokovano redukcijom čvrstoće materijala (pos-zemljotresno sleganje).

Tabela 5. Brana Slupčanka – Vrednosti odgovora brane pri dejstvu zemljotresa: sintetičkog, El Centro i Albatros za OBE (Z1)- (PGA=0.165 g) - Slupčanka

ZEM LJOTRES Z1 - OBE						
	LA analiza			ELA analiza		
	sintetički	El Centro	Albatros	sintetički	El Centro	Albatros
PCA (g)	0.623	0.624	0.470	0.422	0.536	0.366
DAF	3.775	3.781	2.848	2.557	3.248	2.218
X _N (m))	0.0056	0.023	0.004	0.0095	0.091	0.049
Y _{din} (m)	0.508	0.702	0.353	0.534	0.698	0.370
Y _r (m)	0.0021	0.006	0.0044	0.0013	0.00046	0.0084
Y (m)	0,5101	0,708	0,3574	0,5353	0,69846	0,3784

Tabela 6. Brana Slupčanka – Vrednosti odgovora brane pri dejstvu zemljotresa: sintetičkog, El Centro i Albatros za OBE (Z2)- (PGA=0.275 g) -Slupčanka

ZEM LJOTRES Z2 - MCE						
	JIA analiza			ELA analiza		
	sintetički	El Centro	Albatros	sintetički	El Centro	Albatros
PCA (g)	0.721	0.726	0.523	0.606	0.817	0.556
DAF	2.622	2.640	1.902	2.203	2.971	2.022
X _N (m))	0.00043	0.0029	0.0033	0.00163	0.27	0.421
Y _{din} (m)	0.388	0.824	1.211	0.407	1.217	0.80
Y _r (m)	0.00066	0.00107	0.00026	0.00027	0.00984	0.0016
Y (m)	0,389	0,825	1,211	0,407	1,227	0,802

Tabela 7. Deponija Gradac - Vrednosti odgovora brane na dinamičke uslove, pri dejstvu zemljotresa Albatros za Z2-(PGA=0.1g)

Zemljotres Z2		
	LA Analiza-Albatros	
	Presek 3-3	Presek 5-5
PCA (g)	0.24	0.25
DAF	2.4	2.5
X N (cm)	1.60	0.57
Ydin(cm)	3.96	1.24

Klizanje kosine brane izazvano je porastom smičućih napona pri dejstvu dinamičkih inercijalnih sila za vreme trajanja zemljotresa. Ukoliko ovi naponi u nekoj zoni prevazilaze otpornost na smicanje materijala, izazivaju se permanentne deformacije. Kumulativan efekat ovih deformacija rezultira permanentnim deformacijama koje su izazvane dinamičkim dejstvom. Prilikom analize dinamičke stabilnosti za zemljotrese OBE i MCE zabilježeni su u nekim slučajevima faktori sigurnosti nešto niži od 1. Ovo znači da će u tim slučajevima doći do permanentnih pomeranja duž kosina brane.

Nastala klizna tela na nizvodnoj kosini brane **Slupčanka** imaju plitke ravni klizanja i ne mogu izazvati klizanje i deformaciju uzvodnog betonskog ekrana. Na uzvodnoj kosini brane, kada je kota akumulacija na nivou normalnog uspora, dobija se veći faktor sigurnosti od minimalno dozvoljenog, pa se može zaključiti da neće doći do trajnih pomeranja duž ekrana tokom zemljotresa. Newmark-ovom metodom dobijena su mala trajna pomeranja na nizvodnoj kosini (plitka klizna ravan). Dinamičkom deformacionom analizom dobijene su vrednosti sleganja krune brane, maksimalno 0,708 m za OBE zemljotres, odnosno 1,227 m za MCE zemljotres.

Dinamička analiza je obuhvatila i približan proračun sleganja nakon zemljotresa, koje bi izazvalo slabljenje materijala u brani kada je izloženo cikličnom dejstvu. Ovo pomeranje posle zemljotresa je izračunato smanjenjem krutosti materijala za 20%-30% i dalo je maksimum od 0,8 cm za OBE, ili 0,98 cm za MCE zemljotres. Seizmička otpornost brane Slupčanka na dejstvo zemljotresa potvrđena je primenom sofisticiranih metoda na dva načina:

- Geometrija potencijalnog kliznog tela koje neće ugroziti vodonepropusni element na brani (betonski ekran);

- Permanentna sleganja krune brane su manja od izmerene visine od kote normalnog uspora do kote vrha valobrana.

Relativna procena dinamičke krutosti karakterističnih materijala indirektno se može proceniti na osnovu rezultata dobijenih oskultacijama brane tokom njene eksploatacije. Postavljanjem akcelografa na kruni brane (najvišem mestu krune) kao i osnovnoj steni nizvodno od nožice brane mogu se registrovati akcelogrami prilikom pojave zemljotresa jačeg inteziteta. Na osnovu dobijenih podataka, može se izvršiti provera vrednosti dobijenih dinamičkom analizom odnosno tariranje i uspostavljanje novog matematičkog modela.

Generalni zaključak, nakon sprovedene dinamičke analize za branu Slupčanka, jeste da nasuta brana od zastupljenog kamena fundirana na čvrstoj steni, za usvojenu geometriju i rasporedom materijala poseduje prihvatljivu seizmičku otpornost.

Analiza stabilnosti **deponije Gradac** za dinamičke uticaje, koja je prikazana u ovom radu, predstavlja kvalitativnu analizu, čiji je cilj određivanje položaja potencijalnih kritičnih kliznih površi, odnosno definisanje verovatnog mehanizma po kome bi, za slučaj likvefakcije odloženog materijala koji je uglavnom sastavljen od prašiniastih peskova, došlo do razvoja pomeranja u telu deponije, i uticalo na njenu stabilnost i funkcionalnost. Materijal u telu nasipa tretiran je kao pesak koji je podložan likvefakciji za razliku od drenažnih materijala (kamen, krupan šljunak) i materijala kod kojih kohezija kao parametar smičuće čvrstoće utiče na njeno sprečavanje (glina).

Metodom Newmarka dobijena su mala permanentna pomeranja cm reda veličine (od 0.57 do 1.6 cm) za zemljotres Z2. Dinamičkom analizom dobijene su vrednosti sleganja krune brane maksimalno 3.96 cm za zemljotres Z2. Seizmička otpornost brana na deponiji Gradac zadovoljena je za projektovane sanirane kosine brane pri dejstvu zemljotresa.

Potencijal likvefakcije je neznatan i javlja se većinom u zoni korita reke. Deponija Gradac nakon sanacije i rekultivacije ima zanemarljiv potencijal likvefakcije. Sleganja krune deponije je malo kao i pomeranje Newmarkovog krutog bloka usled dejstva seizmičke sile.

Generalni zaključak dinamičke analize deponije Gradac jeste da nakon rekultivacije kosina i tela deponije, za usvojenu geometriju i raspored materijala, poseduju zadovoljavajuću seizmičku otpornost.

5. LITERATURA

- [1] Osnoven proekt za aiakumulacija na reka Slupčanska, Kњiga 3: dinamička analiza na branata (usoglasena verzija so revizija), Faza: hidrotehnika, Gradežen Institut Makedonija, Energoprojekt-Hidroinženjering a.d., dec. 2018. god.
- [2] Studija za seizmički hazard za profilot na brana Slupčanka, Univerzitet „Sv. Kiril i Metodij“ vo Skopje-Institut za zemjotresno inženerstvo i inženerska seizmologija-Skopje
- [3] Glavni projekat rekonstrukcije flotacionog jalovišta rudnika „Šuplja stijena“, Gradac u opštini Pljevlja, Kniga 4 Građevinski projekat, Sveska 4.1 Glavni projekat stabilizacije jalovišta, IRM Bor, Nik Com Nikšić,;
- [4] Glavni projekat rekonstrukcije flotacionog jalovišta rudnika „Šuplja stijena“, Gradac u opštini Pljevlja,, Knjiga 2- Podloge za Izradu Glavnog projekta – Sveska 2.2 – Elaborat detaljnih geoloških i geotehničkih istraživanja; IRM Bor, Nik Com Nikšić,;
- [5] Dynamic Modeling with QUAKE/W 2007, 2018, An Engineering Methodology, GEO-SLOPE International Ltd.
- [6] Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 and 1998 workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils; T. L. Youd, Member, ASCE, and I. M. Idriss, Fellow, ASCE
- [7] Concrete Face Rockfill Dams concepts for design and construction, ICOLD committee on materials for fill dams, November 2004
- [8] Eartfill dam design and analysis, Robert Jansen Washinton; Richard Kramer US Biro of Reclamation, Colorado; John Lowe III, New York; Steve Poulos, GEI, Massachusetts; Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation, (Chapter 9), Van Nostrand Reinhold-New York, 1988
- [9] Rockfill Dam-Design and Analysis, Thomas Leps, California, Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation,(Chapter 12),, Van Nostrand Reinhold-New York, 1988
- [10] Earthquake respons analysis of embankments dams I.M.Idriss, Oakland, California; J.M.Duncan, Virginia; Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation, (Chapter 8), Van Nostrand Reinhold-New York 1988
- [11] Tailings dams, Bulletin 97, International Commission on Large Dams, 1994

- [12] Concrete Face Rockfill Dams – Concept for design and construction, ICOLD committee of materials for fill dams, 2004
- [13] DeAlba, P., Chan, C.K., and Seed, H.B., 1975, Determination of Soil Liquefaction Characteristics By Large-Scale Laboratory Tests, Report EERC 75-14, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [14] Gu, W.H., Morgenstern, N.R., and Robertson, P.K. (1994). Post Earthquake Deformation Analysis of Wildlife Site, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol.120, No.2, pp. 333-349.
- [15] Gu, W.H. (1992). Post-earthquake Deformation Analysis, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
- [16] Hardin, B.O. and Vincent, P. D., 1972, Shear Modulus and Damping In Soils: Design Equations and Curves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, SM7, pp667-691.
- [17] Kramer, S.L. and Seed, H.B. 1988. Initiation of Soil Liquefaction under Static Loading Conditions, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 4, pp.412-430.
- [18] Kramer, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall.
- [19] Seed, H.B., Mori, K., and Chan, C.K., 1975, Influence of Seismic History On The Liquefaction Characteristics of Sands, Report EERC 75-25, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 21pp.
- [20] Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer, J., 1976, Pore-Water Pressure Changes During Soil Liquefaction, Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE, GT4, pp323-345.
- [21] Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams, by Steven G. Vick, John Wiley & Sons, New York, 1983, 369 p., ISBN 0-471-89829-5