

primljen: 21.08.2023.
korigovan: 02.09.2023.
prihvaćen: 05.09.2023.

izvorni naučni rad

UDK : 624.19:519.6

NUMERIČKE ANALIZE STABILNOSTI ISKOPA TUNELA IBARAC I STABILIZACIJA URUŠENOG DIJELA, PARKING NIŠE

Sead Kadrić¹, Ekrem Bektašević², Kemal Gutić³, Denijal Sikira⁴

Rezime: Prilikom iskopa tunela u stijenskoj masi dolazi do promjene naponskog stanja, odnosno do pojave koncentracije napona oko konture iskopa. U radu je prikazano naponsko – deformacijsko stanje u stijenskoj masi i analiza zona tunela u kojima je već izveden iskop i primarna podgrada, a na kojima su deformacije znatno uvećane. Proračun, na bazi Metode konačnih elemenata (MKE), proveden je primjenom kompjuterskog programa PLAXIS 2D. Pomoću programa RocLab posebno su definisani ekvivalentni Mohr – Coulombovi parametri čvrstoće za svaku zonu i nastupajuću geološku jedinicu. Postupak/faze stabilizacije urušenog dijela tunela rađen je na primjeru tunela Ibarac. Ove analize stabilnosti ukazuju na područja u kojima se može očekivati lom stijenskog materijala, odnosno na mjesta na kojima treba poduzeti odgovarajuće mjere osiguravanja.

Glavne riječi: numerička analiza, stabilnost, iskop, podgrada, tunel

NUMERICAL ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE IBARAC TUNNEL EXCAVATION AND STABILIZATION OF THE COLLAPSED PART, PARKING NICHE

Abstract: When excavating a tunnel in the rock mass, there is a change in the stress notation, that is, the appearance of a concentration of stress notation around the contour of the excavation. The paper presents the stress-deformation state in the rock mass and the analysis of the tunnel zones where the excavation and the primary support have already been completed, and where the deformations are significantly increased. The calculation, based on the Finite Element Method (FEM), was carried out using the PLAXIS 2D computer program. Using the RocLab program, the equivalent Mohr-Coulomb strength parameters were specifically defined for each zone and the following geological unit. The process/phases of stabilization of the collapsed part of the tunnel was done on the example of the Ibarac tunnel. These stability analyzes indicate the areas where rock material failure can be expected, i.e. the places where appropriate securing measures should be taken.

Key words: numerical analysis, stability, excavation, subgrade, tunnel

¹ i ⁴ “FM INŽENJERING” d.o.o. Sarajevo, sead.kadric@gmail.com

² Dr.sc. “PPG” d.o.o. Sarajevo, bektasevic.ekrem@gmail.com

³ Prof.dr.sc.Rudarsko-geološko-građevinski fakultet, Univerzitet u Tuzla, kemal.gutic@untz.ba

1 UVOD

Iskop podzemnih prostorija i tunela, kao i stabiliziranje neposredno iskopanog profila jedan je od najizazovnijih i najodgovornijih inženjerskih zadataka.

Svaki iskop u stijeni koji formira prazan prostor u stijenskoj masi narušit će primarno stanje napona u masivu i dovesti do razvoja sekundarnog stanja napona oko tih prostorija. To stanje napona dovodi do deformacija konture prostorije. Ako su deformacije velike izvodi se podgrađivanje te prostorije kako bi se spriječilo njeno deformisanje i zadržala namjena. Polazni uslovi su svakako: strukturno – geološka građa masiva, deformacija konture prostorije, primarni i sekundarni naponi te uticaj pritiska podzemne vode.

Osnovni problem koji treba riješiti kada treba postaviti podgradu je koliko stijeni treba dozvoliti da se deformiše prije nego što podgrada preuzme na sebe opterećenje i onemogućiti daljnje deformacije konture prostorije. To znači da kod podgrađivanja i izbora racionalnog sistema treba uzeti u obzir interaktivnu prirodu karakteristika opterećenje – deformacija, kako stijenske mase, tako i podgrade.

Numeričke metode omogućavaju korištenje naprednih konstitutivnih modela kojima se može realnije predvidjeti odziv sredine u kojoj se tunel izvodi, kao i ponašanje elemenata podgradnog sklopa pri različitim uslovima opterećenja. Numeričke analize kod kojih se parametri materijala mijenjaju u skladu s rezultatima geotehničkih mjerenja i opažanja nazivaju se povratne analize. Princip povratnih analiza je taj da se za pretpostavljene karakteristike materijala izračuna stanje naprezanja i deformacija te da se izračunato stanje komparira sa rezultatima dobivenim mjerenjem stvarnog stanja na terenu.

Shodno tome provedene su numeričke analize naponsko – deformacijskog stanja u stijenskoj masi tunela Ibarac i uticaji u primarnoj podgradi, za sve faze izgradnje tunelskog profila u kojima su provjerene relevantnosti iskopa tunela za različite geološke uslove[1]. Takođe, prezentirana je i kontrolna analiza - numerički model, za već izrađeni dio tunela Ibarac (parkirna niša) na kome je došlo do povećanja deformacija (kolapsa obloge tunela), s cilju definisanja što optimalnijeg rješavanja nestabilnosti stropa tunelskog iskopa i primarne obloge na pomenutom dijelu tunela.

Tunel „Ibarac“ nalazi se na obilaznici Rožaja, i dio je projekta *Izgradnja II faze obilaznice Rožaja*, od

stacionaže km 0+101,40 do km 1+294,50. Tunel je jednocijevni ukupne dužine od 1.193,10m. Uz cestovni tunel, s desne strane na osnom odstojanju od 20m vršena je izrada i evakuacionog tunela. Evakuacioni tunel ukupne je dužine 693,10m. Sa ulazne strane evakuacioni tunel prati glavnu cijev od stacionaže km 0+101,40 do 0+420,00m, dok sa izlazne strane prati glavnu cijev od stacionaže km 0+920,00 do km 1+294,50. Poprečnom vezom na stacionaži km 0+920,00, evakuaciona cijev povezana je sa glavnom cijevi tunela. U središnjem dijelu tunela, na dužini od 500m, nije predviđena evakuaciona cijev.

1.1 GEOTEHNIČKI MODEL TLA I STIJENA

Inženjersko-geološke karakteristike „in-situ“ obuhvataju čvrstoću materijala, elemente pukotina, kontakte između pojedinih stijena i sl.

Nakon utvrđivanja inženjersko – geoloških karakteristika i kontinuiranih geološkog kartiranja definisani su geotehnički modeli tla i stijena za tunel Ibarac[2]. Geotehnički modeli, utvrđeni su za dvije geotehničke sredine, i to:

- a) fluvioglacialni sedimenti i
- b) trošni krečnjaci, degradirani i raspucali.

Fluvioglacialni sedimenti:

- prirodna zapreminska težina, $\gamma=24,0$ kN/m³,
- ugao unutrašnjeg trenja, $\phi=25-35^\circ$,
- kohezija, $c=45-55$ kN/m²,
- modul deformacije, $E_v=90-120$ Mpa.

Ovaj materijal, po RMR kategorizaciji, svrstan u V kategoriju stijenske mase, iako se materijal determiniše kao tlo.

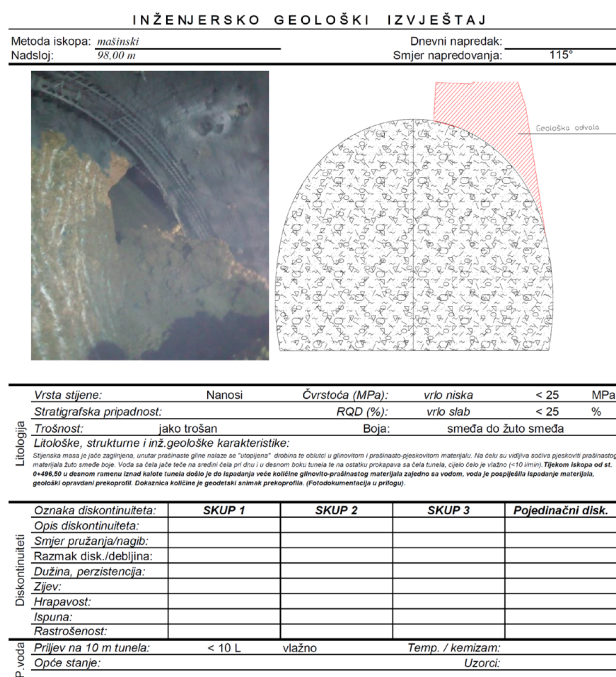
Trošni krečnjaci, degradirani i raspucali:

- prirodna zapreminska težina, $\gamma=25,0$ kN/m³,
- ugao unutrašnjeg trenja, $\phi=30-40^\circ$,
- kohezija, $c=50-100$ kN/m²,
- modul deformacije, $E_v=150-250$ Mpa.

Ovaj materijal, po RMR kategorizaciji, svrstan u IV kategoriju stijenske mase.

Ukratko, fluvioglacialni sedimenti su građeni od žuto-smeđe do smeđe prašinasto-pjeskovite gline, u površinskim dijelovima pjeskovito - prašinski sedimenti sa sitnim šljunkom i valuticama. Dublje su krupnozrni, heterogeni (rjeđe poluzaobljeni) šljunkovi i centimetarsko – decimetarci valutci. Povremeno se javljaju džepovi gline. Materijal u zoni iskopa glavne tunelske cijevi je porozan i stišljiv.

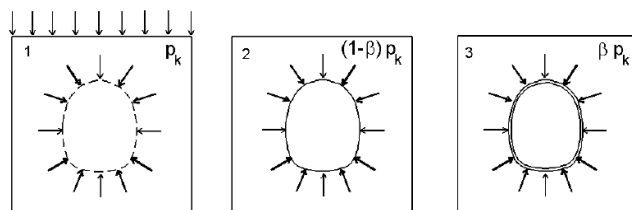
Krečnjaci i dolomiti, značajno tektonizirani, ispucali i sitno blokovski izdijeljeni ili potpuno raspadnuti. U nastavku je prikazan inženjersko-geološki izvještaj sa stacionaže 0+496.50.



Slika 1 - IG obrazac (Tunel „Ibarac“, st.0+496.50)

2 NUMERIČKE ANALIZE

Numeričke analize vršene su metodom konačnih elementata pomoću kompjuterskog programa PLAXIS. U numeričkoj analizi primjenjen je postupak simulacije građenja tunela koji se naziva $(\lambda=1-\beta)$ - metoda. U toku izgradnje tunela, pomjeranja konture rastu sa dužinom napredovanja iskopa odnosno sa odmicanjem čela od posmatranog poprečnog preseka tunela. Nakon ugradnje primarne podgrade kontura tunela se nastavlja deformisati, ali sada zajedno sa podgradom sve dok se ne uspostavi stanje konačne ravnoteže. Kasnija ugradnja podgrade (udaljenije čelo iskopa) implicira manje opterećenje na podgradu i veća pomjeranja stijenske mase. Ranijom ugradnjom podgrade (manje udaljeno čelo iskopa) izbjeći će se veća pomjeranja, ali prepustiti znatno veće opterećenje na podgradu, što nije nužno ekonomski opravdano. Idejni koncept $(\lambda=1-\beta)$ - metode je da se inicijalni napon na mjestu budućeg tunela podijeli na dio $(1-\beta)p_k$ koji prenosi stijenska masa nepodgrađenog tunela i dio βp_k koji preuzima podgrađeni tunel (fotografija br.2). Vrijednost $p_k=p_0$ odgovara početnim naponima za koje se pretpostavlja da su hidrostatični.



Slika 2 Shematski prikaz koncepta β -metode ($1-\beta=\lambda$)

Koeficijent relaksacije λ je u funkciji više parametara:

- nosivosti stijenske mase,
- faktora stabilnosti tunela,
- koraka iskopa i
- primarne podgradnje (tj. udaljenosti čela iskopa u odnosu na profil u kome se vrši ugradnja primarne podgrade).

Koeficijent relaksacije λ uzima vrijednosti od 1,0 do 0,0 pri čemu 1,0 označava totalnu relaksaciju napona. U numeričkoj analizi potrebno je težiti tome da se usvoji vrijednost λ koja je bliska vrijednosti za λ_{cr} jer to omogućava dimenzionisanje podgradnje koja će zadovoljiti potrebu dominantnog elastičnog odziva stijenske mase, odnosno najbliže slijedi principima NATM. To znači da postoji vrijednost koeficijenta relaksacije $\lambda = \lambda_{cr}$, pri kojoj dolazi do plastifikacije:

$$\lambda_{cr} = 1 - \left(\frac{2}{1+k} \right) \left(\frac{N_s - 1}{N_s} \right) \quad (1)$$

gde je $k=tg^2(45+\phi/2)$.

Iz toga slijedi da je stijenska masa oko tunela u elastičnom stanju ako je:

$$N_s \leq 1 \quad ili \quad (N_s > 1 \quad i \quad \lambda \leq \lambda_{cr}) \quad (2)$$

u plastičnom stanju ako je:

$$N_s > 1 \quad i \quad \lambda > \lambda_{cr} \quad (3)$$

Gdje je N_s faktor stabilnosti nepodgrađenog dijela tunela, i definiše se relacijom:

$$N_s = \frac{2p_0}{\sigma_{cm}} \quad (4)$$

gdje je:

- $p_0 = \gamma H$ - pritisak nadstroja i
- σ_{cm} - jednoosna čvrstoća stijenske mase na pritisak.

Ukoliko je vrijednost faktora stabilnosti tunela $N_s < 1,0$ to implicira višu vrijednost za λ jer stijenska masa ima zahtjevanu nosivost tako da samo mali dio opterećenja preuzima primarna podgrada. U skladu s tim će presječne sile u oblozi biti relativno male zbog manjeg nivoa opterećenja koje preuzimaju. Obrnuto, manji λ -faktor znači veće presječne sile i manje

deformacije stijene prije ugradnje podgrade. Vrijednost λ -faktora, koja se koristi kao ulazni podatak za numeričke analize se utvrđuje na bazi teorijskih pretpostavki i ocjene nosivosti odnosno kvaliteta stijenske mase. Svakako, najrealnija ocjena se postiže povratnim statičkim analizama koristeći podatke mjernih profila na terenu.

2.1 METODOLOGIJA ODREĐIVANJA ULAZNIH PARAMETARA ZA 2D ANALIZE

Prilikom numeričkog modeliranja u mehanici stijena, osnovni problem predstavlja određivanje ulaznih parametara stijenske mase. Na osnovu opšteg Hoek – Brown kriterijuma loma, razvijen je softverski program „RockLab“ koji na vrlo jednostavan način omogućava dobijanje pouzdane procjene stijenske mase kako za postojeće tako i za vrlo slabe stijenske mase.

Za potrebe provjere stabilnosti tunela, u kategorijama stijenske mase koje nisu bile predviđene korišteni su svi relevantni podaci koji su bili dostupni u fazi izrade Glavnog projekta. Tunel je podjeljen u dvije kvazihomogene zone, i to zona u kojoj je zastupljena V kategorija stijenske mase i zona tunela u kojoj je zastupljena IV kategorija stijenske mase. Zona tunela u kojoj je zastupljena IV kategorija stijenske mase, je podjeljena na dvije podzone, i to na:

- zona tunela u kojoj je vrijednost RMR-a u rasponu od 21 do 30 bodova i
- b) zona tunela u kojoj je vrijednost RMR-a u rasponu od 31 do 40.

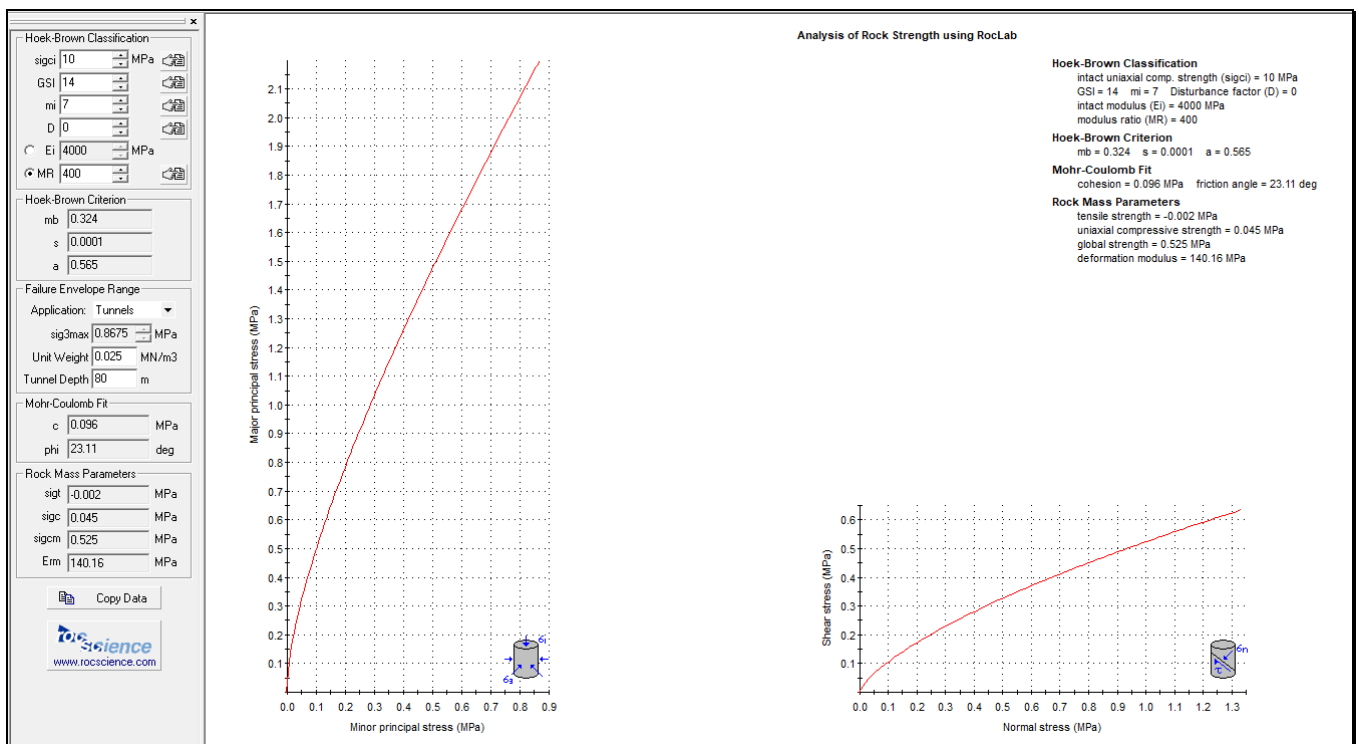
Koristeći se procjenom strukturnih karakteristika stijenske mase navedenim u Izvještaju o inženjersko - geološkim uslovima u tunelu Ibarac, na osnovu geološke GSI klasifikacije i ponašanja primarne podgrade za iskopane i podgrađene sekcije tunela, data je prognoza geomehaničkih parametara za svaku zonu. Za svaku geološku jedinicu izvršena Hoek-Brown-ova i Hoek-Marinos-ova klasifikaciju za stijenske mase, na temelju izmjerenih i interpretiranih jednoosnih čvrstoća na pritisak σ_{cm} , procijenjene

vrijednosti GSI i Hoek-ove konstante m_i . Pomoću programa RocLab definisani su ekvivalentni Mohr-Coulombovi parametri čvrstoće za svaku zonu i nastupajuću geološku jedinicu posebno, pri čemu je razmotrena i reprezentativna visina nadsloja tunela unutar te zone. Sve stijenske geološke sredine su modelirane upotrebom Hardening Soil (HS) modela[3]. Parametri c , φ i E_{tm} dobiveni su programom RocLab. Model, koji je korišten u studiji za opis ponašanja stijenske mase (HS), omogućava unos različite krutosti za rasterećenje i opterećenje ($E_{ur}/E_{ref}= 3\div 10$), čime se realnije modelira rasterećenje izazvano iskopom tunela, koje je karakteristično za odzivnu putanju napona stijenske mase. U analizama su korišteni tipični odnosi modula $E_{ur}/E_{ref}=3$. U praktičnom smislu to znači da su moduli elastičnosti u krajnoj konsekvenci i do 3 puta niži od onih koje su efektivno upotrebljeni u numeričkim analizama o ovoj studiji i koje su rezultat praćenja konvergentnih pomjeranja stijenske mase (glavni oblik ponašanja stijenske mase prilikom iskopa tunela je izazvan rasterećenjem početnih geostatičkih napona).

Numeričke analize tunela izvedene su primjenom metode konačnih elemenata (MKE) kompjuterskim programom PLAXIS 2D. Određena su naponsko-deformacijska stanja u stijenskoj masi te uticaji u primarnoj podgradi, za sve faze izgradnje tunelskog profila. Analize su izvedene prema projektnom pristupu 2 u skladu sa evropskim standardom Evrokod 7 odnosno po pravilniku PBAB87 za betonske konstrukcije.

Dakle, za svaku kvazihomogenu zonu analizirane su slijedeće faze iskopa i podgrađivanja: iskop kalote, poodgrađivanje kalote, iskop stepenice, podgrađivanje stepenice, iskop i podgrađivanje podnožnog svoda. Pri tome su potporne mjere modelirane za svaku zonu.

U nastavku su prikazani ulazni parametri na predmetnom dijelu tunela koji se odnose na parkirnu nišu (kvazihomogena zona 2).



Slika 3 - Odabir ulaznih parametara (Ispis iz RocLab-a)

Za geotehnički model su korišteni sljedeći parametri (tabelarni prikaz).

Tabela 1 Ulazni Parametri

Identification	units	V kategorija – fluvioglacialni sedimenti RMR <20
Hardening soil model		
Drainage type		Drained
γ_{unsat}	kN/m ³	24
γ_{sat}	kN/m ³	24
ϵ_{init}		0,5000
E_{50}^{ref}	kN/m ²	91,00E3
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	91,00E3
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	273,00E3
power (m)		0,5000
C_{ref}	kN/m ²	79,0
ϕ (phi)	°	21,25
ψ (psi)	°	0,000

Na području tunela nije bilo provedenih mjerenja početnog naponskog stanja. Zbog toga je prilikom definisanja vrijednosti koeficijenta pritiska u stanju

mirovanja uzeta vrijednost za K_0 , i to vrijednost 1- $\sin\phi$. 2D i 3D efekt je, pri izračunima u programu PLAXIS 2D, modeliran prema λ -metodi sa korigiranjem parametra ΣM -Stage. Karakteristična je samo jedna zona.

2.2 REZULTATI ANALIZA TUNELA

Pri modeliranju iskopa kalote i stepenice uzet je u obzir 3D efekt, koji je posljedica uticaja čela iskopa. Efekat je obuhvaćen tako da su početni naponi u fazi iskopa djelimično rasterećeni, u fazi podgrađivanja u cjelini. U skladu sa tom metodom je faktor λ zavisen od sljedećih parametara: visine nadsloja, čvrstoće materijala, dimenzija tunela i koraka iskopa, koji je različit za svaku pojedinačnu kategoriju stijenske mase. U programu PLAXIS 2D postupak rasterećenja simuliran je preko parametra ΣM -Stage, koji definiše djelimično rasterećenje inicijalnih napona u pojedinim fazama. Tipične vrijednosti parametra ΣM -Stage u analizama su bile u rasponu od 0,70 do 0,90. U nastavku nisu prikazani rezultati svih ispitivanja odnosno analiza. Prikazani su rezultati za karakterističnu stacionažu, parkirna niša, iako su analize stabilnosti tunela provedene za obje kvazihomogene zone, odnosno kategorije stijenske mase. Također su provedene analize kojima je što

vjerodnostnije predstavljeno ponašanje primarne podgrade u već izvedenim dijelovima tunela.

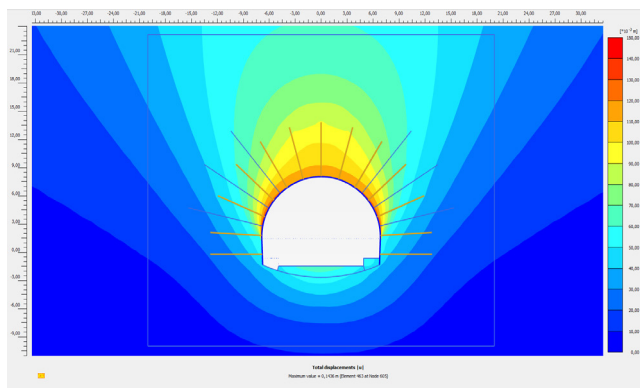
2.2.1 Analiza u kvazihomogenoj zoni 2 – fluvioglacialni sedimenti – kontrolna analiza za već izvedeni dio tunela-Ibarac ulaz od stacionaže km0+455,00 do km0+515,50, parkirna niša

Za potrebe što kvalitetnije ocjene ponašanja materijala u kojem vršen iskop tunela u parkirnoj niši izrađen je pouzdan numerički model koji predstavlja realno stanje na terenu.

Model uspješno opisuje ponašanje stijenske mase i tipa podgrade, po svim fazama podgrađivanja obzirom da je izrađen na osnovu mjerenja stvarnih pojava u tunelu (rezultati mjerenja konvergencija i pukotine u mlaznom betonu). Ovaj model je korišten za pouzdano definisanje podgradnih elemenata, za određivanje mjera sanacije na predmetnom dijelu tunela, parkirna niša od km 0+455 do km 0+515,50.

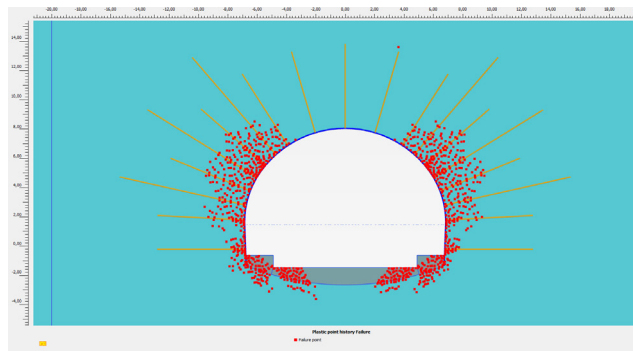
Nakon izrade modela moguće je precizno razmotriti šta se zapravo desilo u stijenskoj masi i podgradi. Veličina deformacija stijenske mase je kompatibilna sa deformacijama izmjerenim na terenu i ukupno iznosi cca 15 cm.

U nastavku su prikazani modeli ponašanja stijenske mase (rezultati statičke analize).



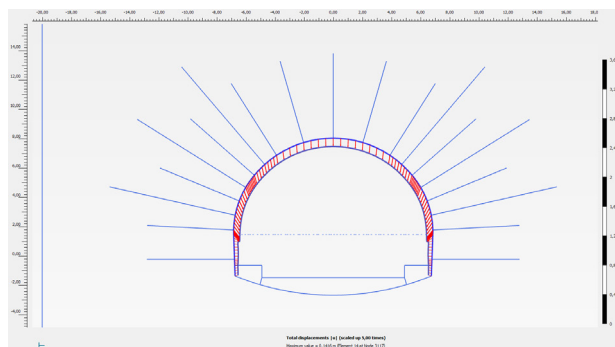
Slika 4 - Pomjeranje stijenske mase nakon iskopa i sistematske podgradnje – D=15cm

Stijenska masa oko tunela je dostigla stepen pune plastifikacije, a dubina plastificirane zone iznosi do L=9m.



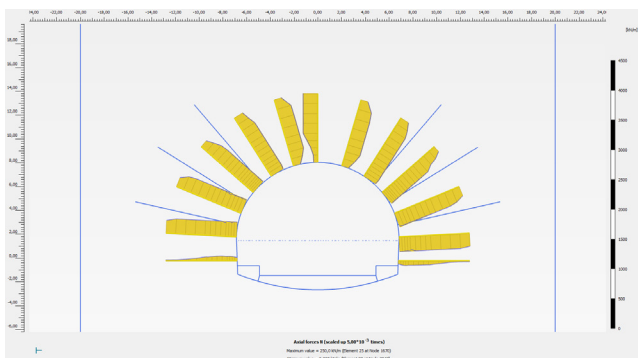
Slika 5 - Plastifikacija stijenske mase oko tunelske cijevi nakon iskopa i sistematske podgradnje

Sidra IBO L=6m su potpuno mobilisana, a vrijednost sile od 250kN je jednaka vrijednosti sile pune plastifikacije čelika. Kao što se vidi iz dijagrama momenata, sile u mlaznom betonu su izašle izvan dozvoljenih vrijednosti što se manifestuje pukotinama koje se opažaju na terenu. Na osnovu pouzdanog numeričkog modela, napravljena je statička analiza kojom su simulirani trenutni procesi u tunelu, a sve u cilju definisanja što optimalnijeg rješenja sanacije kolapsa obloge u kaloti.



Slika 6 - Deformacija i kolaps obloge od mlaznog betona nakon sistematske podgrade d=15cm

Rezultati proračuna jasno pokazuju da su elementi podgrade nedovoljno dimenzionirani da bi uspješno osigurali stabilnost tunela. Stanje ravnoteže tunelskog iskopa nije postignuto, a dokaz tome je konstantan prirast pomjeranja na terenu. Tako je izvršena sanacija i reprofilacija oštećene obloge, jer je zbog uvećanih deformacija parkirna niša praktično cijelom svojom dužinom bila u podprofilu.



Slika 7 - Envelopa normalnih sila u podgradi od mlaznog betona – gubitak integriteta obloge

Intezitet pomjeranja je najznačajniji u bokovima tunela, te je preporučena sistematska ugradnja dodatnih sidara u bokovima, dužine $L=9\text{m}$. Suština rješavanja problema je u ograničavanju deformacija, stoga je predložen i koncept sa ugradnjom lučnog podnožnog svoda od ljevanog betona. Time se stvara kontinuitet obloge u poprečnom profilu i osigurava stabilnost tunela.

Sanacija podprofila u kaloti tunela Ibarac, na stacionaži od km 0+455,00 do km 0+515,50, s izvedbom u sljedećim koracima:

- Prethodno iz dijela tunela koji nije oštećen ili koji je saniran, potrebno instalirati zaštitu stropa u vidu kopalja IBO $\Phi 51\text{mm}$, $L=3\text{m}$, sa preklapom od 1,0m.
- Pažljivo ukloniti postojeću oblogu od mlaznog betona koja je u podprofilu, na način da, ni u jednom trenutku duž tunela ne smije biti otvoreno više od jednog metra. Pažljivo ukloniti oblogu da se ne oštete već ugrađena sidra. Sidra reaktivirati nakon ugradnje nove obloge. Na mjestima gdje to ne bude moguće instalirati nova.
- Nakon uklanjanja postojeće obloge ugraditi novu oblogu od mlaznog betona MB30 debljine $d=30\text{cm}$, armiranu sa dva sloja armaturnih mreža Q335.
- Sistematska ugradnja dodatnih šest IBO sidara, dužine $L=9$ u bokovima kalote, po tri sidra na svakom boku.
- Nakon provedenih svih prethodnih koraka izvršiti izradu podnožnog svoda od livenog betona MB30.

Preporučene faze radova prilikom sanacije podprofila u kaloti:

- Instaliranje zaštite stropa IBO kopljima.
- Uklanjanje postojeće obloge betona koja je u podprofilu, korak je 1,0 m tunela.

- Ugradnja prvog sloja armaturne mreže i mlaznog betona.
- Uklanjanje drugog koraka obloge, a na prvom koraku ugradnja drugog sloja armaturne mreže.
- Uklanjanje trećeg koraka obloge, na drugom koraku kompletiranje obloge od mlaznog betona, a na prvom ugradnja dodatnih sidara i reaktivacija postojećih sidara.

Na dijelu tunela Ibarac, na stacionaži km 0+455,50 (parkirna niša) došlo je urušnja stropa tunelskog iskopa i primarne obloge. Urušenje tunela je lokalne prirode u vidu dimnjaka, koji se progresivno proširio do površine terena. Velika količina materijala zatrpala je tunelski iskop i spriječila komunikaciju duž tunela. Materijal u kojem se vršio iskop tunela su fluvio-glacijalni nanosi (pijesak, šljunak mjestimično zaglinjen), koji su skloni osipanju. Na ovom dijelu tunela, nakon iskopa i primarne podgradnje uočen je značajan priliv podzemnih voda, koje su se manifestovale „curenjem“ vode na mjestima ugrađenih sidara.

Zbog kriterijumskih parametara koji nisu uzeti u obzir prilikom ocjene stabilnosti iskopa i ugradnje primarne podgrade pri izradi Glavnog projekta došlo je do kolapsa stropnog dijela tunelskog iskopa zajedno sa primarnom podgradom. Naime, prisustvo podzemne vode, i općenito uticaj podzemnih voda na moguće pojave lokalne nestabilnosti u tunelu naknadno je razmatran, iako je voda u skoro svim slučajevima, direktno ili indirektno povezana s nastakom nestabilnosti. Tada se dodatno povećava gravitacijska smičuća sila nastala zbog povećane težine stijene zasićene vodom. Ostali parametri koji se mogu koristiti kao relevantni za ocjenu stabilnosti iskopa i podgrade su:

- lokalne varijacije u orijentaciji diskontinuiteta u odnosu na pravac napredovanja čela iskopa u odnosu na bokove tunela,
- stanje ispune diskontinuiteta u smislu lokalnog slabljenja na određenom dijelu uslijed lokalnih geoloških varijacija,
- bilo koja vrsta anizotropije stijenske mase,
- predvidljiva promjena geoloških uslova čela iskopa,
- stanje konvergentnih pomjeranja prethodno iskopanog i podgrađenog dijela tunela,
- stepen mobilizacije sidara i stanje integriteta tunelske obloge prethodno podgrađenog dijela tunela.

Obzirom na karakter i veličinu urušenja, sanacione radove na iskopu i ugradnji novih elemenata primarne podgrade potrebno je izvoditi u više faza. Definirane faze sanacije urušenog dijela sekcije tunela su sljedeće:

Faza 1. – iskop i podgrada u minimalnom profilu, profil glavne tunelske cijevi, kao prolaz ispod urušene zone i omogućavanje komunikacije,

Faza 2. – izrada cijevnog štita i injektiranje zone neposredno iznad stropa tunela,

Faza 3. – proširenje i reprofiliacija profila tunela, profil parking niše, sa ponovnom izradom primarne podgrade,

Faza 4. – zapunjavanje i plombiranje „rupe“ (krater) koja se manifestovala na površini.

Sve faze radova moraju biti izvedene sa posebnom pažnjom na sigurnost radnika.

U nastavku je prikazan detaljniji opis svih radova na sanaciji urušenja po fazama. Opis i postupak radova u fazi 1. je sljedeći:

Izrada zaštite stropa, IBO šipke $\Phi 51\text{mm}$, $L=6\text{m}$, $e=30\text{cm}$, 27kom, preklap 3m. Korak iskopa i napredovanja od 0.5 m, po potrebi i manje. Rešetkasta remenata PS95/22/32 se postavlja na razmaku od 0.5 m. Obloga od mlaznog betona MB30, $d=30\text{cm}$ te dva sloja armaturne mreže Q335. Zaštita čela iskopa, mlaznim betonom $d=10\text{cm}$, jedan sloj armaturne mreže Q188, kao i IBO sidra $\Phi 32\text{mm}$.

Faza 2. se izvodi neposredno nakon završetka faze 1. Faza 2. se sastoji od ugradnje cijevnog štita iz proširenog profila parkirne niše. Cijevni štiti se izvodi od čeličnih cijevi $\Phi 114\text{mm}$, $L=15\text{m}$, $e=30\text{cm}$, 45kom. U fazi 3. korak iskopa iznosi 0.5m a po potrebi i manji. Ugrađuje se rešetkasta remenata PS95/22/32 na međusobnom rastojanju od 0,5m. Obloga od mlaznog betona MB30, $d=30\text{cm}$. Dva sloja armaturne mreže Q335. Koriste se IBO sidra sa sljedećim rasporedom:

- kalota/strop $l=6,0\text{m}$ 5/6 kom/korak,
- kalota/bokovi $l=9,0\text{m}$ 6 kom/korak,
- stepenica $l=9,0\text{m}$ 4 kom/korak.

Podnožni svod od mlaznog betona MB30 debljine 30cm, armiran sa dva sloja armaturne mreže Q335 treba biti ugrađen odmah nakon iskopa stepenice.

Nakon izvedenih prethodnih faza radova, potrebno je otvor na površini zatrpati i teren dovesti u prvobitno stanje. Prvenstveno je potrebno uraditi betonski čep, odnosno u otvor na površini izliti količinu betona, tako da se formira betonski čep minimalne debljine 1,0m. Nakon toga, otvor zatrpati zemljanim materijalom, te dovesti teren u prvobitno stanje.

3 ZAKLJUČAK

U radu prikazana sprovedena metodologija koja obuhvata inženjersko – geološku klasifikaciju sa procjenom parametara čvrstoće i modula deformacija stijenske mase na osnovu Hoek – Brown kriterij loma. Detaljno je opisan numerički model za analizu stabilnosti i uslovi loma, te utvrđeni bitni pokazatelji ponašanja stijenske mase. Odnosno, provedene su numeričke analize stabilnosti iskopa tunela, i to za kategorije stijenske mase koje nisu bile obuhvaćene osnovnim Glavnim projektom. Ukupno je izrađeno šest analiza, u kojima je provjerena relevantnost osiguranja iskopa tunela za različite geološke uslove kroz tunel. Osiguranje iskopa je bilo dimenzionisano tako da su bile deformacije i naponi u dozvoljenim granicama. Pri određivanju koraka iskopa i primarne podgrade je uzeta u obzir tehnološka izvodljivost dužine koraka za date geološke uslove. Definirane su i mjere sanacije urušenja u tunelu, parkirna niša na stacioniži km 0+455,50. Sanacija urušenja izvedena je u fazama. U konačnici može se zaključiti da se pomoću metode konačnih elemenata (MKE) mogu izučavati i analizirati različiti problemi uticaja primarnih napona u tunelogradnji i uticaji promjena karakteristika stijenskog materijala na promjenu napona oko tunela. Takođe, treba napomenuti da u određenim slučajevima kada su pojave podzemnih voda obilne, ili kada je moguća značajna filtracija površinskih i oborinskih voda, treba neizostavno unijeti uticaje vode i analizirati zajedno sa ostalim parametrima (strukturno – teksturni uslovi, diskontinuiteti, inženjersko – geološkim uslovi).

LITERATURA

- [1] **Glavni projekat Izgradnje II faze obilaznice Rožaja, tunel Ibarac, građevinski dio, knjiga 4.** PUT-INŽENJERING, Podgorica i TEHNO-GRADNJA, Pljevlje, Novembar 2015.
- [2] **Dopuna glavnog projekta Izgradnja II faze obilaznice Rožaja Tunel „Ibarac“.** PUT-INŽENJERING, Podgorica i TEHNO-GRADNJA, Pljevlje.
- [3] Tadić Ljiljana: **Analiza pojave plastičnog loma u stenskoj masi uz tunelski otvor.** Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Subotica, 19 (2010), (63-77).
- [4] Memić Mirza, Folić Radomir, Ibrahimović Adnan: **Metode numeričkog modeliranja i sanacije nestabilne padine u izmjenjenoj serpentinskoj stijenskoj masi.** Originalni naučni rad, Građevinski materijali i konstrukcije 55, (2012), 4 (23-45).

- [5] Tadić Ljiljana: **Analiza pojave plastičnog loma u stijenskoj masi uz tunelski otvor.** *Zbornik radova 19*, (2010).
- [6] Ćosić Mladen.: **Analiza napona i deformacija tunela simulacijom fazne gradnje.** *Jedanaesti nacionalni i peti međunarodni naučni skup*, Novi Sad, novembar (2009).
- [7] Selimović Mustafa.: **Mehanika stijena – treći dio, primjena u inženjerskoj praksi – TOM 1.** *Univerzitet „Džemal Bijedić“ u Mostaru, Građevinski fakultet*, Mostar (2014).
- [8] Avdić Mevludin: **Fortran programiranje za Windowse.** *Univerzitet u Tuzli, Rudarsko-geološko-građevinski fakultet*, Tuzla (2001).
- [9] Vidanović Nebojša, Tokalić Rade Gutić Kemal: **Praktikum iz izrade jamskih prostorija.** *Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet*, Beograd (2011).