

ANALIZA TUNELSKOG OBJEKTA NA ZEMLJOTRESNA DEJSTVA

Ljiljana Tadić¹
Đerđ Varju²

UDK: 624.19 : 624.042.7

DOI: 10.14415/zbornikGFS22.008

Rezime: Iako su oštećenja, nastala usled dejstva zemljotresa, veća na nadzemnim nego na podzemnim objektima, efekti dejstva zemljotresa na podzemne objekte nisu zanemarljivi, kako se vrlo često pretpostavlja. S toga je, u cilju obezbeđivanja stabilnosti podzemnog objekta, nužno, osim napona od statičkog opterećenja, predvideti i napone od seizmičkog opterećenja. Dosadašnja iskustva su pokazala da je odziv tunelskog objekta na dejstvo zemljotresa uslovljen odzivom okolnog tla, a brojne analize oštećenja pokazuju da su parametri koji utiču na njihov nastanak i stepen brojni i veoma raznovrsni. U ovom radu se daje kratak prikaz analize kretanja tla pri dejstvu zemljotresa, seizmičkog opterećenja i metoda analize ponašanja tunelskog objekta pri dejstvu zemljotresa. Osim toga, analiziran i uticaj dimenzija poprečnog preseka tunelskog objekta na seizmički odgovor tunelskog objekta, odnosno njihov uticaj na vrednost aksijalnih sila u primarnoj podgradi.

Gljučne reči: tunelski objekat, seizmičko opterećenje, analiza

1. UVOD

Analiza odziva tunelskih konstrukcija na dejstvo seizmičkog opterećenja predstavlja kompleksan zadatak, jer se seizmička dejstva smatraju najkompleksnijim od svih dejstava kojima građevine mogu biti izložene.

Ukorenjeno je mišljenje da su podzemni objekti bezbedniji od nadzemnih objekata, ali ukoliko su pravilno projektovani, onda su i jedni i drugi podjednako bezbedni.

Novije studije mnogih autora (Asakura, El-Nahas, Kontogianni i Stiros, Lanzano, Wang, Yashiro) o ponašanju, odnosno o ranjivosti tunela pri seizmičkim dejstvima, potvrđuju da su oštećenja, nastala usled seizmičkih dejstava, veća na nadzemnim nego na podzemnim objektima, ali i to da efekti zemljotresa na podzemne objekte, posebno na one koji su plitko položeni, nisu zanemarljivi, kako se tradicionalno pretpostavlja. To potvrđuju i podaci dobijeni nakon katastrofalnih zemljotresa koji su se desili poslednjih nekoliko decenija, počev od onih iz dvadesetih godina prošlog veka, poput zemljotresa Kanto (Honshu, Japan, 1923.), preko North-Izu (Hakone-Tanzawa, Japan, 1930.), San Fernando (California 1971.), pa do onih novijeg datuma među kojima su Chi-Chi (Taiwan, 1999.), Niigataken-Chuetsu (Japan, 2004.), Hyogoken Nanbu (Kobe, Japan,

¹ mr Ljiljana Tadić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel: 024/554-300, e-mail: tadic@gf.uns.ac.rs

² mr Đerđ Varju, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel: 024/554-300, e-mail: varjugv@gf.uns.ac.rs

1995.), Duzce (Turkey, 1999.), Baladeh (Iran, 2004.), Wenchuan (Sichuan Province, China, 2008.) i mnogih drugih.

Dosadašnja iskustva su pokazala da je odziv na dejstvo zemljotresa kod većine podzemnih konstrukcija uslovljen odzivom okolne sredine, a ne inercijalnim svojstvima same konstrukcije, kao što je to slučaj kod nadzemnih konstrukcija (za većinu podzemnih konstrukcija inercija okolne sredine znatno je veća od inercije same konstrukcije – Okamoto 1973). Odziv podzemne konstrukcije na seizmičke uticaje bazira se i na dinamičkoj interakciji konstrukcije i medijuma u kojem se ona nalazi (kod podzemnih konstrukcija interakcija sa okolnom sredinom se manifestuje po celoj njenoj spoljnoj konturi, dok kod nadzemnih konstrukcija samo temelji dolaze u interakciju sa okolnom sredinom). Dosadašnja iskustva i brojne analize oštećenja nastalih na podzemnih konstrukcijama usled seizmičkih dejstava, pokazali su da nastanak i stepen oštećenja konstrukcije zavisi od mnoštva parametara, ali ih je zbog kompleksnosti problema nemoguće sve istovremeno uvrstiti u analizu. U ovom radu analizira se uticaj dimenzija poprečnog preseka tunela na veličinu aksijalnih sila u primarnoj podgradi od prskanog betona za tunelski objekat u elastičnoj i plastičnoj sredini.

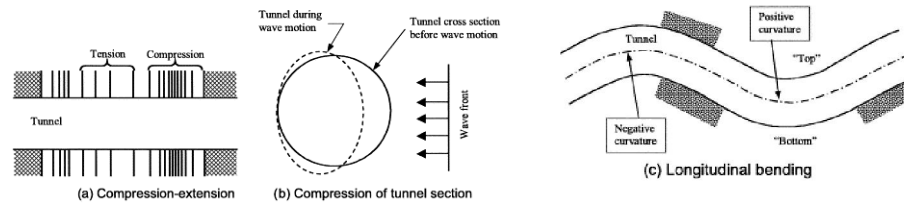
2. EFEKTI DEJSTVA ZEMLJOTRESA NA TUNELSKI OBJEKAT I METODE SEIZMIČKE ANALIZE

Na osnovu statističkih istraživanja izvedeni su sledeći opšti zaključci:

1. Tunelski objekti izgrađeni u tlu trpe znatno veća oštećenja nego oni koji su izgrađeni u čvrstoj stenskoj masi.
2. Tunelski objekti koji su obloženi i stabilizovani sigurniji su od nepodgrađenih tunela.
3. Tunelski objekti su u manjoj meri osetljivi na dejstvo zemljotresa od nadzemnih objekata.
4. Oštećenja na tunelskim objektima se samnjuju sa povećanjem visine nadsloja.
5. Kada je reč o nestabilnim kosinama, oštećenja samih tunelskih portala kao i poremećaj u njihovoj neposrednoj blizini mogu biti od velike važnosti.
6. Oštećenja tunelskih objekata su izazvana prvenstveno maksimalnim ubrzanjima i brzinama kretanja tla uslovljenih zemljotresom, koji zavise od epicentralnog rastojanja i magnitude zemljotresa.
7. Uzrok poremećaja stenske mase ili tunelske konstrukcije lokalnog karaktera mogu biti kretanja tla sa visokom frekvencijom. Ove frekvencije koje rapidno opadaju sa povećanjem rastojanja, najčešće se javljaju na malim udaljenostima od raseda koji je uzrok nastanka potresa.
8. Kretanja tla mogu biti veoma pojačana ukoliko seizmički talasi, koji su u interakciji sa tunelskim objektom, imaju dužinu koja je od jedan do četiri puta veća od prečnika tunela.
9. Zbog boljeg kontakta i interakcije obloge i okolnog tla, tuneli su daleko stabilniji pod simetričnim opterećenjem. Ojačavanje obloge povećavanjem njene debljine i ukrućenjem pojedinih delova duž tunela, bez stabilizacije okolnog tla koje je slabijih karakteristika, doprinosi povećanju seizmičkih sila na tunelsku konstrukciju.
10. Od najveće važnosti su dugotrajna kretanja tla tokom zemljotresa, jer ona dovode do zamora materijala, poremećaja, a samim tim i do velikih deformacija.

Odgovor tunelske konstrukcije na seizmičke talase

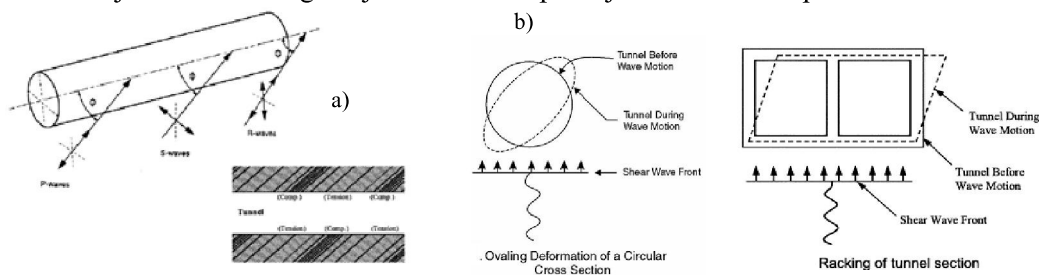
Sa inženjerskog aspekta razlikuju se tri vrste deformacija tunelskih „cevi“: pritisak/zatezanje, podužno savijanje i distorzija poprečnog preseka (Owen & Scholl, 1981). [1] Najjednostavniji oblik deformacija tunelskih „cevi“, koje se mogu javiti pri seizmičkim potresima, su *aksijalne deformacije*. Ova vrsta deformacija nastaje usled dejstva komponenti seizmičkih talasa koje propagiraju u pravcu paralelnom sa podužnom osom tunelske cevi. Dilatacije stenske mase izazvane propagacijom ovih komponenti seizmičkih talasa se prenose na konturu tunelskog iskopa u vidu podužnih dilatacija pritiska i zatezanja (*sl.1.a i b*).



Slika 1: Deformacije tunelske cevi izazvane dejstvom seizmičkih talasa: a) i b) aksijalne deformacije tunelske cevi, c) podužno savijanje tunelske cevi [2]

Kod tunelskih cevi čija je dužina veća od talasne dužine fronta seizmičkog talasa, ovo seizmičko delovanje se javlja kao priraštaj ili opadanje vrednosti onih primarnih napona u stenskoj masi koji su po pravcu delovanja paralelni sa podužnom osom tunelske cevi. U slučajevima kada je dužina tunelske cevi manja od talasne dužine fronta seizmičkog talasa, delovanje aksijalnih deformacija se ostvaruje samo do visine koja je jednaka razlici maksimalne i minimalne dilatacije koja se može ostvariti na delu talasne dužine.

Podužno savijanje (*sl.1.c*) uzrokuju komponente seizmičkih talasa koje izazivaju pomeranja u pravcu upravnom na podužnu osu tunela. U slučajevima kada se talasi pružaju dijagonalno u odnosu na tunelsku konstrukciju (*sl.2.a*) dolazi do toga da se različiti delovi konstrukcije pomeraju u različitim fazama. Uopšteno posmatrano, talasi većih talasnih dužina dovode do pomeranja velikih amplituda, dok su maksimalna zakrivljenja duž tunelske cevi povezana sa talasima kraćih talasnih dužina koji izazivaju pomeranja relativno malih amplituda. [3] *Distorziju* (smicanje) poprečnog preseka tunelske cevi uzrokuju transverzalni talasi koji se prostiru u poprečnom pravcu (upravnom ili približno upravnom na podužnu osu tunela). Ona može nastati usled delovanja talasa koji se prostiru horizontalno ili koso, ali kada je ova vrsta deformacije u pitanju, dominantni su vertikalni S talasi. Treba napomenuti da je ovo najkritičniji vid deformacije tunelske obloge koji može nastati pri dejstvu seizmičkih potresa.



Slika 2. Deformacije tunelske cevi izazvane dejstvom seizmičkih talasa: a) Seizmički talasi koji izazivaju aksijalne deformacije i savijanje tunelske cevi, b) Distorzija poprečnog preseka tunelske cevi [2]

Pri seizmičkoj analizi tunelskih objekata potrebno je obuhvatiti tri različite vrste opterećenja:

- a) primarne napone - („in situ“ naponsko stanje koje postoji u neporemećenoj stenskoj masi) obuhvataju težinu tla, pritisak zemlje i pritisak vode (ukoliko ona postoji),
- b) sekundarne napone - nastaju kao posledica izgradnje tunela i poremećaja primarnog naponskog stanja i
- c) tzv. incidentna opterećenja od seizmičkih talasa.

Seizmička analiza tunelskih konstrukcija može biti vršena odvojeno ili kombinovano za primarne (P) i sekundarne (S) talase. U slučaju plitko položenih tunelskih konstrukcija analize je potrebno vršiti i za Rejljeve (R) talase jer oni u tlu izazivaju pomeranja i napone koji se bitno razlikuju od onih koje izazivaju P i S talasi. U slučaju ovih talasa deformacije konstrukcije su mnogo veće, a najizraženije među njima su deformacije savijanja.

Pri aseizmičkom projektovanju tunelskih konstrukcija, pored toga što treba predvideti kako će se konstrukcija usled dejstva zmljotresa deformisati, nužno je predvideti i kako će se materijal od kojeg je konstrukcija sačinjena ponašati pri tim deformacijama. S obzirom na to treba razlikovati tri domena: a) odgovor u domenu elastičnog ponašanja (nema oštećenja i plastičnih deformacija), b) nelinearne vibracije sa velikim amplitudama (plastične deformacije, prsline, ali ne do nivoa loma), c) vibracije veoma velikih amplituda (velika oštećenja koja mogu dovesti do kolapsa).

Metode u seizmičkoj analizi tunelskih objekata

Free-field metoda omogućuje vrlo jednostavnu i brzu procenu odgovora tunelske konstrukcije na dejstvo zmljotresa. Ova metoda zanemaruje interakciju između okolne sredine i tunelske konstrukcije. Suština je da se najpre odrede deformacije slobodnog terena (kada u tlu još uvek ne postoji tunelski objekat) izazavne seizmičkim oscilacijama, a zatim projektuje konstrukcija koja je prilagođena ovim deformacijama. Ova metoda se primenjuje u čvrstim stenskim masama, ili kada se predviđa nizak nivo potresa.

U **pseudo-statičkoj** metodi deformacije tla predstavljaju statičko opterećenje, a interakcija konsrukcije i tla ne uključuje efekte propagacije seizmičkih talasa.

Dinamička metoda se bazira na činjenici da prisustvo podzemnog objekta u tlu utiče na modifikaciju deformacija slobodnog terena. Dinamička interakcija konstrukcije i tla se u ovoj metodi utvrđuje numeričkom analizom zasnovanoj na metodi konačnih elemenata ili na metodi konačnih razlika. Primenjuje se u slučaju kada je konstrukcija položena u tlo slabih karakteristika.

BIEM metoda se koristi za simulaciju dinamičkog ponašanja tunelskih konstrukcija položenih u ispucalom i poremećenom medijumu.

3. NUMERIČKA ANALIZA

Numerički model, ulazni parametri i rezultati numeričke analize

Numeričko modeliranje je zvršeno softverskim paketom Phase², koji se bazira na metodi konačnih elemenata.

Ulaznim parametrima definisan je položaj tunela u odnosu na površinu terena, u prvom redu debljina stenske mase iznad gornje površine tunelskog iskopa, poprečni presek tunela, geotehnička svojstva stenske mase (Poissonov koeficijent, modul elastičnosti, zapreminska težina, kohezija, ugao unutrašnjeg trenja) i parametri primarne podgrade (Poissonov koeficijent, modul elastičnosti, zapreminska težina i sl.) tip proračuna i maksimalni broj iteracija prilikom tih proračuna.

Usvojene su spoljašnje granice proračunskog preseka tipa BOX s faktorom ekspanzije 4 (četverostruka vrednost prečnika tunelskog otvora). Na bočnim konturama proračunskog modela, na donjoj i gornjoj granici proračunskog preseka, sprečeno je horizontalno i vertikalno pomeranje.

Diskretizacija proračunskog bloka je izvršena uz zahtev da se podela radi sa deset segmenata po spoljnim konturama modela. Mreža elemenata ima najveću gustinu u užoj zoni oko otvora jer se u njoj očekuju najveće promene napona i pomeranja.

Nakon generisanja mreže zadato je opterećenje. Za stičko opterećenje uzeta je težina nadsloja, tj. pritisak masiva koji odgovara primarnim naponima p_v i p_h . U Phase² seizmičko opterećenje je pseudo-statičko, odnosno zadaju se seizmički koeficijenti za horizontalni i vertikalni pravac. U ovom radu numeričke simulacije su rađene za sledeća tri slučaja:

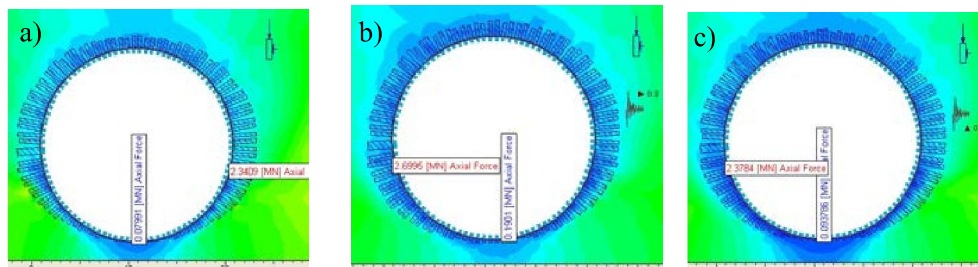
1. seizmički koeficijent u horizontalnom pravcu $h=0,3$,
2. seizmički koeficijent u vertikalnom pravcu $v=0,3$,
3. seizmički koeficijent u horizontalnom pravcu $h=0,3$ i $v=0,2$ u vertikalnom pravcu.

Analize su vršene za tunel u elastičnoj i u plastičnoj sredini, pri čemu je variran poluprečnik tunelskog otvora (od 2,5m do 10m). Primarna podgrada je od prskanog betona debljine 0,1m.

Na slici 3a je prikazan dijagram aksijalnih sila u primarnoj podgradi tunela prečnika 20m, izgrađenog u plastičnoj sredini, usled dejstva statičkog opterećenja. Za ovaj slučaj opterećenja, odnosno prečnik tunelskog otvora i datu sredinu, vrednost pomenute sile se kreće od min 0,078MN do max 2,34MN.

Slike 3b i 3c predstavljaju dijagrame aksijalnih sila u podgradi dobijene nakon nanošenja dinamičkog opterećenja na isti model (slika 3b za $h=0,3$, a slika 3c za $v=0,3$).

Maksimalna vrednost aksijalne sile u podgradi dobijena je pri dinamičkom opterećenju ($h=0,3$) za tunelski otvor poluprečnika 10m, a iznosi približno 2.7MN.



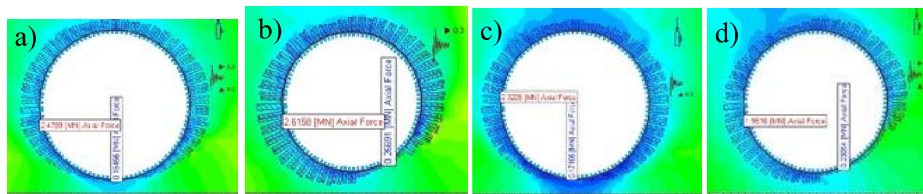
Slika 3: Dijagrami aksijalnih sila u primarnoj podgradi za tunelski objekat poluprečnika 10m u plastičnoj sredini: a) statičko opterećenje b) dinamičko opterećenje ($h=0,3$), c) dinamičko opterećenje ($v=0,3$)

Na slici 4 su prikazani dijagrami aksijalnih sila u primarnoj podgradi tunela prečnika 20m u elastičnoj sredini dobijeni nakon nanošenja dinamičkog opterećenja: sl.4b - vrednosti dobijene za $h=0,3$, sl.4c – vrednosti dobijene za $v=0,3$ i sl. 4d za $h=0,3$ i $v=0,4$.

Tabela 1: Vrednosti aksijalnih sila u primarnoj podgradi usled statičkog i dinamičkog opterećenja za tunelski otvor poluprečnika $R=5m$ i $R=10m$

Okolna sredina	Vrsta opterećenja	Seizmički koef.	R=5m		R=10m	
			N[MN]			
			min	max	min	max
Elastična	Dinamičko	$h=0,3$	0.0717	0.9301	0,2824	2.652
		$v=0,3$	0.0713	0.9304	0,1717	2.3226
		$h=0,3v=0,2$	0.0712	0.9298	0.2305	1.9516
	Statičko		0.0720	0.9307	0.1555	2.3067
Plastična	Dinamičko	$h=0,3$	0.2558	1.8492	0.1901	2.6995
		$v=0,3$	0.2169	1.6891	0.0938	2.3784
		$h=0,3v=0,2$	0.2548	1.8445	0.1646	2.4789
	Statičko		0.2047	1.6846	0.0799	2.3409

U tabeli 1 prikazane su vrednosti maksimalnih i minimalnih aksijalnih sila u primarnoj podgradi za tunelski otvor prečnika 10m i tunelski otvor prečnika 20m za različite vrste opterećenja u plastičnoj, odnosno elastičnoj sredini.



Slika 4: Dijagrami aksijalnih sila u primarnoj podgradi za tunelski objekat poluprečnika 10m: a) plastična sredina ($h=0,3$ i $v=0,2$), b) elastična sredina ($h=0,3$), c) elastična sredina ($v=0,3$) d) elastična sredina ($h=0,3$ i $v=0,2$)

4. ZAKLJUČAK

Rezultati numeričke analize su pokazali da je maksimalna aksijalna sila u primarnoj podgradi tunela zavisna od dimenzija tunelskog otvora.

Maksimalna vrednosti aksijalne sile u primarnoj podgradi, u elastičnoj sredini, ne menja se značajno nakon nanošenja dinamičkog opterećenja, ali ni sa povećavanjem dimenzija tunelskog otvora. Za razliku od elastične sredine, u plastičnoj sredini sa povećanjem dimenzija tunelskog otvora značajno raste i vrednost maksimalne aksijalne sile u podgradi, kako za statičko tako i za dinamičko opterećenje. Osim toga, primetna je i velika razlika između maksimalnih vrednosti aksijalnih sila u podgradi usled statičkog opterećenja i onih koje su dobijene nakon nanošenja dinamičkog opterećenja. Upoređivanjem dobijenih rezultata uočava se da ta razlika može biti i do 40% vrednosti max aksijalne sile izazvane statičkim opterećenjem.

LITERATURA

- [1] Owen, G.N., Scholl, R.E.: Earthquake engineering of large underground structures. Report no. FHWA/RD-80/195. Federal Highway Administration and National Science Foundation, **1981**.
- [2] Hashash YMA, Hook JJ, Schmidt B., Yao JI-C.: Seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling and Underground Space Technology 16(4): 247-293 CrossRef, ISI., **2001**.
- [3] Kuesel, T.R.: Earthquake Design Criteria for Subways. J. Struct. Div., ASCE ST6, 1213-1231, **1969**.
- [4] Phase² 5.0: 2D finite element program for analyzing and designing underground and surface excavations and their support systems, **2004**.
- [5] Web stranica: www.sciencedirect.com

ANALYSIS OF EARTHQUAKE EFFECTS ON TUNNEL FACILITY

Summary: *Although the damage caused by earthquake, more on above-ground than underground structures, the effects of earthquake on underground facilities are not negligible, as is often assumed. Therefore, in order to ensure the stability of the underground facility, it is necessary, apart a stress from the static load, predict stress from seismic loading.*

Past experience has shown that the response of tunnel in earthquake impact caused by the response of the surrounding soil, and many analysis of damage shows that the parameters that influence their occurrence and degree are numerous and very diverse.

This paper provides a brief overview of the analysis of ground motion during an earthquake, seismic loading and behavior analysis of tunnel in an earthquake. In addition, we analyzed the influence dimension cross-sectional of the tunnel on the seismic response of the tunnel and their impact on the value of the axial force in the primary support.

Keywords: *Tunnel, seismic loading, analysis.*