

3D ANALIZA INTERAKCIJE TUNELSKJE OBLOGE I STENSKE MASE – I. NUMERIČKO MODELIRANJE

3D ANALYSIS OF TUNNEL LINING – ROCK MASS INTERACTION – I. NUMERICAL MODELLING



UDK: 624.19.001.2
Stručni rad

Asistent mr Snežana MARAŠ-DRAGOJEVIĆ, dipl. inž. građ.

REZIME

Kod razmatranja problema interakcije tunelske obloge i stenske mase od suštinskog značaja je razmatranje delimične relaksacije stenske mase, odnosno pomeranja konture iskopa koja su se desila na čelu tunela pre postavljanja obloge. U tom smislu izuzetno je značajno definisanje adekvatnog numeričkog modela. 3D numeričko modeliranje neophodno je za razmatranje efekata na radnom čelu tunela kao i efekata sekvencijalne izgradnje tunela. Metodom konačnih elemenata razvija se model sa kojim se može sprovesti naponsko-deformacijska analiza po fazama građenja sa uzimanjem u obzir odgovarajućih svojstava stenske mase. U ovom prvom radu se razmatraju neki problemi modeliranja stenske mase i tunela metodom konačnih elemenata. Prikazano je 3D numeričko modeliranje izgradnje tunela pri čemu je analiziran tretman faza građenja i izložen iterativni postupak za simulaciju napredovanja čela tunela.

Ključne reči: tunel, stena, metod konačnih elemenata, 3D numeričko modeliranje, napredovanje čela tunela.

SUMMARY

In the analysis of tunnel lining – rock mass interaction, it is essential to consider partial stress release at the tunnel face, i.e. deformation of the tunnel walling that occurs before the application of the lining. Accordingly, it is important to develop an adequate numerical model considering tunnelling face effects as well as construction sequence effects. Consequently, a 3D numerical modelling is necessary. Through the use of finite element method (FEM), a numerical model is developed enabling analysis of stress-strain states considering specific rock mass properties and consequent stages of a tunnel construction. In this first paper, some elements of FEM modeling of rock mass and tunnelling were introduced. 3D numerical modelling of tunnel driving process is described: treatment of construction stages, and iterative procedure for simulating the tunnelling face advancement.

Key words: tunnelling, rock, finite element, 3D numerical modelling, advancing tunneling face.

1. UVOD

Tunelska obloga i stenska masa predstavljaju složen interaktivni sistem. Čak i u slučajevima kada je podzemni otvor sa relativno ograničenim nadslojem, stenska masa obično predstavlja stvarnu noseću konstrukciju koja je potpomognuta oblogom. U stenskoj masi koja nije poremećena podzemnim radovima vlada primarno ili *in situ* stanje napona koje je uglavnom rezultat gravitacije, tektonike i erozije Zemljine kore. Iskop tunela dovodi do preraspodele napona i formiranja sekundarnog stanja napona u stenskoj masi oko tunelskog otvora. Danas je opšte prihvaćeno da proces izgradnje tunela indukuje tipično 3D polje napona i deformacija. Opterećenje se oko tunelskog otvora prenosi delom preko stenske mase ispred radnog čela tunela, delom preko stenske mase sa strana tunelskog otvora, kao i preko obloge koja je već formirana (takođe obloga prenosi opterećenje u poprečnom i podužnom pravcu). Na radnom čelu tunela dolazi do delimične relaksacije stenske mase odnosno do pomeranja konture iskopa pre formiranja obloge. Obzirom

da se obloga postavlja na već deformisanu površinu iskopa treba biti izložena samo naponsko-deformacijskim promenama koje su se desile nakon njenog formiranja. 2D modelima ovo se ne može obuhvatiti pa je za adekvatnu analizu naponsko-deformacijskih stanja u oblozi i stenskoj masi neophodna 3D analiza uz simulaciju napredovanja izgradnje tunela i naponsko-deformacijskih promena na radnom čelu tunela. Uprkos tome još uvek se u inženjerskoj praksi (čak i u velikoj većini publikovanih radova) analize tunelskih konstrukcija sprovode uz pretpostavku 2D ravnog stanja deformacija. Razlog za to je činjenica da su 3D analize još uvek suviše skupe i iziskuju značajan proračunski napor i vreme rada računara sa tehnikom i programima koji danas stoje na raspolaganju.

Pre pojave računara, konstrukcije u steni su projektovane uglavnom na osnovu iskustva i mehanika stena je smatrana u osnovi empirijskom disciplinom. Analitička rešenja koja postoje za neke jednostavnije probleme odnosno kada se velikim brojem pretpostavki pojednostavi realna situacija ne mogu dati realna rešenja za kompleksne probleme o kojima je reč. Zbog toga su numeričke metode proračuna postale veoma popularne za rešavanje problema u mehanici

Adresa autora: Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 11000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

stena. Razvoj kompjuterske tehnologije i *user friendly* računarskih programa doprineo je širokoj primeni numeričkih metoda pri projektovanju tunela u inženjerskoj praksi.

Od numeričkih metoda koje se koriste (metod konačnih elemenata, metod konačnih razlika, metod graničnih elemenata, metod diskretnih elemenata) bez sumnje je najpopularniji metod konačnih elemenata. Negro and Queiroz (2000) su pokazali da se od radova koje su prikupili u skorijoj literaturi oko 96% odnosi na analize tunela metodom konačnih elemenata, pri čemu su 92% analize sprovedene uz pretpostavku ravnog stanja deformacija, dakle 2D analize. Ovo je donekle zabrinjavajuće s obzirom da je, kao što je već naglašeno, za tačno određivanje naponsko-deformacijskih stanja u tunelskoj konstrukciji i stenskoj masi neophodno 3D modeliranje. Ipak, broj 3D analiza publikovanih u literaturi se rapidno povećava pri čemu se autori bave različitim aspektima 3D numeričkih simulacija (npr. Swoboda and Abu-Krishna, 1999; Eberhardt, 2001; Galli et al., 2004; Farias et al., 2004). Može se očekivati da će sa razvojem računarske tehnike i naročito programskih paketa koji će biti na raspolaganju inženjerima, 3D analize iz akademske preći u inženjersku praksu. Treba naglasiti da se više autora bavilo i problemom inkorporiranja najvažnijih efekata 3D modela (kao što je delimična relaksacija napona na čelu tunela) u 2D modele čime bi se inženjerima u praksi obezbedio jednostavniji pristup pri projektovanju tunela (Kielbassa and Duddeck, 1991).

U ovom prvom radu je prikazano numeričko modeliranje tunela primenom metode konačnih elemenata i prikazan postupak 3D numeričke simulacije napredovanja izgradnje tunela.

2. MODELIRANJE STENSKE MASE

Kod analize interakcije obloge i stenske mase neophodno je uzeti u obzir noseću ulogu stenske mase i shodno tome njeno naponsko-deformacijsko ponašanje. U praksi je uobičajeno da se stenska masa idealizuje i posmatra uz pomoć modela. Definisane naponsko-deformacijskog modela tla je izuzetno složen zadatak i u praksi je uobičajeno da se sprovodi uz uvodnje brojnih aproksimacija i pojednostavljenja. Pri tome stepen pojednostavljenja često zavisi od prefinjenosti analize i složenosti problema koji se rešava. Teškoće u proračunskom modeliranju odnose se i na težak zadatak obezbeđivanja pouzdanih ulaznih podataka. Podaci potrebni za formiranje modela određuju se *in situ* merenjima i laboratorijskim ispitivanjima, pa kvalitet ulaznih podataka mora da odgovara prefinjenosti analize. Rezultati analiza provedenih primenom metode konačnih elemenata su pouzdani samo ukoliko su vrednosti bitnih parametara realno određene.

U modelu naponsko-deformacijskog ponašanja stene pretpostavlja se da samo elastične deformacije koje su proporcionalne opterećenju i nisu funkcija vremena nastaju kada naponsko stanje ostaje u okviru

ma raspoložive čvrstoće stenske mase. Većina intaktnih stena se ponaša elastično u domenu napona koji se javljaju u inženjerskim konstrukcijama, a do prekoračenja čvrstoće obično dolazi tek pod relativno velikim opterećenjem. Dva parametra, Young-ov modul elastičnosti E i Poisson-ov koeficijent ν su dovoljni za opisivanje linearno elastičnog naponsko-deformacijskog ponašanja homogenog i izotropnog tela. U slučaju nekih metamorfni i sedimentni stena, uz pojavu škrljavosti vezano je transverzalno izotropno ponašanje stenske mase u domenu elastičnosti koje se simulira usvajanjem pet međusobno nezavisnih konstanti elastičnosti i to Young-ovih modula E_1 i E_2 za pravce paralelno i upravno na ravan izotropije (škrljavosti) respektivno, modula smicanja G_2 za smičuće opterećenje u ravni izotropije i dva Poisson-ova koeficijenta ν_1 i ν_2 , međutim, postoje mnogi problemi određivanja pouzdanih vrednosti navedenih konstanti.

Za modeliranje konstitutivnog ponašanja stena, osim teorije elastičnosti, koristi se i teorija elasto-plastičnosti i elasto-viskoplastičnosti. U praksi se mogu desiti sve prelazne faze od čisto elastičnog do plastičnog ponašanja stenske mase. Elastična analiza pruža informacije o područjima i stepenu preopterećenja stene, međutim da bi se ispitao mehanizam loma neophodna je primena nelinearnih metoda proračuna u kojima se uzima u obzir čvrstoća stenske mase. Ponašanje stenskog materijala, s obzirom na njegove mehaničke karakteristike, često najviše odgovara elasto-viskoplastičnom ponašanju. Kada je čvrstoća stenske mase prekoračena u okolini podzemnog otvora, kao rezultat naponskih promena koje nastaju nakon iskopa, dolazi do plastičnih deformacija stenske mase. Lom odnosno plastifikacija jako napregnute stenske mase oko podzemnog otvora je vremenski zavistan proces. Iskustvo je pokazalo da mogu nastati velike, viskoplastične deformacije zidova. Plastično tečenje stene je od naročitog interesa pri projektovanju podzemnih prostorija na velikoj dubini. Da bi se proračunali naponi i deformacije u steni, parametri stenske mase moraju biti određeni i korišćeni kao funkcija napona. Za rešavanje nelinearnih problema koriste se inkrementalne, iterativne i inkrementalno-iterativne metode.

Pod pojmom stenska masa podrazumeva se sistem sastavljen od intaktnog stenskog materijala i diskontinuiteta. Svojstva stenske mase kao sistema definisana su svojstvima pojedinih elemenata kao i geometrijom sistema. Da bi se postigao realističan opis naponsko-deformacijskog ponašanja stene sa spojnicama, veća deformabilnost i manja čvrstoća diskontinuiteta se mora uzeti u obzir zajedno sa deformabilnošću i čvrstoćom same intaktne stene. U proračunskom modelu uticaj diskontinuiteta se može uključiti u analizu na dva načina. Individualni diskontinuiteti od posebnog značaja koji se nalaze na većem međusobnom rastojanju mogu se simulirati, zajedno sa njihovom deformabilnošću i čvrstoćom, individual-

no "diskretno" u konceptualnom modelu. Ovo je moguće sprovesti u Metodi konačnih elemenata na taj način što se usvajaju individualni elementi da simuliraju intaktnu stenu i diskontinuitete. Odgovarajućim postupcima merenja mora se obezbediti kartiranje diskontinuiteta i određivanje njihovih karakteristika. Međutim, kada postoji veći broj diskontinuiteta na malom međusobnom rastojanju nije racionalno njihovo detaljno kartiranje, već se njihov uticaj uvodi u analizu kroz definisanje modifikovanih svojstava ekvivalentne kontinualne stenske mase, kao naprimer modula elastičnosti i klizanja, čvrstoće i dr. Prisustvo diskontinuiteta u stenskoj masi utiče da u osnovi, stenska masa postaje slabija, deformabilnija, izrazito anizotropna zbog smanjene smičuće čvrstoće i veće propustljivosti paralelno diskontinuitetima i povećane stišljivosti kao i smanjene zatezne čvrstoće (u suštini nula) upravno na njih.

Pretpostavka elastičnog ponašanja sa lokalizovanim plastičnim deformacijama na diskontinuitetima često predstavlja adekvatnu aproksimaciju za slučajevne opterećenja koji se javljaju u praksi. Kao početni korak za viskoplastičnu analizu, korisno je u preliminarnoj elastičnoj analizi u kojoj se pretpostavlja da je stenska masa elastična i izotropna, odrediti smičuće i normalne napone duž diskontinuiteta na kojima se očekuju plastične deformacije. Na taj način moguće je odrediti područja u kojima će doći do smičućih lomova za datu čvrstoću.

3. MODELIRANJE TUNELA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Da bi se razjasnilo integralno ponašanje složenog sistema: obloga – stenska masa izuzetno je značajno definisanje adekvatnog numeričkog modela. Metodom konačnih elemenata razvija se model sa kojim se može sprovesti naponsko–deformacijska analiza po fazama građenja sa uzimanjem u obzir odgovarajućih svojstava stenske mase. Poznavanje promena naponskog stanja, deformacija i opterećenja u funkciji tehnološkog procesa građenja omogućava pravilno i ekonomično projektovanje tunelske konstrukcije.

Kada se razmatraju problemi interakcije stenske mase i obloge treba naglasiti da na oblogu kada se formira nemaju nikakav uticaj naponsko deformacijske promene kojima je do tada bila izložena okolna stenska masa. Bilo kakvo opterećenje koje će eventualno delovati na oblogu može samo biti rezultat jednog ili više sledećih uzroka: napredovanja iskopa na radnom čelu tunela, vremenski zavisnog ponašanja stenske mase oko obloge, vremenski zavisne reakcije na promene u režimu podzemnih voda ako tunel deluje kao drenaža i naknadnog opterećivanja, kao što je dodatni nadsloj, izgradnja susednih tunela, korišćenje tunela itd. Opterećenje koje će obloga primiti je pod uticajem interakcije obloge i stenske mase. Jednom kada je obloga formirana ona ne može biti tretirana kao nezavisna konstrukcija.

Primena metode konačnih elemenata omogućava formiranje modela stenske sredine koji može da obuhvati njene značajne osobine kao što su heterogenost, anizotropija, diskontinualnost, primarno naponsko stanje kao i realne veze između napona i deformacija. Na modelu se obavlja odgovarajuća naponsko–deformacijska analiza, sagledava ponašanje realne sredine odnosno analizira njeno sadejstvo sa veštačkom konstrukcijom. Podaci potrebni za formiranje modela određuju se odgovarajućim terenskim i laboratorijskim istraživanjima. Ipak, vrlo često raspoloživi podaci o fizičko–mehaničkim svojstvima sredine su oskudni, odnosno nedovoljno precizni. U takvim situacijama mogu se sprovesti parametarske studije. Parametarska studija može biti od neprocenljivog značaja u ispitivanju senzitivnosti i postavljanju granica za projektnu pretpostavku. MKE je veoma pogodna za analize stabilnosti i nosivosti stenske mase i tunelske konstrukcije uz sprovođenje parametarskih studija njihovog ponašanja jer omogućava obuhvatanje i variranje velikog broja parametara relevantnih za analizu.

Primena MKE na probleme izgradnje u steni, uglavnom kroz sprovođenje parametarskih studija obezbeđuje sagledavanje i značajan uvid u razmatrani problem.

U projektovanju podzemnih konstrukcija koje imaju veliku dužinu u odnosu na dimenzije poprečnog preseka, za slučaj izotropne stenske mase analize stabilnosti se često sprovode uz pretpostavku ravnog stanja deformacije, dakle kao 2D problem. Međutim, 3D analize su neophodne za razmatranje efekata na čelu tunela, efekata sekvenci izgradnje, ukrštanja tunela i slučajevne kada jedan od glavnih napona ne leži duž ose tunela. Razvoj metode konačnih elemenata omogućio je efikasnu trodimenzionalnu analizu, međutim u praktičnoj primeni MKE u oblasti trodimenzionalne analize javljaju se dodatne teškoće koje se pre svega odnose na znatno povećanje obima računskog posla a time vremena i koštanja proračuna.

Analiza primenom MKE počinje izborom veličine i oblika proračunske oblasti, kao i određivanjem stanja napona i deformacija koji se moraju uzeti u obzir na granicama oblasti. Pri određivanju veličine i oblika oblasti, mora se obezbediti da se na njenim granicama ne javljaju promene napona i deformacije koje su rezultat izgradnje tunela. S druge strane sile i deformacije koji se zadaju na granicama oblasti moraju biti izabrani tako da *in situ*, odnosno primarno stanje napona u neporemećenoj stenskoj masi bude korektno simulirano.

Kada se tunel gradi na maloj dubini uticaj topografije na primarno stanje napona se može ispitati u prvom koraku analize na odgovarajućoj (većoj) proračunskoj oblasti.

Međutim, vrlo često topografija nema uticaja na primarne napone (kod dublje položenih tunela i kad je površina terena horizontalna) i nije potrebno sprovođenje posebnu analizu *in situ* stanja napona, već se na

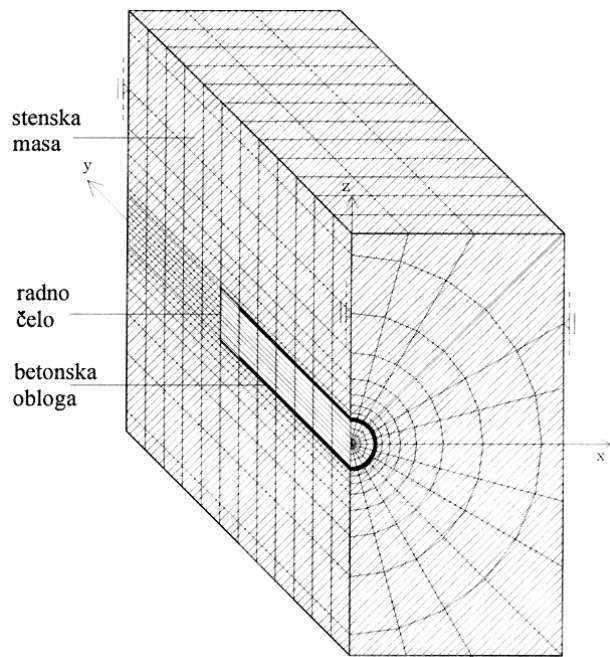
gornjoj granici usvojene proračunske oblasti zadaje opterećenje koje odgovara težini nadsloja stenske mase. Granični uslovi na ostalim granicama zahtevaju posebno razmatranje.

U slučajevima kada se stenska masa ponaša izotropno i u domenu elastičnosti, može se usvojiti da su čvorovi mreže elemenata na bočnim i donjoj granici proračunske oblasti nepokretni u pravcu upravnom na odgovarajuću granicu. U slučaju anizotropne stenske mase za čvorne tačke na vertikalnim graničnim površinama proračunskog preseka ne može se po pravilu usvojiti da su fiksirane, već se posebnom analizom određuju deformacije koje nastaju pod sopstvenom težinom u primarnom stanju napona i te proračunate deformacije se zatim uvode kao granični uslov.

Na tačnost napona i deformacija proračunatih primenom MKE osim veličine proračunske oblasti značajan uticaj ima i njena diskretizacija. Obzirom da je MKE približna metoda, strogo rešenje razmatranog problema se ne može dobiti, međutim, što je provedena diskretizacija finija, odnosno usvojen veći broj elemenata to se izračunati naponi i deformacije više približavaju strogom rešenju. S druge strane sa povećanjem finoće mreže naglo se povećava i potreban rad na proračunu. Na taj način usvojena mreža bi, s jedne strane, trebala biti dovoljno fina da se obezbedi zadovoljavajuća tačnost rezultata, a s druge strane ne bi trebalo izaći iz prihvatljivih proračunskih troškova.

Opšte pravilo je da se veći broj (manjih) elemenata usvaja u područjima gde se očekuju veće naponske promene. Za tunele to je uvek područje uz konturu iskopa s obzirom da se sa povećanjem rastojanja od konture iskopa naglo smanjuju odstupanja sekundarnih od primarnih napona. U slučaju pseudo-trodimensionalne i trodimensionalne analize, osim dimenzija elemenata u ravni upravnoj na osu tunela, izabrana debljina odsečaka u pravcu ose tunela je takođe značajna s obzirom na tačnost rezultata analize. Da li je adekvatna mreža elemenata usvojena može se ustanoviti komparativnim analizama korišćenjem različitih konfiguracija mreže. Na slici 1 dat je primer proračunskog 3D modela konačnih elemenata.

Jedan od veoma važnih koraka u primeni MKE je izbor oblika elemenata i interpolacionih funkcija pomoću kojih se aproksimira polje promenljivih u elementima. Pravolinijski i krivolinijski elementi mogu biti jednodimensionalni ili linijski, dvodimensionalni (trougao i četvorougao) i trodimensionalni (tetraedar i heksaedar). Mnogi raspoloživi komercijalni programi imaju "biblioteke" elemenata koji se mogu koristiti u odgovarajućim analizama. Danas je najviše u primeni izoparametarski koncept MKE, u kome se iste interpolacione funkcije koriste za aproksimaciju i osnovnih nepoznatih i geometrije elemenata. Broj čvorova na elementu je promenljiv i osim u uglovima, elementi mogu imati i čvorove na stranicama, a takođe i unutrašnje čvorove.



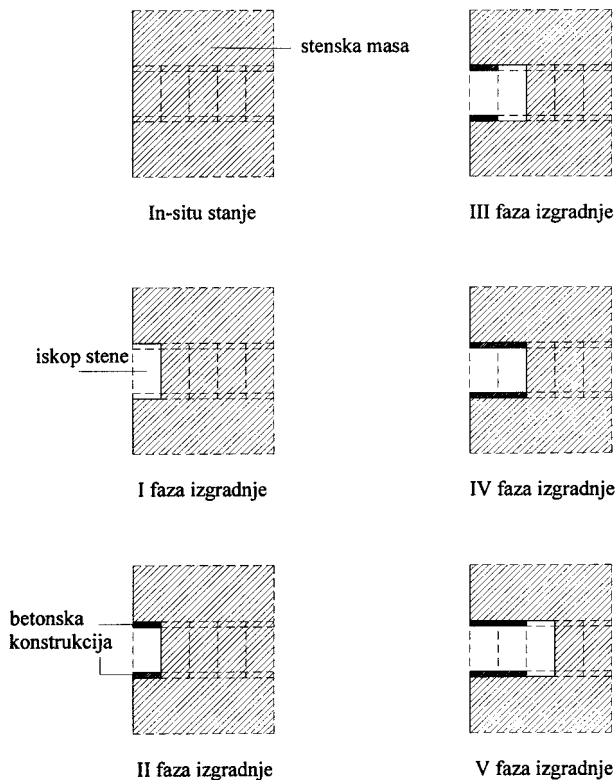
Slika 1. Proračunski 3D model konačnih elemenata

U primenama MKE na rešavanje problema izgradnje u steni pojavljuju se različiti zahtevi. Što jednostavniji elementi su pogodni kada zahtevana tačnost nije suviše velika. Trodimenzionalni element sa osam čvorova u uglovima heksaedra ("brick" element), koji može biti iskošen, se pokazao kao naročito pogodan za ove analize. U slučaju većih zahteva, vezano za modeliranje krivolinijskih konstrukcija ili za veću tačnost analize, izoparametarski trodimenzionalni element sa brojem čvorova koji može varirati od 8 do 21 može zadovoljiti većinu ovih zahteva.

4. TRETMAN FAZA GRAĐENJA

Proračunski model treba što je moguće bolje da reprezentuje složene procese koji se odigravaju u stenskoj masi i oblozi kao složenom interaktivnom sistemu kroz sve faze izgradnje tunela. Izgradnja tunela se sastoji od sekvenci iskopa pri čemu nakon iskopa odgovarajuće kampade sledi formiranje obloge. Ono što je bitno je da obloga može preuzeti samo opterećenje koje nastaje nakon što je formirana tj. ono koje je rezultat narednih faza iskopa i vremenski zavisnih pojava u s masi.

Simulacija fazne izgradnje metodom konačnih elemenata sprovodi se korak po korak (slika 2). U prvom koraku simulira se primarno ili *in situ* stanje napona koje postoji u neporemećenoj stenskoj masi pre izgradnje tunela na taj način što se svim konačnim elementima koji formiraju proračunski presek dodeljuju zapreminska težina i mehaničke karakteristike stenske mase. Vektor sila u čvorovima sistema se formira od sila koje se zadaju u čvorovima na gornjoj granici proračunske oblasti koje su ekvivalentne težini nadsloja stenske mase i zapreminskih sila u elementima



Slika 2. Šema simulacije fazne izgradnje

usled sopstvene težine stene. Naponi $\{\sigma_i\}$ koji se dobijaju kao rezultat ovog koraka proračuna predstavljaju *in situ*, odnosno primarne napone u stenskoj masi. Odgovarajuće deformacije $\{\delta_i\}$ koje su dobijene ovim proračunom su se dogodile u geološkoj prošlosti i ne mogu biti merene.

Nakon proračuna *in situ* stanja sledi simulacija fazne izgradnje. Sve sekvence iskopavanja i nakon toga formiranje obloge se simuliraju u zasebnim proračunskim koracima počev od portala. Prva faza je iskop prve kampade koji se simulira deaktiviranjem elemenata unutar konture iskopa. Ovo se može postići (osim uklanjanjem elemenata iz mreže) dodeljivanjem ovim elementima jedinične težine vazduha i krutosti približno jednake nuli. Kao rezultat ovog koraka proračuna dobijaju se odgovarajući naponi i deformacije $\{\sigma_I\}$ i $\{\delta_I\}$. Merljive deformacije koje su rezultat iskopavanja predstavljaju razliku izračunatih deformacija i *in situ* deformacija.

U drugoj fazi izgradnje postavlja se podgradna betonska (torkret) konstrukcija u oblasti prve kampade. U skladu sa ovim, elementima kojima se simulira obloga se dodeljuju mehaničke karakteristike betona. S obzirom da se betonski elementi postavljaju na već deformisanom sistemu, oni se moraju prilagoditi deformacijama $\{\delta_I\}$ sračunatim u prethodnom koraku uz pomoć fiktivnog napona $\{\sigma^{*e1}\}$ odnosno odgovarajućih ekvivalentnih čvornih sila $\{F^{*e1}\}$. Kao rezultat proračuna u ovoj fazi u elementima obloge prve kampade egzistira fiktivno stanje napona $\{\sigma^{*e1}\}$, dok osta-

li elementi zadržavaju stanje napona i deformacija iz prethodnog proračunskog koraka.

Treća faza izgradnje je iskop druge kampade. Elementima unutar konture iskopa u drugoj kampadi dodeljuju se karakteristike vazduha $\gamma_v, [D_v] \sim 0$. Od ove faze elementi koji predstavljaju betonsku podgradnu konstrukciju u prvoj kampadi, preuzimaju deo opterećenja koja su rezultat narednih sekvenci iskopavanja. Stvarni naponi u ovim elementima u određenoj fazi dobijaju se kada se od izračunatih vrednosti napona oduzmu fiktivni naponi $\{\sigma^{*e1}\}$. Na taj način se definiše stvarno stanje napona u pojedinim elementima obloge, dok se kod elemenata koji predstavljaju stensku masu stvarni naponi poklapaju sa izračunatim vrednostima napona. Merljive totalne deformacije se dobijaju kada se od izračunatih deformacija oduzmu *in situ* deformacije.

Simulacija narednih faza izgradnje se nastavlja na isti način. U fazi IV koja predstavlja postavljanje betonske konstrukcije u drugoj kampadi, elementima obloge se dodeljuju mehaničke karakteristike betona i oni se prilagođavaju deformacijama sračunatim u prethodnoj fazi uz pomoć odgovarajućih fiktivnih sila $\{F^{*e2}\}$. Prema tome, faza izgradnje IV se analizira na sličan način kao faza II, dok faza V odgovara fazi III itd.

U prikazanom postupku simulacije fazne izgradnje primenom MKE, da bi se odredila nepoznata pomeranja čvorova mora se rešavati sistem jednačina za *in situ* stanje, kao i za sve faze građenja, s obzirom da se u svakom koraku proračuna sa promenom odgovarajućih matrica krutosti elemenata menja i globalna matrica krutosti. Kako je ovakav postupak analize prilično naporan i skup sa stanovišta vremena rada računara, često se pokušava proces građenja idealizovati i njegova simulacija ograničiti na limitirani broj proračunskih koraka. Ako bi se, kao ekstreman slučaj, celokupan iskop simulirao u jednom proračunskom koraku, nakon čega bi kao drugi proračunski korak sledilo postavljanje obloge na celoj dužini tunela, u slučaju elastičnog ponašanja stenske mase i betona dobili bi se naponi u oblozi jednaki nuli, dok bi deformacije stenske mase bile precenjene. Suprotno ovome, ako se celokupan iskop i formiranje obloge simuliraju u jednom proračunskom koraku rezultat proračuna su precenjeni naponi u betonskoj oblozi i podcenjene deformacije stenske mase. Stvarno stanje napona i deformacija se nalazi između ova dva rešenja.

U narednom poglavlju ovog rada biće prikazan postupak sa kojim se, na nešto jednostavniji način, može sprovesti simulacija trodimenzionalnog stanja napona na radnom čelu tunela u toku njegove izgradnje.

5. ITERATIVNI POSTUPAK SIMULACIJE NAPREDOVANJA ČELA TUNELA

Postupak simulacije izgradnje tunela u kome se sve faze građenja analiziraju u zasebnim proračun-

skim koracima počev od portala, kao što je već naglašeno, iziskuje znatan proračunski napor s obzirom da se matrica krutosti globalnog sistema menja u svakom koraku proračuna. Osim toga ovakva analiza zahteva veliku proračunsku oblast za deo tunela van zone uticaja portala. Efikasniji način simulacije napredovanja izgradnje tunela je postupak u kome mreža konačnih elemenata prati napredovanje čela tunela (Wittke, 1990). Pri tome se usvaja "mali" proračunski presek čije se dimenzije biraju tako da se naponi i deformacije na vertikalnim granicama preseka ne menjaju kao rezultat pomeranja radnog čela za dužinu jedne kampade iskopa.

Postupak proračuna se sastoji od proračuna primarnog ili *in situ* stanja napona, zatim analize početnog odnosno inicijalnog stanja nakon čega sledi iterativni proračun kojim se simulira napredovanje čela tunela. Tok proračuna je prikazan na slici 3. Tunel je sa jednom nepodgrađenom deonicom i vertikalnim radnim čelom tj. pretpostavlja se da se iskop sprovodi u punom profilu. Pojedine sekvence iskopa su označene brojevima.

Analiza *in situ* ili primarnog stanja napona i deformacija se sprovodi na način koji je izložen u prethodnom odeljku (dodeljivanjem svim konačnim elemen-

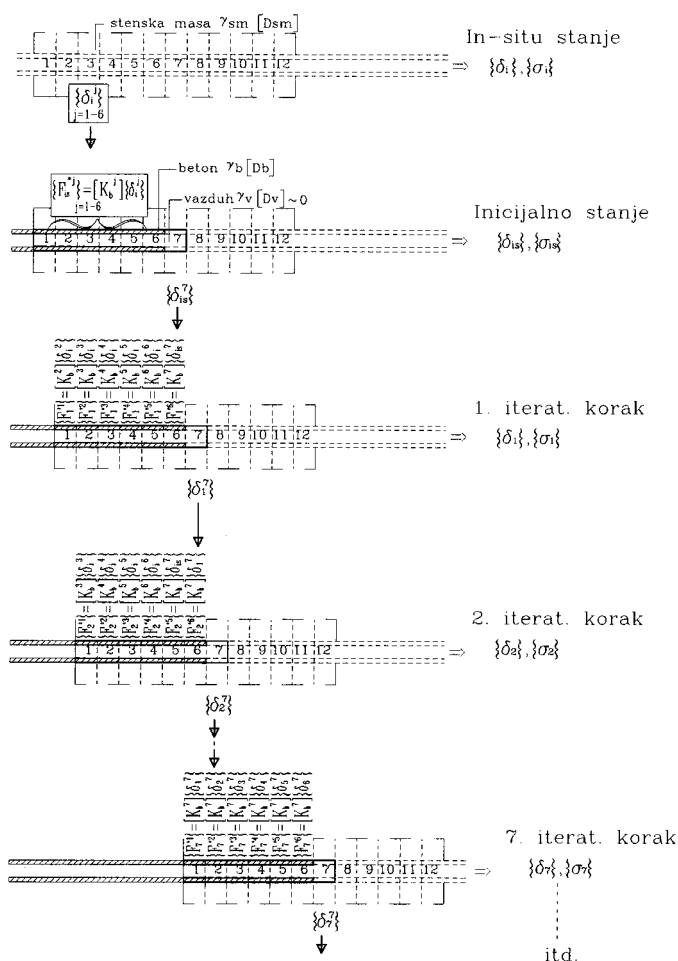
tima koji čine proračunski presek zapremine težine γ_{SM} i mehaničkih karakteristika stenske mase $[D_{SM}]$). Kao rezultat proračuna dobijaju se primarni ili *in situ* naponi u stenskoj masi $\{\sigma_i\}$ i odgovarajuće deformacije $\{\delta_i\}$ (koje su se u stvari desile u geološkoj prošlosti i ne mogu biti izmerene).

Nakon proračuna *in situ* stanja sledi analiza tzv. inicijalnog stanja u kome se obloga postavlja u sistem koji je deformisan prema *in situ* stanju i u jednom koraku se simulira iskop do privremenog radnog čela pri čemu se uzima u obzir jedna nepodgrađena deonica na čelu tunela dužine jedne kampade. Simulacija iskopa i formiranje obloge inicijalno deformisane uz pomoć fiktivnog stanja napona odnosno fiktivnih čvorovnih sila se sprovodi saglasno postupku izloženom u prethodnom odeljku. Elementima kojima se simulira obloga (deonice 1–6) dodeljuju se mehaničke karakteristike betona $[D_b]$ i oni se prilagođavaju *in situ* pomeranjima $\{\delta_i^1\}$, $j = 1-6$ uz pomoć fiktivnog stanja napona odnosno fiktivnih čvorovnih sila $\{F_{is}^{*j}\}$, $j = 1-6$. Iskop se zatim simulira dodeljivanjem jedinične težine vazduha $\gamma \approx 0$ i krutosti približno jednake nuli ($[D_v] \approx 0$) elementima unutar konture iskopa na delu tunela sa oblogom (deonice 1–6) kao i na nepodgrađenoj deonici na čelu tunela (deonica 7). Rezultat proračuna su naponi i pomeranja inicijalnog stanja $\{\sigma_{is}\}$ i $\{\delta_{is}\}$.

Nakon proračuna inicijalnog stanja sledi iterativni proračun u kome se proračunska oblast odnosno mreža konačnih elemenata pomera (napreduje) sa napredovanjem izgradnje tunela. Sa svakim pomeranjem proračunskog preseka jedan segment elemenata sa leve strane proračunskog preseka se isključuje (što nema uticaja na napon i deformacije u oblasti radnog čela), dok se sa desne strane dodaje. Oblast stenske mase ispred radnog čela tako uvek ostaje dovoljno velika čime se izbegava uticaj graničnih efekata na deformacije u oblasti radnog čela. Na taj način, proračunska oblast ostaje ista, odnosno globalna matrica krutosti se ne menja u pojedinim koracima proračuna kao rezultat pomeranja mreže konačnih elemenata već samo stanje napona odnosno sile u čvorovima sistema (desna strana sistema jednačina). Da bi se mogao primeniti ovaj postupak uslov je da se ne menjaju poprečni presek tunela i visina nadsloja u podužnom pravcu tunela i da je stenska masa homogena.

U prvom iterativnom koraku se proračunska oblast pomera u odnosu na inicijalno stanje za dužinu jedne kampade iskopa u pravcu napredovanja gradnje. Iz pomeranja konture iskopa na nepodgrađenoj deonici $\{\delta_{is}^7\}$ koja su sračunata pri analizi inicijalnog stanja sračunavaju se fiktivni naponi odnosno fiktivne čvorne sile $\{F_1^{*0}\}$ koje se zadaju u čvorovima elementa obloge na deonici 6 u prvom iterativnom koraku. Rezultat proračuna su naponi $\{\sigma_1\}$ i pomeranja $\{\delta_1\}$.

U drugom iterativnom koraku se proračunska oblast ponovo pomera za dužinu kampade iskopa u pravcu napredovanja radova. Iz pomeranja dobijenih u prvom iterativnom koraku za segment 7 određuju se



Slika 3. Iterativni postupak simulacije napredovanja čela tunela

fiktivne čvorne sile sa kojima se vrši prilagođavanje betonske obloge u segmentu 6 inicijalnim pomeranjima stenske mase. Na sličan način proračun se obavlja i u narednim koracima iteracije.

U svakoj sekvenci iskopa, kao što je već naglašeno, u stenskoj masi na nepodgrađenom delu na radnom čelu tunela dolazi do relaksacije napona normalno na otvorenu površinu iskopa i odgovarajućih pomeranja ka unutrašnjosti otvora. Uz pretpostavku da je stenska masa dovoljno homogena u podužnom pravcu tunela, efekti svake sekvence iskopa se dodaju na prethodno stanje napona i deformacija pri čemu oni nakon određenog broja koraka imaju istu vrednost u svakom narednom koraku napredovanja, odnosno rezultat je stacionarno stanje. Na taj način pomeranja na čelu tunela, koja su se desila pre formiranja obloge, se proračunavaju kroz veći broj iteracija i kontinualno se približavaju stvarnim vrednostima. Iterativni proračun, odnosno pomeranje mreže konačnih elemenata se završava kada se sračunata pomeranja na čelu tunela više praktično ne menjaju u dva uzastopna koraka iteracije. Na slici 4 prikazana su vertikalna pomeranja (w) stenske mase u kaloti tunela dobijena u pojedinim koracima iterativnog proračuna na primeru tunela kružnog preseka (slika 1), prečnika $D = 10$ m u elastičnoj stenskoj masi modula elastičnosti $E = 10000$ MPa i sa visinom nadsloja $H = 160$ m.

Pomeranjem proračunskog preseka naponi i pomeranja koji su u početnom stanju bili pogrešno određeni se eliminišu i stvarno stanje napona i deformacija se asimptotski određuje. Treba imati u vidu da se stvarno stanje napona u elementima obloge dobija kada se od napona sračunatih u zadnjem iterativnom koraku za te elemente oduzme njihovo fiktivno stanje napona sračunato u odgovarajućem iterativnom koraku. Stanje napona u elementima koji predstavljaju stensku masu sračunato u poslednjem koraku odgovara stvarnom stanju napona. Pomeranja koja su rezultat izgradnje tunela i koja se mogu meriti određuju se tako što se od pomeranja sračunatih u poslednjem iterativnom koraku oduzmu pomeranja dobijena u analizi *in situ* stanja.

U II delu rada biće prikazani neki rezultati sprovedenih 3D analiza primenom ovde izloženog postupka simulacije napredovanja izgradnje tunela.

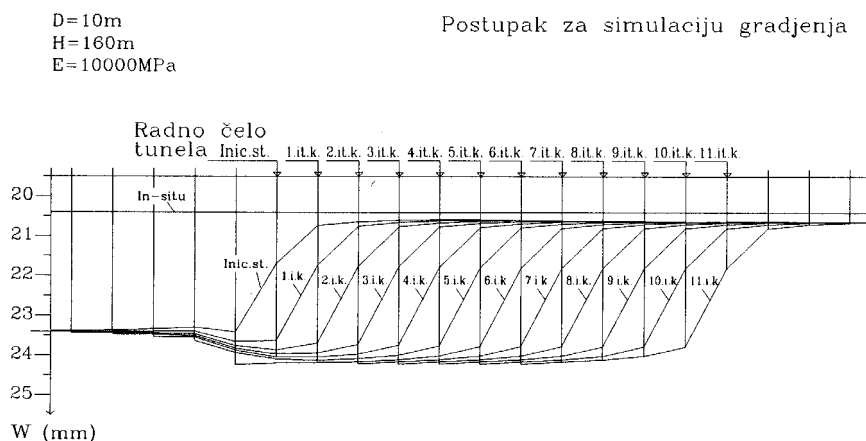
6. ZAKLJUČAK

Izgradnja tunela je 3D proces. U toku izgradnje tunela indukuje se tipično 3D polje napona i deformacija pri čemu na radnom čelu tunela dolazi do delimične relaksacije stenske mase odnosno pomeranja konture iskopa pre formiranja obloge. Obloga se postavlja na već deformisanu površinu iskopa i shodno tome treba biti izložena samo naponsko-deformacijskim promenama koje su se desile nakon njenog formiranja.

S obzirom da se 2D modelima ovo ne može obuhvatiti za adekvatnu analizu naponsko-deformacijskih stanja u tunelskoj oblozi i stenskoj masi, kao složenom interaktivnom sistemu, neophodna je 3D analiza uz simulaciju napredovanja izgradnje tunela i naponsko-deformacijskih promena na radnom čelu tunela. Iako je danas moguće sprovesti 3D analize, u inženjerskoj praksi se proračuni tunelskih konstrukcija još uvek uglavnom sprovode uz pretpostavku 2D ravnog stanja deformacija. Razlog za to je činjenica da su 3D analize još uvek suviše skupe i iziskuju značajan proračunski napor i vreme rada računara sa tehnikom i programima koji danas stoje na raspolaganju.

U radu su izloženi principi iterativnog postupka metodom konačnih elemenata za simulaciju napredovanja izgradnje tunela. U ovom postupku pri simulaciji sekvenci izgradnje tunela mreža konačnih elemenata prati napredovanje čela tunela. Efekti svake sekvence iskopa se dodaju na prethodno stanje napona i deformacija pri čemu oni nakon određenog broja koraka imaju istu vrednost u svakom narednom koraku napredovanja, odnosno rezultat je stacionarno stanje. Na taj način stvarno stanje napona i deformacija u stenskoj masi i tunelskoj konstrukciji se asimptotski određuje.

Dakle u ovom prvom radu prikazan je postupak numeričkog modeliranja procesa izgradnje tunela. U drugom radu će biti dat uporedni prikaz rezultata pro-



Slika 4. Vertikalna pomeranja u kaloti tunela sračunata u pojedinim iterativnim koracima

računa primenom ovde izloženog postupka simulacije napredovanja izgradnje tunela i primenom uobičajenih uprošćenih postupaka proračuna u jednom koraku na 2D i 3D modelu konačnih elementa. Takođe će biti prikazani rezultati sprovedenih parametarskih studija u kojima su varirani parametri geometrije problema (dimenzije otvora), materijalni parametri za stensku masu i visina nadsloja.

LITERATURA

- [1] Curtis, D.J., Rock, T.A.: "Tunnel linings – design?", *Computer Methods in Tunnel Design*, The Institution of Civil Engineers, London, 175–181 (1978).
- [2] Eberhardt, E.: "Numerical modelling of three–dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 38, 499–518 (2001).
- [3] Farias, M.M., Moraes, A.H., Assis, A.P.: "Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3–D numerical simulations", *Tunnelling and Underground Space Technology* 19, 283–293 (2004).
- [4] Galli, G., Grimaldi, A., Leonardi, A.: "Three–dimensional modelling of tunnel excavation and lining", *Computers and Geotechnics* 31, 171–183 (2004).
- [5] Ghaboussi, J., Gioda, G.: "On the Time–dependent Effects in Advancing Tunnels", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. Vol.1, 249–269 (1977).
- [6] Goodman, R.E.: *Introduction to Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, 2 (1989).
- [7] Hamza, M., Croney, P.: "The role of stress analysis in the design of large unlined openings in rock", *Computer Methods in Tunnel Design*, The Institution of Civil Engineers, London, 145–174 (1978).
- [8] Hoek, E., Brown, E.T.: *Underground Excavations in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London (1980).
- [9] Kielbassa, S., Duddeck, H.: "Stress–Strain Fields at the Tunnelling Face –Three–dimensional Analysis for Two–dimensional Technical Approach", *Rock Mechanics and Rock Engineering* 24, 115–132 (1991).
- [10] Ladanyi, B., Gill, D.E.: "Tunnel Lining Design in a Creeping Rock", *Canadian Tunnelling Canadian*, 45–58 (1986).
- [11] Maraš S.: "Analiza interakcije horizontalne tunelske konstrukcije i stenske mase", Magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd (1997).
- [12] Maraš–Dragojević, S., Anagnosti, P.: "Proračunsko modeliranje izgradnje tunela primenom 3D modela konačnih elemenata", 10. Kongres JDGK, Zbornik radova, Vrnjačka Banja, T–23, 133–138 (1998).
- [13] Maraš–Dragojević, S.: "3D analiza naponsko–deformacijskih stanja u tunelskoj konstrukciji i stijenskoj masi u procesu izgradnje tunela", Istraživanja, Monografija posvećena dvadesetogodišnjici rada fakulteta, Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore, Podgorica, 177–197 (2000).
- [14] Negro, A., Queiroz, B.I.P.: "Prediction and performance of soft ground tunnels: a review of numerical analyses for tunnels", In: Kusakabe, O., Fujita, K., Miyazaki, Y. (eds.), *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Rotterdam: Balkema, 409–418 (2000).
- [15] Pande, G.N., Beer, G., Williams, J.R.: *Numerical Methods in Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, Chichester (1990).
- [16] Swoboda, G., Abu–Krisha, A.: "Three–Dimensional Numerical Modeling for TBM Tunneling in Consolidated Clay", *Tunnelling and Underground Space Technology* 14(3), 327–333 (1999).
- [17] Wittke, W.: *Rock Mechanics – Theory and Applications with Case Histories*, Springer–Verlag, Berlin (1990).