

Primljen / Received: 28.11.2011.

Ispravljen / Corrected: 21.7.2012.

Prihvaćen / Accepted: 31.8.2012.

Dostupno online / Available online: 15.9.2012.

Utjecaj temelja na dinamičku analizu betonskih gravitacijskih brana

Autori:



Zahra Heirany, PhD Candidate
Islamic Azad University (IAU)
Science and Research Branch
Department of Civil Engineering
Tehran, Iran
z.heirany@piau.ac.ir



Associate Prof. **Mohsen Ghaemian**
Sharif University of Technology
Department of Civil Engineering
Tehran, Iran
ghaemian@sharif.edu

Prethodno priopćenje

Zahra Heirany, Mohsen Ghaemian

Utjecaj temelja na dinamičku analizu betonskih gravitacijskih brana

U članku se opisuje nelinearna dinamička analiza betonskih gravitacijskih brana. Zbog analize međudjelovanja akumulacije i temelja upotrebljavaju se dvodimenzionalni pristup i metoda konačnih elemenata uz primjenu modela razmazanih pukotina. Međudjelovanje brane i akumulacije riješeno je prikladnim rastavom sustava jednadžbi, dok je Sharanov rubni uvjet primijenjen na najudaljeniji rub akumulacije. Temelj je definiran kao dio konstrukcije pa se na njegove rubove primjenjuju drugačiji rubni uvjeti poput Lysmarovog i Boulderovog te rubnog uvjeta s prigušivačima. Rezultati pokazuju da je odziv gravitacijske brane zadovoljavajući kada se u nelinearnu analizu uključi međudjelovanje brane i temelja, masa temelja, fleksibilnost i radijacijsko prigušenje.

Ključne riječi:

betonske gravitacijske brane, međudjelovanje brana – akumulacija – temelji, rubni uvjet

Preliminary note

Zahra Heirany, Mohsen Ghaemian

Effect of foundation in dynamic analysis of concrete gravity dams

In this paper, nonlinear dynamic analysis of concrete gravity dams was studied. To investigate the effect of dam-reservoir-foundation interaction, a two-dimensional approach was used including the finite element method, and smeared crack approach. The dam-reservoir interaction is solved by staggered solution procedure while the Sharan boundary condition is applied at the reservoir's far-end truncated boundary. The foundation is defined as a part of the structure and some different boundary conditions such as Lysmer, Boulder and damper boundary conditions are applied at its truncated boundaries. Results show that when the nonlinear analysis includes the dam - foundation interaction and the foundation's mass, flexibility and radiation damping, the gravity dam's response will be acceptable.

Key words:

concrete gravity dams, dam-reservoir-foundation interaction, boundary condition

Vorherige Mitteilung

Zahra Heirany, Mohsen Ghaemian

Einfluss des Fundaments auf die dynamische Analyse von Betongewichtsstauwauern

In dem Artikel wird die nicht-lineare dynamische Analyse von Betongewichtsstauwauern analysiert. Zum Zwecke der Analyse der Wechselwirkung von Talsperre, Speicher und Fundament wurde die zweidimensionale Vorgehensweise und die Finite-Elemente-Methode unter Anwendung des verschmierten Rissmodells angewendet. Die Wechselwirkung der Talsperre und des Speichers wurde durch die entsprechende Zerlegung des Gleichungssystems gelöst, während die Sharan – Randbedingung an dem am weitesten gelegenen Speicherrand angewendet wurde. Das Fundament ist als Teil der Konstruktion definiert, so dass auf seine Ränder andere Randbedingungen, wie z.B. Lysmer- und Boulder sowie jene von Tilgern angewendet werden. Die Resultate zeigen, dass die Einflussreaktion der Gewichtsstauwauern befriedigend ist, wenn in der nicht-linearen Analyse die Wechselwirkung von Talsperre und Fundament, Fundamentmasse, Elastizität und Strahlungsdämpfung mit eingerechnet werden.

Schlüsselwörter:

Betongewichtsstauwauern, Zwischenwirkung der Talsperren – Speicher – Fundamente, Randbedingung,

1. Uvod

Većina autora smatra iznimno značajnim ocjenjivanje sigurnosti dinamičkog odziva brana. Kada se sustav brane naruši djelovanjem potresa, tada se, zbog vibracija brane i djelovanja vode u akumulaciji, na uzvodnom licu brane javljaju hidrodinamički tlakovi koji uvelike premašuju hidrostatičke. Iz toga slijedi da je predviđanje dinamičkog odziva brane u slučaju potresa poprilično složen problem, te da njegovo rješenje ovisi o nekoliko faktora kao što su međudjelovanje brane, stijenske podloge i akumulacije, te obilježja materijala koja se koriste u analizi. Stoga se pri ocjenjivanju sigurnosti betonskih gravitacijskih brana smještenih u područjima jače seizmičke aktivnosti trebaju primjenjivati dokazano djelotvorne metode.

Nekoliko se metoda u današnje vrijeme primjenjuje u analizi uzajamnih djelovanja brane, akumulacije i temelja. Fenves i Chopra [1] analiziraju međudjelovanja brane, vode i temelja u okviru linearne analize frekvencijskog područja, a u sklopu svojih istraživanja razvili su i računalni program EAGD-84 temeljen na metodi konačnih elemenata [2]. Leger i Bhattacharjee [3] prikazuju metodu baziranu na modelima neovisnima o frekvenciji koja se također koristi za prikazivanje međudjelovanja između brane, akumulacije i temelja. U radu Gaun i dr. [4] opisuje se djelotvorni numerički postupak za izravnu i u vremenskoj domeni definiranu analizu dinamičkog odziva sustava sastavljenog od akumulacije, brane i temelja. Nešto kasnije, Ghaemian, Noorzad i Moradi Moghaddam pokazuju u svom radu [5] da oblik i masa temelja bitno utječu na linearni odziv lučnih brana. Korištenje približnih (skraćenih) rubnih uvjeta u analizama smatra se prikladnim i ekonomski opravdanim rješenjem. Moglo bi se reći da se danas najviše koristi model prigušenja radijacije tla koji predlažu Lysmer i Kuhlemeyer [6]. Prema tom se modelu temelji štite ublaživačima vibracija koji su tako podešeni da mogu apsorbirati valove S (secondary) i P (primary); međutim, u tom se modelu ignorira uzajamno djelovanje temelja i slobodnog polja. Ovo se djelovanje uzima u obzir u sofisticiranijem modelu koji predlažu Miura i Okinaka [7]. Ipak, u tom se modelu traže četiri zasebne dvodimenzionalne analize slobodnog polja. Saouma [8] predlaže još jedan rubni uvjet koji naziva "Boulderovom preporukom", a koji uključuje primjenu opruga i prigušivača na vertikalnim aproksimiranim rubovima. Iako se u Boulderovoj preporuci koristi Lysmerova formula za prigušivače, u toj se preporuci uvodi i djelotvorna formula za korištenje opruga. I na kraju, vrijedi spomenuti i Wilsona koji u svom radu [9] prikazuje metodu pod nazivom "metoda međudjelovanja tla i konstrukcije" (SSI - Soil Structure Interactin method) koji se koristi za određivanje seizmičkih pomaka u slobodnom polju na lokacijama brana. U ovoj se metodi zanemaruje prisutnost konstrukcije (brane) tijekom potresa te se pretpostavlja da je relativni pomak na aproksimiranom rubu jednak nuli. Pokazuje se da su u tim uvjetima temelji podvrgnuti isključivo djelovanju sile inercije, a ne i djelovanju sile potresa. U ovom se članku

dvodimenzionalni sustav sastavljen od brane, akumulacije i temelja analizira nelinearno pomoću metode konačnih elemenata i pritom se koristi pristup razmazanih pukotina. Međudjelovanja brane i akumulacije rješavaju se prikladnim rastavom sustava jednadžbi, a Sharanov se rubni uvjet koristi za najudaljeniji rub akumulacije. Temelji se definiraju kao dio konstrukcije, pa se za njihove aproksimirane rubove primjenjuju drugačiji rubni uvjeti.

2. Međudjelovanje brane i akumulacije

Jednadžba pomaka akumulacije može se iskazati Helmholtzovom jednadžbom kako slijedi:

$$\frac{1}{C^2} \ddot{p} = \nabla^2 p \quad (1)$$

gdje je p hidrodinamički tlak, dok je C brzina tlačnog vala u vodi.

Rubni uvjet na slobodnoj površini u akumulaciji iskazuje se kao:

$$p = 0 \quad (2)$$

Uključeni rubni uvjet kojim bi se mogla modelirati cjelokupna apsorpcija valova na krajnjem rubu akumulacije naziva se Sharanovim rubnim uvjetom [10], a on se iskazuje kako slijedi:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{\pi}{2h} p - \frac{1}{C} \dot{p} \quad (3)$$

gdje je h visina akumulacije a n je vektor okomit na površinu. U dnu i na stranama akumulacije, Helmholtzova se jednadžba koristi u području sedimenata, pri čemu se pretpostavlja samo vertikalna pobuda hidrodinamičkih tlačnih valova, što dovodi do sljedeće jednadžbe:

$$\frac{\partial p}{\partial n} - q \frac{\partial p}{\partial t} = -\rho a_n^s \quad (4)$$

gdje je a_n^s normalna akceleracija brane u zoni kontakta.

$$q = \frac{1-k}{(1+k)C} \quad (5)$$

gdje je C brzina tlačnog vala na dnu i na stranama akumulacije, dok je k koeficijent refleksije.

3. Uzajamno djelovanje brane, akumulacije i temelja

Utjecaj međudjelovanja brane, akumulacije i temelja analizira se pomoću dviju diferencijalnih jednadžbi drugog reda koje se mogu iskazati na sljedeći način:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f_t\} - [M]\{\ddot{u}_g\} + [Q]\{p\} \quad (6)$$

$$[G]\{\ddot{p}\} + [C']\{\dot{p}\} + [K']\{p\} = \{F_2\} - \rho [Q]^T \{\ddot{u}\} \quad (7)$$

[M], [C] i [K] matrice su mase, prigušenja i krutosti za sklop koji se sastoji od brane i temelja, dok su [G], [C'] i [K'] odgovarajuće matrice mase, prigušenja i krutosti za branu. [Q] je matrica koja povezuje jednadžbe (spojna matrica), a {f₁} je vektor sile tijela i hidrostatičke sile. {f₂} je komponenta sile uzrokovane akceleracijom na kontaktu brane i akumulacije te akumulacije i temelja. {p} i {u} su vektori tlakova i pomaka. {ü_g} je akceleracija tla, a ρ je gustoća fluida.

3.1. Rubni uvjeti

3.1.1. Lysmerov rubni uvjet

U ovom se istraživanju koriste tri rubna uvjeta i to za temelje bez mase i s masom. Prvi je Lysmerov rubni uvjet koji je objašnjen u radu Lysmera i Kuhlemeyera [6], a iskazan je na slici 1. Na obje strane temelja smješteni su horizontalni i vertikalni prigušivači, ali se na samoj podlozi nalaze valjci. Taj je rubni uvjet definiran primjenom Lysmerove teorije o prigušenju radijacije. Prema toj teoriji, okolni se rubovi mogu modelirati primjenom normalnih i tangencijalnih prigušivača. U modelu konačnih elemenata, za te se prigušivače može faktor prigušenja izračunati kako slijedi [6]:

$$C_{11}^i = V_p \rho \int_{l_0} N_i dl \quad (8)$$

$$C_{22}^i = V_s \rho \int_{l_0} N_i dl \quad (9)$$

C₁₁ i C₂₂ su faktori prigušenja, jedan za normalni a drugi za tangencijalni smjer, dok je N_i funkcija oblika elementa. Pritom se brzina tlačnih i posmičnih valova (V_p i V_s) izračunava na sljedeći način:

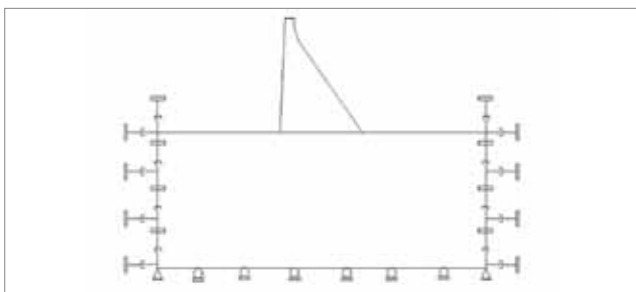
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (10)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (11)$$

$$S^2 = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \quad (12)$$

$$V_p = \frac{1}{S} V_s \quad (13)$$

gdje je G modul posmika, E modul elastičnosti, ρ gustoća mase, a ν je Poissonov koeficijent temelja.



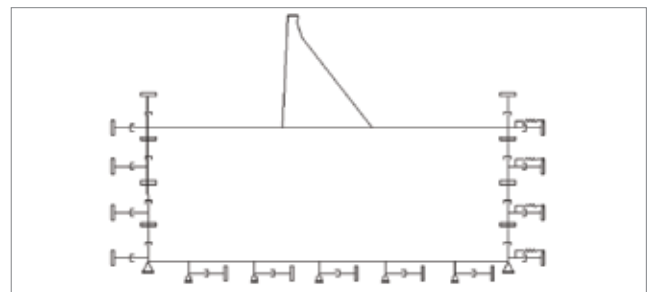
Slika 1. Lysmerov rubni uvjet

3.1.2. Boulderov rubni uvjet

Rubni uvjet prikazan na slici 2 (Boulderov rubni uvjet) podudara se s Lysmerovim rubnim uvjetom s tim da na jednoj strani temelja ima i horizontalne opruge. Faktor prigušenja prigušivača može se izračunati pomoću jednadžbi (8) i (9). Krutost opruga računa se pomoću jednadžbe (14):

$$K_m = \frac{EA}{h} \quad (14)$$

gdje je E modul elastičnosti temelja, A je utjecajno područje čvora povezanog s oprugom, a h je reprezentativna ekvivalentna dubina temelja [8].

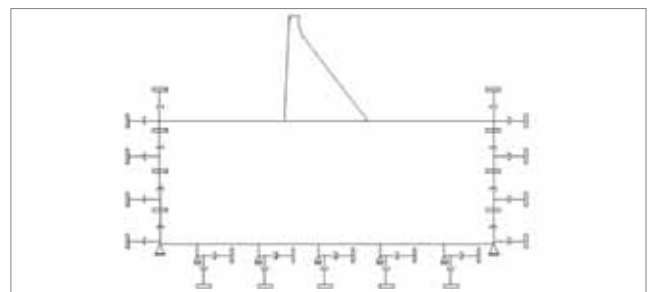


Slika 2. Boulderov rubni uvjet

3.1.3. Rubni uvjet s prigušivačima

Rubni uvjet s horizontalnim i vertikalnim prigušivačima na obje strane i u podlozi temelja s valjcima prikazan je na slici 3. Na donjem se rubu kombiniraju valjci i vertikalni prigušivači zato što vertikalni prigušivač skoro neznatno utječe na apsorpciju odlaznih valova.

Faktor prigušivanja koji se dobiva primjenom prigušivača može se izračunati pomoću jednadžbe (8) i (9).



Slika 3. Rubni uvjet s prigušivačima

4. Nelinearna analiza

Model razmazanih pukotina kojeg su uveli Bhattacharjee i Leger [11] koristi se za ocjenu nelinearnog ponašanja betonskih gravitacijskih brana i pritom se analizira međudjelovanje brane, akumulacije i temelja, a rješenje se dobiva rastavom sustava jednadžbi koji predlažu Ghaemian i Ghobarah [12].

4.1. Rezultati numeričkih analiza

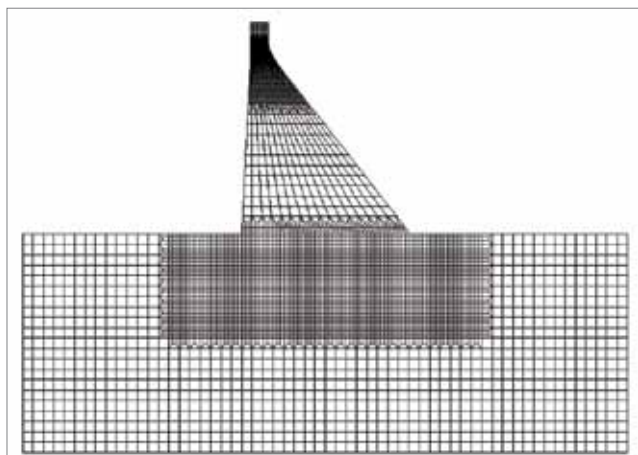
Analiza primjera iz prakse: Brana Pine Flat

Najviši monolitni element brane Pine Flat smještene u Kaliforniji (slika 4.) odabran je za analizu rezultata dobivenih računalnim programom NSAG-DRI [13] koji je služio za obavljanje nelinearne analize. Ovakav je odabir napravljen zato što su za ovu branu izrađene brojne eksperimentalne i teoretske studije. Dužina krune brane iznosi 560 m, a sastoji se od 37 monolita širine 15,2 m. Visina najvišega monolitnog elementa iznosi 122 m.



Slika 4. Brana Pine Flat

Četveročvorni, četverostrani te izoparametarski model konačnih elemenata ovog monolitnog elementa s ravninskim naprezanjem prikazan je na slici 5. Model sadrži 5664 čvora (3768 čvorova u temeljima) i 5512 elemenata.

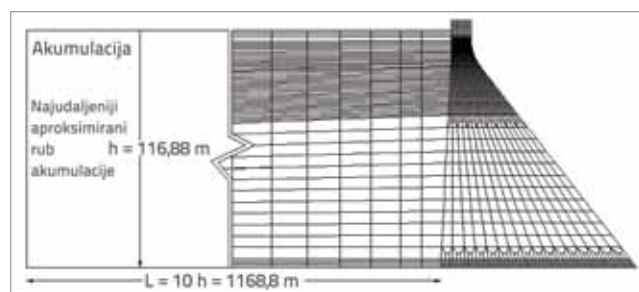


Slika 5. Diskretizacija najvišeg monolitnog elementa brane Pine Flat konačnim elementima

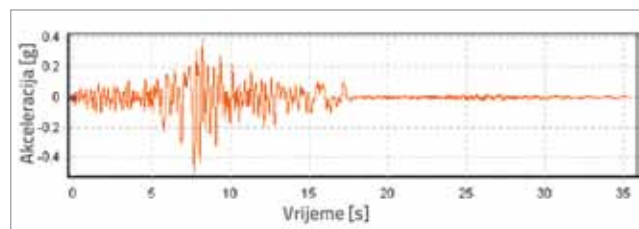
Parametri korišteni u ovom istraživanju odgovaraju parametrima koje Ghaemian i Ghobarah koriste u svojim modelima [14]. Za betonsku su branu usvojeni sljedeći osnovni parametri: modul elastičnosti (27,58 GPa), gustoća (2400 kg/

m³) i Poissonov koeficijent (0,20). Za temelje u stijenskoj masi usvojeni su sljedeći parametri: modul elastičnosti (22,4 GPa), gustoća (2643 kg/m³) i Poissonov koeficijent (0,33). Vlačna čvrstoća za betonske brane iznosi 3,05 MPa dok je energija loma 300 N/m. Za vlačnu čvrstoću i energiju loma, faktor dinamičkog povećanja iznosi 1,2 [14].

U svim je modelima pretpostavljeno linearno ponašanje temelja. Dužina temelja iznosi 348 m a širina 126 m. Akumulacija je deset puta duža od razine vode u akumulaciji. Diskretizacija akumulacije konačnim elementima prikazana je na slici 6. Sharanov rubni uvjet koristi se za najudaljeniji aproksimirani rub akumulacije [10]. Brzina tlačnog vala u vodi iznosi 1438,66 m/sec, a koeficijent refleksije valova je 0.82. Za potrebe seizmičke analize brane upotrijebljeni su podaci o potresu koji je zadesio Manjil (slika 7.).



Slika 6. Diskretizacija akumulacije konačnim elementima



Slika 7. Potres u Manjilu 1990., Stanica: Tonekabun

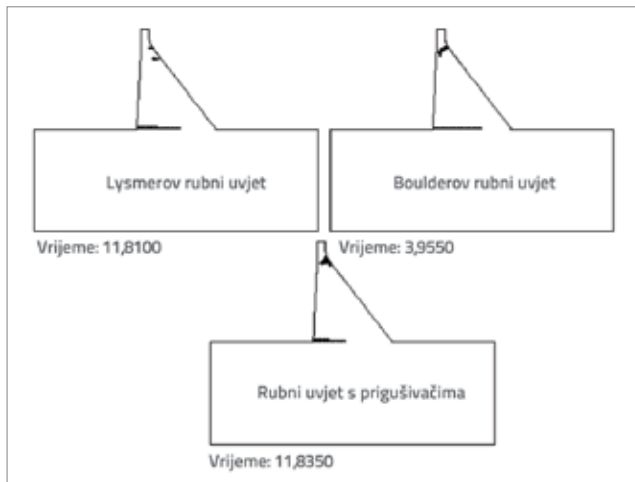
4.2. Utjecaj mase temelja

Da bi se u obzir uzeo utjecaj mase temelja, nelinearne dinamičke analize temelja obavljene su s masom i bez nje uz primjenu Lysmerovih rubnih uvjeta, Boulderovih rubnih uvjeta i rubnih uvjeta s prigušivačima. Na slikama 8. i 10. prikazani su rezultati presjeka pukotina za oba temelja (s masom i bez mase) i za tri rubna uvjeta.

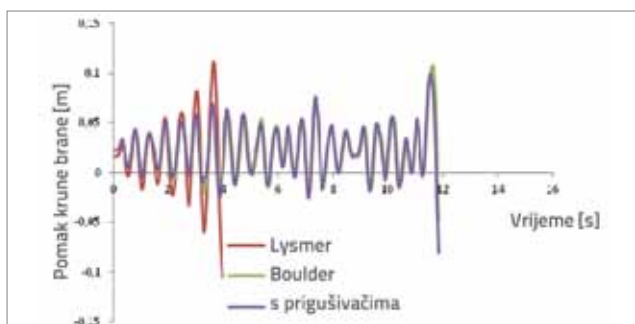
Rezultati za temelje bez mase pokazuju da kod Lysmerovog rubnog uvjeta dolazi do smanjenja profila pukotina i pomaka u kruni brane. Nakon Lysmerovog rubnog uvjeta, po redoslijedu smanjenja profila pukotina uvjetovanih visokom apsorpcijom energije slijede Boulderov rubni uvjet i rubni uvjet s prigušivačima.

Kod Boulderovog rubnog uvjeta, vremenski interval završava s četiri sekunde i to zbog pretjeranog oštećivanja konstrukcije. Kod Lysmerovog rubnog uvjeta i rubnog uvjeta s prigušivačima, uočava se slična fleksibilnost jer se prigušivači koriste na obje

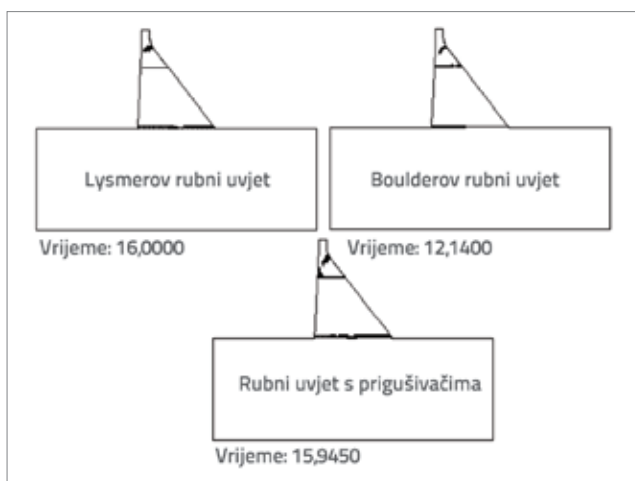
strane, ali je Boulderov rubni uvjet krući zbog horizontalnih opruga koje uzrokuju veći pomak na kruni brane (slike 8. i 9.).



Slika 8. Presjeci pukotina sustava temelja bez mase, za razne rubne uvjete



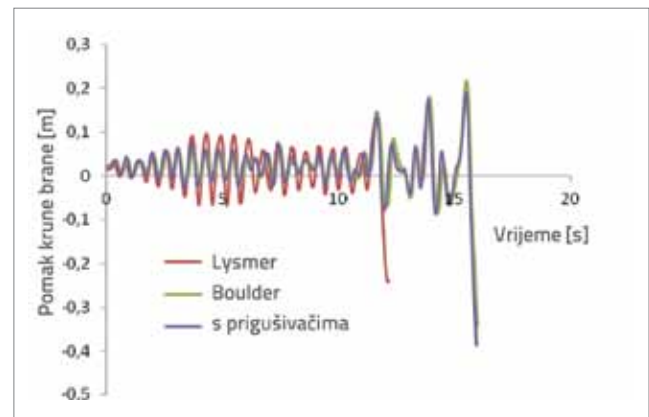
Slika 9. Maksimalni pomak krune brane u temeljima bez mase, za razne rubne uvjete



Slika 10. Profili pukotina u sustavu temelja s masom, za razne rubne uvjete

Rezultati za temelje s masom prikazani su za tri rubna uvjeta na slikama 10. i 11. Kod Lysmerovih rubnih uvjeta i rubnih

uvjeta s prigušivačima možemo uočiti zanemariv utjecaj na profil pukotina, što je rezultat korištenja prigušivača zbog kojih su ti rubni uvjeti fleksibilniji. Međutim, u slučaju Boulderovog rubnog uvjeta, profili pukotina bitno se smanjuju zbog primjene horizontalnih opruga. Smanjenje maksimalnog pomaka u kruni brane pri korištenju Lysmerovog rubnog uvjeta i rubnog uvjeta s prigušivačima, a u odnosu na pomak pri korištenju Boulderovog rubnog uvjeta, također proizlazi iz veće fleksibilnosti.



Slika 11. Maksimalni pomak u kruni brane kod temelja s masom, za razne rubne uvjete

5. Zaključak

Odziv gravitacijske brane realniji je kada se u nelinearnu analizu uključi uzajamno djelovanje brane i temelja. Kod temelja bez mase u obzir se uzima samo fleksibilnost i prigušenje konstrukcije, dok se inercija i geometrijsko prigušivanje zanemaruju. Nakon toga se povećava vremenski interval pomaka u kruni brane, pa se može zaključiti da je valjanost nelinearne dinamičke analize temelja bez mase precijenjena.

S obzirom na to što geometrijsko prigušenje u nelinearnoj dinamičkoj analizi temelja s masom umanjuje vremenski interval pomaka u kruni brane, možemo zaključiti da to dovodi do manjeg oštećenja sustava.

Kod temelja bez mase, Lysmerov rubni uvjet dovodi do smanjenja profila pukotina i maksimalnog pomaka u kruni brane. Međutim, kod temelja s masom, vrijeme potrebno da Boulderov rubni uvjet dosegne pretjerano oštećenje veće je nego kod ostala dva uvjeta, s tim da profili pukotina pokazuju da su oštećenja kod Boulderovog rubnog uvjeta manja od oštećenja zabilježenih kod ostala dva rubna uvjeta. Tome je uzrok korištenje horizontalnih opruga u Boulderovom rubnom uvjetu. Horizontalne opruge umanjuju fleksibilnost pa sustav postaje krući, što uzrokuje manja oštećenja u profilu pukotina i veće pomake u kruni brane.

LITERATURA

- [1] Fenves, G., Chopra, A.K.: Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Reservoir Bottom Absorption and Dam-Water-Foundation Rock Interaction, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 12 (1984) 5, 663-680.
- [2] Fenves, G., Chopra, A.K.: EAGD84: A Computer Program for Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams, Report No. UCB/EERC 86/09, University of California, Berkeley, (1984).
- [3] Leger, P. & Bhattacharjee, S.S.: Reduced Frequency-Independent Models for Seismic Analysis of Concrete Gravity Dam, **Computer and Structures**, 44 (1992) 6, 1381-1387.
- [4] Gaun, F., Moore, I.D., Lin, G.: Seismic Analysis of Reservoir-Dam-Soil Systems in the Time Domain, **Computer Methods and Advances in Geomechanics**, (1994), 917-922.
- [5] Ghaemian, M., Noorzad, A., Moradi Moghaddam, R.: Foundation Effect on Seismic Response of Arch Dams Including Dam-Reservoir Interaction, **Europe Earthquake Engineering**, (2005), 49- 57.
- [6] Lysmer, J., Kuhlemeyer, R.L.: Finite Dynamic Model for Infinite Media, **Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE**, , 95(1969), 859-877.
- [7] Miura, F., Okinaka, H.: Dynamic Analysis Method for 3D Soil-Structure Interaction Systems with the Viscous Boundary Based on the Principle of Virtual Work, **Japanese Journal of Civil Engineering**, (1989), 395-404.
- [8] Saouma V.: Course Note, Chapter 8: Nonlinear Dynamic Analysis of Dams.
- [9] Wilson, E.L.: Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering, 4th Ed., **Computers and Structures Inc**,(2000).
- [10] Sharan, S.: Modeling of radiation damping in fluids by finite elements, **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 23 (1986), 945-957.
- [11] Bhattacharjee, S.S., Leger, P.: Seismic cracking and energy dissipation in concrete gravity dams, **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 22 (1993), 991-1007.
- [12] Ghaemian, M., Ghobarah, A.: Staggered Solution Schemes for Dam-Reservoir Interaction, **Journal of Fluid and Structures**, 12 (1998), 933-948.
- [13] Ghaemian, M.: Manual of NSAG-DRI, a computer program for nonlinear seismic analysis of gravity dams including dam-reservoir-foundationinteraction, (2008).
- [14] Ghaemian, M., Ghobarah, A.: "Nonlinear seismic response of concrete gravity dams with dam-reservoir interaction", **Engineering Structures**, Vol.21, pp. 306-315 /1999.