

Primljen / Received: 1.6.2017.

Ispravljen / Corrected: 13.6.2017.

Prihvaćen / Accepted: 5.7.2019.

Dostupno online / Available online: 10.9.2020.

Primjena metode konačnih elemenata za 2D i 3D analize slijeganja izazvanih izgradnjom tunela

Autor:

Prof.dr.sc. **Snežana Maraš-Dragojević**, dipl.ing.grad.

Sveučilište u Beogradu

Građevinski fakultet

snezamd@grf.bg.ac.rs

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Snežana Maraš-Dragojević

Primjena metode konačnih elemenata za 2D i 3D analize slijeganja izazvanih izgradnjom tunela

U radu su prikazani rezultati niza 3D i 2D analiza izgradnje tunela s otvorenim čelom u laporasto-glinovitim sredinama. Provedena je parametarska analiza utjecaja početnog stanja naprezanja, deformabilnosti tla, parametara posmične čvrstoće i anizotropije tla na procjenu slijeganja. Usporedba 2D i 3D rezultata pokazuje da se profil slijeganja određen 2D analizom dobro slaže sa 3D rezultatima kada se usvoji adekvatna vrijednost rasterećenja naprezanja prije ugradnje obloge. Pokazano je da faktor redukcije naprezanja u značajnoj mjeri ovisi o parametrima posmične čvrstoće tla.

Ključne riječi:

tunel, slijeganje, 3D FE analiza, metoda redukcije naprezanja

Research paper

Snežana Maraš-Dragojević

Use of finite element method for 2D and 3D analyses of tunnelling induced settlements

Results of a series of 3D and 2D analyses of open-face tunnelling in marly-clayey deposits are presented in the paper. A parametric study was performed to investigate the influence of initial stress state, soil deformability, shear strength parameters, and soil anisotropy, on settlement prediction. Comparison of 2D and 3D results shows that the settlement trough predicted by 2D analysis agrees well with 3D results when an appropriate amount of unloading prior to lining installation is adopted. It is demonstrated that the load reduction factor significantly depends on shear strength parameters of soil.

Key words:

tunnel, settlement, 3D FE analysis, stress reduction method

Vorherige Mitteilung

Snežana Maraš-Dragojević

Anwendung der Finite-Elemente-Methode für die 2D- und 3D-Analyse der durch den Tunnelbau verursachten Setzung

Diese Arbeit präsentiert die Ergebnisse einer Reihe von 3D- und 2D-Analysen des offenen Fronttunnelbaus in Mergelton-Umgebungen. Eine parametrische Analyse des Einflusses des anfänglichen Spannungszustands, der Bodenverformbarkeit, der Scherfestigkeitsparameter und der Bodenanisotropie hinsichtlich der Senkungsbewertung wurde durchgeführt. Ein Vergleich der 2D- und 3D-Ergebnisse zeigt, dass das durch 2D-Analyse ermittelte Setzungsprofil gut mit den 3D-Ergebnissen übereinstimmt, wenn vor der Installation der Auskleidung ein angemessener Spannungsentlastungswert übernommen wird. Es hat sich gezeigt, dass der Spannungsreduzierungsfaktor weitgehend von den Scherfestigkeitsparametern des Bodens abhängt.

Schlüsselwörter:

Tunnel, Setzung, 3D-FE-Analyse, Spannungsreduzierungsverfahren

1. Uvod

Jedan od glavnih problema kod izgradnje tunela s otvorenim čelom (NATM - nova austrijska tunelska metoda ili štit s otvorenim čelom) u urbanom području jest kontrola slijeganja površine terena. Procjena slijeganja uslijed izgradnje tunela u mekoj sredini je važan zadatak geotehničkog projektiranja, i kao takva je predmet brojnih istraživanja. Postoje tri kategorije pristupa ovom problemu: empirijske metode, analitičke metode i numeričke metode. Empirijske metode, koje se temelje na pretpostavci da se profil slijeganja može opisati Gaussovom funkcijom [1], često se koriste u inženjerskoj praksi. One daju razumnu procjenu slijeganja površine terena ako su uvjeti na terenu dobro poznati i projektni parametri adekvatno kalibrirani. Analitičke metode [2-5] daju jednostavna rješenja u zatvorenom obliku, ali je njihova primjena u praksi ograničena jer se često zasnivaju na idealiziranim pretpostavkama. Za modeliranje složenog problema interakcije tunel-tlo, nužne su napredne numeričke metode. Metoda konačnih elemenata (eng. *Finite element method* - FEM) prilagodljiv je alat koji su usvojili mnogi autori. Razna istraživanja su pokazala da ključnu ulogu u FE procjeni slijeganja uslijed izgradnje tunela imaju 3D učinci izgradnje tunela, početno stanje naprezanja (naročito koeficijent bočnog pritiska tla u stanju mirovanja K_0) i naponsko-deformacijsko ponašanje tla [6-20]. Više autora je napomenulo da analiza izgradnje tunela primjenom metode konačnih elemenata predviđa suviše široke poprečne profile slijeganja u odnosu na podatke s terena, naročito u tvrdim glinama s visokim vrijednostima K_0 ($K_0 > 1$). Sugerirano je da se poboljšano predviđanje može postići modeliranjem anizotropije i nelinearnosti tla pri malim deformacijama (eng. *small-strain nonlinearity*). Simpson i dr. [8] zaključili su na osnovi FE analiza izgradnje tunela u londonskoj glini, da je širina izračunanog profila slijeganja površine terena pod značajnim utjecajem anizotropije modula smicanja, a malim utjecajem nelinearnosti (i ortotropni linearno elastični idealno plastični Mohr-Coulombov model i ortotropni nelinearni model dali su profile slijeganja koji su bili mnogo bliži promatranim oblicima nego nelinearni ali izotropni model). Lee i Rowe [6] zaključili su na osnovi linearno elastičnih idealno plastičnih FE analiza izgradnje tunela, da treba uzeti u obzir učinak elastične anizotropije, naročito odnos nezavisnog modula smicanja G_{vh} i vertikalnog modula E_v , kako bi se dobila pouzdana procjena slijeganja.

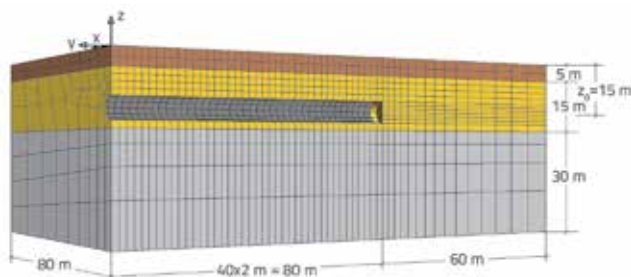
Izgradnja tunela je nedvojbeno trodimenzionalni proces. Da bi se simuliralo napredovanje radova i promjene naprezanja i deformacija koji se događaju na privremenom radnom čelu tunela, potrebna je puna 3D FE analiza. Međutim, s obzirom na to da je 3D modeliranje proračunski zahtjevno, u rutinskoj geotehničkoj praksi još se uvijek uobičajeno koriste 2D modeli. Kada se proces izgradnje tunela simulira u 2D (ravninsko stanje deformacija) modelu, nužno je uvesti barem jednu pretpostavku kojom se uzimaju u obzir relaksacija naprezanja i pomaci koji se događaju na čelu tunela prije formiranja obloge. U literaturi su, do sada, predložene različite metode koje uzimaju u obzir 3D

učinke izgradnje tunela u okviru pojednostavljenih, 2D (ravninsko stanje deformacija) analiza (pregled metoda se može naći u [21, 22]). Najčešće korištena metoda za 2D modeliranje izgradnje tunela s otvorenim čelom jest metoda redukcije naprezanja koja zapravo predstavlja primjenu *convergence-confinement* metode u FEM [23].

U ovom radu proveden je niz 2D i 3D elastoplastičnih analiza izgradnje tunela s otvorenim čelom u beogradskim laporasto-glinovitim sredinama. Uspoređeni su poprečni profili slijeganja površine terena dobiveni 3D i 2D modeliranjem te su kalibrirane vrijednosti faktora redukcije naprezanja. Provedena je parametarska analiza s ciljem istraživanja utjecaja koeficijenta bočnog pritiska tla u stanju mirovanja K_0 , deformabilnosti tla, parametara posmične čvrstoće (kohezija i kut unutrašnjeg trenja) kao i anizotropije tla na procjenu slijeganja. U okviru provedenih parametarskih analiza dani su neki zaključci o faktoru redukcije naprezanja. Kao studija slučaja, prikazana je FE analiza slijeganja tunela "Dedinje", koji je dio beogradskog željezničkog čvora.

2. FE analiza

Na slici 1. prikazana je mreža konačnih elemenata usvojena za 3D modeliranje izgradnje tunela s otvorenim čelom u beogradskim laporasto-glinovitim sredinama. Te sredine su karbonatne prašinate gline tvrde konzistencije i visoke plastičnosti. Usvojeni profil tla je karakterističan za teren u Beogradu. On se sastoji od sloja lesa debljine 5 m i sloja degradirane smeđo-žute laporaste gline debljine 15 m koji leži na sloju sive neizmijenjene laporaste gline i lapora. Tunel je promjera 6 m s betonskom oblogom debljine 0,35 m (usvojeno iz Studije tehničko-ekonomske prihvatljivosti brzog javnog gradskog prijevoza u Beogradu [24]). Os tunela je na dubini od 15 m.



Slika 1. FE mreža usvojena za 3D analize

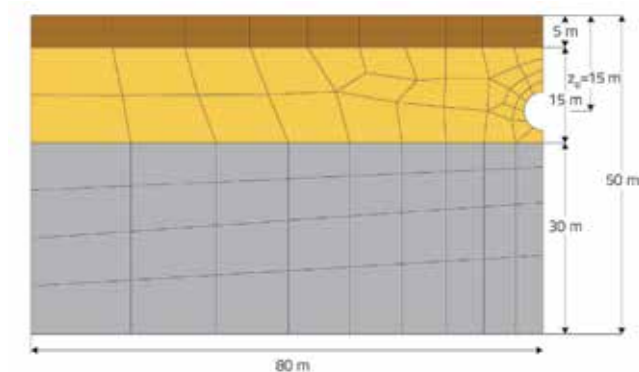
Analize metodom konačnih elemenata, prikazane u ovom radu, provedene su primjenom DIANA Finite Element Analysis code (TNO DIANA BV, Delft). DIANA je višenamjenski FE program (trodimenzionalni i nelinearni) koji omogućava modeliranje fazne izgradnje [25].

2.1. Modeliranje izgradnje tunela

3D proces izgradnje tunela je simuliran primjenom *step by step* (korak po korak) postupka [26-28]. Analiza je započela *in*

situ stanjem naprezanja. Izgradnja tunela je modelirana tako što su sukcesivno uklanjani elementi na čelu tunela kako bi se simulirao nepodgrađeni iskop dužine 2 m, a elementi obloge su sukcesivno ugrađivani da se podupre prethodni iskop. Proces izgradnje tunela je simuliran u 40 koraka, na dužini od 80m. Tlo je modelirano izoparametarskim *brick* elementima s 20 čvorova, a tunelska je obloga modelirana četverokutnim izoparametarskim zakrivljenim *shell* elementima s 8 čvorova. Između obloge i tla nisu primijenjeni elementi sučelja (pretpostavka je da nema relativnih pomaka između obloge i okolnog tla). Na svim vertikalnim granicama mreže spriječeni su horizontalni pomaci, dok su na donjoj granici mreže spriječeni pomaci u svim smjerovima. Za *shell* elemente tunelske obloge primijenjen je dodatni uvjet da je spriječena rotacija oko uzdužne osi u ravnini simetrije.

U radu su sve 2D FE analize provedene primjenom metode redukcije naprezanja, koja zapravo predstavlja primjenu *convergence-confinement* metode u FEM [23]. Prema toj metodi, obloga se ugrađuje nakon rasterećenja određenog postotka početnih naprezanja. Faktor redukcije naprezanja λ (postotak rasterećenja naprezanja prije ugradnje obloge) kontrolni je parametar koji se mora propisati. Na slici 2. prikazana je FE mreža usvojena za 2D analize koja odgovara presjeku 3D mreže prikazane na slici 1. Tlo je modelirano četverostranim izoparametarskim ravninskim elementima s osam čvorova, a obloga tunela modelirana je zakrivljenim *infinite shell* elementima s tri čvora.



Slika 2. FE mreža usvojena za 2D analize

Početni korak je analiza početnog geostatičkog stanja naprezanja, nakon čega se elementi tla u okviru konture iskopa uklanjaju i pri propisanoj vrijednosti λ ugrađuje se obloga na deformiranoj konturi tunela. Parametar λ ovisi o brojnim faktorima kao što

su karakteristike tla, geometrija tunela, metoda izgradnje i dužina napredovanja radova. On se može kalibrirati na osnovi usporedbe 2D i 3D FE rezultata. U praksi se parametar λ često procjenjuje na osnovi inženjerskog iskustva sa sličnim uvjetima izgradnje tunela ili na osnovi podataka mjerenja. U ovom su radu vrijednosti faktora redukcije naprezanja λ kalibrirane tako da se dobije ista veličina slijeganja površine terena iznad osi tunela primjenom 2D i 3D analize.

2.2. Početni uvjeti, konstitutivni model i parametri modela

U početnom koraku svake FE analize uspostavljena su početna naprezanja u tlu. Početna naprezanja su definirana vrijednostima gustoće tla i koeficijenta bočnog pritiska tla u stanju mirovanja K_0 prikazanih u tablici 1. S obzirom na hidrogeološke karakteristike terena u Beogradu, prisutnost podzemne vode nije razmatrano. Da bi se istražio utjecaj K_0 na slijeganja površine terena, FE analize su provedene s vrijednostima $K_0 = 0,65, 0,85$ i $1,0$ za drugi sloj tla (s obzirom na to da najveći utjecaj na rezultate ima vrijednost K_0 na dubini tunela).

U ovom radu modelirano je drenirano ponašanje tla primjenom linearno elastičnog idealno plastičnog modela s Mohr-Coulombovim (MC) uvjetom loma [25]. Namjera je bila istražiti utjecaj modula elastičnosti tla E i parametara posmične čvrstoće (kohezija c' i kut trenja ϕ') na predviđena slijeganja površine terena. Parametri MC modela, koji su usvojeni kao reprezentativni za beogradsko tlo, prikazani su u tablici 1. (pregled geotehničkih svojstava ovih vrsta tla se može naći u [29]). Usvojeno je da je kut dilatacije ψ' jednak nuli za sve slojeve. U parametarskoj analizi, vrijednosti E , ϕ' i c' su varirane za drugi sloj tla (degradirana smeđo-žuta laporasta glina), u kome je tunel lociran. Tunelska obloga je modelirana elastičnim *shell* elementima debljine 0,35 m sa $\rho = 2,5 \text{ g/cm}^3$, $E = 15 \text{ GPa}$ i $\nu = 0,15$.

U radu su provedene dodatne FE analize da bi se ispitali učinci elastične anizotropije na predviđena slijeganja površine terena. Transverzalno-anizotropno (ortotropno) ponašanje tla je potpuno definirano s pet nezavisnih elastičnih parametara: vertikalni Youngov modul E_v , horizontalni Youngov modul E_h , dva Poissonova koeficijenta ν_{vh} i ν_{hv} i modul smicanja G_{vh} ($G_{hh} = E_h/2(1 + \nu_{hh})$, $\nu_{vh}/\nu_{hv} = E_v/E_h$). Kada se primjenjuju ti parametri, često se specificiraju odnosi $n = E_h/E_v$ i $m = G_{vh}/E_v$. Lee i Rowe [6] pokazali su da odnos nezavisnog modula smicanja G_{vh} prema vertikalnom modulu E_v ima najveći utjecaj na oblik profila slijeganja uslijed izgradnje tunela i da vrijednosti $m = 0,2 - 0,25$

Tablica 1. Parametri tla korišteni u FE analizama

Sloj tla	ρ [g/cm ³]	E [MPa]	ν	c' [kPa]	ϕ' [°]	K_0
Les	1,85	10	0,4	18	23	0,65
Degradirana laporasta glina	2,0	(10) 15 (30)	0,3	20 (40)	(15) 20 (25)	(0,65) 0,85 (1,0)
Neizmjenjena laporasta glina i lapori	2,0	60	0,3	60	25	0,58

daju primjereno slaganje FE rezultata i centrifugalnih testova (oni su naglasili da je odnos G_{vh}/E_v u uvjetima rasterećenja za većinu tla niži od izotropne vrijednosti). U ovom su radu elastični anizotropni parametri tla usvojeni za drugi sloj tla - degradiranu smeđo-žutu laporastu glinu u kojoj je smješten tunel. Analize su provedene s dreniranim odnosom $n = E_h/E_v = 1,2$ i $m = G_{vh}/E_v$ u tipičnom rasponu 0,2 do 0,4 s $v_{hh} = 0,3$ i $v_{vh} = 0,25$. Vertikalni Youngov modul E_v je iste veličine kao u izotropnom modelu. Parametri MC modela su dani u tablici 1.

3. Rezultati analiza i rasprava

Inicijalno, 3D analiza je provedena s ulaznim parametrima koji su predočeni (bez zagrada) u tablici 1. Na slici 3. prikazan je uzdužni profil slijeganja površine terena iznad osi tunela, dobiven nakon 40 koraka iskopa (čelo tunela na $y = -80$ m). Stacionarno stanje slijeganja (horizontalni dio uzdužnog profila) tzv. *steady-state* je postignuto na približno 30 m (5D) iza čela tunela.

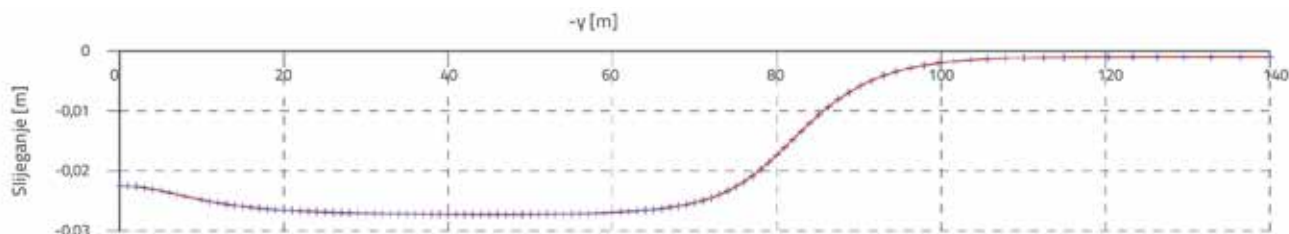
Na slici 4. prikazan je poprečni profil slijeganja površine terena, dobiven 3D analizom, na $y = -50$ m (*steady-state* uvjeti) i profil dobiven ekvivalentnom 2D analizom primjenom metode redukcije naprezanja s $\lambda = 0,63$. Faktor redukcije naprezanja λ je kalibriran na osnovi *steady-state* slijeganja iz 3D analize (kao što će biti navedeno u poglavlju 3.5). Može se uočiti da 3D i 2D analize daju slične profile slijeganja površine terena kad se usvoji odgovarajuća vrijednost faktora redukcije naprezanja. Poprečni profili slijeganja dobiveni FE analizama uspoređeni su s empirijskim Gausovim krivuljama. Opsežna terenska mjerenja su pokazala da se poprečni profil slijeganja može dobro opisati Gaussovom funkcijom [1], pri čemu je vertikalno slijeganje u poprečnom smjeru iskazano izrazom (1):

$$S_v(x) = S_{vmax} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

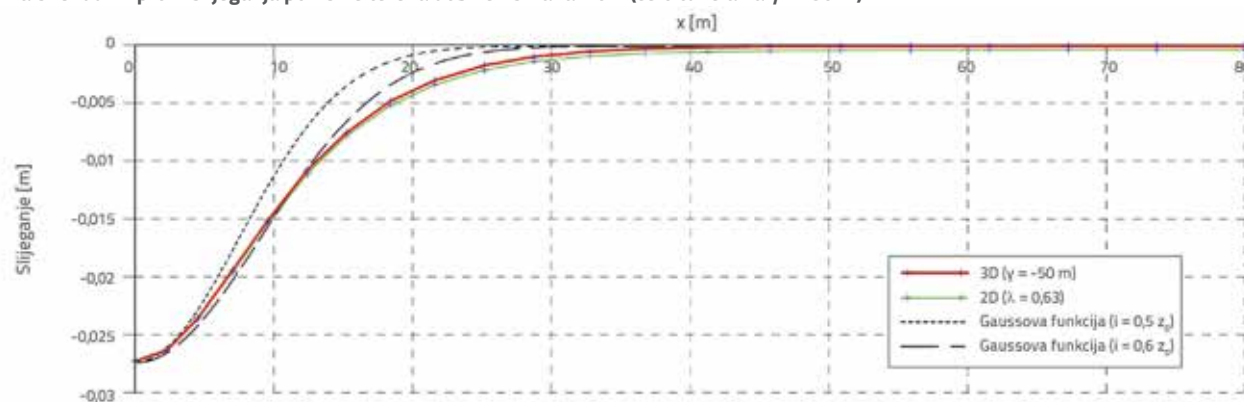
gdje je S_{vmax} najveće slijeganje mjereno iznad osi tunela, dok je i horizontalni razmak od osi tunela do točke infleksije profila slijeganja.

Slijeganje tla uslijed izgradnje tunela obično se karakterizira parametrom koji predstavlja faktor gubitka volumena tla *volume loss* ili *ground loss* $V_L = V_s/(\pi D^2/4)$, gdje je V_s višak volumena tla iskopa u odnosu na teorijski volumen tunela i D je promjer iskopa tunela. Za tunele u glinama (pod uvjetima konstantnog volumena) može se usvojiti da je volumen V_s jednak volumenu profila slijeganja $V_s = 2,5 \cdot i \cdot S_{vmax}$. Tipične vrijednosti parametra *volume loss* za izgradnju tunela s otvorenim čelom u mekanom tlu uglavnom su u rasponu 1 do 3 % [30, 31]. O'Reilly i New [32] prikazali su terenske podatke za izgradnju tunela štitom s otvorenim čelom u londonskoj glini koji daju V_L u rasponu 1 do 2 %. Parametar širine profila i se definira kao udaljenost točke infleksije od centralne linije tunela. O'Reilly i New [32] su za praktičnu primjenu predložili linearnu vezu $i = Kz_0$ s $K = 0,5$ za gline. Mair i Taylor [30] su za glinovito tlo dobili vrijednost parametra K u rasponu od 0,4 do 0,6. Za primjenu ove metode u inženjerskoj praksi ključan je izbor odgovarajuće vrijednosti parametra *volume loss* V_L . Empirijske metode se mogu kalibrirati na osnovi 3D FE analiza ili podataka iz prethodnih projekata u sličnim uvjetima.

Na slici 4. prikazana je usporedba poprečnih profila slijeganja dobivenih FE analizama i Gaussovih krivulja s $i = 0,5z_0$ i $i = 0,6z_0$ (dobivena vrijednost *volume loss* je oko 2 %). Može se uočiti da



Slika 3. Uzdužni profil slijeganja površine terena dobiven 3D analizom (čelo tunela na $y = -80$ m)

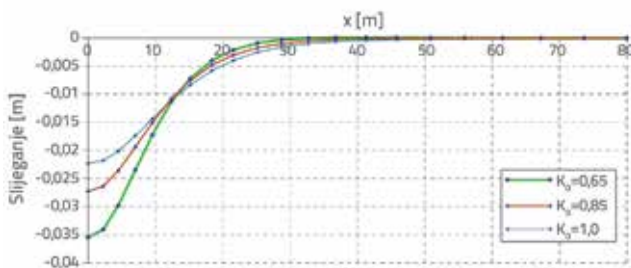


Slika 4. Poprečni profili slijeganja površine terena dobiveni 3D i 2D analizama zajedno s Gausovim krivuljama

je širina profila slijeganja dobivenog primjenom FEM donekle precijenjena.

3.1. Utjecaj koeficijenta bočnog pritiska tla

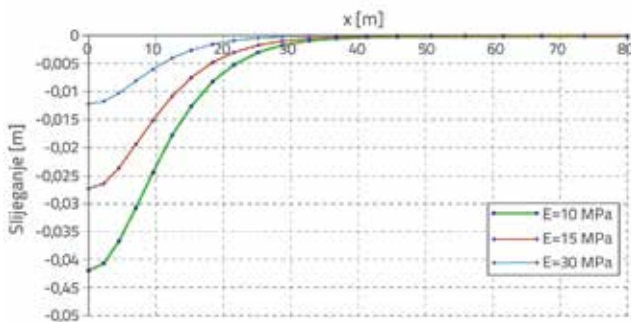
U ovom su radu dodatne 3D analize provedene radi istraživanja utjecaja koeficijenta bočnog pritiska tla (K_0) na profil slijeganja uslijed izgradnje tunela. Na slici 5. prikazani su poprečni profili slijeganja površine terena dobiveni iz 3D analiza (na $y = -50$ m) s vrijednostima K_0 od 0,65, 0,85 i 1,0 (za drugi sloj tla u kome se nalazi tunel). Može se uočiti da niže vrijednosti K_0 daju užu i dublje poprečne profile slijeganja, što je u skladu sa zaključcima drugih autora.



Slika 5. Utjecaj K_0 na slijeganje površine terena

3.2. Utjecaj deformabilnosti tla

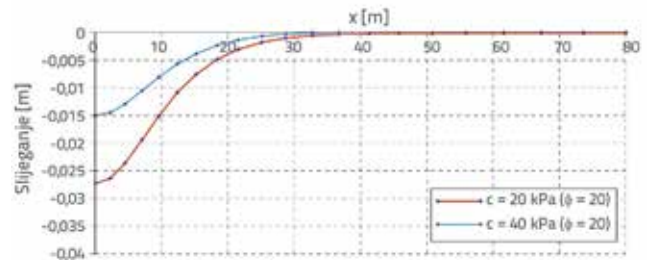
Na slici 6. prikazani su profili slijeganja površine terena dobiveni 3D analizama (na $y = -50$ m) za vrijednosti Youngovog modula $E = 10, 15$ i 30 MPa (za drugi sloj tla). Može se vidjeti da modul elastičnosti ima značajan utjecaj na izračunano slijeganje površine terena. Kao što je i očekivano, niže vrijednosti E daju veća slijeganja.



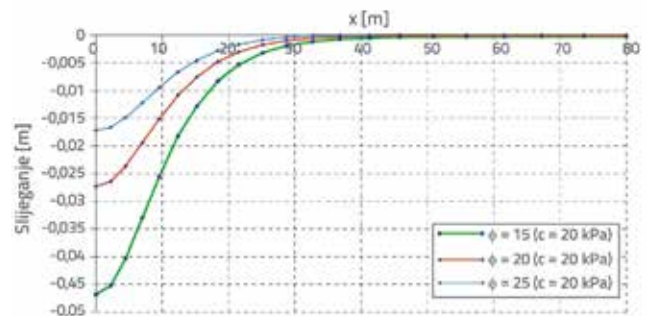
Slika 6. Utjecaj deformabilnosti tla na slijeganje površine terena

3.3. Utjecaj parametara posmične čvrstoće

Na slici 7. prikazani su poprečni profili slijeganja dobiveni iz 3D analiza za vrijednosti kohezije (za drugi sloj tla) $c' = 20$ i 40 kPa ($\phi' = 20^\circ$). Na slici 8, prikazani su profili slijeganja za vrijednosti kuta unutrašnjeg trenja $\phi' = 15, 20$ i 25° ($c' = 20$ kPa).



Slika 7. Utjecaj kohezije na slijeganje površine terena

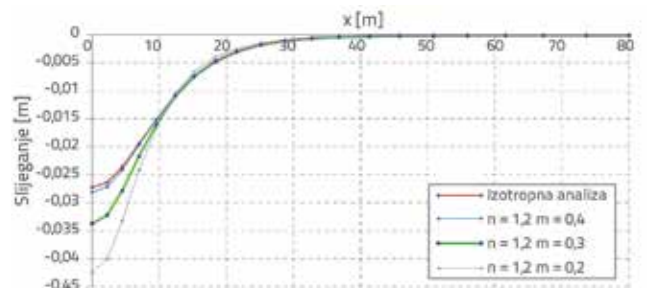


Slika 8. Utjecaj kuta unutrašnjeg trenja na slijeganje površine terena

Prikazani dijagrami pokazuju da parametri čvrstoće, kohezija i kut unutrašnjeg trenja znatno utječu na izračunano slijeganje. S obzirom na to da vrijednosti kohezije određene laboratorijskim pokusima obično variraju u širokim granicama, posebnu pozornost treba obratiti na određivanje adekvatne vrijednosti toga parametra.

3.4. Utjecaj anizotropije tla

Slika 9. prikazuje usporedbu poprečnog profila slijeganja za izotropni model s profilima za anizotropni model s parametrima $n = E_h/E_v = 1,2$ i $m = G_{vh}/E_v = 0,2, 0,3$ i $0,4$ (za drugi sloj tla). Prikazani rezultati pokazuju da odnos nezavisnog modula smicanja G_{vh} prema vertikalnom modulu E_v ima značajan učinak na oblik profila slijeganja. Profil slijeganja površine terena postaje užu i dublji s povećanjem stupnja anizotropije.



Slika 9. Utjecaj anizotropnog odnosa $m = G_{vh}/E_v$ na slijeganje površine terena

3.5. Zaključci o faktoru redukcije naprezanja

U rutinskom geotehničkom projektiranju i dalje se uobičajeno koriste 2D modeli. Radi istraživanja utjecaja početnog K_0 stanja naprezanja, deformabilnosti tla i parametara posmične čvrstoće kao i anizotropije tla na veličinu faktora redukcije naprezanja, provedene su dodatne 2D analize. Faktor redukcije naprezanja λ je kalibriran na temelju *steady-state* slijeganja iz 3D analiza. U procesu kalibracije proveden je niz 2D analiza s različitim (progresivno rastućim) vrijednostima λ i praćeno je dobiveno slijeganje površine terena iznad osi tunela. Vrijednost parametra λ je usvojena tako da se poklopi veličina slijeganja površine terena iznad osi tunela dobivena 2D analizom s onom dobivenom 3D analizom. Dobivene vrijednosti λ prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Rezultati parametarske analize

Degradirana laporovita glina				λ	
K_0	E [MPa]	c' [kPa]	ϕ' [°]		
0,65 0,85 1,0	15	20	20	0,60	
				0,63	
				0,67	
0,85	10	20	20	0,64	
	15			0,63	
	30			0,62	
0,85	15	20	20	0,63	
		40		0,50	
0,85	15	20	15	0,69	
			20	0,63	
			25	0,56	
0,85	15	20	20	0,63	
				$m = 0,2$	0,63
				$m = 0,3$	0,63
				$m = 0,4$	0,64

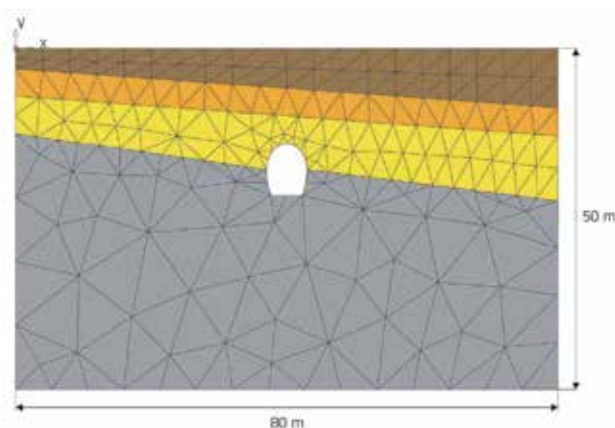
Kao što se vidi iz tablice 2., faktor redukcije naprezanja λ značajno ovisi o parametrima posmične čvrstoće tla, pri čemu povećanje kohezije i kuta posmične čvrstoće smanjuje faktor redukcije naprezanja. Ovo iznova upućuje na važnost određivanja adekvatnih vrijednosti parametara čvrstoće, s posebnim osvrtom na određivanje kohezije. Nije utvrđeno da početno K_0 stanje naprezanja, krutost tla i anizotropija tla značajno utječu na faktor λ .

4. Studija slučaja – tunel “Dedinje”

Tunel “Dedinje” je dvocijevni jednokolosiječni tunel dužine 2,9 km, koji se nalazi u sklopu beogradskog željezničkog čvora, između stanica Prokop (Beograd-Centar) i Rakovica. Tijekom izgradnje tunela, mjereni su vertikalni pomaci površine terena

na 220 m dugoj dionici od stacionaže 0 + 850 km do 1 + 070 km [33]. Tunel je građen primjenom tzv. belgijske metode (iskop i betoniranje kalote, a zatim upornjaka) s čeličnim remenatama i drvenim talpama kao privremenom podgradom. U ovom radu, prikazana je 2D analiza *greenfield* slijeganja površine terena iznad lijeve tunelske cijevi, koja je građena prva. Naknadna izgradnja desne tunelske cijevi nije uključena u analizu.

Na slici 10. prikazana je 2D mreža konačnih elemenata za modeliranje lijeve cijevi tunela na stacionaži 1 + 019 km. Tunelska cijev je širine 5,4 m i visine 7,1 m (bez obloge). Tjeme tunela se nalazi 14 m ispod površine terena. Profil tla se sastoji od laporasto-glinovitih sedimenata pokrivenih lesom: potpuno degradirani lapori i degradirani lapori u zoni raspadanja i svježi, neizmijenjeni lapor ispod ove zone. S obzirom na to da je problem nesimetričan, modelirana je puna geometrija problema. Tlo je modelirano trokutastim izoparametarskim ravninskim elementima sa šest čvorova, a obloga je modelirana *infinite shell* elementima s tri čvora. Na vertikalnim stranama mreže spriječeni su horizontalni pomaci, a na donjoj granici mreže spriječeni su i horizontalni i vertikalni pomaci.



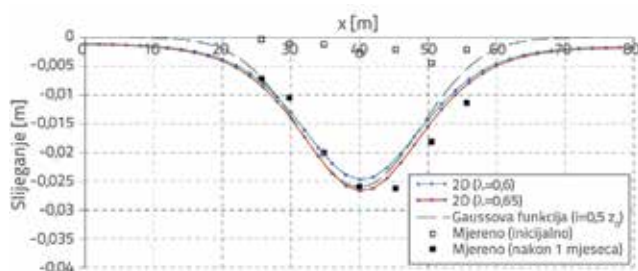
Slika 10. FE mreža usvojena za 2D analizu tunela “Dedinje” (lijeva tunelska cijev na stac. 1 + 019 km)

Modeliran je fazni iskop poprečnog presjeka tunela. Nakon određivanja početnog stanja naprezanja, najprije je izveden iskop gornjeg svoda, i pri usvojenoj vrijednosti λ ugrađena je obloga na deformiranoj konturi iskopa. Nakon toga je izvršen iskop donjeg dijela tunela i ugrađena je obloga. Provedena je drenirana analiza s ulaznim parametrima MC modela danim u tablici 3. (za slojeve 2 i 3, usvojeni su parametri koji su reprezentativni za laporasto glinovite sedimente zone raspadanja [29]). Tunelska obloga je modelirana elastičnim *shell* elementima debljine 0,60 m (0,40 m invert) i $\rho = 2,4 \text{ g/cm}^3$, $E = 20 \text{ GPa}$ i $\nu = 0,20$.

Na slici 11. prikazani su profili slijeganja površine terena dobiveni FE analizama s $\lambda = 0,6$ i $0,65$, Gaussova krivulja ($i = 0,5 z_0$) i terenski podaci zabilježeni mjesec dana nakon iskopa tunela [33]. Faktor redukcije naprezanja je kalibriran na osnovi podataka mjerenja. Može se uočiti da je oblik profila slijeganja površine terena predviđen sa zadovoljavajućom točnošću.

Tablica 3. Parametri tla korišteni u FE analizi tunela "Dedinje"

Sloj tla	ρ [g/cm ³]	E [MPa]	ν	c' [kPa]	ϕ' [°]	K_0
1. Les	1,85	10	0,4	18	23	0,65
2. Potpuno degradirani lapori	2,0	15	0,3	20	20	0,85
3. Degradirani lapori	2,0	20	0,3	30	23	0,85
4. Svježiji lapori	2,0	60	0,3	60	25	0,58



Slika 11. Profili slijeganja površine terena dobiveni 2D analizama, Gaussova krivulja i podaci mjerenja

5. Zaključak

Izgradnja tunela je trodimenzionalni proces. Da bi se dobila pouzdana procjena slijeganja izazvanih izgradnjom tunela, nužno je uzeti u obzir relaksaciju naprezanja i pomake koji se događaju na čelu tunela prije ugradnje obloge. Primjena potpunog 3D FE modeliranja omogućava predviđanje slijeganja površine terena bez potrebe da se unaprijed pretpostavi vrijednost *volume loss* ili postotak rasterećenja naprezanja prije ugradnje obloge. U ovom radu provedena je potpuna 3D FE elasto-plastična analiza izgradnje tunela s otvorenim čelom u beogradskim laporastim glinama. 3D proces izgradnje tunela je simuliran u koracima na dužini od 80m i *steady-state* stanje slijeganja je postignuto na približno 30 m (5D) iza čela tunela. U inženjerskoj praksi, međutim, još uvijek je uobičajena primjena 2D metode (zbog toga što je 3D modeliranje proračunski zahtjevno). Kada se proces izgradnje tunela modelira uz pretpostavku ravninskog stanja deformacija, treba pretpostaviti vrijednost kontrolnog parametra kojim se uzimaju u obzir 3D učinci izgradnje tunela. U ovom radu uspoređeni su poprečni profili slijeganja dobiveni 3D i 2D FE analizama i kalibrirane su vrijednosti faktora redukcije naprezanja. Može se zaključiti da se profil slijeganja dobiven 2D analizom dobro slaže sa 3D rezultatima kada se usvoji adekvatna vrijednost faktora redukcije naprezanja. Usporedbom profila

slijeganja dobivenih iz FE analiza s Gaussovom krivuljom, može se vidjeti da je širina profila slijeganja predviđenog metodom konačnih elemenata nešto precijenjena.

Niz 3D FE elasto-plastičnih analiza proveden je radi ispitivanja utjecaja koeficijenta bočnog pritiska K_0 , modula elastičnosti tla, parametara čvrstoće i anizotropije tla na slijeganja uslijed izgradnje tunela. Rezultati pokazuju da niže vrijednosti K_0 daju uže i dublje poprečne profile slijeganja, što je u skladu sa zaključcima drugih autora. Također, modul elastičnosti i parametri čvrstoće imaju značajan utjecaj na procijenjenu veličinu slijeganja. Ustanovljeno je da anizotropija tla, tj. odnos nezavisnog modula smicanja G_{vh} i vertikalnog modula E_v ima značajan utjecaj na oblik profila slijeganja. Može se zaključiti da profil slijeganja površine terena postaje uži i dublji s porastom stupnja anizotropije. U okviru provedenih parametarskih analiza mogu se dati neki zaključci o faktoru redukcije naprezanja, na osnovi sustavne usporedbe 3D i 2D rezultata. Prikazani rezultati sugeriraju da faktor redukcije naprezanja u značajnoj mjeri zavisi od parametara posmične čvrstoće tla, pri čemu smanjenje kohezije ili kuta unutrašnjeg trenja povećava njegovu vrijednost. To je zbog toga što lošije tlo dovodi do većih deformacija na čelu tunela prije ugradnje obloge. Budući da vrijednost kohezije, koja se dobiva iz laboratorijskih pokusa, obično varira u širokim granicama, posebno se treba usredotočiti na određivanje adekvatne vrijednosti toga parametra. Početno K_0 stanje naprezanja, krutost tla i anizotropija tla nemaju bitan utjecaj na faktor redukcije naprezanja. Konačno, provedena je 2D FE analiza slijeganja iznad tunela "Dedinje", koji je dio beogradskog željezničkog čvora, i faktor redukcije naprezanja je kalibriran na osnovi podataka mjerenja. Pokazano je da se oblik profila slijeganja dobivenog 2D analizom dobro slaže s Gaussovom krivuljom i podacima mjerenja. Ovaj rad, pod uvjetima da se utvrde odgovarajuće vrijednosti parametara tla, upućuje na to da FE analiza može proizvesti pouzdano predviđanje slijeganja površine terena izazvanih izgradnjom tunela.

LITERATURA

- [1] Peck, R.B.: Deep excavations and tunnelling in soft ground, In: Proc. of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, State of the art volume, pp. 225–290, 1969.
- [2] Sagaseta, C.: Analysis of undrained soil deformation due to ground loss, *Géotechnique*, 37 (1987) 3, pp. 301–320.
- [3] Verruijt, A., Booker, J.R.: Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane, *Géotechnique*, 46 (1996) 4, pp. 753–756.

- [4] Loganathan, N., Poulos, H.G.: Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 124 (1998) 9, pp. 846–856.
- [5] Gonzalez, C., Sagaseta, C.: Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extension of Madrid metro. *Computers and Geotechnics*, 28 (2001), pp. 445–468.
- [6] Lee, K.M., Rowe, R.K.: Deformations caused by surface loading and tunnelling: the role of elastic anisotropy. *Géotechnique*, 39 (1989) 1, pp. 125–140.
- [7] Desari, G.R., Rawlings, C.G., Bolton, M.D.: Numerical Modelling of a NATM Tunnel Construction in London Clay, In: *Proc. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, London, pp. 491–496, 1996.
- [8] Simpson, B., Atkinson, J.H., Jovičić, V.: The influence of anisotropy on calculations of ground settlements above tunnels, In: *Proc. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, London, pp. 591–594, 1996.
- [9] Addenbrooke, T.I., Potts, D.M., Puzrin, A.M.: The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction. *Géotechnique*, 47 (1997) 3, pp. 693–712.
- [10] Lee, G.T.K., Ng, C.W.W.: Three-dimensional analysis of ground settlements due to tunnelling: Role of K_0 and stiffness anisotropy, In: *Proc. International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Lyon, pp. 617–622, 2002.
- [11] Vermeer, P.A., Bonnier, P.G., Möller, S.C.: On a Smart Use of 3D-FEM in Tunnelling, In: *Proc. 8th Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics – NUMOG VIII*, Rome, pp. 361–366, 2002.
- [12] Galli, G., Grimaldi, A., Leonardi, A.: Three-dimensional modelling of tunnel excavation and lining, *Computers and Geotechnics*, 31 (2004), pp. 171–183.
- [13] Franzius, J.N., Potts, D.M., Burland, J.B.: The influence of soil anisotropy and K_0 on ground surface movements resulting from tunnel excavation, *Géotechnique*, 55 (2005) 3, pp. 189–199.
- [14] Ng, C.W.W., Lee, G.T.K.: Three-dimensional ground settlements and stress-transfer mechanisms due to open-face tunnelling, *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (2005), pp. 1015–1029.
- [15] Yazdchi, M., Macklin, S.R., Yeow, H.: 3D modelling of sprayed-concrete-lined tunnels in clay, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 159 (2006) GE4, pp. 243–250.
- [16] Möller, S.C., Vermeer, P.A.: On numerical simulation of tunnel installation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23 (2008), pp. 461–475.
- [17] Mašin, D.: 3D Modeling of an NATM Tunnel in High K_0 Clay Using Two Different Constitutive Models, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 135 (2009) 9, pp. 1326–1335.
- [18] Svoboda, T., Mašin, D., Boháč, J.: Class A predictions of a NATM tunnel in stiff clay, *Computers and Geotechnics*, 37 (2010), pp. 817–825.
- [19] Maraš-Dragojević, S.: Analysis of ground settlement caused by tunnel construction, *GRAĐEVINAR*, 64 (2012) 7.
- [20] Milaković, D., Szavits-Nossan, A.: Ground settlement induced by tunnel boring in stiff clay, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 6, pp. 503–512.
- [21] Potts, D.M., Zdravković, L.: *Finite element analysis in geotechnical engineering: Application*, Thomas Telford, London, 2001.
- [22] Karakus, M.: Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22 (2007), pp. 47–56.
- [23] Panet, M., Guenot, A.: Analysis of convergence behind the face of a tunnel, *Tunnelling 82*, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 197–204, 1982.
- [24] Studija tehničko ekonomske podobnosti brzog javnog gradskog saobraćaja u Beogradu, Knjiga 3, Idejna inženjerska rešenja prve etape metroa, Zavod za izgradnju grada Beograda, Sektor za metro, Beograd, 1981.
- [25] DIANA Finite Element Analysis, User's Manual release 9.4.3, TNO DIANA BV, Delft, 2010.
- [26] Katzenbach, R., Breth, H.: Nonlinear 3-D Analysis for NATM in Frankfurt Clay, In: *Proc. 10th ICSMFE*, Stockholm, pp. 315–318, 1981.
- [27] Svoboda, G., Mertz, W., Schmid, A.: Three-dimensional numerical models to simulate tunnel excavation, In: *Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Models in Geomechanics*, Niagara Falls, pp. 536–548, 1989.
- [28] Wittke, W.: *Rock Mechanics: Theory and Applications with Case Histories*, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [29] Maraš-Dragojević, S., Radić Z.: Some geotechnical aspects of the future Belgrade metro construction, In: *Proc. UNDER CITY Colloquium on Using Underground Space in Urban Areas in South-East Europe*, Dubrovnik, ITA Croatia, pp. 224–235, 2012.
- [30] Mair, R.J., Taylor, R.N.: Bored tunneling in urban environment, In: *Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Hamburg, pp. 2353–2385, 1997.
- [31] Mair, R.J.: Tunnelling and geotechnics: new horizons, *Géotechnique*, 58(9), 695–736, 2008.
- [32] O'Reilly, M.P., New, B.M.: Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction, *Tunnelling 82*, Institution of Mining and Metallurgy, London, 173–181, 1982.
- [33] Lokin, P., Pavlović, N., Bogdanović, A.: Surface subsidence in urban area due to underground structures construction, In: *Proc. International Congress on Large Underground Openings*, Firenze, Italy, pp. 771–777, 1986.