

ANALIZA POJAVE PLASTIČNOG LOMA U STENSKOJ MASI UZ TUNELSKI OTVOR

Ljiljana Tadić¹

UDK: 624.121 : 539.42 : 519.61

Rezime: Prilikom iskopa u stenskoj masi dolazi do promene naponskog stanja, odnosno do koncentracije napona oko konture iskopa. U radu se prikazuje postupak proračuna zona plastifikacije u neposrednoj okolini nepodgrađenog tunelskog iskopa. Proračun je sproveden primenom program Phase² koji se bazira na Metodi konačnih elemenata u koju je integrisan Hoek – Brown – ov kriterijum loma. Primenom programa RocLab izračunata je istovremeno deformabilnost i čvrstoća stenske mase, dok je gruba procena deformacija (prečnik plastifikovane zone i konvergencija konture iskopa) izvršena primenom programa Rocsupport. Postupak proračuna je prikazan na primeru putnog tunela, kružnog poprečnog preseka, sa dve saobraćajne trake.

Ovakav način modeliranja je od značaja jer pruža uvid u ponašanje stenske mase, odnosno tunelskog otvora, u svim fazama iskopa. Drugim rečima, rezultati ovakve analize stabilnosti ukazuju na područja u kojima se može očekivati plastični lom stenskog materijala, odnosno na mesta na kojima treba preduzeti odgovarajuće mere osiguravanja tunelskog iskopa.

Ključne reči: Tunelski iskop, stenska masa, Metod konačnih elemenata, kriterijum loma.

1. UVOD

Pri analizi prostornog stanja napona često dolazi do pojednostavljivanja u smislu da se naponsko stanje analizira kao dvodimenzionalni problem u jednoj od ravni glavnih napona. Jedan od tipičnih primera kod kojeg se analiza naponskog stanja može pojednostaviti s ravnim stanjem deformacija je tunel – tokom iskopa tunela u homogenoj i izotropnoj stenskoj masi, sva pomeranja se dešavaju u ravni upravnoj na osu tunela.

Prilikom iskopa tunela u stenskoj masi se remeti prirodna ravnoteža čime započinju reološki procesi koji dovode do smanjenja dimenzija iskopa, odnosno dolazi do promene naponskog polja u stenskoj masi u okolini tunelskog iskopa. Kada su u pitanju reološki procesi moguće su dve njegove tendencije: konvergentan i divergentan proces (Slika1). Konvergentan proces je karakterističan za većinu zdravih i čvrstih stena, dok je za stene sa nižim mehaničkim svojstvima karakterističan divergentan proces.

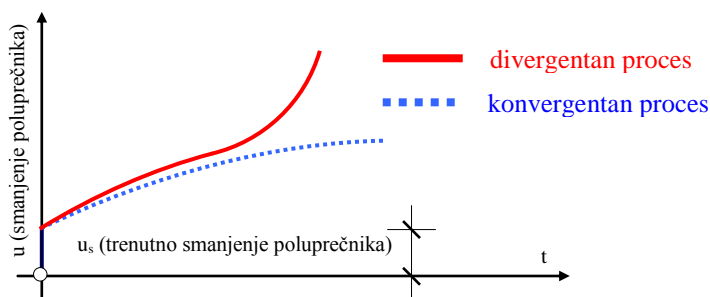
¹ mr Ljiljana Tadić, dipl.inž.grad., Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, tel. 554 – 300, e – mail: tadic@gf.uns.ac.rs

Dosadašnja istraživanja pokazuju da su kod stenskih masa moguće tri osnovne vrste deformacije: elastične, plastične i viskozno tečenje.

S obzirom da se prilikom iskopa u stenskoj masi menja naponsko polje, prilikom projektovanja i građenja tunela, a u zavisnosti od tehnološkog procesa građenja, potrebno je odrediti promene naponskog polja u stenskoj masi od početka otvaranja stenskog masiva do završetka. To podrazumeva i neophodnost utvrđivanja postojanja uslova za nastanak loma i slučajeva u kojima će se on desiti. S obzirom da je proces loma stenske mase, odnosno tla, veoma kompleksan, on se ne može prikazati jednostavnim modelom. Kriterijumi koji se u tu svrhu danas u praksi primenjuju su brojni i raznovrsni, ali najčešće primenjivani su oni koji su izraženi pomoću glavnih napona, a to su:

- Von Misesov,
- Trescin,
- Mohr – Coulombov,
- Drucker – Pragerov,
- Hoek – Brownov kriterijum loma.

Među navedenim kriterijumima najstariji i najčešće primenjivan je Mohr – Coulombov kriterijum, koji definiše granični smičući napon u zavisnosti od normalnog napona na kritičnoj ravni klizanja. Ovom kriterijumu je sličan, ali nešto drugačije formulisan i u poslednje vreme često primenjivan, Hoek – Brown – ov kriterijum loma. Ono što je za ova dva kriterijuma zajedničko je to da ne uzimaju u obzir treću komponentu tenzora napona u prostoru, a mogu se definisati sa dve, odnosno tri konstante. Dok je za koherentna i nekoherentna tla pogodan Mohr – Coulombov kriterijum loma, Hoek – Brown – ov kriterijum loma koristi se u mehanici stena, za stenski masiv.



Slika 1 – Tendencija razvoja deformacije konture iskopa

2. HOEK – BROWN – OV KRITERIJUM LOMA

Pri projektovanju tunela, osim opterećenja stene na trasi tunela pre iskopa tunela, nepoznata su i mehanička svojstva stena jer nikada nema dovoljno prethodnih inženjersko – geoloških istraživanja, kao ni geotehničkih ispitivanja. Stvarna mehanička svojstva stene u masivu je veoma teško odrediti, a ispitivanjima na malim standardnim

uzorcima uglavnom se dobija samo aksijalna čvrstoća a u proračune, osim nje, treba uvesti deformacijske karakteristike masiva (moduli elastičnosti, moduli deformacija za pojedina područja prostornog stanja napona). Na veličine tih modula, između ostalog, utiču raspored diskontinuiteta i ispuna pukotina. U podacima koje daje Hoek manje se vodi računa o petrografskim karakteristikama stene a više upravo o izlomljenosti masiva, broju sastava površina diskontinuiteta i njihovim svojstvima i aksijalnoj čvrstoći.

U tunelogradnji je za modeliranje kontinuuma potrebno simulirati odziv stenske mase na iskop, što se postiže uvođenjem jednakog kontinuuma¹. Najjednostavniji način za rešavanje tog problema sastoji se u redukovanju svojstava prirodne stenske mase na svojstva stenske mase pomoću empirijski definisanih odnosa poput onih koje se predložili Hoek i Brown² [1982.].

Pri opisivanju ponašanja stenske mase primenom Hoek – Brown – og kriterijuma loma, na samom početku postupka redukovanja moraju se definisati parametri prirodnog stenskog materijala, među kojima su σ_{ci} (jednoaksijalna čvrstoća na pritisak) i m_i (konstanta materijala koja zavisi od svojstava stenske mase). Definisanje ovih parametara se vrši na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjem jednoaksijalne i triaksijalne čvrstoće u laboratoriji. Nakon toga mogu se proceniti parametri stenske mase kao što su m_b i s_b (konstante stenske mase prema Hoek – Brown – ovom kriterijumu) ili c i ϕ (kohezija i ugao unutrašnjeg trenja stenske mase), i to uspostavljanjem poznatih korelacija (prema stepenu poremećenosti stene koji varira zavisno od vrste stene i metode iskopa) s najčešće korišćenim indeksima stene (Q ili RMR, ili GSI).

2.1. Generalizovani Hoek – Brownov kriterijum [2002.]³

Ovaj kriterijum uvodi faktor D koji zavisi od stepena poremećenosti stenske mase usled miniranja i naponskog relaksiranja. Umesto izračunavanja koeficijenata s i a za $GSI > 25$ i $GSI < 25$, koristi se ista jednačina za sve stenske mase. Uvedena su dva dijagrama za odabiranje GSI na osnovu opisa stenske mase (jedan opšti i jedan koji se odnosi na fliš). Pored navedenog, karakteriše ga i to da razlikuje pojmove jednoaksijalne čvrstoće stenske mase na pritisak i globalne čvrstoće stenske mase.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (1)$$

gde je m_b redukovana vrednost konstante m_i i data je izrazom:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (2)$$

dok su konstante za stensku masu s i a :

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right), \quad (3)$$

¹ Stenska masa se tretira kao kontinuum kod kojeg su ulazni podaci o čvrstoći i deformabilnosti, pomoću kojih se definiše vrsta sredine (elastična, plastična i sl.), jednaki u svim smerovima.

² Hoek, E.; Brown, E. T.: Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech Min.Sci.Vol. 34, pp.1156.-1186. 1997.god.

³ Hoek, Carranza – Torres and Corrkum, 2002. (Evert Hoek, Carlos Carranza –Torres, Brent Corrkum)

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right). \quad (4)$$

U gornjim jednačinama:

- GSI je geološki index čvrstoće (*Geological Strength Index*),
- D (*disturbance factor*) je stepen poremećenosti stenske mase koji varira zavisno od vrste stene i metode iskopa. Njegova vrednost se kreće od 0 za neporemećene stenske mase (in situ) do 1 za veoma poremećene stenske mase.

Fizički smisao napred navedenih konstanti se može dobiti ako se razmotre stanja jednoaksijalnog pritiska ili zatezanja. Tako npr. stanje $\sigma_3' = 0$, tj. jednoaksijalni pritisak daje:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a, \quad (5)$$

odakle sledi da bi za stenski masiv bez pukotina bilo $s=1$, dok je za realne uslove $0.05 \leq s \leq 1$, zavisno od stanja masiva.

Za stanje $\sigma_1' = \sigma_3' = \sigma_t$ se dobija:

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b}. \quad (6)$$

Slično se iz uslova $\sigma_1' = 0$ i $\sigma_3' = \sigma_t$ može dobiti konstanta m.

Modul deformacije stenske mase izražen preko stepena poremećenosti stenske mase, tj. preko faktora D:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad [\text{GPa}] \quad \text{za } \sigma_{ci} < 100 \text{MPa}, \quad (7)$$

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad [\text{GPa}] \quad \text{za } \sigma_{ci} > 100 \text{MPa}, \quad (8)$$

a ϕ' i c' su:

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}} \right], \quad (9)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n}'] (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{(6am_b (s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1})}{(1+a)(2+a)}}}, \quad (10)$$

gde je:

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma_{ci}} \quad (11)$$

Za tunele je:

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad (12)$$

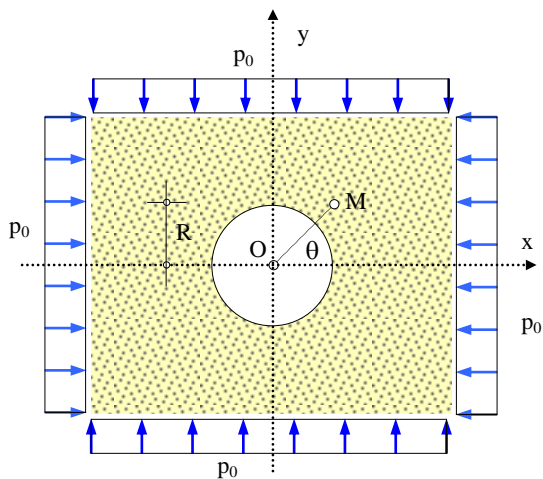
gde je:

H – dubina na kojoj se tunel nalazi (dubina ispod površine terena),
 γ – zapreminska težina stenske mase.

S obzirom da Hoek – Brownov kriterijum pretpostavlja izotropno ponašanje stene i stenske mase, on se može primenjivati samo u slučajevima kada postoji dovoljan broj gusto raspoređenih diskontinuiteta, sa sličnim površinskim karakteristikama, da se može pretpostaviti izotropno ponašanje uključujući lomove diskontinuiteta.

2.2. Stanje napona i deformacija oko tunelskog otvora kružnog poprečnog preseka u elastoplastičnoj sredini po Hoek – Brown – ovoj teoriji

Do formiranja plastifikovane zone doći će ako naponi u okolini tunela premaše čvrstoću stenske mase.



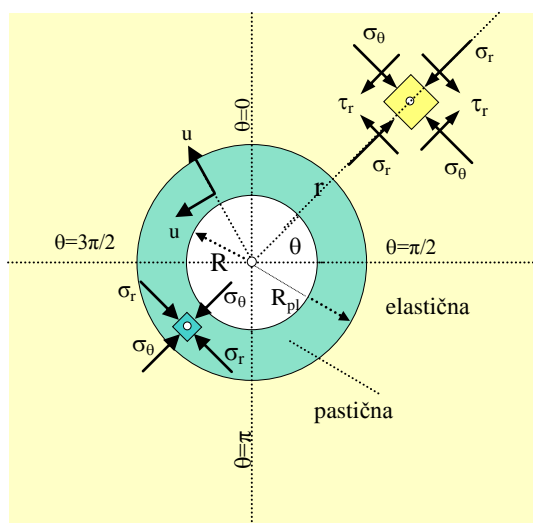
Slika 2 – Šema za analizu naponskog stanja i deformacija u zoni oko tunelskog otvora kružnog poprečnog preseka

Ako je čvrstoća stenske mase definisana Hoek – Brownovim kriterijumom čvrstoće, radijalni i tangencijalni naponi, za hidrostatičko primarno stanje napona (slika 2), su:

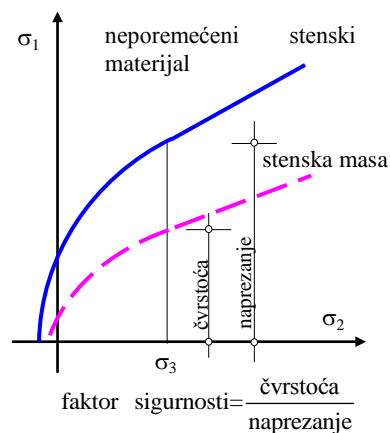
$$\sigma_r = p_0 - (p_0 - \sigma_{re}) \left(\frac{R_{pl}}{r} \right)^2, \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = p_0 + (p_0 - \sigma_{re}) \left(\frac{R_{pl}}{r} \right)^2. \quad (14)$$

gde je σ_{re} – radijalni napon na granici plastične i elastične zone ($R_{pl}=r$)



Slika 3 – Tangencijalni i radijalni naponi u elastičnom i plastičnom području u polarnim koordinatama



Slika 4 – Hoek –Brown–ov kriterijum sloma za prirodni (neporemećeni) stenski materijal i stensku masu. Ilustracija postupka redukovanja i definicija faktora sigurnosti

U plastifikovanoj zoni je:

$$\sigma_r = \frac{m_r \sigma_c}{4} \left[\ln \left(\frac{r}{R} \right) \right]^2 + \ln \left(\frac{r}{R} \right) (m_r \sigma_c p_i + s_r \sigma_c)^{\frac{1}{2}} + p_i, \quad (15)$$

gde je:

p_i – radijalni pritisak koji deluje na zidove iskopa,

R – poluprečnik iskopa,

σ_c – jednoaksijalna čvrstoća stene na pritisak,

m_r, s_r – Hoek – Brown – ove bezdimenzionalne konstante za stensku masu kojima se definiše kompaktnost stenskog masiva u plastičnoj zoni.

Vrednosti σ_{re} i r_e definisane su na sledeći način:

$$\sigma_{re} = p_0 - M \sigma_c, \quad (16)$$

$$r_c = Re^{-\left[N \cdot \frac{2}{m_r \sigma_r} (m_r \sigma_c p_0 + s_r \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (17)$$

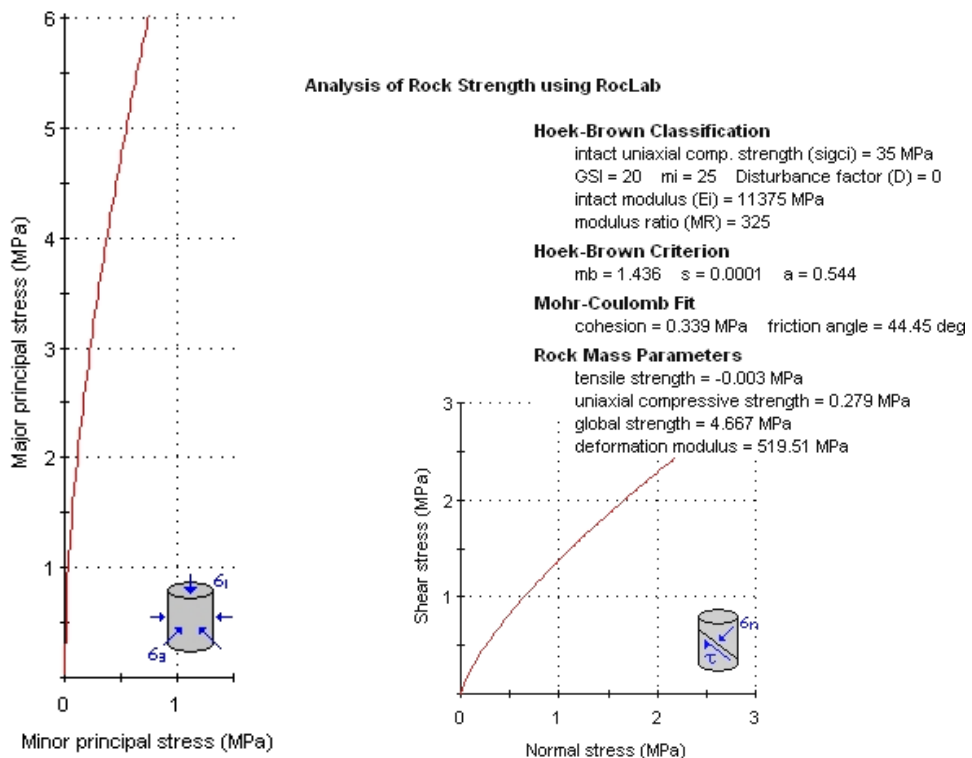
$$M = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m}{4} \right)^2 + \frac{m p_0}{s_c} + s \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{m}{8} \quad (18)$$

$$N = \frac{2}{m_r \sigma_r} (m_r \sigma_c p_0 + s_r \sigma_c^2 - m_r \sigma_c^2 M)^{\frac{1}{2}}, \quad (19)$$

gde su:

m , s – Hoek – Brown – ove bezdimenzionalne konstante za stensku masu kojima se definiše kompaktnost stenskog masiva u elastičnoj zoni.

3. ODREĐIVANJE ČVRSTOĆE I DEFORMABILNOSTI STENSKE MASE I PROCENA STABILNOSTI NEPODGRADENOG TUNELSKOG ISKOPA



Slika 5 – Hoek – Brown – ov kriterijum čvrstoće stenske mase

Kao primer navodi se proračun napona i deformacije putnog tunela sa dve saobraćajne trake i to s pretpostavkom otvaranja u punom profilu.

Proračun je izvršen primenom programa *RocLab*¹, gde je čvrstoća stenske mase definisana Hoek – Brown – ovim kriterijumom čvrstoće a deformabilnost po *Evert Hoek, Carlos Carranza – Torres, Brent Corkum 2002.*

U prilogu ovog programa nalaze se tablice na osnovu kojih je procenjena vrednost geološkog indeksa čvrstoće (GSI).

Za datu stenu i njeno stanje dobijen je *Hoek – Brown – ov* kriterijum čvrstoće prikazan na slici 5. Proračunom su dobijeni sledeći parametri čvrstoće date stenske mase:

Tabela 1 – Približan odnos deformacije i geotehničkih uslova stabilizacije

	Def. ε [%]	Geotehnički uslovi	Vrsta podgrade
A	<1	<i>Očekuju se mali problemi stabilnosti, pa se mogu koristiti pojednostavljene metode projektovanja. Klasifikacije stenskih masa predstavljaju dobru osnovu za projektovanje.</i>	<i>Jednostavni uslovi u tunelu-obično se koriste sidra i prskani beton</i>
B	1÷2,5	<i>Koristi se metoda karakterističnih krivulja za prognozu formiranja plastifikovane zone oko tunelskog iskopa i interakcije između progresivnog razvoja ove zone i različitih tipova podgrade.</i>	<i>Manji problemi gnječenja koji se rešavaju sidrima i prskanim betonom, a ponekad laganim čeličnim profilima ili rešetkastim čeličnim profilima koji se dodaju radi postizanja dodatne sigurnosti</i>
C	2,5÷5	<i>Dvodimenzionalna analiza konačnim elementima u koju su uključeni i elementi podgrade i iskop po fazama. Stabilnost čela uopšteno nije glavni problem.</i>	<i>Ne mnogo izraženi problemi gnječenja zahtevaju brzu ugradnju podgrade i pažljivu kontrolu kvaliteta. Potrebna je ugradnja teških čeličnih profila u prskani beton.</i>
D	5÷10	<i>Stabilnost čela je dominantno glavni problem projektovanja, pa treba predvideti i mere osiguranja i na čelu iskopa. Dvodimenzionalna analiza nije dovoljna.</i>	<i>Izraženi problemi gnječenja i stabilnosti čela iskopa. Obično je potreban pipe roof i sidrenje čela sa čeličnim lukovima ugrađenim u prskani beton.</i>
F	>10	<i>Nestabilnost čela i gnječenje u okolini tunela čine ovaj slučaj trodimenzionalnim. Danas ne postoji efikasna metoda projektovanja za ove uslove. Većina rešenja se temelji na iskustvu.</i>	<i>Ekstremni problemi gnječenja. Pipe roof i sidrenje čela i popustljiva podgrada u ekstremnim slučajevima.</i>

$m_b=1.436$, $s=0.0001$ i $a=0.544$, dok je dobijeni modul elastičnosti stenske mase $E=519.51\text{MPa}$. Ovi podaci, odnosno dobijeni Hoek – Brown – ov kriterijum, će se koristiti pri proračunu zona u kojima dolazi do pojave plstičnog loma.

Gruba procena stabilnosti nepodgrađenog tunelskog iskopa izvršena je primenom programa *Rocsupport*. Ovaj program se koristi za hidrostatičko stanje napona i tunel kružnog porečnog preseka. Ulazni podaci potrebni za ovu analizu su: prečnik tunela, primarni naponi, ponašanje stenske mase, kriterijum čvrstoće i modul elastičnosti

¹ Nalazi se na web stranici www.rocscience.com a baziran je na poslednjoj verziji Generalisanog Hoek – Brown – ovog kriterijuma čvrstoće (Evert Hoek, Carlos Carranza – Torres, Brent Corkum 2002.)

(dobijeni kao rezultat primene RocLab – a). Kao rezultat proračuna dobijaju se poluprečnik plastifikovane zone i konvergencija tunela. Upoređivanjem dobijenih rezultata (konvergencije) i podataka iz *Tabele 1*, u kojoj se prikazuju približni odnosi deformacije i geotehničkih uslova stabilizacije tunela, donosi se odluka o tome da li je potrebno sprovesti detaljniju analizu. Rezultati ovakve analize primera datog u ovom radu pokazuju da je potrebno izvršiti detaljniju dvodimenzionalnu analizu primenom konačnih elemenata.

4. NUMERIČKO MODELIRANJE TUNELA KRUŽNOG POPREČNOG PRESEKA U STENSKOJ MASI – Analiza pojave i razvoja plastičnog loma u stenskoj masi u zoni oko tunelskog iskopa

Pojava i način razvoja zone plastifikacije oko tunelskog otvora analizira se primenom Metode konačnih elemenata. U tu svrhu je korišćen softverski paket *Phase²*. *Phase²* je dvodimenzionalni program koji se zasniva na Metodi konačnih elemenata i Hoek – Brown – ovom kriterijumu loma materijala, koji najviše odgovara ponašanje stenske mase pri iskopu tunelskog otvora. Ovaj program se koristi za proračun napona i deformacija oko podzemnih otvora i može se koristiti za rešavanje velikog broja građevinskih i rudarskih problema.

Program se sastoji od tri modula:

- Model,
- Compute,
- Interpret.

Kao što je napred navedeno, analiza se vrši za putni tunel sa dve saobraćajne trake, kružnog poprečnog preseka, pri čemu je iskop sa vertikalnim radnim čelom, tj. pretpostavlja se da se iskop sprovodi u punom profilu.

Analiza se vrši uz pretpostavku elastičnog, odnosno plastičnog ponašanja stenske mase, pa se s obzirom na to primarni naponi računaju po teoriji elastičnosti za prvu grupu, odnosno po teoriji plastičnosti za drugu grupu analiza.

4.1. Ulazni parametri za analizu

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

Dimenzije poprečnog preseka:

- Putni tunel sa dve kolovozne trake kružnog poprečnog preseka prečnika $D=9,5\text{m}$.

Vrsta stene:

- Dijabaz rožna formacija – pretežno rožnaci

Proračunski model

Granice modela: Iz posmatranog beskonačnog područja izdvaja se konačni deo tako da se konačne granice s odgovarajućim graničnim uslovima postave dovoljno daleko od područja koje je predmet analize, a da se pri tome dobije zadovoljavajuće rešenje. Granice se najčešće postavljaju proizvoljno, na osnovu iskustva. Veličina posmatranog područja u ovom primeru je usvojena kao četvorostruka vrednost prečnika otvora, tj. usvojene su spoljašnje granice proračunskog preseka tipa BOX sa faktorom ekspanzije 4. Generisanje mreže: Program sam generiše mrežu nakon zadavanja sledećih parametara:

- tip,
- tip elementa,
- faktor gradijenta,
- broj čvorova na konturi iskopa.

S obzirom da na tačnost rezultata dobijenih primenom MKE osim veličine proračunske oblasti značajan uticaj ima i njena diskretizacija (što je sprovedena diskretizacija finija, tj. što je usvojen veći broj elemenata, to se postižu tačniji rezultati). Diskretizacija proračunskog bloka je izvršena uz zahtev da se podela radi sa deset segmenata po spoljnim konturama modela i 48 čvorova na konturi iskopa. To znači da je dobijena mreža elemenata koja ima najveću gustinu u užoj zoni oko otvora, jer se u njoj očekuju najveće promene napona i deformacija (sa povećavanjem rastojanja od otvora naglo se smanjuju odstupanja sekundarnih od primarnih napona). Dakle, zbog sve manjih gradjenata napona i deformacija prema spoljašnjoj konturi usvojen je konstantan korak povećavanja dimenzija elemenata.

Granični uslovi: Na bočnim konturama, na donjoj i gornjoj granici proračunskog preseka sprečeno je horizontalno i vertikalno pomeranje.

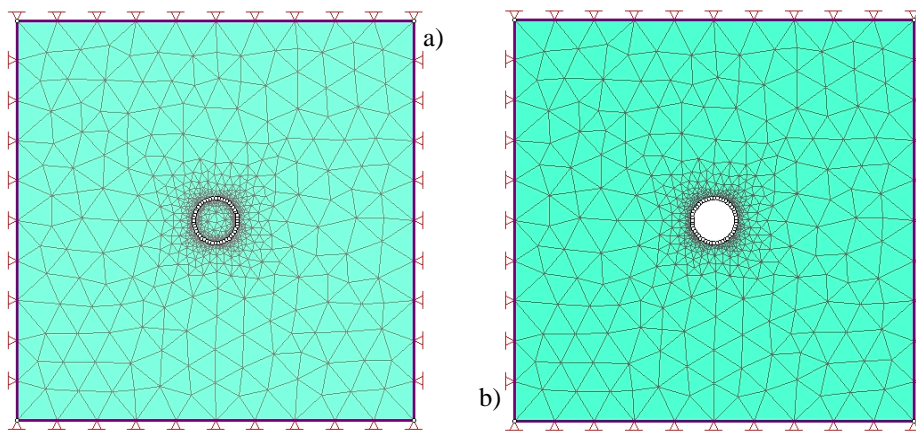
Svi elementi u početnoj fazi analize, tzv. „in – situ” (primarno) stanju napona, imaju mehaničke karakteristike stenske mase. To znači da se „in – situ” stanje simulira tako što se svim konačnim elementima, koji formiraju proračunski presek, dodeljuju zapremnska težina i mehaničke karakteristike stenske mase.

Pretpostavljeno je gravitaciono polje napona. Kao opterećenje uzeta je težina nadsloja (pretpostavljena visina nadsloja je 100m), tj. usvojen je pritisak stenskog masiva koji odgovara primarnim naponima:

$$\sigma_v = \gamma \cdot H$$

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v$$

Nakon zadavanja svih parametara, simuliran je iskop unutar granica proračunskog preseka. Iskop se simulira dodeljivanjem elementima unutar konture iskopa mehaničkih karakteristika vazduha, tj. zapremnske težine ($\gamma_v \sim 0$) i krutosti približno jednake nuli.



Slika 6 – Usvojeni proračunski 2D model mreže konačnih elemenata za a) početnu „in – situ” i b) sekundarnu fazu.

Vrste analiza: Najpre se vrši „elastična“ analiza, jer u slučaju da se u elastičnoj analizi dobiju manji naponi od granične nosivosti stenskog materijala (proračunate u skladu sa izabranim modelom) ($SF^1 > 1$), iskop će biti stabilan bez ikakve podgrade.

Međutim, u slučaju da dobijeni naponi budu veći od granične otpornosti materijala ($SF < 1$), najpouzdanije je vršiti novu analizu u kojoj bi se stenski materijal tretirao kao plastični, čime bi se, kako je napred navedeno, dozvolile veće deformacije, a time i relaksacija napona. Dakle, na osnovu vrednosti SF faktora, dobijenih u ovoj analizi, može se zaključiti da li je neophodno tunelski iskop osigurati podgradom ili ne.

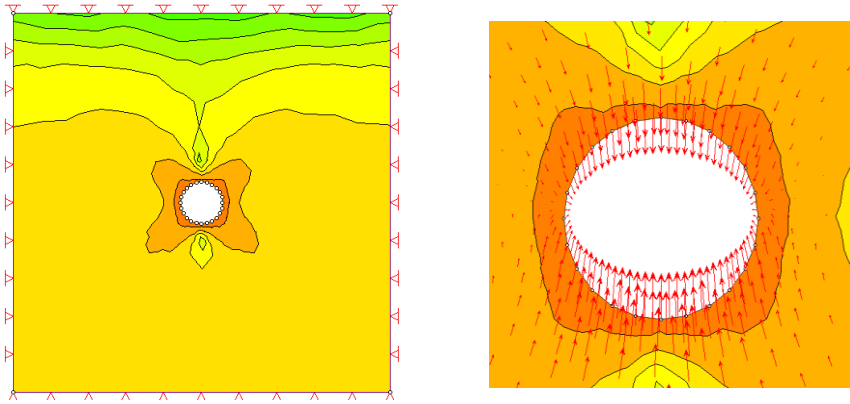
4.2. Dobijeni rezultati i njihova naliza

Kao rezultat analize *sekundarnog naponskog stanja*, tzv. „inicijalnog stanja”, u kome se simulira iskop u punom profilu, dobijaju su naponi i deformacije inicijalnog stanja, odnosno dobijaju se:

- faktor čvrstoće SF (*Strength Factor*),
- izolinije,
- vektori pomeranja.

Iz analize tunelskog iskopa sa pretpostavkom elastičnog ponašanja stenske mase, dobijen je, u pojedinim zonama oko iskopa, koeficijent sigurnosti (*Strength Factor*) manji od jedinice ($SF=0.52$), što ukazuje na to da iskop bez podgrade nije stabilan i da treba da se ugradi primarna podgrada. Maksimalno totalno pomeranje konture iskopa je u kaloti tunelskog otvora i iznosi $u_{max}=0.018m$. Uočava se velika zona loma stenske mase, što ukazuje na potrebu sprovođenja „plastične“ analize.

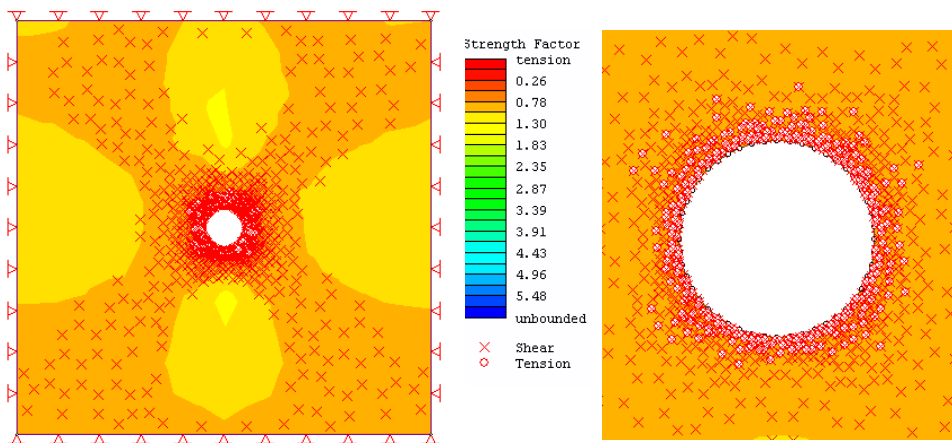
¹ Faktor čvrstoće (*Strength Factor*) – koeficijent sigurnosti predstavlja odnos raspoložive čvrstoće stenske mase i naprezanja u nekoj tački.



Slika 7 – Strength factor i izolinije nepodgrađenog tunela – elastična analiza

Tabela 2 – Strength Factor u čvorovima konture iskopa – elastična i plastična analiza

čvor	Strength Factor	
	Vrsta analize	
	elastična	plastična
1	0.52	1.04
2	0.52	1.04
3	0.52	1.04
4	0.78	1.04
5	0.78	1.04
6	0.78	1.04
7	0.78	1.04
8	0.78	1.04
9	0.78	1.04
10	0.52	1.04
11	0.52	1.04
12	0.52	1.04
13	0.52	1.04
14	0.52	1.04
15	0.52	1.04
16	0.52	1.04
17	0.78	1.04
18	0.78	1.04
19	0.78	1.04
20	0.78	1.04
21	0.78	1.04
22	0.52	1.04
23	0.52	1.04
24	0.52	1.04



Slika 8 – Plastična analiza, Strength factor i slomljeni elementi

Tabela 3 – Rezultati elastične i plastične analize – pomeranja i broj slomljenih elemenata

Analiza	Ponašanje stenske mase	Maksimalno pomeranje [m]	Broj slomljenih konačnih elemenata (Yielded finite elements)	Broj slomljenih elemenata prskanog betona (Yielded liner elements)
Nepodgrađeni tunelski iskop	Elastično	0.007215	-	-
Nepodgrađeni tunelski iskop	Plastično	0.0555491	1009	-

Kod plastične analize se primećuje da nema zona sa faktorom čvrstoće (SF) manjim od jedan. To je sasvim logično s obzirom na činjenicu da se stenska masa ponaša plastično, jer u tom slučaju faktor čvrstoće ne može ni biti manji od jedinice. To znači da će faktor čvrstoće biti jednak jedinici kada se slom desi.

Ovaj faktor može biti manji od jedinice samo u elastičnim analizama kao hipotetička mera preopterećenja stenske mase.

Na slikama (slika 8) su zone plastifikacije (zone slomljenih konačnih elemenata) obeležene kružićima ako je slom posledica napona zatezanja i krstićem kada je slom posledica smičućih napona.

Sa dijagrama se uočava da je plastifikovana zona je približno identična zoni u kojoj je faktor čvrstoće manji od jedinice kod elastičnih analiza.

Uočava se velika plastifikovana zona u okolini tunela, što ukazuje na potrebu njegovog podgrađivanja, jer bi se u suprotnom urušio.

5. ZAKLJUČCI

Veličina pluprečnika plastifikovane zone u okolini tunelskog iskopa dobijena primenom programa *Rocsupport* približna je veličini dobijenoj primenom programa *Phase*².

S obzirom da su rezultati izvršenih proračuna funkcija ulaznih podataka, proizilazi da tačnost proračuna suštinski zavisi od reprezentativnosti tih parametara, odnosno od kvaliteta istraživanja „*in situ*“.

U slučajevima kada se stenska masa ponaša plastično, faktor čvrstoće ne može biti manji od jedinice, jer kada se slom desi faktor čvrstoće je jednak jedinici. Ovaj faktor može biti manji od jedinice samo u elastičnim analizama kao hipotetička mera preopterećenja stenske mase.

Plastifikovana zona dobijena u plastičnoj analizi je približno identična zoni u kojoj je faktor čvrstoće manji od jedinice kod elastičnih analiza.

Plastifikovanje stenske mase u okolini tunelskog iskopa ne znači da će doći do urušavanja tunela. Naime, slomljeni materijal može još uvek imati značajnu čvrstoću što će ograničiti debljinu plastifikovane zone u odnosu na poluprečnik tunela (u nekim slučajevima plastifikacija se može manifestovati samo kao nekoliko prslina ili kao ljuštenje konture tunelskog iskopa manjeg obima).

Ukoliko se u okolini tunelskog iskopa formira velika plastifikovana zona (kakava se uočava u analiziranom primeru) i ako pomeranja na konturi iskopa tunela poprime značajne vrednosti, može doći do urušavanja nepodgrađenog tunelskog iskopa. U tim slučajevima neophodno je prduzeti odgovarajuće mere za stabilizaciju i osiguravanje iskopa.

LITERATURA

- [1] Ljiljana Tadić (2009): Naponsko – deformacijska analiza montažnih obloga saobraćajnih tunela, Magistarski rad, Građevinski fakultet u Subotici, Subotica.
- [2] Curran, J. H., B. T.(1997): *Phase*². 2D finite element program for calculating stresses and estimating support around underground excavations. Reference Manual and Tutorial Manual. Rock Engineering Group. University of Toronto.
- [3] Vrkljan, I. (2003): *Mehanika stijena*. Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka.
- [4] Evert Hoek, Carlos Carranza – Torres, Brent Corkum, (2002): *Hoek – Brown failure criterion – 2002 Edition*, Toronto.
- [5] Priručnik o građenju saobraćajnih tunela (1969), Železnička stručna biblioteka, knjiga VI, «Справочник строителя транспортных тоннелей» Beograd.
- [6] Lambe T.W., Whitman R.V., *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 553, 1969.
- [7] Безпальый, В. И.; Бялер, И. Я.; Карсницкий Н. Г., Сапрыкин, Л. Д.: *Сборный железобетон в подземном строительстве (1961): Литературы пв строительству и архитектуре УССР, Киев.*

ANALYSIS OF THE OCCURRENCE OF PLASTIC FAILURE IN THE ROCK MASS AROUND THE TUNNEL EXCAVATION

Summary: *Excavation of the rock mass causes a change of stress, or concentration of stress around the contours of the excavation. This paper presents a procedure for calculate occurrence of plastic failure in the rock mass around the tunnel excavation. The calculation is done using the program Phase² based on finite element method in which the integrated Hoek – Brown's failure criterion. Using the program RocLab calculated deformability and strength of rock mass, while the rough estimate of deformations (diameter plastic zone and convergence contour tunnel excavation) was made using the program Rocsupport. The procedure of calculation is shown in the example of the traffic tunnel, circular cross – section, with two lanes.*

This way of modeling is important because it provides insight into the behavior of rock mass at all stages of excavation. In other words, the results of this analysis indicate the stability of the areas where we can expect plastic fracture of rock material.

Key words: *Tunnel excavation, rock mass, finite element method, failure criterion.*