

GRAĐEVINSKO INŽENJERSTVO SA ASPEKTA DIMENZIONIRANJA PRIMARNE PODGRADE KOD IZGRADNJE TUNELA /CONSTRUCTION ENGINEERING FROM THE ASPECT OF DIMENSIONING PRIMARY SUBGRADE IN TUNNEL CONSTRUCTION

Nadir Halilbegović¹, Ermedin Halilbegović¹, Azur Memić¹, Mirza Topalović¹

¹IUT, Fakultet politehničkih nauka Travnik, Aleja Konzula – Meljanac bb, 72270 Travnik

e-mail: nadir.halilbegovic@iu-travnik.com, halilbegovic.ernedin@iu-travnik.com,

azur.memic@hotmail.com, protecting.loh@gmail.com

Stručni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251401296>

UDK / UDC 624+69:624.1

Sažetak

U radu se daju principi dimenzioniranja primarne podgrade kod izgradnje tunela. U procesu građenja tunela, nakon usvojene tehnologije iskopa i podgrađivanja, vrši se dimenzioniranje tunelske konstrukcije u fazama. Pri izboru koncepcije građenja tunela, potrebno je izvršiti provjeru svih faza pri formiranju podgradne konstrukcije sa posebnom pažnjom na kvalitet stijeske mase i pritiske koji utiču na podgradnu konstrukciju, uključujući i pritiske same konstrukcije a pridržavajući se propisa i tehničkih normativa. Cilj rješavanja naponsko-deformacijskog problema tunelske konstrukcije je dokaz njegove stabilnosti, a sprovodi se na principima nalaženja stanja napona, deformacija i pomjeranja u stijenskoj masi i primarnoj podgradi tunela za posmatrani poprečni presjek. Veza između nosivosti stijenske mase i stepena relaksacije je ključni faktor stabilnosti tunelskog iskopa. U radu veza je prikazana primjenom parametra faktora stabilnosti tunela (N_s). 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 teži principima NATM-a. Vrijednost λ -faktora, koja se koristi kao ulazni podatak za numeričke analize utvrđuje se 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.

Ključne riječi: tunel, izgradnja, primarna podgrada, NATM, dimenzioniranje, numerička analiza, PLAXIS, faktor stabilnosti, faktor relaksacije

JEL klasifikacija: L74

Abstract

The paper presents the principles of dimensioning the primary support in tunnel construction. In the process of tunnel construction, after the adopted excavation and support technology, the dimensioning of the tunnel structure is carried out in phases. When choosing the concept of tunnel construction, it is necessary to verify all phases in the formation of the support structure, with special attention to the quality of the rock mass and the pressures affecting the support structure, including the pressures of the structure itself, while adhering to regulations and technical standards. The goal of solving the stress-deformation problem of the tunnel structure is to prove its stability, which is carried out based on the principles of finding the state of stress, deformation, and displacement in the rock mass and the primary support of the tunnel for the observed cross-section. The relationship between the load-bearing capacity of the rock mass and the degree of relaxation is a key factor in the stability of the tunnel excavation. In the paper, this relationship is illustrated by applying the stability factor parameter of the tunnel (N_s). In numerical analysis, it is necessary to strive to adopt a value of λ that is close to the value for λ_{cr} , as this allows for the dimensioning of the support that will meet the needs of the dominant elastic response of the rock mass, or closest to the principles of NATM. The value of the λ -factor, which is used as input data for numerical analyses, is determined based on theoretical assumptions and assessments of the load-bearing capacity and quality of the rock mass. Certainly, the most realistic assessment is achieved through back static analyses using data from measurement profiles in the field.

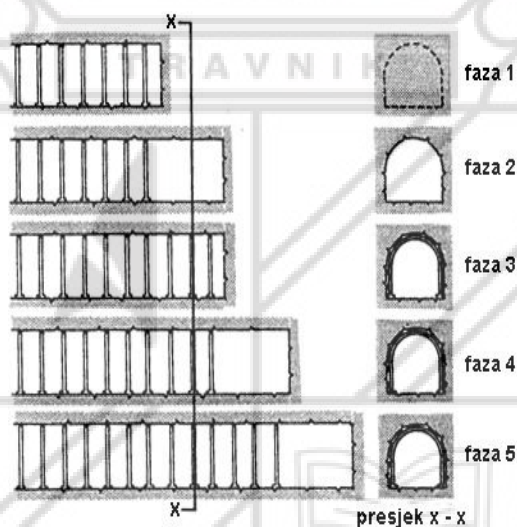
Keywords: tunnel, construction, primary subgrade, NATM, dimensioning, numerical analysis, PLAXIS, stability factor, relaxation factor

JEL classification: L74 Construction

UVOD

U procesu građena tunela, nakon usvojene tehnologije iskopa i podgrađivanja, vrši se dimenzioniranje tunelske konstrukcije u fazama. Dimenzioniranje tunelske konstrukcije uveliko zavisi od same težine konstrukcije u smislu sopstvene težine kao osnovnog opterećenja te pritiska nastalih iz okoline, okolnog tla i stijenske mase uz dodatne analize drugih specifičnih dejstava, uticaja saobraćajnih opterećenja i slično.

Posebnu pažnju treba posvetiti samom procesu iskopa jer se u ograničenom prostoru treba, prije svega obezbijediti sigurnost ljudstva i mehanizacije u onom vremenskom periodu koliko dozvoljava kvalitet stijenske mase. Proces iskopa podrazumjeva da se nakon samog čina iskopa vrši formiranje prve faze podgradne konstrukcije. Shodno tome od izuzetne važnosti je određivanje vremenskog intervala od faze iskopa do formiranja prve faze podgradne konstrukcije. Osim vremenskog intervala, a u zavisnosti od kvalitete stijenske mase, važno je odrediti i „dužinu koraka iskopa“ odnosno veličinu ostvarljivog nepodgrađenog prostora.



Slika 1. Faze izvođenja iskopa i podgrađivanja (Z. Tomanović, 2015)

Pri izboru koncepcije građena tunela potrebno je izvršiti provjeru svih faza pri formiranju podgradne konstrukcije sa posebnom pažnjom na kvalitet stijeske mase i pritiske koji utiču na podgradnu konstrukciju uključujući i pritiske same konstrukcije a pridržavajući se propisa i tehnički normativa. Dva moguća osnovna postupka dimenzioniranja tunelske konstrukcije su:

1. Postupak u kojem podgradnu konstrukciju čini konstrukcija od montažnih AB elemenata ili od livenog betona u oplati fiksiranih injektiranjem na spoju sa granicom iskopa. Ovakav postupak tretira pritiske na podgradnu konstrukciju čineći da sama konstrukcija ima značajno veću krutost od okolne sredine.
2. Postupak u kojem podgradnu konstrukciju čine prskani beton, sidra i armatura, na način da se nakon samog procesa iskopa, u određenom vremenskom periodu, definisanom projektnim zadatkom vrši ugradnja armaturnih mreža prskanih mlaznim betonom koje se preko sidara povezuju sa stijeskom masom uz obavezna mjerenja veličine pomjeranja (konvergencija), čineći „fleksibilnu podgradnu konstrukciju“. Ovakav pristup koristi se u posljednjih 30 godina, a u praksi se pokazao izuzetno učinkovito, formirajući „noseći prsten“ oko tunelskog iskopa koji se dodatno po potrebi „uteže“ sidrima (Slika 2).

Važno je istaći da je kod ovakvog postupka formiranja podgradne konstrukcije od izuzetne važnosti aktivan i motiviran pristup svih učesnika u građenju tunela kako bi se u što kraćem roku i sa manjim količinama betona i armature postigla sigurnost podgradne konstrukcije.



Slika 2. „Noseći prsten“ oko tunelskog iskopa (kalota + stepenica + stalni invert + IBO sidra)
(foto. N. Halilbegović, 2023.)

1. OPĆENITO O DIMENZIONIRANJU PRIMARNE PODGRADE

Cilj rješavanja naponsko-deformacijskog problema tunelske konstrukcije je dokaz njegove stabilnosti. To se vrši na osnovu nalaženja stanja napona, deformacija i pomjeranja u stijenskoj masi i primarnoj podgradi tunela za posmatrani poprečni presjek.

Načelno, iskop tunela prolazi kroz različite uslove gradnje tako da sistem primarne podgrade mora tome biti prilagođen. Svrha statičkih proračuna je dokazati stabilnost iskopa tunela u različitim geološkim uslovima i sa različitim visinama nadsloja. Stabilnost tunela se postiže sa pravilno dimenzioniranom primarnom podgradom tunela.

Pri proračunu treba uzeti u obzir da iskop tunela izaziva relaksaciju početnih napona u stijenskoj masi, koja se zatim preraspodjeli u interakciji između same stijenske mase i podgrade. Ključni element podgrade tunela su stijenska sidra (rock-bolts) koja se ugrađuju radijalno i koja obavljaju funkciju prijenosa uticaja rasterećenja po dubini stijenske mase. Na taj način ona omogućavaju mobilizaciju stijenske mase u blizini otvora i po dubini.

Nova austrijska metoda za tunelogradnju (NATM) počiva na načelu da je potrebno čim više iskoristiti nosivost stijenske mase i čim manje mobilisati primarnu podgradnju. Na taj način se postiže visoka efikasnost pri izvođenju radova, zbog čega je ta metoda jedna od najviše upotrebljivanih u tunelogradnji.

Naponsko-deformacijska analiza iskopa tunela je trodimenzionalni (3D) granični problem samo u periodu građenja. Tada je prisutan utjecaj čela iskopa na osnovu koga stijenska masa preuzima u uzdužnom smjeru ispred tunela dio radijalnih opterećenja. Kada se čelo iskopa udalji dovoljno daleko od posmatranog poprečnog presjeka, granični problem prelazi u dvodimenzionalne (2D) uslove ravnog stanja deformacija.

Iz tog razloga se proračuni stabilnosti tunela u rutinskom projektovanju načelno vrše primjenom 2D modela uz posredno uvođenje 3D efekata.

U tom smislu, u okolini tunela razlikujemo tri naponska stanja odnosno tri zone (Slika 3):

Stanje prije iskopa:

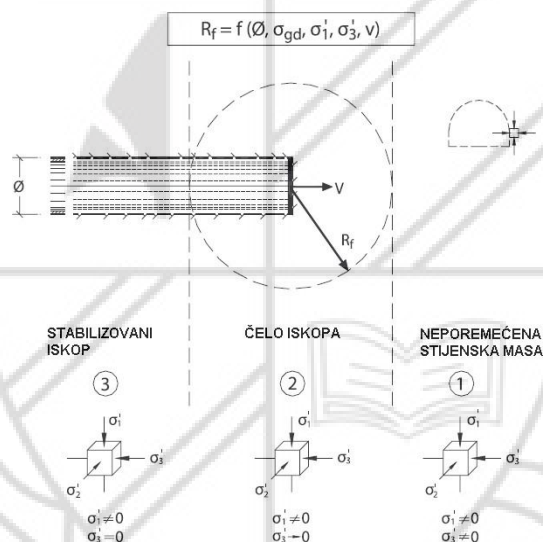
Zona 1 - Neporemećena stijenska masa. Utjecaj prirodno napregnute stijenske mase u unutrašnjosti budućeg tunela je statički ekvivalentan podzemnom pritisku, odnosno, kontaktnom naponu na konturi ($p = p_0$)

3D stanje u kome se osjeća utjecaj blizine čela iskopa:

Zona 2 – Čelo iskopa. Stanje poslije iskopa prije ugradnje podgrade, kontaktni napon na konturi je jednak nuli. ($p = 0$), dio opterećenja preuzima stijenska masa ispred čela iskopa.

2D stanje u kojem se ne osjeća utjecaj blizine čela iskopa:

Zona 3 – Stabilizovan iskop. Stanje poslije ugradnje podgrade je tako da je utjecaj podgrade statički ekvivalentan kontaktnom naponu na konturi, p , granični problem je dvodimenzionalan.



Slika 3. Karakteristične zone napona u toku etapnog iskopa tunela

2. FAKTOR STABILNOSTI TUNELA I ODREĐIVANJE FAKTORA RELAKSACIJE STIJENSKE MASE ZA POTREBE NUMERIČKE ANALIZE

2.1.FAKTOR STABILNOSTI TUNELA

Veza između nosivosti stijenske mase i stepena relaksacije je ključni faktor stabilnosti tunelskog iskopa. Veza je prikazana primjenom parametra faktora stabilnosti tunela N_s .

Faktor stabilnost tunela N_s je vezan na dubinu na kojoj je pozicioniran tunel (H) i na kvalitet odnosno nosivost stijenske mase. Odnos ove dvije veličine, koji je definisan vrijednošću N_s , je pokazatelj naponsko-deformacijskog stanja u stijenskoj masi nakon iskopa tunela (Slika 4).

Faktor stabilnosti nepodgrađenog tunela se definiše relacijom:

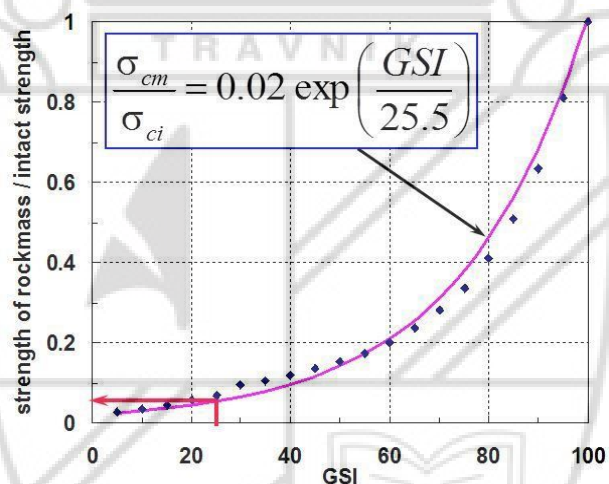
$$N_s = \frac{2p_o}{\sigma_{cm}}$$

gdje je,

$p_o = \gamma H$ - pritisak nadsloja

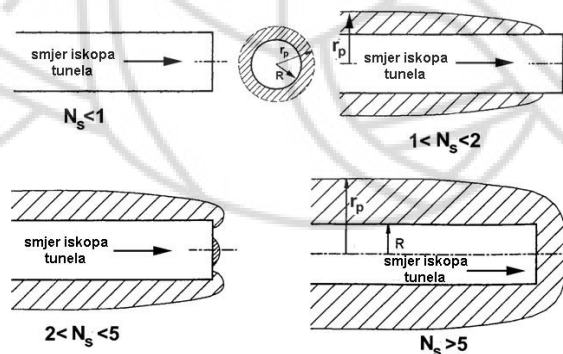
σ_{cm} - jednoosna čvrstoća stijenske mase na pritisak

Za određivanje vrijednosti jednoosne čvrstoće stijenske mase na pritisak σ_{cm} se koristi više različitih metoda. Na slici 4. je prikazan postupak određivanja σ_{cm} pomoću takozvane GSI klasifikacije (Hoek & Brown, 2002). GSI klasifikacija uzima u obzir sve važne parametre diskontinuiteta stijenske mase (razmak, distribucija, slojevitost, frekvencija, orijentacija).



Slika 4. Postupak određivanja σ_{cm} pomoću takozvane GSI klasifikacije

Ukoliko je odziv stijenske mase elastičan vrijednost faktora stabilnosti je $N_s \leq 1$. Za vrijednosti faktora $N_s > 1,0$ odziv stijenske mase je elasto-plastičan, odnosno dio stijenske mase u najbližoj okolini nepodgrađenog tunela je plastificiran. Na slici 5. je prikazana promjena veličine i oblika plastificirane zone stijene oko tunela zavisno od veličine N_s .



Slika 5. Veličina i oblik plastificirane zone oko nepodgrađenog tunela u zavisnosti od vrijednosti N_s (Kavvadas, 2004), r_p – radijus plastične zone oko tunela, k – koeficijent $k = \tan^2$

$$(45+\varphi/2).$$

U primjeru podgrađenog tunela jedan dio opterećenja preuzima podgrada tunela, tako da dubina plastifikacije stijenske mase zavisi i od nosivosti podgrade. U određenom smislu je 3D efekat stabilnosti čela u funkciji smanjivanja dubine plastifikacije, odnosno ona se ne može u potpunosti realizovati dok se iskop čela ne udalji dovoljno od posmatranog poprečnog presjeka. Na taj način su stepen relaksacije i dio opterećenja, koga preuzima podgrada tunela, direktno povezani.

Uticaj podgrade tunela možemo prikazati kao interni pritisak p koji djeluje u otvoru tunela, pri čemu je p_0 početni hidrostatički pritisak. Za hidrostatično stanje je stepen relaksacije;

$$p = (1-l)p_0$$

Kao što je ranije objašnjeno, vrijednost koeficijenta relaksacije λ zavisi od udaljenosti čela iskopa u odnosu na posmatrani poprečni presjek odnosno od transfera sa 3D na 2D granične uslove.

Može se pokazati da za linearno-elastične uslove iskopa kružnog tunela u homogenoj i izotropnoj stijenskoj masi važi:

$$s_q - s_r = 2p_0 l$$

Pri čemu je σ_r radijalni i σ_θ tangencijalni napon. Ukoliko je njihova razlika (devijator napona) veća od jednoaksijalne čvrstoće σ_{cm} dolazi do plastifikacije stijenske mase. Iz prethodne jednačine se vidi da je to direktno zavisno od faktora relaksacije λ . To znači, da postoji vrijednost koeficijenta relaksacije $\lambda = \lambda_{cr}$, (Kavvadas, 2004) pri kojoj dolazi do plastifikacije:

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

gdje je $k = \tan^2 (45 + \varphi/2)$.

Iz toga slijedi da je stijenska masa oko tunela u:

1. elastičnom stanju ako je:

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

2. plastičnom stanju ako je:

$$N_s > 1 \text{ i } \lambda > \lambda_{cr}$$

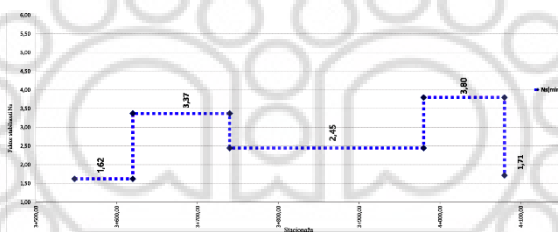
Prema tome, ukoliko želimo da pri $N_s > 1$ stanje u okolini tunela ostane elastično moramo doseći da relaksacija napona usljed iskopa tunela ne prelazi vrijednost λ_{cr} . To znači da moramo ugraditi oblogu dovoljne nosivosti (primarna podgrada i sidra) na određenoj udaljenosti od čela iskopa koja obezbjeđuje da 3D efekat još uvijek zadržava potrebni nivo relaksacije napona.

Prethodno objašnjenje ukazuje na filozofiju dobrog, uspješnog i ekonomski opravdanog građenja tunela u skladu sa principima NATM. Ključno pitanje na koje projektant mora odgovoriti je na kojem rastojanju od čela iskopa imamo vrijednost λ_{cr} i kakvu oblogu treba ugraditi na tom mjestu da bi odziv stijenske mase bio pretežno elastičan.

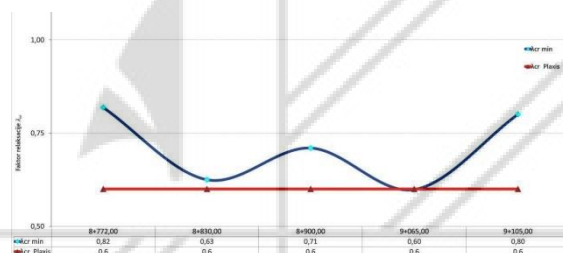
U skladu sa principima NATM dozvoljen je, čak i poželjan, određeni nivo plastifikacije oko otvora tunela, ali on ne smije preći dužinu sidara. U idealnim okolnostima plastifikacija ne prelazi dubinu od 3m do maksimalno 6m.

U svakom slučaju, ako to dozvoljava nosivost stijenske mase, treba težiti da njen odziv ostane pretežno elastičan jer to dugoročno garantuje trajnost tunela, odnosno manju zavisnost njegove stabilnosti od materijala ugrađenih u njegovu podgradu.

Za potrebe numeričke analize stabilnosti tunela je potrebno izvršiti korektnu procjenu raspodjele koeficijenta relaksacije λ uzduž tunela (Slika 6., 7., 8., 9.). Na osnovu toga je moguće preciznije odrediti ulazne parametre za analize interakcije stijenske mase i potpornih elementa primarne podgradnje tunela, što je objašnjeno u nastavku.



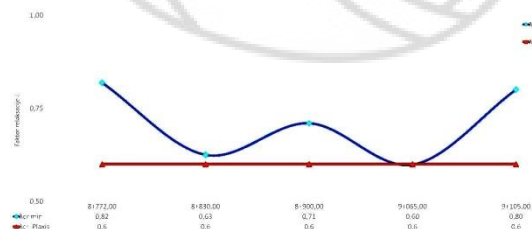
Slika 6. Raspodjela faktora stabilnosti N_s duž desne tunelske cijevi



Slika 7. Raspodjela koeficijenta relaksacije λ_{cr} po sektorima duž desne tunelske cijevi



Slika 8. Raspodjela faktora stabilnosti N_s duž lijeve tunelske cijevi



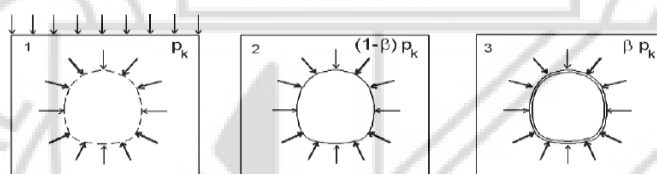
Slika 9. Raspodjela koeficijenta relaksacije λ_{cr} po sektorima duž lijeve tunelske cijevi

2.2. ODREĐIVANJE FAKTORA RELAKSACIJE STIJENSKE MASE ZA POTREBE NUMERIČKE ANALIZE

Numeričke analize se vrše metodom konačnih elemenata pomoću programskog paketa PLAXIS. U numeričkoj analizi se primjenjuje postupak simulacije građenja tunela koji se naziva $\beta(\lambda)$ -metoda. U toku izgradnje tunela pomjeranja konture rastu sa dužinom napredovanja iskopa odnosno sa odmicanjem čela od posmatranog poprečnog presjeka tunela. Nakon ugradnje primarne podgrade kontura tunela se nastavlja deformisati, ali sada zajedno sa podgrade 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) izbjegavamo veća pomjeranja, ali prepuštamo znatno veće opterećenje na podgradu.

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 (Slika 10.). Vrijednost $p_k=p_0$ odgovara početnim naponima za koje se pretpostavlja da su hidrostatički.



Slika 10. Šematski prikaz metode ($\lambda=1-\beta$)

U ranijem tekstu je objašnjeno da koeficijent relaksacije λ funkcija 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 je potrebno 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 teži principima NATM.

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 podgradnja. U skladu sa 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 utvrđuje se 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.

3.MODELIRANJE TUNELSKOG ISKOPA

3.1.GRANIČNI USLOVI

Pri statičkom izračunu u obzir se uzima geometrija iskopa i potporne mjere za svaku pojedinačnu fazu građenja, kao i geološki uslovi, koji su predviđeni prethodnim geološkim istraživanjima i visina nadsloja. Za svaki sektor daju se Hoek-Brown-ove i Hoek- Marinos-ove klasifikacije za stijenske mase, na temelju procijenjenih i interpretiranih jednoosnih čvrstoća na pritisak σ_{cm} , procijenjene vrijednosti GSI i Hoek-ove konstante m_i .

Granice između zona se biraju tako da se, uz poštivanje različnih geoloških uslova, visina nadsloja tunela unutar pojedine zone ne promjeni više od 50m.

3.2.MATERIJALNI MODEL ZA STIJENSKU MASU

Sve stijenske geološke sredine se modeliraju upotrebom Hardening Soil modela i Mohr-Coulomb-ovog uslova loma. Parametri c , φ i E_{rm} dobijaju se programom RocLab. Ako u iskopu tunela dominira rasterećenje stijenske mase onda se u izračunima upotrijebi modul rasterećenja $E_{ur} = 3 \cdot E_{rm}$.

3D utjecaji u 2D analizama iskopa i primarnog podgrađivanja tunela se obuhvate u skladu sa postupkom Kavvasa (2004). Pri izračunima u programu PLAXIS 2D, 3D efekt se modelira prema λ -metodi sa korigiranjem parametra ΣM -Stage (to je λ u PLAXIS 2D), kao što je objašnjeno u ranijem tekstu.

3.3.MATERIJALNI MODEL ZA OBLOGU OD MLAZNOG BETONA

Primarna obloga je modelirana koristeći 1D linijske elemente („beam elements“) koji mogu da prime normalnu silu (zatezanje ili pritisak) i momente savijanja. Linearno elastične karakteristike EA i EI su određene na osnovu debljine primarne podgrade (u rasponu od 5 do 30 cm) i modula elastičnosti za beton. Prilikom proračuna korišten je modul elastičnosti $E_c = 15$ Gpa.

3.4.MATERIJALNI MODEL ZA SIDRA

Štapna sidra se modeliraju koristeći 1D linijske elemente, koji mogu da prenose samo normalnu silu zatezanja. Elementi nisu kruto integrirani u mrežu elemenata nego su spojeni koristeći sistem žica kroz uobičajne čvorove („embedded beam elements“). Njihove linearno elastične karakteristike se određuju na osnovu prečnika bušotine D, uzdužnog razmaka između sidara L_s i modula elastičnosti sidara. Kako su ugrađena sidra kompozitni elementi koji sadrže čelično sidro i ispunu od injekcione smjese, modul elastičnosti zavisi od prečnika bušotine i prečnika čeličnih sidara:

$$E_{kompozit} = E_{čelik} \cdot A_{čelik} + E_{injekcijskasmjesa} \cdot A_{injekcijska smjesa}$$

A_{bušotina}

Sila u sidrima je ograničena na silu plastifikacije N_p , kako sila u sidrima ne bi prekoračila granicu tečenja za sidra.

ZAKLJUČAK

U procesu građena tunela, nakon usvojene tehnologije iskopa i podgrađivanja, vrši se dimenzioniranje tunelske konstrukcije u fazama. Pri izboru koncepcije građena tunela, potrebno je izvršiti provjeru svih faza pri formiranju podgradne konstrukcije sa posebnom pažnjom na kvalitet stijeske mase i pritiske koji utiču na podgradnu konstrukciju, uključujući i pritiske same konstrukcije a pridržavajući se propisa i tehnički normativa.

Cilj rješavanja naponsko-deformacijskog problema tunelske konstrukcije je dokaz njegove stabilnosti.

Stabilnost tunela se postiže sa pravilno dimenzioniranom primarnom podgradom tunela. Ključni element podgrade tunela su stijenska sidra (rock-bolts), koja se ugrađuju radijalno i koja obavljaju funkciju prijenosa uticaja rasterećenja po dubini stijenske mase. Na taj način ona omogućavaju mobilizaciju stijenske mase u blizini otvora i po dubini.

To se vrši na osnovu nalaženja stanja napona, deformacija i pomjeranja u stijenskoj masi i primarnoj podgradi tunela za posmatrani poprečni presjek. Veza između nosivosti stijenske mase i stepena relaksacije je ključni faktor stabilnosti tunelskog iskopa. Veza je prikazana primjenom parametra faktora stabilnosti tunela (N_s).

U numeričkoj analizi je potrebno 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 teži principima NATM-a.

Nakon ugradnje primarne podgrade kontura tunela se nastavlja deformisati, ali sada zajedno sa podgrade 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) izbjegavamo veća pomjeranja, ali prepuštamo znatno veće opterećenje na podgradu.

Vrijednost λ -faktora, koja se koristi kao ulazni podatak za numeričke analize utvrđuje se 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.

LITERATURA

1. N. Halilbegović: Uticaj naponsko-deformacionog stanja stijenskog masiva na tunelsku oblogu kod izgradnje saobraćajnih tunela, Doktorska disertacija – juni 2024. god. IUT Travnik
2. Tunelogradnja u Bosni I Hercegovini – Koridor Vc, Udruženje inženjera geotehničara u BiH, 2023. god
3. Misija G21 – Geotehnički projekat, FM Inženjering d.o.o. Sarajevo, 2021. god.
4. Technical Report, Tunnel Kobilja Glava, Euroasfalt, 2023. god.