

Primljen / Received: 9.4.2012.

Ispravljen / Corrected: 23.6.2012.

Prihvaćen / Accepted: 23.7.2012.

Dostupno online / Available online: 30.7.2012.

Analiza slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela

Autor:



mr.sc. **Snežana Maraš-Dragojević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
snezamd@grf.bg.ac.rs

Pregledni rad

Snežana Maraš-Dragojević

Analiza slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela

Važan zadatak pri projektiranju tunela u urbanim područjima jest predviđanje slijeganja površine terena. U radu je za procjenu slijeganja provedeno 2D i 3D modeliranje procesa izgradnje tunela metodom konačnih elemenata. Prikazani su profili slijeganja površine terena dobiveni pri simulaciji izgradnje tunela otvorenim čelom, na maloj dubini, u glinovito-laporastim sredinama. Uspoređeni su poprečni profili slijeganja dobiveni 2D i 3D analizama.

Ključne riječi:

tunel, slijeganje površine terena, 3D modeliranje, metoda konačnih elemenata

Subject review

Snežana Maraš-Dragojević

Analysis of ground settlement caused by tunnel construction

Prediction of ground settlement is considered as highly significant in the design of tunnels located in urban areas. 2D and 3D modelling of tunnel construction, as needed for settlement analysis, is made according to the finite-element method. The ground settlement profiles, obtained during simulation of the small-depth openface tunnel excavation in clayey-marly terrain, are presented. Settlement cross sections obtained by 2D and 3D analyses are compared.

Key words:

tunnel, ground surface settlement, 3D modelling, finite-element method

Übersichtsarbeit

Snežana Maraš-Dragojević

Analyse der Setzung der Geländeoberfläche infolge eines Tunnelbaus

Eine wichtige Aufgabe bei der Tunnelprojektierung in Stadtgebieten ist die Prognosierung der Setzung der Geländeoberfläche. In der Arbeit wurde für die Prognosierung der Setzung eine 2D- und 3D-Modellierung des Prozesses des Tunnelbaus mit der Finite-Element-Methode durchgeführt. Es sind die Setzungsprofile der Geländeoberfläche dargestellt, die durch Simulation eines Tunnelbaus mit einer offenen Front in kleiner Tiefe in Ton- und Mergelgebenden erhalten wurden. Es wurde ein Vergleich von Querprofil-Setzungen, die man durch 2D - und 3D - Analysen erhalten hat, angestellt.

Schlüsselwörter:

Tunnel, Setzung der Geländeoberfläche, 3D-Modellierung, Finite-Element-Methode

1. Uvod

Ubrzani razvoj velikih gradova posljednjih desetljeća doveo je do sve većih zahtjeva za korištenjem podzemnog prostora. Tuneli su potrebni za smještaj transportnih, električnih, komunikacijskih, vodovodnih i kanalizacijskih sustava. Veliki dio radova u području tunelogradnje širom svijeta vezan je za izgradnju i proširenje mreže podzemnog transporta u velikim prenaseljenim gradovima. Može se očekivati da će u bliskoj budućnosti (s obzirom na nužnost smanjenja prometnih gužvi i zagađenosti zraka) tunnelski projekti ove vrste imati sve veće značenje. U gradovima tuneli se nalaze na maloj dubini ispod gusto naseljenih zona, u tlu ili mekoj stijeni, i njihova izgradnja može imati veoma nepovoljne učinke na postojeće objekte. Zbog toga je posebno važno da se prije početka izgradnje tunela izvrši procjena potencijalnih slijeganja. Međutim, taj zadatak nije nimalo jednostavan. Da bi se postigla adekvatna procjena slijeganja, u metodama proračuna trebalo bi uzeti u obzir brojne faktore: 3D efekt izgradnje tunela, metode i detalje izvođenja, dubinu i promjer tunela, inicijalno stanje napona kao i naponsko-deformacijsko ponašanje tla oko tunela. S obzirom na svu kompleksnost ovog problema, istraživanjima u ovom području bavili su se, a i danas se bave, znanstvenici širom svijeta.

Metode proračuna slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela mogu se svrstati u tri grupe: empirijske metode, analitička rješenja i numeričke metode. Empirijske metode predstavljaju prilično jednostavne postupke proračuna i imaju veliku primjenu u praksi. One daju vrlo dobre rezultate kada su uvjeti izgradnje tunela dobro poznati, odnosno projektni parametri adekvatno kalibrirani. Analitičke metode daju jednostavna (uglavnom elastična ili elastoplastična) rješenja u zatvorenom obliku, ali je njihova primjena ograničena na 2D analize tunela kružnog presjeka u homogenoj sredini i njima se ne mogu na adekvatan način uzeti u obzir efekti interakcije konstrukcije i tla. S druge strane, primjena numeričkih metoda, kao što je metoda konačnih elemenata (FEM - Finite Element Method) omogućuje da se u analizama uzmu u obzir: heterogenost sredine, nelinearno ponašanje tla, složena geometrija problema, interakcija konstrukcije i tla, kao i metoda izgradnje.

Izgradnja tunela je 3D proces pa je za adekvatnu analizu naponsko-deformacijskih stanja u tunnelskoj konstrukciji i okolnoj sredini, kao i slijeganja površine terena, nužno primijeniti 3D numeričko modeliranje. Razvoj metode konačnih elemenata omogućio je efikasnu trodimenzionalnu analizu, međutim, u praktičnoj primjeni javljaju se dodatne teškoće, koje se prije svega odnose na znatno povećanje opsega proračuna te vremena i cijena proračuna. S obzirom na to da je 3D modeliranje izgradnje tunela metodom konačnih elemenata (MKE) izuzetno zahtjevno, primjena numeričkih metoda u inženjerskoj praksi još uvijek je ograničena na 2D

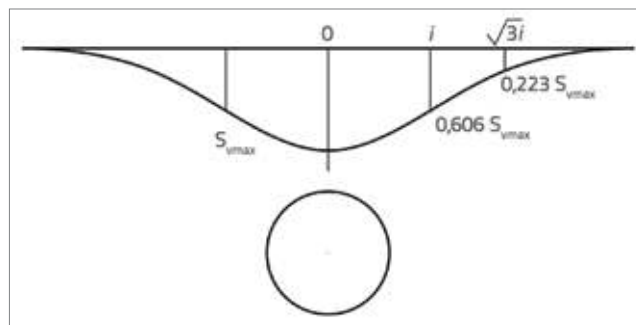
modele. Kada se proces izgradnje tunela razmatra primjenom 2D analiza, moraju se uvesti određene pretpostavke kojima se uzimaju u obzir 3D efekti izgradnje tunela, odnosno naponsko-deformacijske promjene koje se dešavaju na radnom čelu tunela. U ovom radu su, pored kratkog prikaza empirijskih metoda, detaljno prikazani postupci 3D i 2D modeliranja izgradnje tunela primjenom metode konačnih elemenata. Dani su rezultati 3D i 2D analiza slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela s otvorenim čelom u glinovito-laporastim sredinama.

2. Procjena slijeganja primjenom empirijskih metoda

Na temelju podataka mjerenja slijeganja površine terena na većem broju tunela može se poprečni profil slijeganja prilično dobro predstaviti Gaussovom funkcijom normalne raspodjele [1]. Iako primjena ove krivulje nema teorijsko opravdanje, ona je široko prihvaćena u praksi i predstavlja poznatu i široko primjenjivanu empirijsku metodu za procjenu slijeganja površine terena. Vertikalna slijeganja u poprečnom pravcu dana su sljedećim izrazom:

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

gdje je S_{vmax} maksimalno slijeganje koje se javlja iznad osi tunela, x je horizontalna udaljenost od osi tunela, a i je važan parametar koji definira širinu poprečnog profila slijeganja i predstavlja horizontalnu udaljenost od osi tunela do točke infleksije profila, kao što se vidi na slici 1.



Slika 1. Poprečni profil slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela (Gaussova krivulja)

Slijeganje tla uslijed izgradnje tunela se obično karakterizira parametrom koji predstavlja faktor gubitka volumena tla V_L "volume loss" ili "ground loss". To je odnos volumena tla koji se deformira u tunnelski otvor i teorijskog volumena tunnelskog otvora. Kod tunela u glinovitom tlu, slijeganja se za vrijeme izgradnje tunela obično događaju pod nedreniranim uvjetima (bez promjene zapremine) pa se može smatrati da je gubitak volumena tla na konturi iskopa jednak volumenu profila slijeganja površine terena koji se dobiva integracijom izraza (1).

$$V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{v\max} = 2,5 \cdot i \cdot S_{v\max} \quad (2)$$

Faktor "volume loss" V_L (koji se izražava u postocima) za tunel promjera iskopa D jednak je:

$$V_L = \frac{V_s}{\pi D^2} \cdot 100\% \quad (3)$$

Kombinirajući izraze (2) i (3) dobiva se izraz za maksimalno slijeganje površine terena preko parametra V_L .

$$S_{v\max} = 0,313 \cdot V_L \cdot \frac{D^2}{i} \quad (4)$$

Parametar V_L zavisi od metode izgradnje tunela i vrste tla. Posljednjih desetljeća postignut je značajan napredak u tehnologiji građenja tunela. Osim klasičnih metoda građenja, kao što je *nova austrijska tunelska metoda* (NATM), primjenjuje se i metoda štita koja omogućuje izgradnju tunela u izuzetno složenim geotehničkim uvjetima, u mekom tlu s malom visinom nadstroja. Da bi se procijenio parametar V_L , od velike vrijednosti iskustvo vezano za određenu tunelsku tehniku i geotehničke uvjete, odnosno podaci slijeganja na izvedenim objektima. Velika baza podataka o slijeganjima površine terena dobivena je prilikom izgradnje tunela u Londonu. U homogenom tlu, zavisno od opreme i iskustva ekipe koja radi na iskopu, realne vrijednosti V_L su od 0,5 % do 2 %. Mjerenjem slijeganja za Jubilee Line ispod Green Parka u Londonu dobiven je $V_L = 1,4\%$, što spada u rang tipičnih vrijednosti od 1 do 2 % za izgradnju tunela štitom s otvorenim čelom u londonskoj glini, prema [2]. Međutim, pri izgradnji tunela s otvorenim čelom ispod St. James Parka u Londonu (Jubilee Line Extension), izmjerene su veće vrijednosti, 3,3 % i 2,9 % (za zapadni i istočni tunel) [3]. Prema [4, 5], tipične vrijednosti V_L pri građenju tunela s otvorenim čelom u mekom tlu uglavnom su u opsegu 1 do 3 %, dok se znatno niže vrijednosti dobivaju pri građenju tunela sa zatvorenim čelom, primjenom suvremenih strojeva, kao što je EPB štit. Podaci mjerenja s projekta CTRL (Channel Tunnel Rail Link) za tunele u Londonu su pokazali da se, uz pažljivo upravljanje EPB štitom mogu postići veoma male vrijednosti V_L , čak od 0,25 do 0,5 % [6]. Kolika je važnost parametra V_L za slijeganja uslijed izgradnje tunela, govori i činjenica da se granične vrijednosti ovog parametra specificiraju često i u okviru ugovorne dokumentacije za izgradnju tunela [7].

Širina poprečnog profila slijeganja je definirana parametrom i koji predstavlja, kao što je već rečeno, horizontalnu udaljenost točke infleksije profila slijeganja od osi tunela (slika 1.). Na temelju rezultata mjerenja slijeganja površine terena za tunele u glinama, predložena je linearna veza, prema [8]:

$$i = 0,43z_0 + 1,1 \quad (5)$$

gdje se i i z_0 izražavaju u metrima.

Ovaj izraz se za većinu praktičnih primjena pojednostavljuje i usvaja se da je:

$$i = K \cdot z_0 \quad (6)$$

pri čemu se može usvojiti da je za glinovito tlo $K = 0,5$. Prema [9], na temelju podataka mjerenja slijeganja površine terena na većem broju tunela došlo se do vrijednosti $K = 0,5$. Pojedini autori su na temelju velikog broja podataka s gradnje tunela u glinovitom i pjeskovitom tlu dobili vrijednosti K od 0,4 do 0,6 sa srednjom vrijednošću $K = 0,5$ za glinovito tlo i vrijednosti 0,25 do 0,45 sa srednjom vrijednošću 0,35 za pjeskovito tlo [4].

Empirijske metode su prilično jednostavne i imaju veliku primjenu u praksi a naročito su korisne u ranoj fazi projektiranja tunela. One se u većoj ili manjoj mjeri kombiniraju s analitičkim metodama i proračunima primjenom metode konačnih elemenata i provodi se kalibracija parametara na osnovi podataka mjerenja na izvedenim tunelima. Empirijske metode daju vrlo dobre rezultate kad su uvjeti izgradnje tunela dobro poznati, odnosno projektni parametri adekvatno kalibrirani.

3. Numeričko modeliranje izgradnje tunela

Empirijske i analitičke metode predstavljaju jednostavne i korisne postupke proračuna, međutim, mogućnosti su njihove primjene su ograničene. Budući da naponsko-deformacijska stanja u tlu i tunelskoj konstrukciji kao i slijeganja površine terena, osim od geotehničkih karakteristika sredine, geometrije tunela i dubine na kojoj se tunel nalazi, u najvećoj mjeri zavise od postupka izgradnje tunela, osobito je važno da se u analizama na adekvatan način simulira proces izgradnje tunela. To se ne može postići analitičkim metodama, već je nužno primijeniti numeričke metode. Primjena metode konačnih elemenata omogućuje formiranje proračunskog modela kojim je moguće provesti naponsko-deformacijsku analizu po fazama građenja, uzimajući u obzir mjerodavna geotehnička svojstva sredine.

3.1. 3D modeliranje metodom konačnih elemenata

Pri izgradnji tunela dolazi do 3D stanja napona i deformacija na čelu tunela. Tijekom građenja tunela opterećenje se prenosi preko stijenske mase ispred čela tunela i sa strana iskopanog presjeka, kao i preko obloge koja je već formirana. Obloga prima opterećenje u poprečnom i uzdužnom pravcu tunela, a osim toga obloga se postavlja na već deformiranu površinu iskopa. Upravo razmatranje djelomične relaksacije, odnosno deformacija površine iskopa na radnom čelu tunela koje su se dogodile prije instaliranja obloge, jest od ključnog značenja za adekvatnu analizu naponsko deformacijskih stanja u tunelskoj konstrukciji i okolnoj sredini. Da bi se to postiglo, nužna je trodimenzionalna analiza kojom se simulira napredovanje radova i naponske promjene i deformacije u okolici privremenog radnog čela.

Proces izgradnje tunela se obično simulira primjenom tzv. "step-by-step" (korak-po-korak) postupka [10-12]. Početni korak je analiza inicijalnog ili *in-situ* stanja napona u tlu nakon čega slijedi simulacija, korak-po-korak, sekvenci iskopa i podgrađivanja. Simulacija napredovanja izgradnje tunela se mora provesti na dovoljnoj dužini da se iza čela tunela postigne stacionarno stanje (*steady-state*). Ovaj postupak se primjenjuje za simulaciju procesa izgradnje tunela s otvorenim čelom. Kada se provodi simulacija građenja tunela štitom sa zatvorenim čelom modeliranje može obuhvatiti i detalje postupka izgradnje kao što su primjerice potporni tlak na čelu tunela, tlak injektiranja i dr.

Posljednjih godina, zahvaljujući napretku kompjutorske tehnologije, u literaturi se može naći sve veći broj radova u kojima je provedeno 3D modeliranje postupka izgradnje tunela. Za simulaciju građenja tunela s otvorenim čelom, klasičnim metodama (NATM), kao i štitom s otvorenim čelom, autori su uglavnom primjenjivali *step-by-step* postupak. Katzenbach i Breth [10] proveli su analizu izgradnje NATM tunela u frankfurtskoj laporastoj glini primjenom 3D modeliranja metodom konačnih elemenata uz pretpostavku nelinearne elastične veze napona i deformacija. Usporedbom mjerenih i izračunanih slijeganja površine terena, došli su do zaključka da dani proračunski postupak daje zadovoljavajuće rezultate. Drugi autori, kao što je navedeno u [11], analizirali su NATM tunel u stijenskoj masi primjenom *step-by-step* postupka, uz usvajanje reološkog modela, s ciljem razjašnjenja vremenski ovisne interakcije obloge od torkreta i okolne sredine. Pojedini autori su predložili postupak u kome se usvaja "mali" proračunski presjek koji se pomiče pri simulaciji svake sekvence napredovanja [12] (uvjet za primjenu ovog postupka jest da je stijenska masa homogena i da se ne mijenjaju presjek tunela, visina nadsloja i *in-situ* stanje naprezanja u uzdužnom pravcu tunela). Pojedini autori [13, 14] prikazali su rezultate elastične 3D analize metodom konačnih elemenata tunela u stijeni primjenom *step-by-step* postupka s pomicanjem proračunskog područja. No, neki autori su modelirali izgradnju NATM tunela u londonskoj glini primjenom 2D i 3D modela (nelinearno ponašanje londonske gline su modelirali primjenom modela SDMCC (Strain Dependent Modified Cam Clay) [15]. Poprečni profil slijeganja koji su dobili proračunima bio je širi i plići od profila dobivenog mjerenjima na terenu što je sukladno zaključcima i drugih autora da analize slijeganja površine terena primjenom metode konačnih elemenata daju suviše širok i plitak poprečni profil slijeganja u prekonsolidiranom tlu s visokim vrijednostima koeficijenta bočnog tlaka K_0 . Rezultati 2D analize metodom konačnih elemenata (primjenom "volume loss" metode) tunela u londonskoj glini sa $K_0=1,5$ primjenom linearno elastičnih i nelinearno elastičnih modela u kombinaciji s Mohr-Coulombovim uvjetom loma vrlo detaljno su prikazani u [16]. Poprečni profili slijeganja, koje su dobili, bili su suviše široki i plitki kada se usvoje parametri koji su realni za londonsku glinu, pri čemu (unatoč očekivanjima) ni

modeliranje anizotropije tla nije znatnije popravilo rezultate. Provedene su i detaljne 3D analize slijeganja uslijed izgradnje tunela s otvorenim čelom u londonskoj glini i to primjenom linearno elastičnog - idealno plastičnog modela tla u kojima su varirani stupanj anizotropije i vrijednosti K_0 [17, 18]. 3D analize metodom konačnih elemenata provedene su i za NATM primjenom *step-by-step* postupka i linearno elastičnim idealno plastičnim modelom s Mohr-Coulombovim uvjetom loma i $K_0 = 0,66$, [19]. Usporedbom rezultata 3D i 2D analiza dobiven je identičan oblik profila slijeganja, pri čemu se ista veličina slijeganja dobiva ako se u 2D analizi usvoji odgovarajući stupanj rasterećenja tla prije instaliranja obloge (λ metoda). Pojedini autori [20] proveli su 3D modeliranje metodom konačnih elemenata izgradnje tunela u tlu s Mohr-Coulombovom elasto-plastičnom konstitutivnom vezom, pri čemu su analizirani efekti ojačanja čela tunela (soil-nailing) na napone u oblozi i pomicanja u tlu.

Da bi se ispitao utjecaj 3D modeliranja, anizotropije tla i koeficijenta bočnog tlaka K_0 na slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela, provedene su 2D i 3D analize tunela u londonskoj glini [21]. Analize s nelinearnim elasto-plastičnim izotropnim modelom tla (*small strain stiffness* modelom prema [22] i Mohr-Coulombovim uvjetom loma) i koeficijentom bočnog tlaka $K_0=1,5$ pokazale su da 3D modeliranje nije značajnije utjecalo na oblik poprečnog profila slijeganja koji je ostao suviše širok u odnosu na mjerenja (ni uključivanje anizotropije tla, s parametrima koji su realni za londonsku glinu, nije znatnije poboljšalo rezultate). Provedena je i 3D analiza slijeganja površine terena uslijed izgradnje SCL (Sprayed Concrete Lining) tunela u londonskoj glini primjenom nelinearnog *small strain* BRICK modela tla [24] koji uključuje anizotropno ponašanje [23]. Dobiveno je dobro slaganje s Gausovom krivuljom slijeganja (kojom su se prilično dobro mogli aproksimirati podaci mjerenja) i zaključeno je da tehnike 3D modeliranja predstavljaju učinkovito sredstvo za procjenu slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela. Također je analizirana i točnost predviđanja polja pomicanja uslijed izgradnje NATM tunela u tvrdim glinama s visokom vrijednošću K_0 primjenom 3D analize metodom konačnih elemenata na primjeru Heathrow express trial tunela u Londonu [25]. Ponašanja Londonske gline je modelirano primjenom dva modela: hipoplastičnog (hypoplastic) modela za gline koji je predložen prema [25] i modificiranog Cam-clay modela (MCC). Zaključeno je da hipoplastični model daje bolje predviđanje slijeganja od MCC modela, pri čemu je dobiveni poprečni profil slijeganja nešto širi od profila dobivenog mjerenjima. Hipoplastični model za predviđanje polja pomicanja uslijed izgradnje NATM tunela u tvrdog glini primijenjen je i za tunel "Královo Pole" u Brnu (Češka) [26]. Zaključeno je da model dobro predviđa slijeganje i horizontalna pomicanja površine terena kao i vertikalna pomicanja po dubini, dok su horizontalna pomicanja u blizini tunela precijenjena.

3.2. 2D modeliranje metodom konačnih elemenata

S obzirom na to da je 3D numeričko modeliranje izgradnje tunela izuzetno zahtjevno sa stajališta kapaciteta i vremena rada računala, primjena numeričkih metoda u inženjerskoj praksi je još uvijek ograničena na 2D modele. Kada se proces izgradnje tunela razmatra primjenom 2D (ravno stanje deformacija) analiza, moraju se uvesti određene pretpostavke kojima se uzima u obzir djelomična relaksacija napona na čelu tunela, odnosno deformacije koje su nastale na čelu tunela prije formiranja obloge. U literaturi je do sada predloženo više metoda za simulaciju izgradnje tunela primjenom 2D modela: metoda redukcije napona (*Convergence – confinement* ili λ - method) [27], metoda progresivnog omekšavanja (*Progressive softening method*) [28], metoda kontrole parametra V_L - *volume loss* [16] i *Gap* metoda [29-30]. Metoda koji se najviše koristi za 2D modeliranje izgradnje tunela jest metoda redukcije napona (λ -metoda) u kojoj se djelomična relaksacija napona, koja se događa na čelu tunela, uvodi u 2D model preko parametra λ koji predstavlja postotak rasterećenja inicijalnih napona prije instaliranja obloge (obloga prima opterećenje $(1-\lambda) \times \sigma_0$, gdje je σ_0 inicijalni napon u tlu). Faktor rasterećenja λ zavisi od geometrije tunela, inicijalnih napona, karakteristika tla i dužine nepodgrađene dionice na čelu tunela. Veće vrijednosti ovog parametra odgovaraju većoj dužini nepodgrađene dionice na čelu tunela kada su deformacije tla veće, a naponi u oblozi manji, dok suprotno tome, manje vrijednosti λ daju manje deformacije i veće sile u oblozi. Dakle, u ovoj metodi vrijednost parametra λ se mora usvojiti i pokazalo se da metoda daje dobre rezultate, kada se usvoji adekvatna vrijednost ovog parametra.

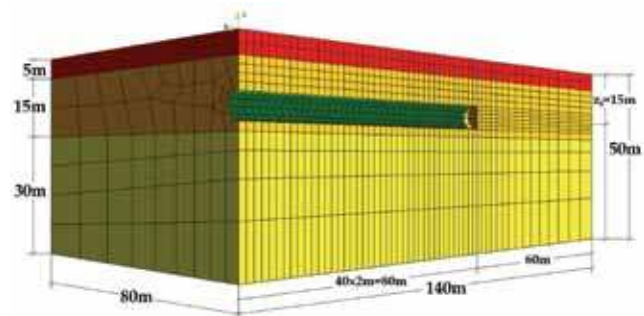
U ovom radu provedeno je 3D modeliranje izgradnje tunela metodom konačnih elemenata primjenom *step-by-step* postupka i 2D modeliranje metodom konačnih elemenata primjenom metode redukcije napona.

3.3. Analiza slijeganja površine terena

Analiza je provedena na primjeru izgradnje tunela s otvorenim čelom, kružnog presjeka, u glinovito-laporastim sredinama karakterističnim za uže gradsko područje Beograda [31]. Proračuni su provedeni primjenom programskog paketa DIANA Finite Element Analysis (TNO DIANA BV). Ovaj program omogućuje trodimenzionalnu nelinearnu analizu kao i modeliranje fazne izgradnje.

Usvojeni profil terena se sastoji od sloja lesa (eolski sediment prašinstog oblika i žučkaste boje) debljine 5 m, ispod koga je sloj degradirane, žutosive laporaste gline debljine 15 m koji leži na sloju sive neizmijenjene laporaste gline i lapora. Proračuni su provedeni za tunel kružnog

presjeka promjera 6 m s betonskom oblogom debljine 0,35 m (prema Studiji tehničko ekonomske podobnosti brzog javnog gradskog prometa u Beogradu, faza 3: idejna inženjerska rješenja prve etape metroa, 1981.). Os tunela je na dubini $z_0 = 15$ m u žutosivoj degradiranoj laporastoj glini.

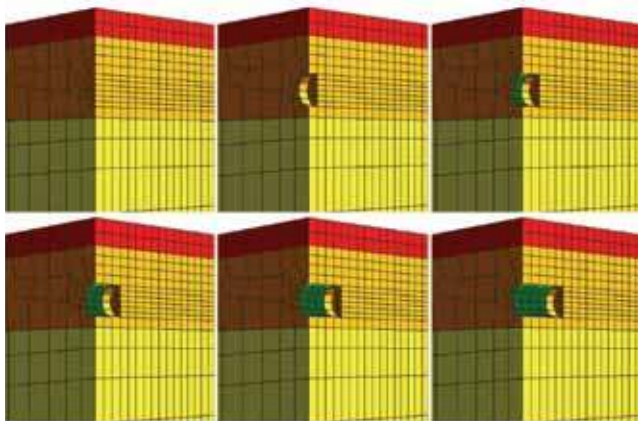


Slika 2. Proračunski 3D model konačnih elemenata (40. korak proračuna)

Na slici 2 prikazan je usvojeni 3D model konačnih elemenata. Usvojeni proračunski presjek ima dimenzije 80 x 50 x 140 m i sastoji se od ukupno 26085 čvorova i 5734 elementa. S obzirom na to da je provedena nelinearna analiza tla, proračuni su provedeni primjenom elemenata "višeg reda" koji osim čvorova u kutovima imaju i čvorove na sredinama stranica. Tlo je modelirano elementom s dvadeset čvorova, izoparametarskim *brick* elementom, a obloga je modelirana primjenom četvorokutnog izoparametarskog zakrivljenog *shell* elementa s 8 čvorova [32].

Prilikom formiranja mreže konačnih elemenata uzeta je u obzir simetrija problema u odnosu na os z. Mreža konačnih elemenata najprije je formirana u ravnini x-z, pa je zatim proširena u uzdužnom smjeru. Iskop tunela je simuliran u negativnom y-smjeru na dužini 80 m, počevši od $y = 0$ u 40 koraka s dužinom iskopa (nepodgrađenom dionicom na čelu) od $d = 2$ m. Usvojeni proračunski presjek u uzdužnom smjeru ima duljinu $L = 140$ m koju čini četrdeset odsječaka po 2,0 m i 60 m usvojenog razmaka od čela tunela u posljednjem koraku proračuna do granice mreže. Konfiguracija mreže je ista za sve ravnine čvorova okomite na os tunela. Razmatran je slučaj iskopa s vertikalnim radnim čelom, tj. pretpostavlja se da se iskop provodi u punom profilu. Granični uvjeti osiguravaju da su na bočnim granicama proračunskog područja spriječena pomicanja u smjeru okomitom na odgovarajuću granicu, a na donjoj granici su spriječena pomicanja u svim smjerovima. U čvorovima obloge u ravnini simetrije usvojen je dodatni uvjet da je spriječena rotacija oko uzdužne osi.

Proračunski model konačnih elemenata ima takvu strukturu koja omogućuje analizu u svim fazama izgradnje tunela. Na slici 3. prikazane su početne sekvence simulacije procesa izgradnje tunela.



Slika 3. Sekvence 3D simulacije procesa izgradnje tunela

Simulacija procesa izgradnje tunela je provedena primjenom *step-by-step* postupka. Prvi korak je analiza inicijalnog odnosno *in-situ* stanja napona u tlu. Nakon toga slijedi simulacija sekvenci iskopa i podgrađivanja u zasebnim proračunskim koracima, počevši od portala. Iskop se simulira tako što se deaktiviraju elementi unutar konture tunela na čelu tunela, na duljini iskopa d , što dovodi do pomicanja na konturi iskopa. Na tako deformiranoj konturi iskopa se, u sljedećoj fazi proračuna, aktiviraju elementi obloge i simulira iskop sljedeće dionice. Dužina na kojoj se simulira izgradnja tunela mora biti dovoljna da se, na određenom razmaku iza čela tunela, formira stacionarno stanje slijeganja (*steady-state*) odnosno horizontalni dio podužnog profila slijeganja. Izgradnja tunela je, u ovom radu, simulirana u 40 proračunskih koraka s napredovanjem $d = 2$ m, što znači da je u posljednjem koraku proračuna čelo tunela udaljeno 80 m od portala.

2D analize su provedene uz pretpostavku ravnog stanja deformacija primjenom metode redukcije napona tzv. λ metode. Konfiguracija mreže 2D modela je ista kao konfiguracija mreže 3D modela, u ravnini okomitoj na os tunela. Tlo je modelirano četvorokutnim izoparametarskim ravninskim elementom s 8 čvorova, a obloga primjenom zakrivljenog *infinite shell* elementa s 3 čvora [32]. Proračun se provodi u tri koraka. Prvi korak je, kao i kod 3D analize, proračun inicijalnog stanja napona u tlu. U drugom koraku proračuna uklanjaju se elementi unutar konture iskopa i

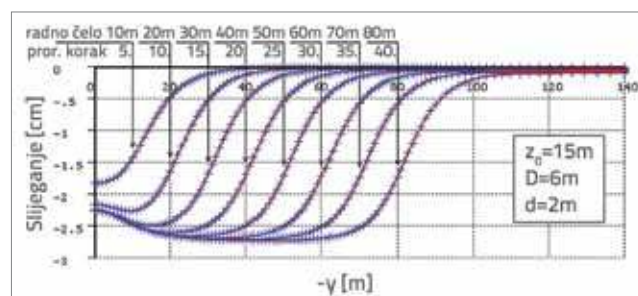
zadaje opterećenje $\lambda \times \sigma_0$, gde je σ_0 inicijalni napon u tlu. Kao rezultat ovog koraka proračuna dolazi do pomicanja konture iskopa i djelomične relaksacije inicijalnih napona. U trećem koraku, na tako deformiranu konturu iskopa, instaliraju se elementi obloge i zadaje cjelokupan inicijalni napon u tlu.

Analize u ovom radu su provedene uz pretpostavku elasto-plastičnog ponašanja materijala s Mohr-Coulombovim (MC) uvjetom loma. S obzirom na inženjersko-geološke i hidrogeološke karakteristike terena, razmatrana je situacija bez podzemne vode. Usvojeni parametri tla MC modela prikazani su u tablici 1. Dilatacija je zanemarena tako što je usvojeno da je kut dilatacije svih slojeva nula.

Betonska obloga je debljine 0,35 m i modelirana je uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja betona sa parametrima $\rho = 2,5 \text{ g/cm}^3$, $E = 15 \text{ GPa}$ i $\nu = 0,15$.

3.4. Prikaz i usporedba rezultata proračuna slijeganja primjenom 3D i 2D modela

Na slici 4. prikazani su uzdužni profili slijeganja dobiveni u pojedinim koracima 3D proračuna. Kao što se vidi na slici, stacionarno stanje pomicanja (horizontalni dio uzdužnog profila) tzv. *steady-state* je postignuto na približno 30 m iza čela tunela, pri simulaciji napredovanja tunela na dužini 80 m (40 koraka po 2 m), pri čemu se na početnom dijelu profila javljaju poremećaji koji su vezani za granične uvjete na lijevoj granici modela [19].

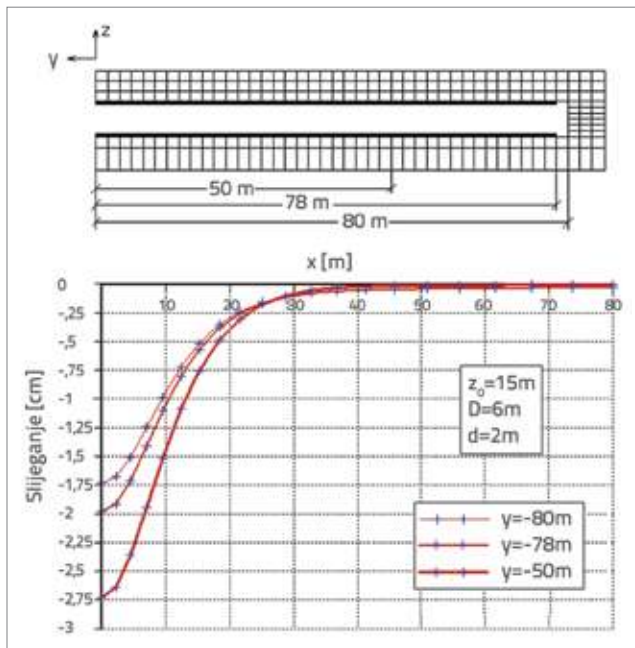


Slika 4. Razvoj uzdužnih profila slijeganja s napredovanjem izgradnje tunela

Na slici 5. prikazani su poprečni profili slijeganja površine terena, dobiveni u 40. koraku proračuna, pri simulaciji izgradnje tunela na dužini $40 \times 2 \text{ m} = 80 \text{ m}$, za vertikalne presjeke na čelu tunela: $y = -80 \text{ m}$ i $y = -78 \text{ m}$, kao i za presjek $y = -50 \text{ m}$ (*steady-state* pomaci).

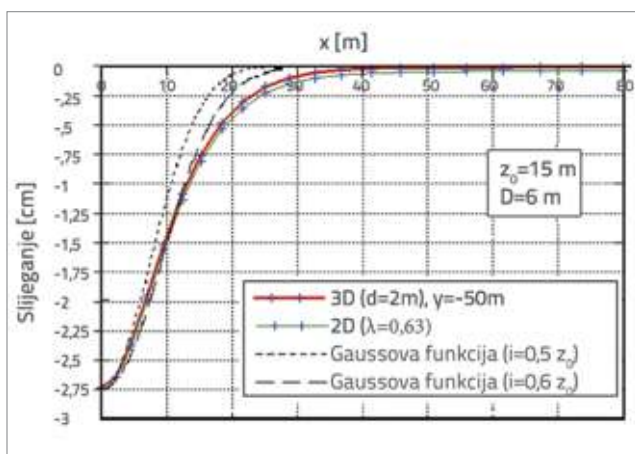
Tablica 1. Usvojeni parametri tla MC modela

Promatrani sloj	ρ [g/cm ³]	E [MPa]	ν	c' [kPa]	ϕ' [°]	K0
Prvi sloj (les)	1,85	10	0,4	18	23	0,65
Drugi sloj (degradirane laporaste gline)	2,0	15	0,3	20	20	0,85
Treći sloj (sive neizmijenjene laporaste gline i lapori)	2,0	60	0,3	60	25	0,58



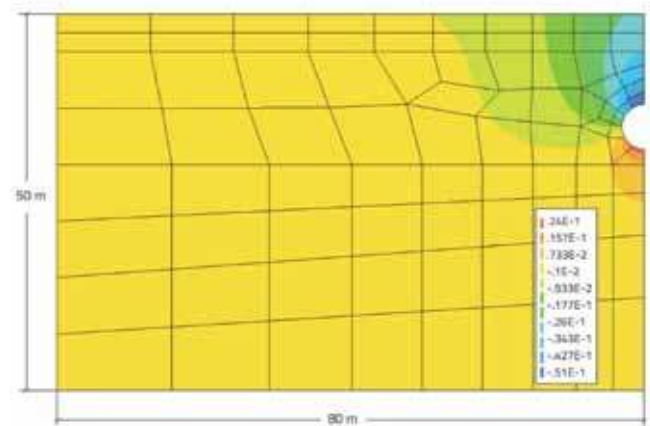
Slika 5. Poprečni profili slijeganja dobiveni 3D analizom pri simulaciji izgradnje tunela

Na slici 6. dan je usporedni prikaz poprečnih profila slijeganja dobivenih 3D proračunom pri simulaciji izgradnje na dužini $40 \times 2 \text{ m} = 80 \text{ m}$ (za presjek $y = -50 \text{ m}$ i *steady-state* pomake) i 2D proračunom primjenom metode redukcije napona s $\lambda = 0,63$. Faktor redukcije napona λ je određen prema stacionarnim (*steady-state*) slijeganjima koja su dobivena 3D proračunom. Na slici su, radi usporedbe, prikazane i empirijske Gaussove krivulje za $i = 0,5 z_0$ i $i = 0,6 z_0$. Kao što se vidi sa slike, kada se usvoji odgovarajući koeficijent redukcije napona, 3D i 2D analize daju slične poprečne profile slijeganja, što je sukladno zaključcima drugih autora [19, 21]. Također se može vidjeti da su profili slijeganja dobiveni proračunima primjenom metode konačnih elemenata nešto širi od empirijske Gaussove krivulje.



Slika 6. Usporedba poprečnog profila slijeganja dobivenog 3D analizom i profila dobivenog 2D analizom metodom redukcije napona

Da bi se objasnio pomak po dubini, na slici 7. su prikazane konture vertikalnih pomaka u poprečnom presjeku $y = -50 \text{ m}$ (*steady-state*).



Slika 7. Konture vertikalnih pomaka u poprečnom presjeku $y = -50 \text{ m}$

4. Zaključak

Pri projektiranju i izgradnji tunela u urbanim područjima, izuzetno je značajno da se adekvatno predvide i kontroliraju slijeganja površine terena. Empirijske metode za procjenu slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela predstavljaju prilično jednostavne postupke koji imaju veliku primjenu u praksi. One daju vrlo dobre rezultate kad su uvjeti izgradnje tunela dobro poznati, odnosno projektni parametri adekvatno kalibrirani. Da bi se procijenio parametar V_L - *volume loss*, vrlo je značajno iskustvo vezano za određenu tunelsku tehniku i geotehničke uvjete, odnosno podaci kontrole slijeganja na izvedenim objektima. Empirijske metode se u većoj ili manjoj mjeri kombiniraju s analitičkim metodama i proračunima primjenom metode konačnih elemenata, a osim toga provodi se kalibracija parametara na osnovi podataka mjerenja na izvedenim tunelima.

Primjena numeričkih metoda, kao što je metoda konačnih elemenata, omogućuje da se u analizama uzme u obzir složena geometrija problema, naponsko-deformacijsko ponašanje tla kao i postupak izgradnje tunela. Za adekvatnu analizu naponsko deformacijskih stanja u tunelskoj konstrukciji i okolnoj sredini, potrebna je prostorna analiza kojom se simulira napredovanje radova te naponske promjene i deformacije u okolici privremenog radnog čela. U radu je provedeno 3D modeliranje postupka izgradnje tunela s otvorenim čelom primjenom *step-by-step* postupka, pri čemu je izgradnja tunela simulirana na dužini 80 m, u 40 proračunskih koraka s napredovanjem $d = 2 \text{ m}$. Dužina na kojoj se simulira izgradnja tunela mora biti dovoljna da se, na određenom razmaku iza čela tunela, formira stacionarno stanje slijeganja (*steady-state*), odnosno horizontalni dio podužnog profila slijeganja. U ovom radu također je stacionarno stanje

pomaka postignuto na oko 30 m (5xD) iza čela tunela. U 3D analizama, postotak rasterećenja napona u tlu na čelu tunela, prije postavljanja obloge, dobiva se izravno i ovisi o geometriji, karakteristikama sredine, kao i dužini nepodgrađene dionice na čelu tunela. U 2D analizama, da bi se uzela u obzir djelomična relaksacija napona na čelu tunela, odnosno deformacije koje su se dogodile na čelu tunela prije formiranja obloge, mora se uvesti najmanje jedna pretpostavka npr. parametar V_L -volume loss, ili postotak rasterećenja napona prije instaliranja obloge,

odnosno faktor redukcije napona λ , ili se mogu zadati stvarni pomaci na konturi. U radu je provedeno 2D modeliranje izgradnje tunela primjenom metode redukcije napona tzv. λ -metode. U ovoj metodi vrijednost parametra λ se može usvojiti na temelju inženjerske procjene, odnosno iskustva na sličnim projektima ili na temelju usporedbe rezultata 3D i 2D proračuna. Na temelju rezultata proračuna dobivenih u ovom radu može se zaključiti da je, kada se usvoji odgovarajući koeficijent redukcije napona, 3D i 2D analize dati slične poprečne profile slijeganja.

LITERATURA

- [1] Peck, R.B.: Deep excavations and tunnelling in soft ground. In *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, State of the art volume: 225–290, 1969.
- [2] Attewell, P.B. & Farmer, I.W.: Ground deformations resulting from tunnelling in London Clay. *Can. Geotech. J.* 11(3): 380–395, 1974.
- [3] Standing, J.R., Nyren, R.J., Burland, J.B. & Longworth, T.I.: The measurement of ground movement due to tunneling at two control sites along the Jubilee Line Extension, *Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam, 751–756, 1996.
- [4] Mair, R.J. & Taylor, R.N.: Bored tunneling in urban environment. *Proc. 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Balkema, Rotterdam, 2353–2385, 1997.
- [5] Mair, R.J.: Tunnelling and geotechnics: new horizons. *Géotechnique* 58(9): 695–736, 2008.
- [6] ITA-AITES WG "Research": ITA/AITES Report 2006 on Settlements induced by tunneling in Soft Ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22: 119–149, 2007.
- [7] Burland, J.B., Standing, J.R. & Jardine, F.M.: Assessing the risk of building damage due to tunnelling – lessons from Jubilee Line Extension, London. *Geotechnical Engineering. Meeting society's need*, Vol.1, Swets and Zeitlinger, Lisse, 17–44, 2001.
- [8] O'Reilly, M.P. & New, B.M.: Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction. *Tunnelling* 82. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 173–181, 1982.
- [9] Rankin, W.J.: Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. *Proc. Conf. Engineering geology of underground movements*, The Geological Society, London, 79–92, 1988.
- [10] Katzenbach, R. & Breth, H.: Nonlinear 3-D Analysis for NATM in Frankfurt Clay. *Proc. 10th ICSMFE*, Stockholm, 315–318, 1981.
- [11] Swoboda, G., Mertz, W. & Schmid, A.: Three-dimensional numerical models to simulate tunnel excavation. *Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Models in Geomechanics*, Niagara Falls, 536–548, 1989.
- [12] Wittke, W.: *Rock Mechanics: Theory and Applications with Case Histories*. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [13] Kielbassa, S. & Duddeck, H.: Stress-Strain Fields at the Tunneling Face - Three-dimensional Analysis for Two-dimensional Technical Approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 24, 115–132, 1991.
- [14] Maraš, S.: *Analiza interakcije horizontalne tunelske konstrukcije i stenske mase*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, 1997.
- [15] Desari, G.R., Rawlings, C.G. & Bolton, M.D.: Numerical Modelling of NATM Tunnel Construction in London Clay. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Maire&Taylor (eds), Balkema, Rotterdam, 1996.
- [16] 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(3), 693–712, 1997.
- [17] Lee, G.T.K. & Ng, C.W.W.: Three-dimensional analysis of ground settlements due to tunnelling: Role of K_0 and stiffness anisotropy. *Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Lyon, 617– 622, 2002.
- [18] 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, 1015–1029, 2005.
- [19] Vermeer, P. A., Bonnier, P. G. & Möller, S. C.: On a smart use of 3D-FEM in tunnelling. *Proc. of the 8th Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics – NUMOG VIII*, Rome, Balkema, Rotterdam, 361–366, 2002.
- [20] Galli, G., Grimaldi, A. & Leonardi, A.: Three-dimensional modelling of tunnel excavation and lining. *Computers and Geotechnics*, 31, 171–183, 2004.
- [21] 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(3): 189–199, 2005.
- [22] Jardine, R.J., Potts, D.M., Fourie, A.B. & Burland J.B.: Studies of the Influence of the Nonlinear Stress-strain Characteristics in Soil-Structure Interaction. *Géotechnique* 36(3), 377–396, 1986.
- [23] Yazdchi, M., Macklin, S.R. & Yeow, H.C.: 3D modelling of sprayed-concrete-lined tunnels in clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 159, Issue GE4, 243–250, 2006.
- [24] Simpson, B.: Retaining structures: displacement and design. *Géotechnique*, 42(4), 541–576, 1992.

- [25] Mašin, D.: 3D Modeling of an NATM Tunnel in High K_0 Clay Using Two Different Constitutive Models. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering* © ASCE, September 2009, 1325-1335, 2009.
- [26] Svoboda, T., Mašin, D., Boháč, J.: Class A predictions of a NATM tunnel in stiff clay. *Computers and Geotechnics*, 37, 817-825, 2010.
- [27] Panet, M., Guenot, A.: Analysis of convergence behind the face of a tunnel. *Tunnelling 82*. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 197-204, 1982.
- [28] Svoboda, G.: Finite element analysis of the New Austrian Tunnelling Method (NATM). In *Proc. 3rd Int. Conf. Num. Meth. Geomech*, Aachen, Vol. 2: 581-586, 1979.
- [29] Rowe, R.K., Lo, K.Y. & Kack, G.J.: A method of estimating surface settlement above tunnel constructed in soft ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 20: 11-22, 1983.
- [30] Lee, K.M. & Rowe, R.K.: An analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay tunnel. *Canadian Geotechnical Journal*, 28: 25-41, 1991.
- [31] Maraš-Dragojević, S. & Radić, Z.: Some geotechnical aspects of the future Belgrade metro construction. *Proc. Under City Colloquium on Using Underground Space in Urban Areas in South-East Europe April 12-14*, Dubrovnik, Croatia, 2012.
- [32] DIANA Finite Element Analysis, *User's Manual release 9.4.3*, TNO DIANA BV, Delft, 2010.