

IZDAVAČ:

Savez građevinskih inženjera Srbije
Beograd, Kneza Miloša 9/I, Tel/Faks: (011) 3241 656

PROGRAMSKI ODBOR SAVETOVANJA:

PREDSEDNIK:

Prof.dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.grad., Novi Sad

POTPREDSEDNIK:

Prof. dr Petar ANAGNOSTI, dipl.inž.grad., Beograd

ČLANOVI:

Prof.dr Dragoslav ŠUMARAC, dipl.inž.grad., Beograd
Prof.dr Dušan SUNARIĆ, dipl.inž.grad., Beograd
Prof.dr Stanko BRČIĆ, dipl.inž.grad., Beograd
Prof.dr Branislav GLAVATOVIĆ, dipl.inž.grad., Podgorica
Prof.dr Djorđe LADINOVIĆ, dipl.inž.grad., Novi Sad
Doc.dr Srđan JANKOVIĆ, dipl.grad.inž., Podgorica
Prof. dr Mira PETRONIJEVIĆ, dipl.inž.grad., Beograd
Prof. dr Lazo PEKEVSKI, dipl.inž., Skoplje
Mr Slavica RADOVANOVIĆ, dipl.inž.geofizike, Beograd

EDITOR: Prof.dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.grad., Novi Sad

TEHNIČKI UREDNIK: Mr Aleksandar ĐUKIĆ, dipl.inž.grad., Beograd

Svi radovi u ovom zborniku radova su recenzirani. Stavovi izneti u ovoj publikaciji ne odražavaju nužno i stavove izdavača, naučnog komiteta ili editora.

TIRAŽ:

250 primeraka

ŠTAMPA: Akademiska izdanja, Zemun

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

699.841(082)
624.042.7(082)
550.34(082)

НАУЧНО-стручно саветовање Земљотресно инжењерство и инжењерска сеизмологија (2 : 2010 ; Дивчибаре) Zbornik radova / Drugo naučno-stručno savetovanje Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, Divčibare, 27.-30. april 2010. godine : [organizatori] Savez građevinskih inženjera Srbije ... [et al.] : editor Radomir Folić. - Beograd : Savez građevinskih inženjera Srbije, 2010 (Zemun : Akademiska izdanja). - X, 418 str. : ilustr. ; 24 cm + 1 elektronski optički disk (CD-ROM : 12 cm)

Tiraž 250. - Str. X: Predgovor / Radomir Folić, Aleksandar Đukić. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-904089-8-6

1. Фолнћ, Радомир [уредник] [аутор додатног текста] 2. Савез грађевинских инжењера Србије (Београд) а) Сеизмичке конструкције - Зборници б) Земљотреси - Зборници
COBISS.SR-ID 174808844

SAVEZ GRAĐEVINSKIH INŽENJERA SRBIJE

u saradnji sa

INSTITUT ZA VODOPRIVREDU "JAROSLAV ČERNI", BEOGRAD
INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE, BEOGRAD
SAOBRAČAJNI INSTITUT CIP doo, BEOGRAD
DRUŠTVO ZA ZEMLJOTRESNO INŽENJERSTVO SRBIJE, BEOGRAD
"VUJIĆ VALJEVO" DOO, VALJEVO

ZBORNİK RADOVA

DRUGO NAUČNO-STRUČNO SAVETOVANJE

ZEMLJOTRESNO INŽENJERSTVO I INŽENJERSKA SEIZMOLOGIJA

Editor: Prof. dr Radomir Folić

Divčibare, 27.-30. april 2010. godine

DINAMIČKA ANALIZA SKLADIŠTA RADIOAKTIVNOG OTPADA U VINČI

Stanko Brčić*, Stanko Čorić*

*Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73,
e-mail: stanko@grf.bg.ac.rs*

REZIME

U ovom radu je prikazana analiza uticaja mogućeg zemljotresa na jednostavan objekat, ali koji zbog svoje namene, skладиštenja radioaktivnog otpada, spada u "Objekte van kategorije". Dinamička analiza je obavljena primenom multimodalne spektralne analize u skladu sa odredbama Evrokoda 8, kao i primenom analize u vremenskom domenu rešavanjem diferencijalnih jednačina kretanja za usvojeni akcelerogram kopaoničkog zemljotresa. Prikazane su osnovne geodinamičke karakteristike tla i konstrukcije, kao i spektar i akcelerogram izabranog reprezentativnog zemljotresa. Osim osnovnih dinamičkih karakteristika konstrukcije, dati su neki dobijeni rezultati maksimalnih pomeranja u uslovima zemljotresa, kao i maksimalnih uticaja u elementima konstrukcije. Imajući u vidu predviđen način odlaganja radioaktivnog otpada, razmatrano je i moguće klizanje i preturanje paleta sa otpadom u uslovima zemljotresnog dejstva.

KLJUČNE REČI: dinamička analiza, multimodalna spektralna analiza, direktna numerička integracija

DYNAMIC ANALYSIS OF A STORE HOUSE FOR RADIOACTIVE WASTE IN VINČA

ABSTRACT

The paper is presenting conducted analysis of earthquake effects upon a store house for the radioactive waste in the Vinča Institute. Due to its contents, the simple store house is classified into the "Structure above category", so conducted dynamic analysis of earthquake effects was done using the multimodal spectral analysis according to EC 8 and the time history analysis for selected accelerogram of the Kopaonik earthquake. Basic geodynamic soil conditions are presented, as well as the basic structural data, together with the spectrum and accelerogram of selected earthquake representation in dynamic analysis (Kopaonik earthquake in this case). Besides the basic dynamic characteristics of the structure, some results of the maximum displacements and cross sectional forces of the structure, due to considered earthquake effects, are given. Also, due to planned details of radioactive waste storage, the possible sliding and rocking motion of palettes with radioactive waste, due to earthquake effects, was considered too.

KEYWORDS: dynamic analysis, multimodal spectral analysis, time history analysis

UVOD

U ovom radu je prikazana dinamička analiza Objekata za skladištenje radioaktivnog otpada u Vinči. Imajući u vidu da ovi objekti spadaju u "Objekte van kategorije", analiza uticaja mogućeg zemljotresa

ne može da se izvrši na uobičajen način, kao ekvivalentno statičko opterećenje, već je potrebno da se izvrši odgovarajući proračun metodama dinamičke analize. Ta analiza se, u ovom slučaju, sastoji od sledećih delova:

- Određivanje svojstvenih oblika i frekvencija (odnosno dinamičkih karakteristika objekata),
- Multimodalna spektralna analiza u skladu sa odredbama Evrokoda 8,
- Direktna numerička integracija diferencijalnih jednačina kretanja za usvojeni akceleroگرام.

PODACI O OBJEKTU

Objekat za skladištenje radioaktivnog otpada (RAO) se sastoji iz dve praktično nezavisne celine, ali sa zajedničkim temeljom u podužnom pravcu. Jedan deo je krut AB "bunker", a drugi deo je montažna hala veće visine. Na slici 2 je prikazan zajednički računski model za oba dela objekta.

ULAZNI PODACI ZA DINAMIČKU ANALIZU UTICAJA ZEMLJOTRESA

• Geodinamički podaci o tlu

U formiranju reprezentativnog geodinamičkog modela tla na posmatranoj lokaciji među najznačajnijim parametrima su brzine prostiranja elastičnih naponskih talasa (longitudinalnih i transverzalnih) kroz slojeve tla, od tzv. ležišne stene (bedroka) do površine terena, koji nastaju u slučaju mogućeg zemljotresa. Podaci koji su korišćeni u ovoj analizi zasnovani su, pre svega, na *Elaboratu o geofizičkim ispitivanjima i seizmičkoj mikrozonizaciji terena za izgradnju novih objekata u krugu Instituta za nuklearne nauke u Vinči*. Tu je ocenjeno da je prihvatljiva dubina bedroka na oko 20m ispod površine, kao i da se tlo na toj dubini sastoji, načelno, iz tri litološka sloja sa sledećim karakteristikama (gledano od površine terena ka dubini):

1. Humificirana glina, dubine 2.8 m, $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^2$
brzina longitudinalnih talasa 540-550 m/s, brzina transverzalnih talasa 260-270 m/s.
2. Prašinasta glina, dubine 2.6 m, $\gamma = 19.8 \text{ kN/m}^2$
brzina longitudinalnih talasa 1130-1140 m/s, brzina transverzalnih talasa 470-480 m/s.
3. Pesak, dubine 2.8 m, $\gamma = 20.4 \text{ kN/m}^2$
brzina longitudinalnih talasa 1540-1560 m/s, brzina transverzalnih talasa 550-560 m/s.

• Maksimalno ubrzanje tla i seizmički hazard

Maksimalno ubrzanje tla na površini terena dobija se na osnovu procenjenog maksimalnog ubrzanja tla na nivou osnovne stene, odn. bedroka, i na osnovu amplifikacije ubrzanja kroz slojeve tla od bedroka do površine terena:

$$a_{p,max} = a_{max} \cdot G(t)$$

Sa $a_{p,max}$ je označeno maksimalno ubrzanje na površini terena, a sa a_{max} maksimalno ubrzanje na nivou bedroka, dok je sa $G(t)$ označen faktor amplifikacije ubrzanja. Ovaj faktor može da se oceni na bazi numeričkog modeliranja slojeva tla primenom metode konačnih elemenata, kao i da se izračuna u zavisnosti od predominantnih perioda oscilovanja tla na nivou bedroka i površine, kao i u zavisnosti od tzv. koeficijenta seizmičke impedanse. U navedenom Elaboratu o mikrozeizmičkoj rejonizaciji lokaliteta posmatranog objekta je ocenjeno da je faktor amplifikacije ubrzanja tla od bedroka do površine terena jednak $G(t) = 1.40$. Seizmički hazard predstavlja verovatnoću pojave zemljotresa u okviru određenog perioda vremena i sa odgovarajućim karakteristikama na posmatranoj lokaciji. Relevantni parametri su maksimalne amplitude (pre svega) ubrzanja tla, povratni period vremena i verovatnoća realizacije takvog događaja. Ovi parametri seizmičkog hazarda se vezuju za osnovnu stenu. U navedenom elaboratu o mikrozeizmičkoj rejonizaciji su posmatrani i analizirani razni

pokazatelji hazarda: magnituda zemljotresa, mikro i makroseizmički inteziteti, za povratne periode od 50, 100, 200 i 475 godina.

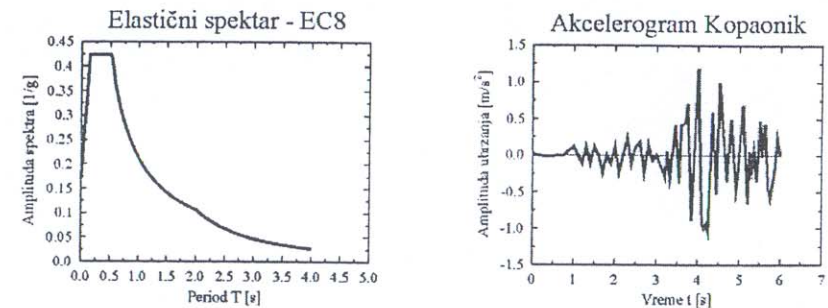
Na osnovu odgovarajuće analize, konstantovano je da se za potrebe seizmičke analize usvoji da je maksimalno ubrzanje tla na nivou osnovne stene, sa povratnim periodom od 200 godina, jednako $a_{max} = 102 \text{ cm/s}^2$. Određen je i ukupni koeficijent seizmičnosti, za povratni period od 200 godina, u iznosu od $K_S = 0.035$. Imajući u vidu faktor amplifikacije ubrzanja kroz slojeve tla od osnovne stene do površine, najveće očekivano ubrzanje tla na površini terena, sa povratnim periodom od 200 godina, je $a_{p,max} = 102 \cdot 1.400 = 142.8 \text{ cm/s}^2$, što predstavlja 14.6 % od ubrzanja zemljine teže $g = 981 \text{ cm/s}^2$.

• Elastični spektar ubrzanja prema Evrokodu EC8

Osnovni način dinamičke analize objekata za uticaje zemljotresa, u skladu sa Evrokodom EC8, je multimodalna spektralna analiza. Imajući u vidu navedene karakteristike tla, pre svega brzinu prostiranja transverzalnih naponskih talasa kroz slojeve, tlo na lokalitetu posmatranih objekata je ocenjeno, u skladu sa klasifikacijom u Evrokodu EC8, kao tlo kategorije B. Imajući u vidu kategoriju tla B, kao i odgovarajuće parametre koji definišu elastični spektar ubrzanja, kao i vrednost maksimalnog ubrzanja tla a_{max} i $a_{p,max}$, u Elaboratu o mikrozeizmičkoj rejonizaciji su tabelarno date vrednosti elastičnog spektra za multimodalnu spektralnu analizu. To je prikazano na slici 1, levo, pri čemu su ordinate spektra redukovane sa ubrzanjem zemljine teže g .

• Usvojeni akceleroگرام reprezentativnog zemljotresa

Imajući u vidu lokalitet posmatranog objekta, za reprezentativni akceleroagram koji prikazuje prinudno ubrzanje tla usled mogućeg zemljotresa, u konsultaciji sa Republičkim seizmološkim zavodom, usvojen je akceleroagram zemljotresa na Kopaoniku, od 18. maja 1980. Sam zapis akceleroagrama Kopaonik dobijen je od Republičkog seizmološkog zavoda i na slici 1 je prikazan reprezentativan deo zapisa akceleroagrama, u trajanju od 6 sekundi, koji je skaliran na maksimalno ubrzanje tla $a_{max} = 1.18 \text{ m/s}^2$. Imajući u vidu da je maksimalno ubrzanje na površini terena na posmatranoj lokaciji dato sa $a_{p,max} = 142.8 \text{ cm/s}^2$, onda se ordinate akceleroagrama na slici 1 skaliraju sa faktorom $142.8/118 = 1.21$.



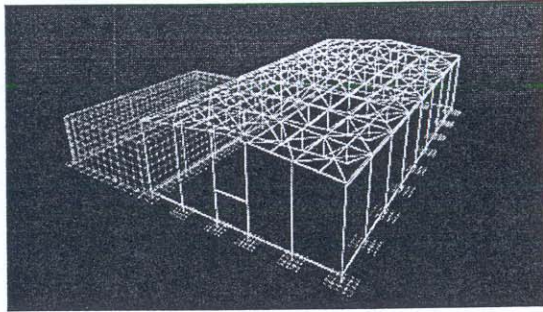
Slika 1. Elastični spektar prema EC8 i akceleroagram zemljotresa "Kopaonik", 18. maj 1980.
Figure 1. Elastic spectrum according to EC8 and accelerogram of the "Kopaonik" earthquake, May 18th, 1980.

RAČUNSKI MODEL KONSTRUKCIJE

• Računski model

U radu je prikazana samo dinamička analiza Objekta za skladištenje radioaktivnog otpada u Vinči koja je izvršena primenom programa SAP 2000. Formiran je integralni računski model koji u sebi sadrži

oba dela objekta: Skladište čvrstog otpada RAO i Bezbedno skladište RAI, pri čemu su ova dva, načelno nezavisna, objekta fundirana na delimično zajedničkom temelju. Imajući u vidu da je predmet ovog razmatranja dinamička analiza posmatranog objekta u uslovima mogućeg zemljotresa, tlo ispod temelja objekta je posmatrano kao kruto, odn. kao elastična podloga, ali sa dovoljno velikim koeficijentom krutosti. Sam vizuelni prikaz računskog modela prikazan je na slici 2.



Slika 2. Računski model skladišta radioaktivnog otpada u Vinči
Figure 2. Numerical model of the store house for radioactive waste in Vinča

• Prikaz nekih dobijenih rezultata

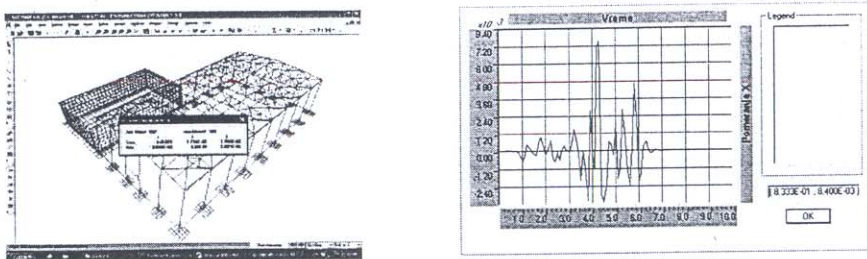
➤ Dinamičke karakteristike: svojstvene frekvencije i oblici

U okviru dinamičke analize sprovedene za ovaj objekat, izračunato je prvih 10 tonova oscilovanja. Periodi oscilovanja i oblici za prva tri tona su:

1. ton $T_1 = 0.3875$ sec – dominantno je pomeranje u pravcu X ose,
2. ton $T_2 = 0.3522$ sec – dominantno je pomeranje u pravcu Y ose,
3. ton $T_3 = 0.2938$ sec – dominantna je rotacija oko vertikalne Z ose.

➤ Maksimalna pomeranja u uslovima mogućeg zemljotresa

Proračun pomeranja usled zemljotresa (kako u pravcu X, tako i u pravcu Y ose) obavljen je primenom spektralne i direktne dinamičke analize. U oba slučaja najveće pomeranje ima čvor 157 koji se nalazi na sredini krova hale. Na slici 3 su prikazana pomeranja čvora u spektralnoj i vremenskoj analizi.



Slika 3. Pomeranja čvora 157 usled zemljotresa u X pravcu: spektralni i akcelerogram
Figure 3. Displacements on joint 157 due to earthquake in X direction: spectrum and accelerogram

Maksimalne dobijene vrednosti pomeranja ovog čvora su prikazane u tabeli 1.

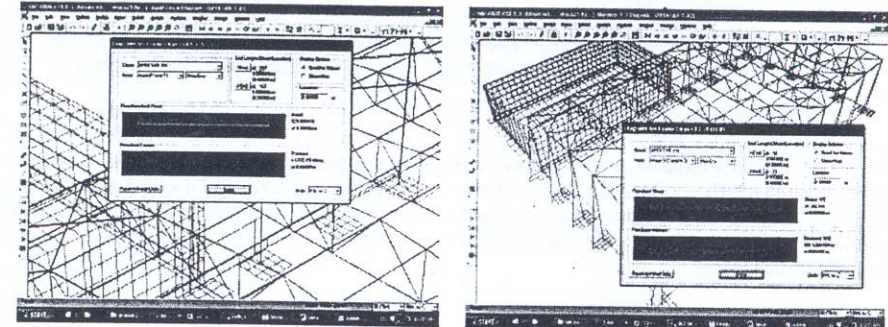
Tabela 1. Najveća dobijena pomeranja u krovu hale (čvor 157)
Table 1. Maximum obtained displacements in the roof (joint 157)

	spektralna analiza	direktna dinamička analiza
zemljotres u pravcu X ose	1.871 cm	0.757 cm
zemljotres u pravcu Y ose	1.866 cm	0.708 cm

Treba napomenuti da je važno i da se prekontrolišu pomeranja stubova hale za skladištenje čvrstog RAO, koji se nalaze uz armirano betonski zid bezbednosnog skladišta RAL. Najveće vrednosti pomeranja u ovom slučaju se dobijaju istog reda veličine kao i za prikazani čvor i konstatovano je da je dilatacija između objekata dovoljna, tako da nema opasnosti od sudaranja.

➤ Maksimalne normalne sile i momenti savijanja u uslovima mogućeg zemljotresa

Kao ilustracija dobijenih rezultata u ovom radu će biti prikazani elementi konstrukcije u kojima se javljaju najveći uticaji usled delovanja zemljotresa u pravcu X ose, a analogno je i u pravcu Y ose. Usled zemljotresa u pravcu X ose maksimalna normalna sila se javljaju su gredi koja se nalazi u ravni terena (br. 480), kao i u stubu koji se nalazi u zidu hale, uz armirano betonski zid bezbednosnog skladišta (br. 44). Što se tiče maksimalnih momenata savijanja oni se javljaju u ivičnom stubu hale, odmah uz armirano betonski zid (br. 17). Vrednosti presečnih sila u tim elementima su date u tabeli 2, kao i na slici 4.



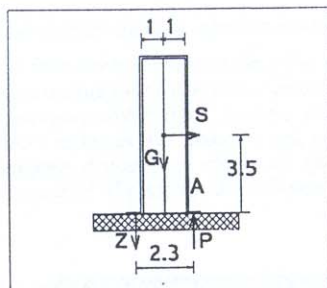
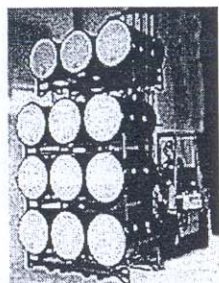
Slika 4. Zemljotres u X pravcu: normalne sile u gredi 480 i momenti savijanja u stubu 17
Figure 4. Earthquake in X direction: normal forces in beam 480 and bending moments in column 17

Tabela 2. Vrednosti presečnih sila u elementima 17, 44 i 480 (zemljotres u X pravcu)
Table 2. Maximum values of cross sectional forces in elements 17, 44 and 480 (earthquake in X direction)

zemljotres u pravcu X ose	spektralna analiza		direktna dinamička analiza	
	N	M	N	M
greda 480	229.68 kN	0	185.01 kN	0.37 kNm
stub 44	10.92 kN	835.89 kNm	3.97 kN	333.49 kNm
stub 17	0.5 kN	861.13 kNm	0.39 kN	344.08 kNm

Analogni rezultati se dobijaju i za zemljotres u pravcu Y ose, ali se ovde ne prikazuju.

Na slici 5, levo je prikazano odlaganje radioaktivnog otpada u čeličnu burad ispunjenu sa betonom i postavljeno na posebne palete prema konceptu firme Cisco-Eagle. Ukupno je predviđeno po 3 bureta u paleti, odn. sloju, 9 takvih slojeva po visini i 2 takva bloka jedan uz drugi. Dimenzije takvog bloka su $2 \times 2 \times 7 \text{ m}$ (visina je 7m), a ukupna težina je $G=2 \times 160=320 \text{ kN}$. Takav blok je opasan po visini sa po dve čelične trake i na slici 5 desno je prikazan računski model za uticaj zemljotresa. Seizmička sila je data sa $S=K_s K_e G$, gde je K_s seizmički koeficijent ($K_s=0.035$), dok je K_e odgovarajući koeficijent ($K_e=10.0$). Analizom je utvrđeno da je blok bezbedan na klizanje ($F_{s,kl}=1.29$) i bez opšivke čeličnim trakama, ali da nije bezbedan na preturanje ($F_{s,pr}=0.86$). Da bi se obezbedilo da koeficijent sigurnosti na preturanje bude $F_{s,pr}=2.50$, neophodne su dve čelične trake po jednom bloku radioaktivnog otpada uz silu ankerovanja od najmanje $Z=150 \text{ kN}$. Time se i koeficijent sigurnosti na klizanje takođe povećava.



Slika 5. levo: Palete sa radioaktivnim otpadom; desno: Računski model za analizu uticaja zemljotresa
Figure 5. left: Palettes for radioactive waste; right: Computational model for earthquake analysis

ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata izvršene dinamičke analize skaldišta za odlaganje radioaktivnog otpada utvrđeno je da su predpostavljene dimenzije konstruktivnih elemenata zadovoljavajuće i u uslovima delovanja mogućeg zemljotresa sa parametrima koji mogu da se očekuju na lokalitetu skladišta. Takođe je utvrđen i bezbedan način ankerovanja uskladištenog otpada, odn. njegovog vezivanja za armirano-betonsku podnu ploču.

LITERATURA

1. Elaborat o geofizičkim ispitivanjima i seizmičkoj mikrorrejonizaciji terena za izgradnju novih objekata u krugu Instituta za nuklearne nauke u Vinči, DP "Kosovoprojekt – Geotehnika", mart 2008.
2. Dinamika diskretnih sistema, S.Brčić, SKC, Beograd, 1998.

NAPOMENA

Rad je urađen u okviru projekta TR 16017 (prvi autor), kao i projekta TR 16031 (drugi autor), koji su finansirani od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.