

Primljen / Received: 4.9.2015.

Ispravljen / Corrected: 26.2.2016.

Prihvaćen / Accepted: 2.5.2016.

Dostupno online / Available online: 10.2.2017.

Istraživanje seizmičkog ponašanja betonskih gravitacijskih brana pomoću probabilističke analize

Autor:



Doc.dr.sc. **Majid Pasbani Khiavi**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Mohaghegh u Ardabili, Iran
Tehnički fakultet
pasbani@uma.ac.ir

Prethodno priopćenje

Majid Pasbani Khiavi

Istraživanje seizmičkog ponašanja betonskih gravitacijskih brana pomoću probabilističke analize

U radu se istražuje utjecaj modula elastičnosti betona na seizmičko ponašanje gravitacijske brane Koyna u Indiji pomoću probabilističke analize. Za analizu osnovnog scenarija koji se zasniva na interakciji brane, akumulacije i temelja, koristi se numerički model baziran na metodi konačnih elemenata. Rezultati pokazuju da modul elastičnosti bitno utječe na seizmičko ponašanje betonskih gravitacijskih brana. Rezultati analize prikazani su kao bilinearne krivulje.

Ključne riječi:

probabilistička analiza, betonska gravitacijska brana, Monte Carlo, metoda graničnih elemenata

Preliminary note

Majid Pasbani Khiavi

Investigation of seismic performance of concrete gravity dams using probabilistic analysis

The effect of the modulus of elasticity of concrete on seismic behavior of Koyna gravity dam in India is studied in the paper using probabilistic analysis. Numerical model based on the finite element method is used to analyse the base-case scenario involving the dam-reservoir-foundation interaction. The results show that the modulus of elasticity significantly affects seismic behaviour of concrete gravity dams. The results of the analysis are presented as bilinear curves.

Key words:

probabilistic analysis, concrete gravity dam, Monte Carlo, finite element method

Vorherige Mitteilung

Majid Pasbani Khiavi

Untersuchung des seismischen Verhalten von Betongewichtsstaumauern mittels probabilistischer Analyse

In dieser Arbeit wird mittels probabilistischer Analyse der Einfluss des Elastizitätsmoduls des Betons auf das seismische Verhalten der Gewichtsstaumauer Koyna in Indien untersucht. Zur Analyse des Grundscenarios, das auf der Interaktion zwischen Staumauer, Akkumulation und Foundation beruht, wird ein auf der Finite-Elemente-Methode beruhendes numerisches Model verwendet. Die Resultate zeigen, dass sich das Elastizitätsmodul bedeutend auf das seismische Verhalten von Betongewichtsstaumauern auswirkt. Die Resultate der Analyse sind als bilineare Kurven dargestellt.

Schlüsselwörter:

probabilistische Analyse, Betongewichtsstaumauern, Monte Carlo, Randelementmethode

1. Uvod

Gravitacijske brane nalazimo u svim dijelovima svijeta, a neke od njih su smještene i u seizmički aktivnim područjima. Čak i danas postoji potreba za gradnjom gravitacijskih brana u potresnim područjima, i to naročito zbog sve veće potrebe za vodom te radi zaštite od poplava. S druge strane, preciznost ocjene rizika za postojeće brane, isto kao i uspješno projektiranje budućih brana, u velikoj mjeri ovisi o dobrom razumijevanju njihovog ponašanja nakon potresnog udara. Kako posljedice popuštanja brane mogu biti nesagledive, općenito je prihvaćeno da se izuzetno odgovorno treba odnositi prema seizmičkom projektiranju takvih građevina. Stoga istraživanje seizmičkog ponašanja brana i dalje ostaje jedno od ključnih pitanja kojima se bavi inženjerska struka [1-3].

Neki od značajnih aspekata koji mogu utjecati na seizmički odziv gravitacijskih brana mogu se analizirati kroz interakciju između brane, akumulacije i temelja. Interakcija između brane i vode mora se uzeti u obzir jer u brani dolazi do deformacija, a to utječe na strujanje vode u akumulaciji. Interakcija između brane i akumulirane vode dovodi do povećanja periode vibracija u brani. Ta se pojava javlja zato što se brana ne može pomicati bez prostorne varijabilnosti tangente vode. Voda koja se kreće duž brane povećava ukupnu masu koja se pomiče uslijed djelovanja potresa. Zbog dodatne mase raste i period prirodnih vibracija brane, što utječe na sile inercije koje nastaju nakon potresnog djelovanja [3-4].

Kontakt brane i vode predstavlja bitan rubni uvjet na kojoj statičke i hidrodinamičke sile djeluju na konstrukciju brane. Te sile uvelike pomažu u analizi seizmičkog odziva pa tako i u projektiranju brana. Maksimalni hidrodinamički tlak koji se javlja u brani pri djelovanju potresa srednje jačine može doseći magnitudu hidrostatičkog tlaka [4-6].

Seizmičko ponašanje brana u odnosu na interakcijska djelovanja ovisno je o nekim parametrima neizvjesnosti. Posebna betonska svojstva koja treba uzeti u obzir pri projektiranju betonskih gravitacijskih brana uključuju između ostalog i jediničnu težinu, tlačnu, vlačnu i posmičnu čvrstoću, modul elastičnosti, puzanje, Poissonov koeficijent, koeficijent linearnog toplinskog rastezanja, toplinsku provodljivost, specifičnu toplinu i difuzivnost. Od tih svojstava, upravo se modul elastičnosti smatra najznačajnijim za projektiranje brana. Naime, modul elastičnosti glavni je faktor koji djeluje na čvrstoću betona. Čvrstoća betona treba udovoljavati zahtjevima ranog opterećenja i građenja, isto kao i zahtjevima koji se odnose na naprezanje. Stoga je odabir optimalne vrijednosti modula elastičnosti izuzetno značajan za projektiranje betonskih gravitacijskih brana.

U radu se probabilistička analiza i analiza osjetljivosti koristi u svrhu određivanja modula elastičnosti betona kao parametra koji bitno utječe na seizmičko ponašanje gravitacijskih brana. Kao postupak probabilističke analize za određivanje intenziteta utjecaja parametara na seizmičko ponašanje betonskih gravitacijskih brana koristi se simulacija Monte Carlo s određivanjem uzorka na bazi latinske hiperkocke (na engl.

latin hypercube sampling, LHS). Simulacije Monte Carlo obično karakterizira velik broj nepoznatih parametara, od kojih se mnogi teško mogu odrediti eksperimentalnim putem. Neki od parametara koji se koriste u seizmičkoj analizi betonskih brana su modul elastičnosti betona, gustoća betona te modul elastičnosti temeljnog tla ili temelja. Parametarska analiza osjetljivosti može se primijeniti za kvantificiranje utjecaja nepoznatih parametara. Kada se primjenjuje za ocjenjivanje rizika, analiza osjetljivosti ovisi o varijabilnosti i nepouzdanosti faktora koji pridonose veličini rizika. Ukratko, analizom osjetljivosti određuje se što utječe na procjenu rizika. Ona se koristi za procjenu točaka i probabilističkih pristupa u svrhu određivanja i rangiranja značajnih izvora varijabilnosti i nesigurnosti. Kvantitativne vrijednosti dobivene analizom osjetljivosti značajne su za rješavanje složenih pitanja u analizi te za definiranje značajnih rezultata. U analizi osjetljivosti naglasak se stavlja na niz grafičkih i statističkih postupaka koji se mogu koristiti za određivanje onih varijabli u modelu rizika koje najviše pridonose variranju procjena rizika. To variranje rizika moglo bi se odnositi i na variranje i na nesigurnost, što ovisi o vrsti modela rizika i karakterizaciji ulaznih varijabli [7].

Simulacijska metoda Monte Carlo najrašireniji je postupak za provođenje probabilističkih analiza. Jedna simulacijska petlja predstavlja komponentu sustava na koju utječe određeni niz opterećenja i rubnih uvjeta. Metoda se može koristiti u svim slučajevima i to bez obzira na vrstu fizikalnog djelovanja koje se modelira u analizi konačnih elemenata. Pod pretpostavkom da je deterministički model ispravan te da je proveden velik broj simulacijskih petlji, postupcima Monte Carlo uvijek se postižu točni probabilistički rezultati. Simulacije Monte Carlo mogu se provoditi bilo pomoću metode izravnog određivanja uzorka ili određivanjem uzorka na bazi latinske hiperkocke (LHS). Simulacije Monte Carlo pomoću postupka LHS mogu se poboljšati na način opisan u radu McKay i dr. [8]. Određivanje uzorka na bazi latinske hiperkocke (LHS) može se opisati kao shema višeslojnog određivanja uzorka koja je tako definirana da je na odgovarajući način predstavljen gornji ili donji kraj distribucija koje se koriste u analizi. Postupak LHS obično se koristi umjesto postupka izravnog određivanja uzorka kada se radi o kompleksnom modelu ili kada je postupak ograničen vremenom i dostupnim resursima [8]. Po svojoj koncepciji, LHS ne određuje veličinu uzorka koji je potreban za postizanje određene razine sigurnosti. Dakle, nije definirana vrijednost veličine uzorka N koja omogućuje postizanje određene razine sigurnosti primjenom postupka LHS [9].

Određivanjem uzorka N na bazi distribucije parametara, ovim se postupkom oblikuje skup mogućih slučajeva u konstrukciji N , od kojih se svaki treba analizirati. Primjenom relativno velike veličine N , koja bi trebala biti bitno veća od broja parametara, uvijek se mogu dobiti procjene koje su dovoljno precizne za primjenu u praksi. Optimalna vrijednost N ovisi o broju slučajnih varijabli i o njihovom utjecaju na odziv [10].

U ovom se istraživanju provodi analiza Monte Carlo primjenom postupka LHS, a odabrana je vrijednost $N = 30$ da bi procjena

bila dovoljno precizna. Također je određena i osjetljivost ponašanja brane u odnosu na osnovni parametar. Za te je potrebe kao primjer služila brana Koyna u Indiji, a čitava je analiza provedena pomoću metode konačnih elemenata u vremenskoj domeni. Utjecaj modula elastičnosti betona na seizmičko ponašanje gravitacijske brane također je analiziran primjenom probablističke analize i analize osjetljivosti.

2. Mjerodavne jednadžbe

U ovom se poglavlju zasebno formuliraju konstrukcijski i hidrodinamički aspekti problema za model osnovnog slučaja. Brana i temelji usvojeni su kao elastično kruto tijelo koje je podložno linearnom i ravninskom naprezanju. Pretpostavljeno je da je voda stišljiv i neviskozozan fluid, te da je brana elastično kruto tijelo [11-13]. Potrebno je napomenuti da se brana i temelji razlikuju po materijalnim karakteristikama kao što su modul elastičnosti, gustoća i Poissonov koeficijent. Dakle, brana i temelji smatraju se konstrukcijskim dijelom sustava te se modeliraju zajedno ali s relativnim materijalnim karakteristikama.

2.1. Model brane i temelja

Mjerodavna jednadžba za model brane i temelja jest jednadžba gibanja. Međutim, da bi se u potpunosti opisao problem interakcije između fluida i konstrukcije, jednadžbi konstrukcije dodano je i tlačno opterećenje fluida koje djeluje na kontaktu. To je napravljeno zato što se brana i temelji pomiču u skladu s prostornom varijabilnošću tangente vode. Pomak vode dovodi do porasta ukupne mase i inercije u slučaju seizmičkog djelovanja [11-13]. Stoga se jednadžbe sustava na koji djeluje gibanje tla i akumulacija iskazuju kako slijedi:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = M\ddot{u}_g + F^{Pr} \quad (1)$$

gdje je:

M - matrica mase

C - matrica prigušenja konstrukcije

K - matrica krutosti konstrukcije.

Vrijednost K dobiva se iz matrice materijala i deformacije-pomaka, a vrijednost C je proporcionalna matrici mase i krutosti prema Rayleighovoj metodi [14-15]. Vrijednost \dot{u} je vektor pomaka u odnosu na tlo, je vektor brzine, a \ddot{u}_g je vektor ubrzanja tla. Opterećenje pritiskom fluida F^{Pr} na kontaktu između brane i akumulacije i između temelja i akumulacije inducirano je zbog interakcije, a dobiva se integriranjem hidrodinamičkog tlaka uzduž kontaktne linije vode i brane, odnosno temelja, po jedinici dužine površine. Hidrodinamički tlak je induciran na kontaktu krutog tijela i fluida zbog sljedećeg rubnog uvjeta [16-18]:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho_w a_n \quad (2)$$

gdje je:

n - unutarnji normalni smjer prema kontaktu

a_n - normalna komponenta ubrzanja

ρ_w - gustoća mase vode.

2.2. Model akumulacije

Kada se radi o problemima interakcije fluida i konstrukcije, treba se analizirati jednadžba dinamike konstrukcija isto kao i Eulerove jednadžbe očuvanja mase (jednadžba kontinuiteta) i količine gibanja za fluid. Ako pretpostavimo da je voda u akumulaciji neviskozozna, stišljiva i bezvrtložna, te da je amplituda strujanja niska, jednadžbe očuvanja mase i količine gibanja za fluid mogu se pojednostavniti da bi se dobila sljedeća jednadžba širenja akustičnog poremećaja [16-18]:

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \quad (3)$$

gdje je:

C - brzina zvuka u fluidu

P - hidrodinamički tlak.

Kako je zanemarena viskozna disperzija, jednadžba (3) povezuje se s jednadžbom širenja valova zvuka u bezviskoznom fluidu. Diskretizirana jednadžba konstrukcije i valna jednadžba trebaju se analizirati istovremeno pri rješavanju problema interakcije fluida i konstrukcije. Smatra se da tlak fluida koji djeluje na konstrukciju na kontaktu između fluida i konstrukcije dovodi do formiranja matrice kontaktne krutosti. Na gornjem dijelu akumulacije korišten je Sommerfeldov rubni uvjet. Taj rubni uvjet podrazumijeva prigušenje na kraju akumulacije, kao što se vidi iz sljedeće jednadžbe (4), prema [17-18]:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \frac{1}{C} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4)$$

gdje je:

C - brzina širenja zvuka kroz vodu

n - vanjski normalni smjer prema kraju akumulacije.

3. Formulacija konačnih elemenata

Jednadžbe mjerodavne za sustav fluid-građevina mogu se izraziti u matricnom obliku pomoću metode konačnih elemenata [14]. Da bi se u potpunosti opisao problem interakcije fluida i građevine, jednadžbi konstrukcije dodaje se sada i tlak fluida koji djeluje na kontaktu. Konačni element kojim se aproksimiraju funkcije oblika za prostorne varijacije komponenata pomaka mogu se opisati kako slijedi [15]:

$$u = \{N\}^T \{u_e\} \quad (5)$$

$$P = \{N\}^T \{P_e\} \quad (6)$$

gdje su:

- $\{N\}$ i $\{N'\}$ - funkcije oblika elemenata za tlak i pomake
- $\{P_e\}$ - vektor čvornog tlaka
- $\{u_e\}$ - vektor komponente čvornog pomaka.

Na temelju jednadžbi (5) i (6), prva i druga vremenska derivacija varijabli i virtualna promjena tlaka mogu se iskazati kako slijedi:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \{u\} = \{N'\}^T \{\ddot{u}_e\} \tag{7}$$

$$\delta P = \{N'\}^T \{\delta P_e\} \tag{8}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \{N'\}^T \{\ddot{P}_e\} \tag{9}$$

$$\delta P = \{N'\}^T \{\delta P_e\} \tag{10}$$

3.1. Model konačnih elemenata za branu i temelje

Diskretizirana jednadžba dinamike konstrukcija može se formulirati pomoću konstrukcijskih elemenata. Jednadžba konstrukcije ovdje je ponovno napisana kako slijedi, prema [15]:

$$[M_e] \{\ddot{u}_e\} + [C_e] \{\dot{u}_e\} + [K_e] \{u_e\} = \{F_e\} + \{F_e^{Pr}\} \tag{11}$$

$$\{F_e^{Pr}\} = \int_s \{N'\} P \{n\} ds \tag{12}$$

$$\{F_e^{Pr}\} = \int_s \{N'\} \{N\}^T \{n\} ds \{P_e\} \tag{13}$$

$$\{F_e^{Pr}\} = [R_e] \{P_e\} \tag{14}$$

$$[M_e] \{\ddot{u}_e\} + [C_e] \{\dot{u}_e\} + [K_e] \{u_e\} - [R_e] \{P_e\} = \{F_e\} \tag{15}$$

gdje su:

$$[M_e^P] = \frac{1}{C^2} \int_V \{N\} \{N\}^T dV \text{ - matrica mase krutog tijela}$$

$$[K_e^P] = \int_V \{B\}^T [B] dV \text{ - matrica krutosti krutog tijela}$$

$$[B'] = \{L'\} \{N'\}^T \text{ - matrica deformacije - pomaka}$$

$$\{L'\} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \right] \text{ - operator matrice za funkcije oblika elemenata}$$

$$\{F_e\} \text{ - sila seizmičkog opterećenja}$$

$$\rho_0 [R_e]^T \{u_e\} = \rho_0 \int_s \{N\} \{n\}^T \{N'\} ds \text{ - matrica interakcije fluida i konstrukcije}$$

ρ - gustoća betona

[C] - materijalna matrica elementa ravninskog napreznja.

3.2. Model konačnih elemenata za akumulaciju

Operator matrice $\{L\} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \right]$ koji se odnosi na funkciju oblika elementa $\{N\}$ definiran je kako slijedi, prema [15]:

$$[B] = \{L\} \{N\}^T \tag{16}$$

Dakle, iskaz konačnih elemenata za valnu jednadžbu prikazan je na sljedeći način:

$$\int_s \rho_0 \{\delta P_e\}^T \{N\} \{n\}^T \{N'\} ds \{u_e\} = 0 \tag{17}$$

gdje je $\{n\}$ normalni vektor na granici kontakta između brane i akumulacije i temelja i akumulacije.

Članovi koji ne variraju ovisno o elementu isključeni su iz integracije. $\{\delta P\}$ je proizvoljno uvedena virtualna promjena čvornog tlaka, a može se odvojiti od faktora u jednadžbi (17). Kako vrijednost $\{\delta P\}$ nije jednaka nuli, jednadžba (17) mijenja se u:

$$\frac{1}{C^2} \int_V \{N\} \{N\}^T dV \{\ddot{P}\} + \int_V \{B\}^T [B] dV \{P_e\} + \rho_0 \int_s \{N\} \{n\}^T \{N'\} ds \{u_e\} = 0 \tag{18}$$

Jednadžba (18) može se iskazati kao matrica da bi se dobila diskretizirana valna jednadžba

$$[M_e^P] \{\ddot{P}_e\} + [K_e^P] \{P_e\} + \rho_0 [R_e]^T \{u_e\} \tag{19}$$

gdje su:

ρ_0 - gustoća vode

$$[M_e^P] = \frac{1}{C^2} \int_V \{N\} \{N\}^T dV \text{ - matrica mase fluida}$$

$$[K_e^P] = \int_V \{B\}^T [B] dV \text{ - matrica krutosti fluida}$$

$$\rho_0 [R_e]^T \{u_e\} = \rho_0 \int_s \{N\} \{n\}^T \{N'\} ds \text{ - matrica mase za interakciju fluida i konstrukcije.}$$

Postupci diskretizacije konačnih elemenata i numeričke vremenske integracije, koji su razvijeni u prethodnoj točki, uneseni su u model konačnih elemenata. U tom modelu hidrodinamički tlak, pomak krutog tijela i napreznja predstavljaju čvorne varijable koje su nepoznate. U ovom se radu za rješavanje diskretiziranih dinamičkih jednadžbi primjenjuje Newmarkova metoda. Tijekom postupnog rješavanja baziranog na Newmarkovoj metodi integracije treba:

- odrediti matricu krutosti K, matricu mase M i matricu prigušenja C
- odrediti vremenski korak Δt i parametre α i δ te izračunati integracijske konstante [15]:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}, a_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}, a_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}, a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$$

$$a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1, a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right), a_6 = \Delta t (1 - \delta), a_7 = \delta \Delta t$$

- odrediti matricu efektivne krutosti: $\bar{K} = K + a_0 M + a_1 C$
- postaviti triangulaciju: $K : \bar{K} = LDL^T$
- za svaki vremenski korak izračunati efektivna opterećenja u vremenu $t + \Delta t$:

$$\bar{F}_{t+\Delta t} = F_{t+\Delta t} + M(a_0 u_t + a_2 \dot{u}_t + a_3 \ddot{u}_t) + C(a_1 u_t + a_4 \dot{u}_t + a_5 \ddot{u}_t)$$

- riješiti za pomak i tlak u vremenu $t + \Delta t$: $LDL^T u_{t+\Delta t} = \bar{F}_{t+\Delta t}$ ili $LDL^T P_{t+\Delta t} = \bar{F}_{t+\Delta t}$
- izračunati ubrzanje i brzinu u vremenu $t + \Delta t$:

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = a_0 (u_{t+\Delta t} - u_t) - a_2 \dot{u}_t - a_3 \ddot{u}_t$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + a_6 \ddot{u}_t + a_7 \ddot{u}_{t+\Delta t}$$

gdje je:

Δt - vremenski korak

α i δ - parametri koji se mogu odrediti da bi se dobila točnost i stabilnost integracije.

Kada je $\alpha = 0,25$, a $\delta = 0,5$, tada je Newmarkova metoda bezuvjetno stabilna [15]. Stoga su te vrijednosti u ovom radu odabrane kao integracijske konstante.

4. Primjer

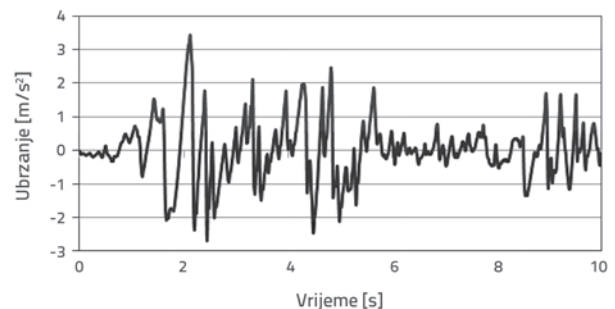
Da bi se dokazala djelotvornost analitičkog postupka prikazanog u ovom radu i utjecaj modula elastičnosti na seizmičko ponašanje betonskih gravitacijskih brana, u nastavku se prikazuje odziv brane Koyna na horizontalnu i vertikalnu komponentu potresa El Centro.

Brana Koyna je jedna od najvećih brana na rijeci Koyna u oblasti Maharashtra koja se nalazi u zapadnom dijelu Indije. U novije je vrijeme brana izdržala udare brojnih potresa. Ova velika građevina smještena je u seizmičkom području Maharashtra pa se stoga može smatrati idealnom lokacijom za praćenje deformacija. Na građevinu djeluju pomaci u podtlu, sezonske promjene dotoka vode u akumulaciju te seizmička aktivnost u regiji. Stoga mnogi istraživači odabiru spomenutu branu kao primjer za analize seizmičkih djelovanja i rizika.

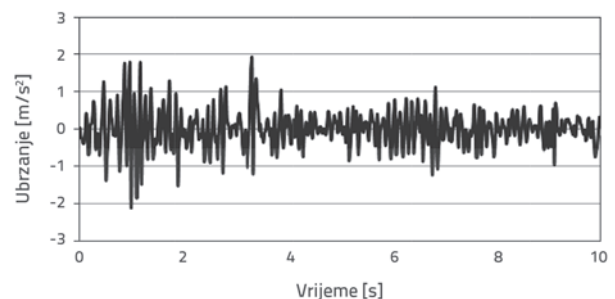
Potres El Centro (ili potres Imperial Valley) zadesio je 18. svibnja 1940. područje Imperial Valley koje se nalazi u južnoj Kaliforniji u blizini državne granice između SAD-a i Meksika. To je bio prvi veći potres koji je zabilježen pomoću seizmografa smještenog uz rasjedno područje. Potres je opisan kao tipični destruktivni događaj srednje veličine, sa složenim otpuštanjem energije. To je bio najjači potres koji je pogodio područje Imperial Valley. Uzrokovao je znatne štete na sustavima za navodnjavanje, i u njemu je poginulo devet osoba. Potres El Centro obično služi kao primjer za ocjenjivanje seizmičkog djelovanja i seizmičke otpornosti građevina.

Slike 1. i 2. pokazuju razdoblje od deset sekundi horizontalne i vertikalne komponente potresa El Centro koje je odabrano u

svrhu seizmičke analize. Usvojene vrijednosti integracijskih parametara prema Newmarkovoj metodi iznosile su $\alpha = 0,25$ i $\delta = 0,5$, dok je vremenski korak (Δt) iznosio 0,02 sekunde.

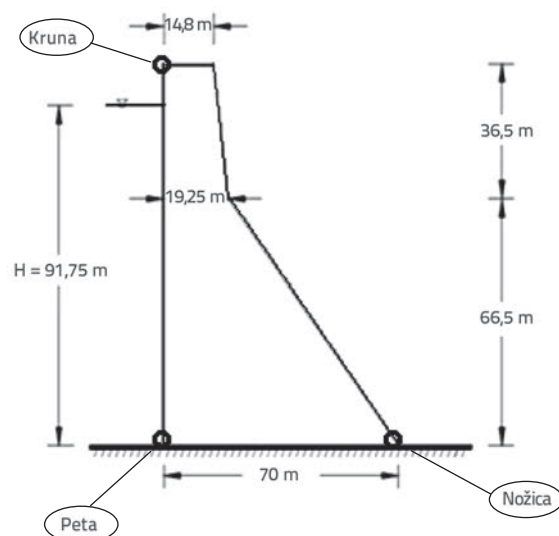


Slika 1. Horizontalna komponenta potresa El Centro

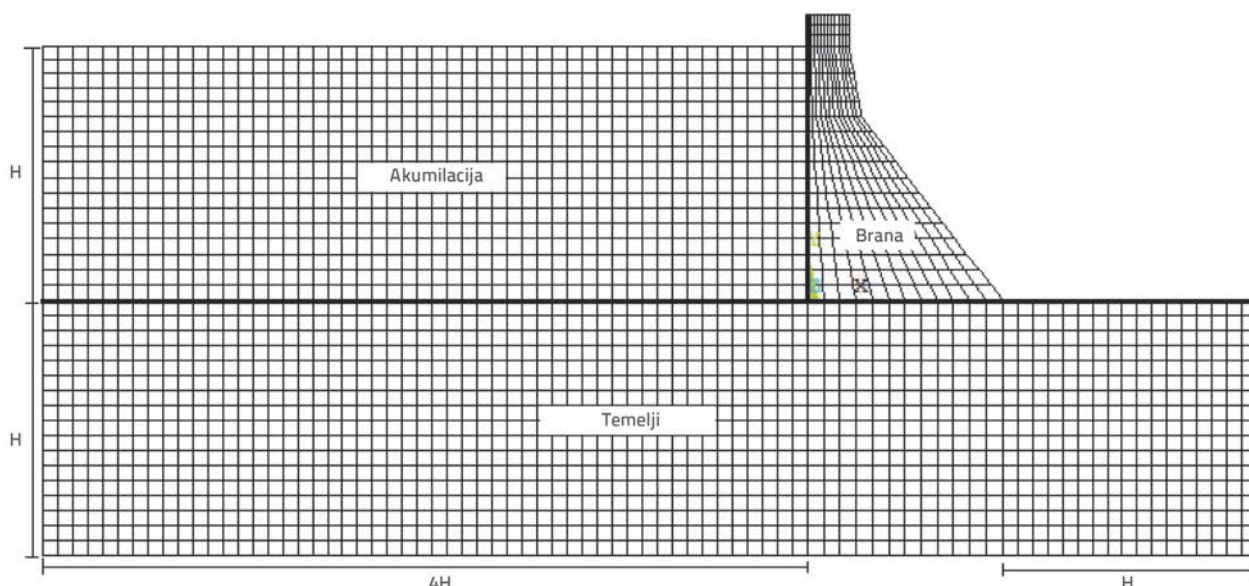


Slika 2. Vertikalna komponenta potresa El Centro

Slike 3. i 4. prikazuju geometriju brane Koyna i diskretizaciju konačnih elemenata sustava brana - akumulacija - temelji. Broj podjela u horizontalnom i vertikalnom smjeru iznosi 12 x 17 za branu, 51 x 17 za akumulaciju te 80 x 17 za temelje.



Slika 3. Geometrijski presjek betonske brane Koyna [16]



Slika 4. Model konačnih elemenata sustava brana - akumulacija - temelji

Za konstrukciju brane usvojene su sljedeće vrijednosti modula elastičnosti, gustoće i Poissonovog koeficijenta za beton: 20,7 GPa, 2643 kg/m³ i 0,2. Za temelje su usvojene vrijednosti modula elastičnosti (16,86 GPa) i Poissonovog koeficijenta (0,2). Što se tiče akumulacije, usvojene su vrijednosti gustoće vode (1000 kg/m³) i modula kompresije (2,1 GPa) [16].

U analizi su korišteni krutost i proporcionalno prigušenje mase (Rayleighovo prigušenje). Brzina tlačnih valova u vodi iznosila je 1438.66 m/s.

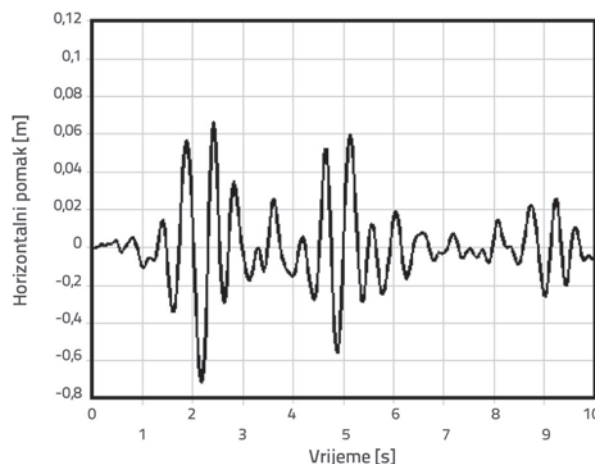
Za opis rasapa ulaznih podataka primijenjena je osnovna i vrlo često korištena lognormalna raspodjela. Lognormalna raspodjela izuzetno je pogodna za rješavanje pojava koje proizlaze iz multiplikacije velikog broja efekata greške. Ta se raspodjela također može koristiti i za slučajne varijable koje proizlaze iz multiplikacije dvaju ili više slučajnih efekata [7, 19, 20].

Simulacije koje su provedene u ovom radu sastojale su se od trideset simulacija po slučajnom sjemenskom broju. Te su simulacije uključivale simulaciju osnovnog slučaja pri čemu je usvojeno da modul elastičnosti (E_c) iznosi 20,7 GPa. Vrijednosti maksimalnog horizontalnog pomaka na kruni brane, prvog osnovnog naprezanja na peti brane te trećeg osnovnog naprezanja na nožici brane, predstavljaju kritične odzive tijekom potresa te su odabrane kao izlazni parametri na koje djeluje E_c . Istražena je i njihova osjetljivost.

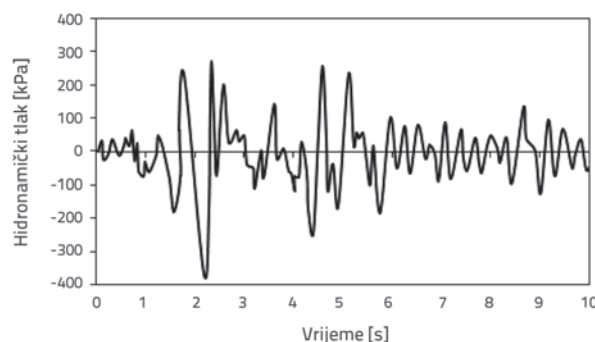
5. Analiza modela

Najprije je analiziran model osnovnog slučaja. Zatim je provedena probabilistička analiza da bi se iskazao utjecaj variranja modula elastičnosti u odnosu na seizmičko ponašanja sustava brana-akumulacija-temelji. Na slikama od 5 do 8 prikazani su rezultati dobiveni tijekom dinamičkog vremenskog proračuna za model osnovnog slučaja pri čemu je korištena srednja vrijednost

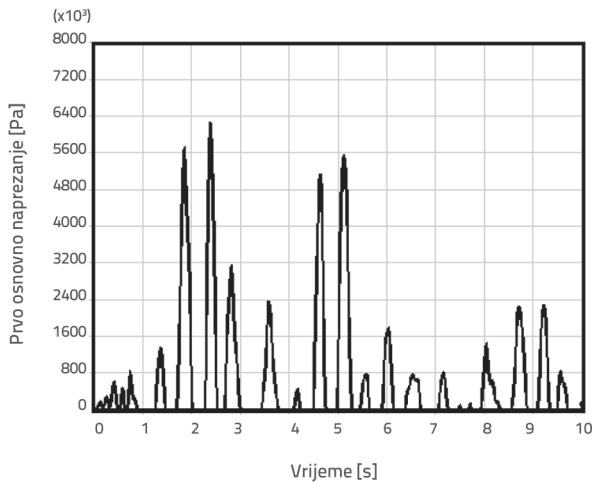
modula elastičnosti. Na slici 5. pozitivne i negativne vrijednosti horizontalnog pomaka označavaju pomake krune brane u nizvodnom i uzvodnom smjeru.



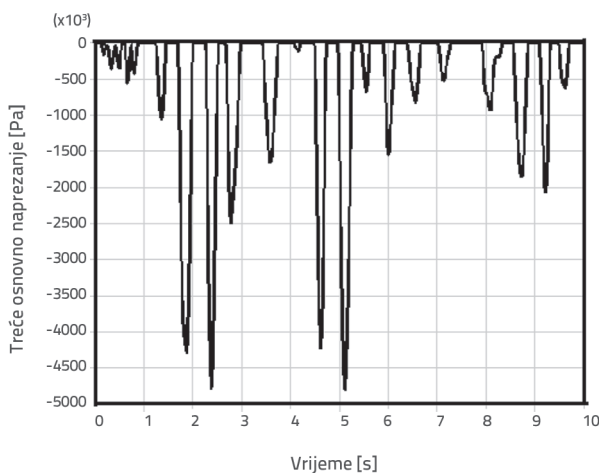
Slika 5. Dinamički vremenski proračun horizontalnog pomaka krune brane



Slika 6. Dinamički vremenski proračun hidrodinamičkog tlaka u peti brane



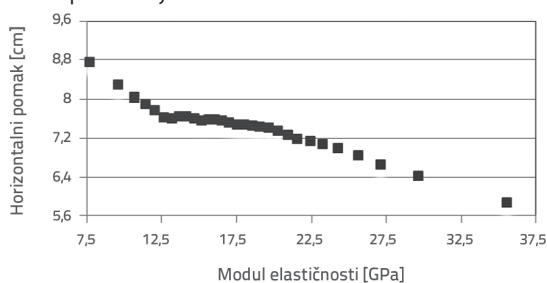
Slika 7. Dinamički vremenski proračun prvog osnovnog napreznja u peti brane



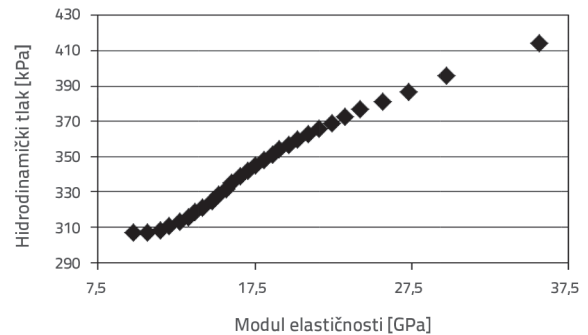
Slika 8. Dinamički vremenski proračun trećeg osnovnog napreznja u nožici brane

5.1. Analiza osjetljivosti

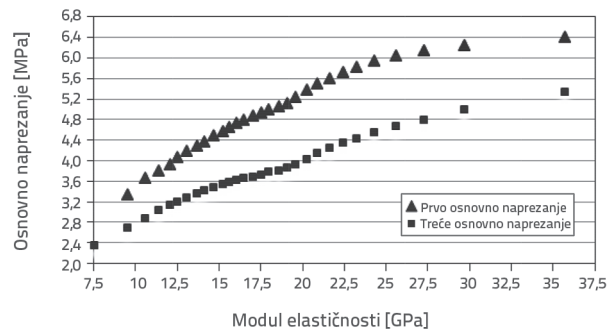
Osjetljivost se obično iskazuje kao variranje izlaznih vrijednosti matematičkog modela zbog promjene ulaznih vrijednosti. Analizom osjetljivosti pokušavaju se rangirati ulazne pretpostavke u odnosu na njihov doprinos izlaznim vrijednostima varijabilnosti ili nesigurnosti [7]. Utjecaj modula elastičnosti betona kao slučajne ulazne varijable na izlazne vrijednosti prikazan je na slikama od 9. do 11.



Slika 9. Osjetljivost krivulje horizontalnog pomaka na modul elastičnosti betona



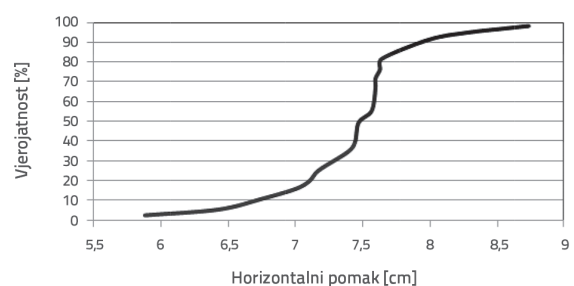
Slika 10. Osjetljivost hidrodinamičkog tlaka u peti brane na modul elastičnosti betona



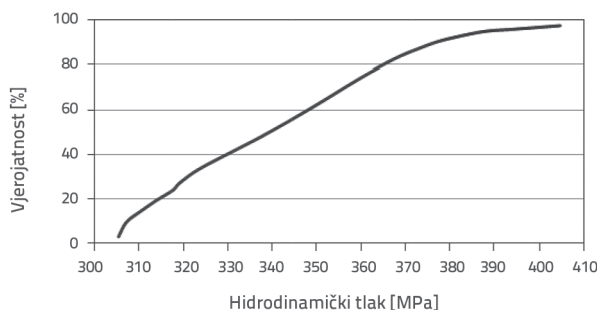
Slika 11. Osjetljivost maksimalnih glavnih napreznja na modul elastičnosti betona

5.2. Probabilistička analiza

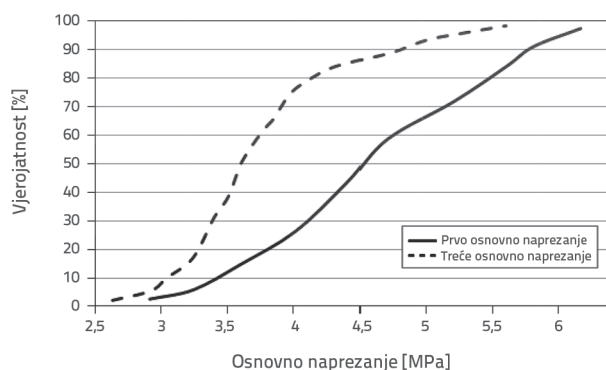
Ovdje se probabilistička analiza prikazuje pomoću kumulativnih funkcija raspodjele izlaznih parametara. Kumulativne funkcije raspodjele u literaturi se spominju i kao funkcije raspodjele, kumulativne funkcije učestalosti ili kumulativne funkcije vjerojatnosti. Kumulativnom funkcijom raspodjele izražava se vjerojatnost da će neka slučajna varijabla imati vrijednost nižu od neke vrijednosti ili jednaku nekoj vrijednosti. U slučaju kontinuiranih slučajnih varijabli, kumulativna funkcija raspodjele dobiva se iz funkcije gustoće vjerojatnosti postupkom integracije ili zbrajanjem u slučaju diskretnih slučajnih varijabli [7]. Kumulativnom funkcijom raspodjele također se vizualizira kakva bi bila vjerojatnost pouzdanosti ili neuspjeha kada bi se trebale promijeniti dopuštne granice projektiranih veličina. Slike 12. do 14. prikazuju kumulativnu funkciju raspodjele odabranih vrijednosti odziva modela.



Slika 12. Kumulativna funkcija raspodjele horizontalnih pomaka na kruni brane



Slika 13. Kumulativna funkcija raspodjele hidrodinamičkog tlaka u peti brane



Slika 14. Kumulativna funkcija raspodjele maksimalnih osnovnih napreznja

Kumulativnom funkcijom raspodjele određuje se razina vjerojatnosti da će vrijednosti ostati ispod neke određene razine. Na primjer, može se odrediti iz krivulja:

- Postoji pedesetpostotna vjerojatnost da će horizontalni maksimalni pomak krune brane u slučaju potresa iznositi manje od 7,5 cm.
- Postoji pedesetpostotna vjerojatnost da će maksimalni hidrodinamički tlak u peti brane biti u slučaju potresa niži od 340 kPa.
- Postoji pedesetpostotna vjerojatnost da će prvo osnovno napreznje u peti brane biti u slučaju potresa niže od 4,5 MPa.

- Postoji pedesetpostotna vjerojatnost da će treće osnovno napreznje u nožici brane biti u slučaju potresa niže od 3,6 MPa.

Analiza kumulativne raspodjele omogućuje usporedbu napreznja u tijelu brane s dopuštenim napreznjem betona. Primjerice, ako dopušteno vlačno napreznje iznosi 3,56 MPa, može se zaključiti da postoji vjerojatnost od približno 15 % da će osnovno vlačno napreznje u peti brane biti niže od dopuštene vrijednosti.

6. Zaključak

Modul elastičnosti smatra se najvažnijim parametrom za projektiranje brana jer se njegove vrijednosti mijenjaju ovisno o čvrstoći betona. Iako čvrstoća betona treba udovoljavati zahtjevima u pogledu ranog opterećenja i građenja te kriterijima napreznja pri projektiranju razine sigurnosti, u projektiranju betonskih gravitacijskih brana izuzetno je značajan i odabir optimalne vrijednosti modula elastičnosti. U ovom je radu korištena probalistička analiza i analiza osjetljivosti sustava brana-akumulacija-temelji, a simulacija Monte Carlo je provedena da bi se pokazao utjecaj modula elastičnosti na seizmičko ponašanje betonskih gravitacijskih brana. Metoda je korištena za određivanje modula elastičnosti (E_c) kao posebnog parametra koji znatno utječe na odziv. Maksimalne vrijednosti horizontalnog pomaka krune brane, hidrodinamičkog tlaka u peti, prvog osnovnog napreznja u peti, te trećeg osnovnog napreznja u nožici brane, pretpostavljene su kao vrijednosti kritičnog odziva tijekom potresa, te su odabrane kao izlazni parametri koji u velikoj mjeri ovise o variranju vrijednosti E_c . Na temelju odnosa između modula elastičnosti i čvrstoće betona mogu se donijeti zaključci o stupnju nesigurnosti u projektiranju gravitacijskih brana primjenom kumulativne funkcije raspodjele rezultata. Na primjer, napreznja u tijelu brane mogu se ocijeniti s dopuštenim napreznjem betona za projektiranje razine sigurnosti. I konačno, treba naglasiti da se model može koristiti i za probalističku analizu drugih parametara kako bi se ustanovila osjetljivost odziva. Primjena modela naročito se preporučuje u svrhu realistične analize velikih brana.

LITERATURA

- [1] Keivani, A., Shoostari, A., Aftabi Sani, A.: Forced vibration analysis of a dam-reservoir interaction problem in frequency domain, *Interaction and Multi scale Mechanics*, 6 (2013) 3, pp. 271-286.
- [2] Ghorbani, M.A.: The effect of substrate stiffness on seismic response of double-curvature arch dams using the finite element model, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, 2 (2016) 1, pp. 188-192.
- [3] Miquel, B., Bouaanani, N.: Accounting for Earthquake-Induced Dam-Reservoir Interaction Using Modified Accelerograms, *Journal of Structural Engineering*, 139 (2013) 9, pp. 1608-1617.
- [4] Westergaard, H.M.: Water pressure on dams during earthquake, *Transactions, ASCE*, 98 (1933), pp. 418-433.
- [5] Chopra, A.K.: Earthquake behaviour of reservoir-dam systems, *Journal of engineering mechanics division*, 94 (1968), pp. 1475-1500.
- [6] Chopra, A.K., Chakrabarti, P.: Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 9 (1981), pp. 363-383, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290090406>

- [7] Risk Assessment Forum U.S.: Guiding Principles for Monte Carlo Analysis, Environmental Protection Agency Washington, DC 20460, 1997.
- [8] McKay, M.D., Conover, W.J., Beckman R.: A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics*, 21 (1979), pp. 239-245, <https://doi.org/10.1080/00401706.1979.10489755>
- [9] Iman, R.: Latin Hypercube Sampling. In: *Encyclopedia of Statistical Sciences*, Wiley: New York, <https://doi.org/10.1002/0471667196>
- [10] Vamvatsikos, D., Fragiadakis, M.: Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39 (2010), pp. 141-163.
- [11] Chakrabati, P., Chopra, A.K.: Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2 (1973) 2, pp. 143-160, 1973.
- [12] Hall, J.F., Chopra, A.K.: Hydrodynamic effects in the dynamic response of concrete gravity dams, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 10 (1982), pp. 333-345, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290100212>
- [13] Sharan, S.K., Gladwell G.M.L.: A general method for the dynamic response analysis of fluid-structure systems, *Computers and structures*, 21 (1985), pp. 937-943, [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(85\)90205-6](https://doi.org/10.1016/0045-7949(85)90205-6)
- [14] Saini, S.S, Bettles, P., Zienkiewicz, O.C.: Coupled hydrodynamic response of concrete dams using finite and infinite elements, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 6 (1978), pp. 363-374, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290060404>
- [15] Bathe, K.J.: *Finite element procedures*, PRENTICE Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1996.
- [16] Chakrabarti, P., Chopra, A.K.: The earthquake experience at Koyna dam and stresses in concrete gravity dams, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 1 (1972), pp. 151-164, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290010204>
- [17] Chopra, A.K.: Earthquake resistant design of concrete gravity dams, *Journal of Structural Division, ASCE*, 104 (1978) 6, pp. 953-971.
- [18] Kucukarslan, S.: Time-domain dynamic analysis of dam-reservoir-foundation interaction including the reservoir bottom absorption, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28 (2004), pp. 963-980, <https://doi.org/10.1002/nag.369>
- [19] Alembagheri, M., Seyedkazemi, M.: Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44 (2015) 1, pp. 41-58.
- [20] Pasbani Khiavi, M.: Investigation of the Effect of Reservoir Bottom Absorption on Seismic Performance of Concrete Gravity Dams using Sensitivity Analysis, *KSCE Journal of Civil Engineering*, pp. 1-10, 2015.