

Primljen / Received: 11.8.2014.  
Ispravljen / Corrected: 15.10.2014.  
Prihvaćen / Accepted: 23.10.2014.

Dostupno online / Available online: 10.1.2015.

# Inicijalne i vremenski ovisne deformacije oko malog kružnog otvora u laporu

## Autor:



Prof.dr.sc. **Zvonko Tomanović**, dipl.ing.grad.  
Univerzitet Crne Gore  
Građevinski fakultet Podgorica  
[zvonko@ac.me](mailto:zvonko@ac.me)

Prethodno priopćenje

## Zvonko Tomanović

### Inicijalne i vremenski ovisne deformacije oko malog kružnog otvora u laporu

Osnovna karakteristika standardnih laboratorijskih pokusa je ta da se provode na uzorcima jednostavnog geometrijskog oblika i stanja naprezanja. Uobičajeno je da se parametri materijala, dobiveni iz ovih pokusa, koriste u numeričkim modelima koji opisuju dosta složenije pojave ovisne o naprezanju. Zbog toga je nužno, na modelima ili tijekom gradnje stvarnih objekata, provjeriti rezultate numeričkih modela. U ovom radu prikazuju se rezultati deformacija u vremenu oko kružnog otvora promjera 10,8 cm, na dvodimenzionalnom modelu od lapora dimenzija 60 x 60 x 10 cm.

#### Ključne riječi:

puzanje, konvergencija, tunel, model, kružni otvor

Preliminary note

## Zvonko Tomanović

### Initial and time-dependent deformations in marl around small circular opening

The basic property of standard laboratory tests is that they are conducted on samples of simple geometry and stress state. It is a common practice to use material parameters obtained from such tests in numerical models that describe more complex stress-dependent phenomena. For this reason, numerical modelling results have to be verified either through models or during construction of actual structures. The paper presents results of time-dependent deformations around the circular opening 10.8 cm in diameter, using the two-dimensional marl model measuring 60 x 60 x 10 cm

#### Key words:

creep, convergence, tunnel, model, circular opening

Vorherige Mitteilung

## Zvonko Tomanović

### Anfängliche und zeitabhängige Verformungen von Mergelstein mit kreisförmiger Öffnung

Das Hauptmerkmal von Standardlaborversuchen ist, dass sie an Proben einfacher geometrischer Formen und Spannungszustände durchgeführt werden. Die durch solche Untersuchungen erhaltenen Materialparameter werden üblicherweise in numerischen Modellen angewandt, um bedeutend komplexere spannungsabhängige Erscheinungen zu beschreiben. Es ist daher notwendig, aufgrund von Modellen oder im Laufe des Aufbaus wirklicher Objekte, die Resultate numerischer Analysen zu überprüfen. In dieser Arbeit werden Resultate zeitabhängiger Verformungen um eine kreisförmige Öffnung mit 10,8 cm Durchmesser anhand des Modells einer 60 x 60 x 10 cm großen Mergelsteinprobe dargestellt.

#### Schlüsselwörter:

Kriechen, Konvergenz, Tunnel, kreisförmiger Öffnung

## 1. Uvod

U posljednjih nekoliko desetljeća napravljen je vidni pomak u tehnologiji izgradnje tunela, ali i u procesu projektiranja, numeričkog modeliranja i dimezioniranja podgradne konstrukcije. Bez obzira na napredne tehnologije izgradnje i proračuna, koji se danas koriste, potvrda uspostavljanja ravnoteže između pritisaka stijenske mase i sila u podgradnoj konstrukciji donosi se tijekom gradnje na osnovi mjerenja pomaka konture tunelskog otvora. Naime, nakon iskopa jedne dionice tunela dolazi do trenutačnog pomicanja konture iskopa u radijalnom pravcu kao posljedica deformacija uzrokovanih promjenom naprezanja u stijenskoj masi. Osim kratkotrajne deformacije, tijekom vremena dolazi do prirasta radijalnih deformacija konture iskopa čiji intenzitet uglavnom ovisi o vrsti stijene u kojoj se tunel gradi i primijenjenoj podgradnoj konstrukciji.

Vremenski ovisno ponašanje stijenske mase i pojava prirasta radijalnih pomaka konture iskopa primijećena je uslijed šire primjene fleksibilne tunelske podgradne konstrukcije sastavljene od mlaznog betona, armaturnih mreža i sidara [1, 2]. Sama fleksibilna podgradna konstrukcija ima također izraženo vremenski ovisno ponašanje [3, 4]. Prvi pokušaji da se primjenom teoretskih rješenja unaprijed dođe do procjene vremenski ovisnih pomaka konture iskopa nisu dali zadovoljavajuće rezultate. Problem proračuna i procjene vremenski ovisnih deformacija rješavan je empirijskim formulama koje su kod tunela, u jednom periodu, davale ekonomski i tehnički prihvatljive rezultate. Brz napredak razvoja računala i numeričkih metoda u prethodnih nekoliko desetljeća doveli su do razvoja složenih reoloških modela [5-8], numeričkih procedura i računalnih programa koji su omogućili bolje razumijevanje složeno, vremenski ovisno ponašanje podgradne konstrukcije i stijenske mase oko tunelskog otvora, [9, 10], i dr.

Pri formiranju matematičkih modela nužno je i definirati karakteristične reološke koeficijente i parametre materijala. Općenito se parametri materijala i konstante dobivaju laboratorijskim ispitivanjima ili ispitivanjima na terenu. Međutim, opisivanje reološkog ponašanja stijenske mase karakteriziraju naglašeni problemi pri definiranju egzaktnih konstanti materijala i parametara koji postoje u reološkom modelu. Problemi određivanja parametara materijala posljedica su specifične građe samog stijenskog materijala: diskretne mineralne građe, ravnine uslojenosti, diskontinuiteta, itd. Osim toga, nužno je posebno definirati ne samo ponašanje stijenskog uzorka nego i diskontinuiteta.

Osnovna karakteristika standardnih laboratorijskih i terenskih ispitivanja je ta da se provode na uzorcima jednostavnog geometrijskog oblika i manje ili više jednostavnog stanja naprezanja. Kod različitih problema u stvarnoj stijenskoj masi geometrija i stanje naprezanja se obično značajno razlikuju od laboratorijskih ili terenskih ispitivanja. Međutim, uobičajeno je da se parametri materijala koji se dobivaju iz jednostavnih pokusa primijene u matematičko-reološkim modelima koji općenito

opisuju znatno složenije pojave koje ovise o naprezanju, pa i u mehanici stijena kod analize stanja naprezanja i deformacija oko tunelskog otvora.

Razlike između laboratorijskih pokusa i stvarne pojave naprezanja i deformacija, koja se razmatra u pogledu geometrije i stanja naprezanja, mogu biti uzrok manjih ili većih odstupanja rezultata matematičkog modela od stvarnog stanja naprezanja i deformacija. Zbog toga je nužno na modelima, ili pri izgradnji stvarnih objekata, provjeriti rezultate koji se dobivaju na osnovi mjerenja na jednostavnim – standardnim pokusima i prije svega ustanoviti ima li značajnih fenomenoloških odstupanja, a zatim i provjeriti točnost provedenih proračuna stanja naprezanja i deformacija. U nastavku ovog rada prikazuju se rezultati deformacija u vremenu, oko kružnog otvora promjera 10,8 cm na dvodimenzionalnom modelu od lapora dimenzija 60 x 60 x 10 cm, i komparativna analiza s rezultatima puzanja jednoosno opterećenih uzoraka.

## 2. Cilj istraživanja

Za adekvatan numerički proračun stanja naprezanja i deformacija u stijeni oko tunelskog otvora nužno je fenomenološki poznavati ponašanje stijene u uvjetima vremenski ovisnih deformacija. Jednako je važno i nužno osigurati i odgovarajuće materijalne parametre samog stijenskog uzorka, što je cilj eksperimentalnog istraživanja. Primjenom jednoosnih pokusa puzanja mogu se definirati materijalne konstante i parametri lapora kao izabrane reprezentativne stijene iz grupe mekih stijena, koji se nalaze u reološkom modelu. Ispitivanjem vremenski ovisnih deformacija oko malog kružnog otvora na modelu od lapora dimenzija 60 x 60 x 10 cm u uvjetima dvoosnog stanja naprezanja može se razumijeti fenomenologija vremenski ovisnog ponašanja oko malog kružnog otvora i usporediti ga s vremenski ovisnim ponašanjem jednoosno opterećenog uzorka.

Razlog da se eksperimentalno istražuje na uzorcima lapora, u uvjetima kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja i rasterećenja, je nedovoljna eksperimentalna istraženost ponašanja mekih stijena i parametara materijala nužnih za postavljanje adekvatnih numeričkih modela kod pojava koje ovise o naprezanju i deformacijama u stijenskoj masi. Naime, postojeći reološki modeli i računalni programi bazirani na njima još uvijek ne omogućavaju dobro predviđanje vremenski ovisnih deformacija u stijeni oko tunelskog otvora, odnosno predviđanje prirasta radijalnih pomaka konture tunelskog otvora nakon iskopa.

Razlog istraživanja predmetnog problema proizlazi iz potrebe da se suvremeni postupci iskopa i podgrađivanja podzemnih otvora, zasnivani na interakciji stijenske mase i podgradne konstrukcije u vremenski ovisnim uvjetima, numerički modeliraju i da se u fazi projektiranja omogući blježenje stanja naprezanja i deformacija tijekom iskopa i u tijeku uporabe. Analiza vremenski nezavisnih (kratkotrajnih) i vremenski ovisnih deformacija (puzanje) nalazi se u središtu ovog istraživanja kao osnova za formiranje numeričkih modela pojava ovisnih o naprezanju u mehanici stijena.

Rezultati istraživanja trebaju uputiti na fenomenologiju ponašanja naprezanja i deformacija odabranog stijenskog materijala pri kratkotrajnom opterećivanju i dugotrajnom opterećenju u uvjetima jednoosnog i dvoosnog opterećenja. Iz eksperimentalnih mjerenja treba definirati stvarni opseg materijalnih parametara ispitivanog stijenskog materijala i razviti adekvatne empirijske ovisnosti kojima je moguće aproksimirati relacije naprezanja i deformacija pri kratkotrajnom opterećenju te puzanje stijenskog uzorka u uvjetima dugotrajnog opterećenja i nakon djelomičnog ili potpunog rasterećenja. Usporednom analizom rezultata jednoosnog pokusa puzanja i rezultata vremenski ovisnog ponašanja stijene oko malog tunelskog otvora na modelu treba ocijeniti mogućnost primjene jednostavnih laboratorijskih pokusa u numeričkim modelima koji opisuju geometrijski i s aspekta naprezanja mnogo složenije situacije.

### 3. Ograničenja istraživanja

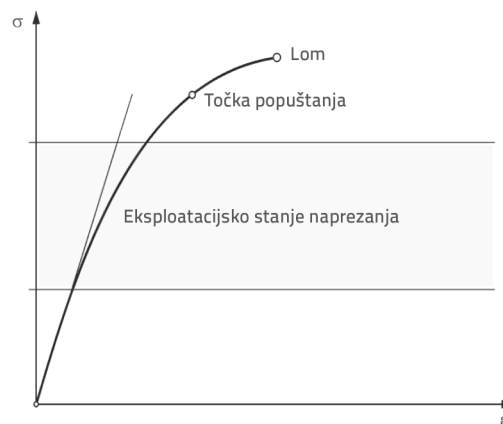
Analiza je ograničena na područje u kojem se ponašanje stijenske mase može preuzeti kao kvazi-elastično (viskoelastično) pri kratkotrajnom opterećivanju u uvjetima sobnih temperatura i ograničene promjene prirodne vlažnosti. Kvazielastično ponašanje stijene podrazumijeva da su pri kratkotrajnom opterećivanju i rasterećenju deformacije potpuno reverzibilne kada je stanje naprezanja ispod granice popuštanja. Kod dugotrajnog opterećenja, deformacije sadrže i zaostalu – plastičnu komponentu deformacije iako stanje naprezanja nije dostiglo granicu popuštanja pri "kratkotrajnom" opterećenju (od nekoliko minuta do nekoliko sati). Iz prethodnog proizlazi da je granica popuštanja pri dugotrajnom opterećenju (nekoliko dana, tjedana ili mjeseci) niža od granice popuštanja pri "kratkotrajnom" opterećivanju. Kada se vremenski ovisne deformacije javljaju i pri sasvim niskoj razini naprezanja, tada se govori o određenoj nultoj granici popuštanja.

Dva su razloga zašto je istraživanje ograničeno na ponašanje naprezanja i deformacija stijene ispod granice popuštanja pri kratkotrajnom opterećenju. Prvi razlog za to ograničenje nalazi se u činjenici da stanje naprezanja, koje je predmet istraživanja, karakterizira i najveći broj situacija u stijeni oko tunelskog otvora. Naime, ako je stanje naprezanja u stijeni oko tunelskog otvora ispod granice popuštanja, tunelski otvor se ne podgrađuje ili se samo postavlja obloga koja nema zadatak preuzeti značajne sile. Ako je dostignuta granica popuštanja u stijeni oko otvora, postavlja se podgrada koja preuzima dio neuravnoreženih sila u stijeni, čime se stanje naprezanja u stijeni dovodi ispod granice popuštanja i uspostavlja se ravnoteža sila.

Drugi razlog za predmetno proučavanje nalazi se u činjenici da je opisano stanje naprezanja, koje je ispod granice popuštanja, ali iznad nivoa za korektno aproksimiranje linearno elastičnim modelom, bilo predmet ograničenog proučavanja. Naime, teorija elastičnosti je "zaokružena" teorija u prošlom stoljeću, teorija plastičnosti, odnosno granica loma je bila predmet velikog zanimanja kroz nekoliko stoljeća pa je formuliran znatan broj teorija – zakona koji na prihvatljiv način opisuju ponašanje

različitih materijala nakon dostizanja granice popuštanja, kao i samu granicu loma.

Područje koje se može definirati kao polje radnih-uporabnih naprezanja (pri kojima se javljaju vremenski ovisne deformacije) predstavlja znatno manje istraženo područje reološkog ponašanja stijenske mase i materijala uopće (slika 1.). Naime, nakon postavljanja zadovoljavajućih teorija loma materijala, bilo je moguće definirati faktore sigurnosti koji su osiguravali da ne dođe do loma konstrukcije, odnosno u ovom slučaju do loma stijenske mase. Razlike računskog stanja naprezanja (koje je više ili manje zasnovano na teoriji elastičnosti) i stvarnog stanja naprezanja riješene su uvođenjem različitih faktora sigurnosti za različite materijale i tipove konstrukcija koji su u praksi davali zadovoljavajuće rezultate.



Slika 1. Dijagram ovisnosti naprezanja i deformacija

### 4. Laboratorijska ispitivanja

Po definiciji, osnovna karakteristika ispitivanja puzanja je održavanje konstantnog stanja naprezanja tijekom dužeg razdoblja. Radi istraživanja pojave puzanja lapora, ovdje su provedeni jednoosni i dvoosni pokusi puzanja na uzorcima. Izabran je lapor kao reprezentativni materijal iz grupe mekih stijena radi proučavanja same fenomenologije ponašanja i dobivanja materijalnih parametara reološkog modela, koji opisuju deformacijsko ponašanje ovog materijala pod dugotrajnim opterećenjem.

Ispitani lapor u pogledu kemijskog sastava sadrži  $\text{CaCO}_3$  u granicama od 48,10 do 48,30 %, dok je neotopljeni ostatak (glina+kvarc) u granici od 51,03 do 51,87 %. U pogledu mineralološkog sastava, kalcit (46-48 %) i kvarc (12-13 %) predstavljaju dominantne mineralne faze, dok glinovite faze sadrže ilit i smektit, montmorilonit, kaolinit, glaukonit, transformirane feldspate i liskune. Prirodna vlažnost uzoraka bila je od 8 do 11 %, a jednoosna čvrstoća je oko  $\sigma_c = 8,8 \text{ MPa}$ .

Jednoosni pokusi puzanja provedeni su na prizmatičnim uzorcima (15 x 15 x 40 cm) i dvoosni pokusi na uzorcima oblika ploče (60 x 60 x 10 cm). Jednoosni pokusi su provedeni nakon opterećenja i pokusi relaksacijskog puzanja nakon potpunog ili djelomičnog rasterećenja. U prvoj fazi dvoosni

pokusi su provedeni pri različitim odnosima vertikalnog i horizontalnog tlačnog naprezanja. U drugoj fazi ispitivanja na pločastim uzorcima izbušen je kružni otvor promjera 10,8 cm čime je modeliran iskop tunela u stijenskoj masi, uz očuvanje konstantnog opterećenja nanesenog u prvoj fazi pokusa. Na taj je način omogućeno proučavanje stanja naprezanja i deformacija oko malog otvora u stijeni u uvjetima kratkotrajnih (vremenski nezavisnih) i vremenski ovisnih deformacija.

#### 4.1. Jednoosni pokus

Najčešće primjenjivani i najjednostavniji pokus puzanja provodi se na cilindričnim ili prizmatičnim uzorcima u uvjetima jednoosnog stanja naprezanja. Osnova za formiranje reološkog modela u ovom istraživanju bili su pokusi puzanja provedeni na jednoosnim prizmatičnim uzorcima lapora - meke stijene.

Pokus je proveden u tri faze: opterećivanje, rasterećenje i ponovno opterećenje, na veći nivo naprezanja, uz održavanje konstantnog naprezanja nakon promjena naprezanja. Prizmatični uzorci dimenzija 15 x 15 x 40 cm na kojima je obavljen pokus jednoosnog puzanja mogu se promatrati i kao izolirani prizmatični segmenti stijene u blizini konture tunelskog otvora, kako je to prikazano na slici 2., gdje je stanje naprezanja približno jednoosno, [8, 11].

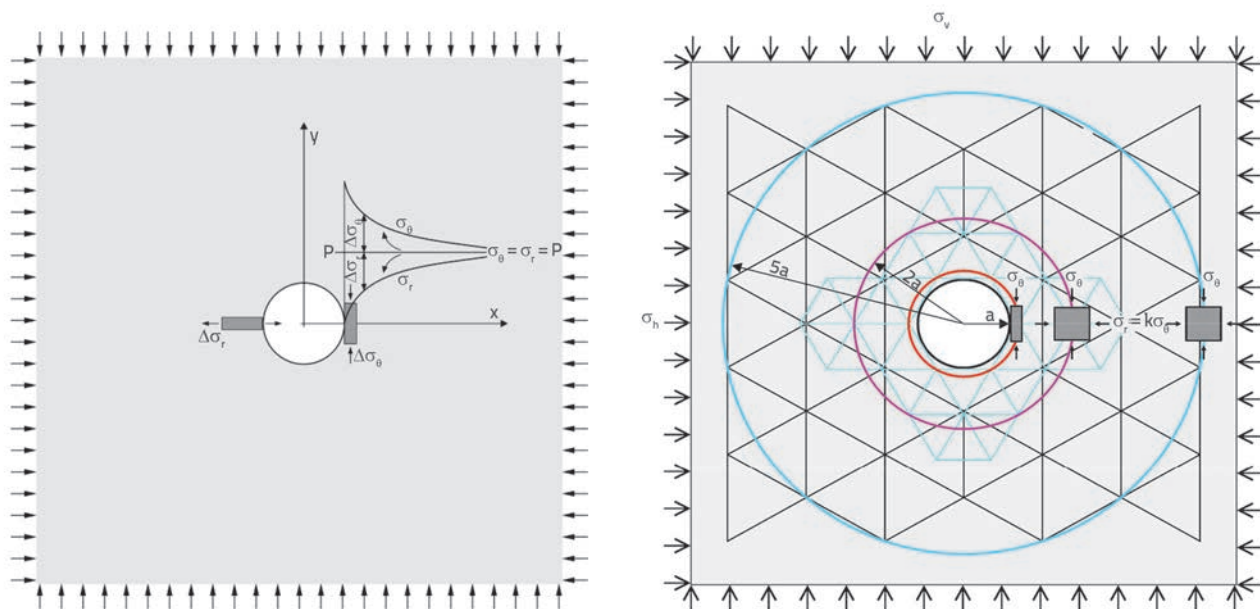
#### 4.2. Pokus na pločastim uzorcima

Pokus na pločastim uzorcima proveden je uz pomoć uređaja za opterećivanje koji se sastoje od primarnog okvira sa stalnim opterećenjem i sekundarnog okvira za nanošenje horizontalnih opterećenja (slika 3.). Deformacije ploče mjerene su primjenom osnovne mreže mjernih točaka dviju strana ploče, koje su sastavljene od međusobno povezanih trokuta, i one su

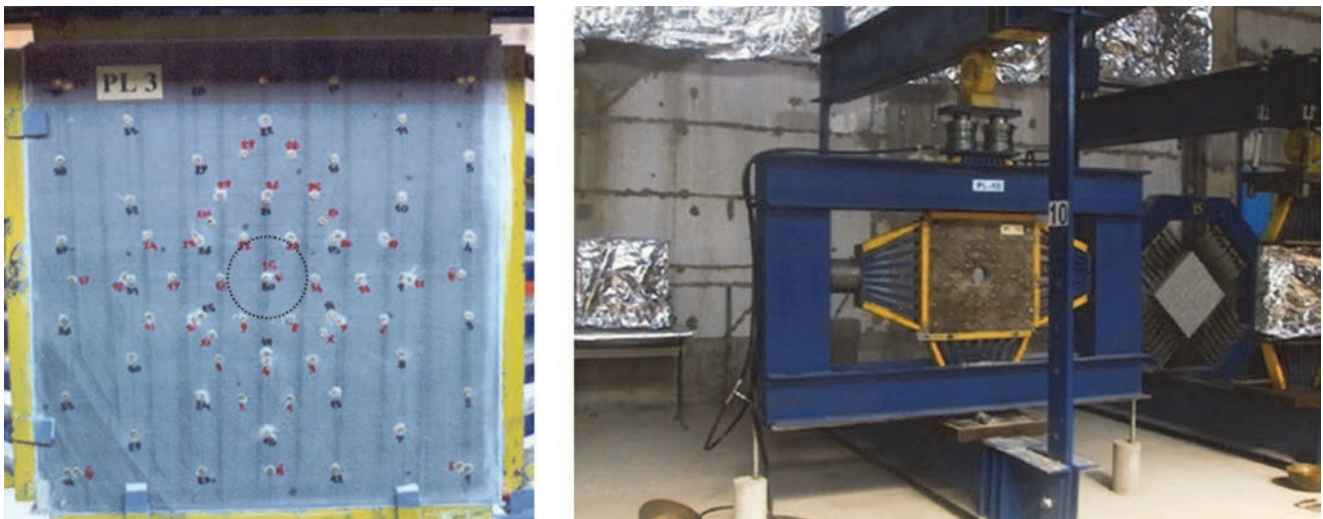
omogućile mjerenje polja deformacija u ravnini ploče u svim fazama pokusa. Mreža baze mjerenja 100mm je postavljena na čitavoj površini uzorka, a mreža baze mjerenja 60 mm formirana je u središnjem dijelu uzorka, kako je prikazano na slikama 2. i 3. Gušćom mrežom mjernih mjesta obuhvaćen je uži dio oko otvora koji će se izbušiti u drugoj fazi pokusa. Mjerenje deformacije po stranama trokuta mreže omogućuje definiranje deformacije u bilo kojem željenom pravcu.

Mjerenje dilatacija izvedena su mehaničkim deformetrom tipa "Pfender" (očitanje pomaka 1/1000 mm na mjernoj bazi 100 mm). Nakon dugotrajnih ispitivanja ustanovljena je pogreška mjerenja ovog tipa uređaja 2-3/1000 mm. Mjerenja promjena razmaka između repera tijekom pokusa puzanja na uzorcima od lapora bila je u granicama od 0,5 do 1 mm. Imajući na umu ostvarene relativne deformacije, pogreška mjerenja od 3/1000mm može se ocijeniti kao prihvatljiva.

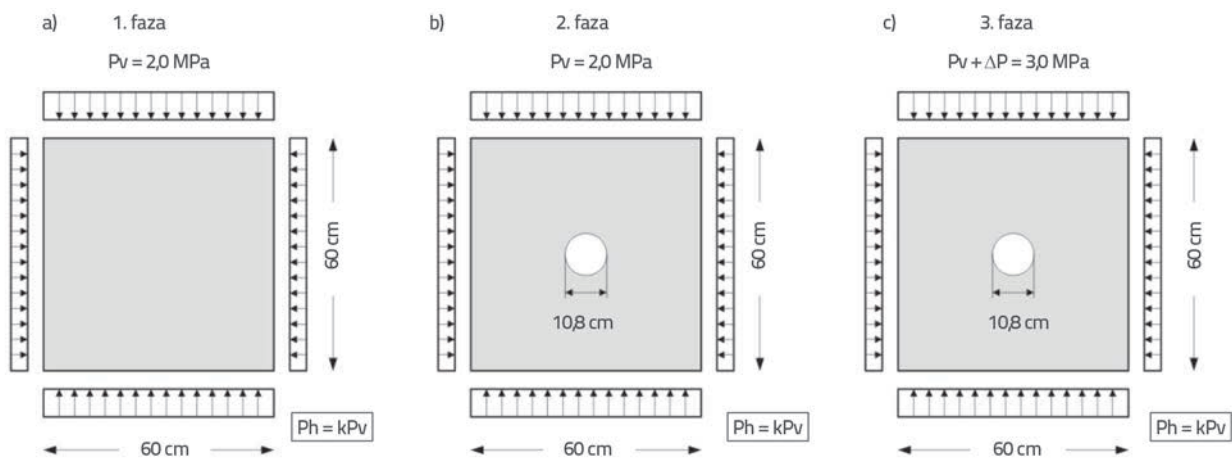
U prvoj fazi pokusa pločastih uzoraka (slika 4.a), u svojoj ravnini ploče, nanoseno je jednoosno i dvoosno opterećenje. Opterećenje je obavljeno u inkrementima od 0,5 MPa, tijekom jednog sata, do vertikalnog naprezanja od 2,0 MPa, što je oko 25 % vršne čvrstoće ispitivanog lapora. Tri uzorka su opterećena jednoosno, a u sljedeće tri grupe uzoraka variran je odnos horizontalnog i vertikalnog naprezanja,  $k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ , 0,3, 0,5 i 1,0. Inicirano stanje naprezanja (uz održavanje konstantnog odnosa horizontalnog i vertikalnog naprezanja) održavano je idućih 45 dana uz mjerenja polja deformacija na objema stranama ploče. Prva faza pokusa je projektirana tako da se ustanovi utjecaj bočnog naprezanja na puzanje u vertikalnom pravcu, te da se ustanovi varijacija mjerenih deformacija (kratkotrajnih i dugotrajnih) ovisno o obliku uzorka, tj. prizmatičan – pločast. Dvoosno opterećene ploče u prvoj fazi pokusa mogu se promatrati kao izdvojeni dijelovi stijene na proizvoljnoj udaljenosti od tunelskog otvora pri različitim odnosima horizontalnog i vertikalnog naprezanja (slika 2.).



Slika 2. Stanje naprezanja oko kružnog tunelskog otvora



Slika 3. Uređaji za dvoosno opterećivanje: a) prva i druga faza pokusa; b) treća faza pokusa



Slika 4. Faze dvoosnog pokusa: a) prva faza; b) druga faza; c) treća faza

Druga faza pokusa simulira iskop u stijenskoj masi; na pločastom uzorku je izbušen kružni otvor promjera 10,8 cm, kako je prikazano na slici 4.b. Nakon bušenja otvora na ploči, model je održavan pod inicijalnim stanjem naprezanja idućih 30 dana. Trenutačne deformacije nakon bušenja otvora trebaju upozoriti na zonu promjene naprezanja – preraspodjele naprezanja oko otvora i utjecaj bočnog naprezanja (ovdje radijalnog) na uzdužnu deformaciju. Mjerenjem deformacija, tijekom 30 dana prati se deformacijsko polje, tj. puzanje materijala u zoni oko otvora.

U trećoj fazi pokusa (slika 4.c) model je još opterećen u vertikalnom pravcu za 1,0 MPa i u odgovarajućem odnosu u horizontalnom pravcu. Nakon naknadnog opterećivanja, model je održavan pod novim stanjem naprezanja idućih 45 dana. Ova faza pokusa simulira prirast naprezanja koje tijekom građenja može biti uzrokovano iskopom sljedeće kampade postojeće tunelske cijevi. Nakon promjene stanja naprezanja, mjerene su deformacije puzanja na mreži mjernih točaka (u sve tri faze pokusa) i to nakon 1, 6 i 24 sata od nanošenja opterećenja, zatim nakon 3 i 7 dana, a u daljnjem periodu svakih 15 dana.

Intervali mjerenja su odabrani tako da razlike prethodne i tekuće mjerene deformacije budu približno jednake.

## 5. Inicijalne-kratkotrajne deformacije oko kružnog otvora

Da bi se analizirale vremenski ovisne deformacije oko otvora, nužno je poznavati inicijalno sekundarno stanje naprezanja oko otvora, jer intenzitet vremenskih deformacija bitno ovisi od stanju naprezanja. Uzimajući to u obzir, u ovom poglavlju je analizirano sekundarno stanje naprezanja oko malog kružnog otvora i definiran njegov intenzitet i raspodjela kako bi se stvorila osnova za analizu i tumačenje vremenski ovisnih komponenti deformacija koje se javljaju nakon bušenja otvora u stijeni. Nakon bušenja malog kružnog otvora na pločastim uzorcima, u drugoj fazi pokusa, uzorci poprimaju karakteristike modela tunelskog otvora u stijenskoj masi. Iako s jednostavnim kružnim oblikom otvora, model predstavlja vrlo pogodnu osnovu za izučavanje pojava ovisnih o naprezanju i provjeru osnovnih pretpostavki konstitutivnog modela formiranog na

osnovi jednoosnih pokusa. Kružni oblik otvora, osim toga, daje mogućnost usporedne analize rezultata mjerenja i rješenja klasične teorije elastičnosti za stanje naprezanja i deformacija oko kružnog otvora.

Rezultati mjerenja na modelu se mogu izravno upotrijebiti jedino kod analize oslobađanja naprezanja u bušotinama, pri istraživanju primarnog stanja naprezanja u stijenskoj masi, ili pri sličnim izučavanjima, dok pri analizi naprezanja oko tunelskog otvora realnih dimenzija i u prirodnoj stijenskoj masi, rezultati imaju kvalitativan značaj i upućuju na fenomene i procese oko tunelskog otvora ovisne o naprezanju [12-14].

Treba imati na umu da je model pločastog oblika opterećen u svojoj ravnini, lica ploče su neopterećena, pa model odgovara ravninskom stanju naprezanja. Ravninsko stanje naprezanja nije uobičajeno stanje naprezanja u stijenskoj masi, već je mnogo češće stanje približno ravninskom stanju deformacija. Stanje naprezanja u stijenskoj masi oko tunelskog otvora približno je stanju naprezanja u proučavanom modelu samo u slučaju kada se iskop izvodi okomito na vertikalno orijentirane slojeve stijene s otvorenim diskontinuitetima. Učinjena idealizacija je uzrokovana fizičkom nemogućnošću da se na stijeni, tijekom ispitivanja, na licu modela, istodobno izvodi mjerenje pomaka i da se nanese opterećenje kako bi se uspostavilo troosno stanje naprezanja ili da se simulira ravninsko stanje deformacija koje više odgovara stanju "in situ".

Utjecaj treće komponente naprezanja, okomite na srednju ravninu ploče, može se razmatrati i kvalificirati kroz dijagrame utjecaja bočnog naprezanja pri rotacijsko simetričnom opterećenju tijekom standardnog troosnog pokusa i kroz dijagrame utjecaja bočnog naprezanja na uzdužnu deformaciju pri dvoosnom pokusu na pločastim uzorcima, [8]. Stvarno stanje naprezanja oko tunela, u realnoj stijenskoj masi nalazi se između ta dva granična slučaja.

Bušenjem otvora poremeti se primarno polje naprezanja, inducirano bočnim opterećenjem u prvoj fazi pokusa na pločastom modelu, i inducira se sekundarno stanje naprezanja. Naprezanja oko otvora rastu u tangencijalnom pravcu na konturu, a opadaju u radijalnom pravcu, slika 2. (lijevo). U nastavku ovog poglavlja iznose se rezultati usporedne analize stanja naprezanja i deformacija oko kružnog otvora primjenom: Kirschovog teoretskog rješenja za homogen, izotropan i linearno elastičan materijal, te numeričkog rješenja uz primjenu modula elastičnosti ovisnih o naprezanju i mjerenih vrijednosti deformacija na pločastom modelu pri jednakom vertikalnom i horizontalnom naprezanju primarnog pritiska.

### 5.1. Kirschovo analitičko rješenje za stanje naprezanja oko kružnog otvora u homogenom, izotropnom i elastičnom materijalu

U literaturi je dobro poznato Kirschovo analitičko rješenje za stanje naprezanja i deformacija oko kružnog otvora u homogenom, izotropnom i elastičnom materijalu. Osim pretpostavke da je  $a \ll z$  (gdje je  $a$  - polumjer otvora,  $z$  - dubina od površine do osi tunela, odnosno otvora, slika 5.), osnovna

pretpostavka rješenja je da linearno elastičnu materijalnu sredinu opisuju Youngov modul elastičnosti  $E$  i Poissonov koeficijent  $\nu$ . Dakle, rješenje je zasnovano na klasičnoj teoriji elastičnosti, koja se bazira na konstantnim materijalnim parametrima, tj. parametrima nezavisnim od stanja naprezanja u materijalu. U cilindričnim koordinatama Kirschove jednadžbe za komponente naprezanja glase:

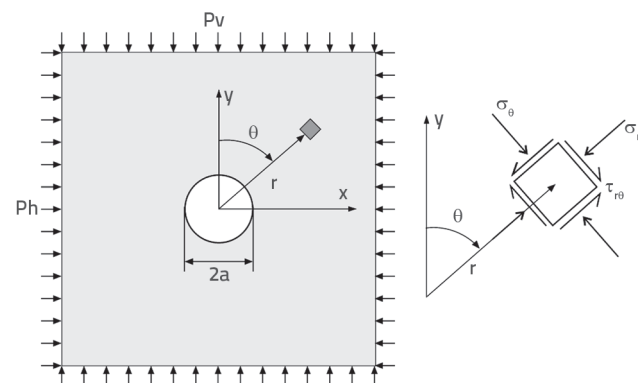
$$\sigma_r = \frac{P_v}{2} \left[ (1 + \lambda) \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left( 1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^3}{r^3} \right) \cos 2\theta \right] \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_v}{2} \left[ (1 + \lambda) \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - (1 - \lambda) \left( 1 + 3 \frac{a^3}{r^3} \right) \cos 2\theta \right] \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{P_v}{2} (1 - \lambda) \left( 1 + 2 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^3}{r^3} \right) \sin 2\theta \quad (3)$$

gdje su:

- $a$  - polumjer kružnog otvora,
- $P_v = \gamma z$  - opterećenje od vlastite težine materijala (smjer  $z$ ),
- $\lambda = P_h/P_v$  - odnos horizontalnog i vertikalnog primarnog naprezanja,
- $r, \theta$  - cilindrične koordinate promatrane točke.



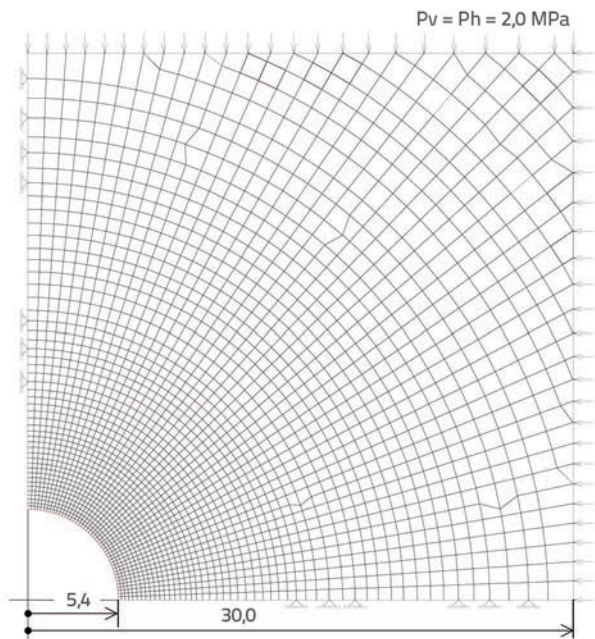
Slika 5. Geometrija i oznake kod Kirschovog analitičkog rješenja

Analitička rješenja ovog tipa danas se uglavnom koriste za kalibriranje numeričkih modela, odnosno provjeru točnosti i traženje optimalne strukture mreže konačnih elemenata uz primjenu računalnih programa za analizu naprezanja i deformacija. Kirschovo analitičko rješenje ovdje je prikazano radi usporedbe rezultata koji se dobivaju primjenom klasične teorije elastičnosti (bazirane na Youngovom modulu elastičnosti), rezultata koji se dobivaju pri modulima elastičnosti ovisnim o naprezanju i rezultata koji su dobiveni mjerenjem na modelu.

### 5.2. Numeričko rješenje za stanje naprezanja oko kružnog otvora pri modulima elastičnosti ovisnim o naprezanju

Numerički model pločastog uzorka s kružnim otvorom formiran je primjenom računalnog programa SAP2000 formuliranog na

bazi konstantnih parametara materijala, tj. Youngovog modula elastičnosti, slika 6. Međutim, u troosnom stanju naprezanja moduli elastičnosti u pojedinim pravcima ovise od bočnim naprezanjima pa se u analizu uvode moduli elastičnosti ovisni o naprezanjima koji su funkcije bočnog naprezanja, [8, 12].



Slika 6. Mreža konačnih elemenata za proračun u računalnom programu "SAP2000"

Ovisnost početnih modula deformacije o bočnom naprezanju dobiva na značenju kod prostornog stanja naprezanja čak i u području niskog nivoa naprezanja, kada se može govoriti o modulima elastičnosti ovisnim o naprezanju. Tako je početni modul elastičnosti lapora dobiven pri slobodnom bočnom širenju (dakle, Youngov modul elastičnosti) oko dva puta manji od početnog modula kada djeluje bočno naprezanje od 2,0 MPa (2,0 MPa je oko 25 % od jednoosne granične čvrstoće).

Zamjenjujući u ovisnosti naprezanja i deformacija linearnog elastičnog materijala Youngov modul elastičnosti  $E$  s modulima elastičnosti ovisnim o naprezanju  $E(\sigma_3)$  dobije se izraz:

$$\sigma = E(\sigma_3)\varepsilon \quad (4)$$

pri čemu  $E(\sigma_3)$  može biti početni modul elastičnosti, tangetni ili sekantni modul deformacije definiran jednadžbama.

U općem slučaju, kada se napusti pretpostavka o linearnoj elastičnosti, može se formulirati nelinearna veza naprezanja i deformacija oblika

$$\varepsilon^n = k^n P_{(\sigma_3)} \left(\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right)^m \quad \text{ili} \quad \left(\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right)^m = \frac{1}{k^n P_{(\sigma_3)}} \varepsilon^n \quad (5)$$

gdje su  $n$  i  $m$  parametri materijala, koji se određuju na temelju eksperimentalnih rezultata,  $\bar{\sigma} = 1,0$  MPa (normalizacija),  $k$  je

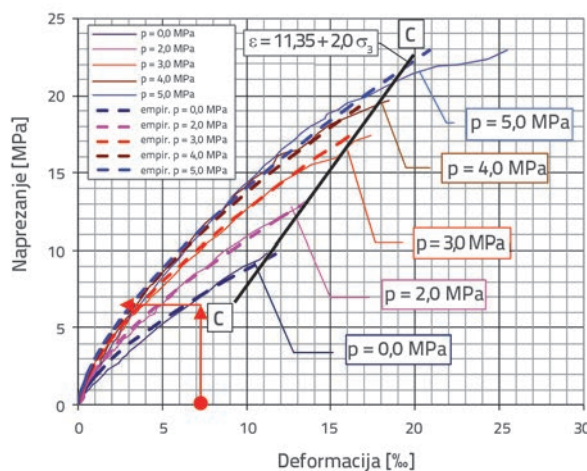
koeficijent stanja naprezanja, a  $P(\sigma_3)$  funkcija ovisna o bočnom tlaku i za ispitivani lapor ima oblik:

$$P_{(\sigma_3)} = 0.00022 \left(\frac{\sigma_3}{\bar{\sigma}}\right)^{3.5} - 0.03453 \left(\frac{\sigma_3}{\bar{\sigma}}\right) + 0.14727 \quad (6)$$

a funkcija ovisnosti deformacija i naprezanja:

$$\varepsilon_1 = \left[ P_{(\sigma_3)} \left(\frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}}\right)^3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Dijagram na slici 7. pokazuje krivulje ovisnosti  $\sigma$ - $\varepsilon$  prema danoj empirijskoj formuli (7) i mjerenim vrijednostima u standardnom troosnom uređaju. Empirijska krivulja dobro aproksimira mjerene vrijednosti gotovo do naprezanja loma kada je  $\sigma_3 \leq 4,0$  MPa. Kada je  $\sigma_3 \leq 4,0$  MPa (oko 50 % od jednoosne čvrstoće), empirijska formula je limitirana linijom C-C. Razvijena empirijska formula (7) za opisivanje veza između naprezanja i deformacija je glatka, diferencijalna i neprekidna funkcija, pa se bez poteškoća može inkorporirati u numeričke procedure [8].

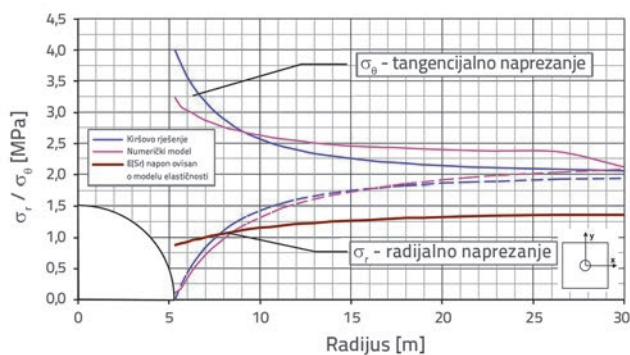


Slika 7. Usporedni dijagram ovisnosti naprezanja i deformacija lapora prema empirijskoj formuli i prema mjerenim vrijednostima (p - bočni tlak) [8]

Efekt modula elastičnosti ovisnog o naprezanju inkorporiran je iterativno. Prvi proračunski korak je proveden je uz konstantan modul elastičnosti, a rezultati stanja naprezanja iskorišteni su za proračun modula elastičnosti ovisnog o naprezanju korištenjem izraza (4) do (7) unošenjem izračunanog radijalnog naprezanja u prethodnom koraku (vidi dijagram na slici 7.), kao i za svaku sljedeću iteraciju. Za sljedeću iteraciju, u svakom konačnom elementu, s različitim stanjem naprezanja. Prirast naprezanja oko kružnog otvora pri rotacijsko simetričnom stanju primarnih naprezanja događa se u tangencijalnom pravcu, u odnosu na konturu otvora, a u radijalnom pravcu naprezanja opadaju i na koturi otvora imaju vrijednost nula, kao što se vidi na dijagramu slike 8. U analizi stanja naprezanja oko kružnog otvora, manje glavno naprezanje je radijalno naprezanje, pa je u analizi korišteno da je  $\sigma_3 = \sigma_r$  čime su definirani moduli elastičnosti ovisni o naprezanju dani jednadžbom (4). Slična procedura je provedena za

proračun naprezanja iz mjerenih dilatacija na pločastom modelu u drugoj fazi ispitivanja, gdje se iz poznatih mjerenih dilatacija na modelu i radijalnog naprezanja iz numeričkog modela primjenom formula (4) do (7) dolazi do naprezanja, slika 7.

Na dijagramu slike 8. prikazana su usporedno Kirschova rješenja naprezanja za geometriju eksperimentalno ispitivanog pločastog modela pri odnosu primarnih naprezanja  $\lambda = 1,0$  i rezultati proračuna na numeričkom modelu pri modulima elastičnosti ovisnim o naprezanju, kao što je gore opisano. Radijalno naprezanje raste od nule na konturi otvora i brzo se približava vrijednosti primarnog stanja naprezanja (na oko  $6-a$ , gdje je  $a$  - polumjer otvora). Opadanjem radijalnog naprezanja mijenja se i modul elastičnosti (opada od inicijalne vrijednosti 1,37 GPa na konturi modela do 0,87 GPa u zoni otvora), kako je prikazano na slici 8. Dakle, krutost materijala relativno raste s udaljenjem od otvora, što ima za posljedicu i značajnu preraspodjelu naprezanja u odnosu na teoretski homogen materijal prema Kirschu, tj. klasičnoj teoriji elastičnosti. Ovaj efekt je dobro poznat pri pojavi zone plastifikacije oko otvora, ali očigledno egzistira i prije pojave zone plastifikacije kada se u obzir uzmu moduli elastičnosti ovisni o naprezanju.



Slika 8. Usporedni dijagram tangencijalnih i radijalnih naprezanja prema Kirschovom rješenju i prema numeričkom modelu

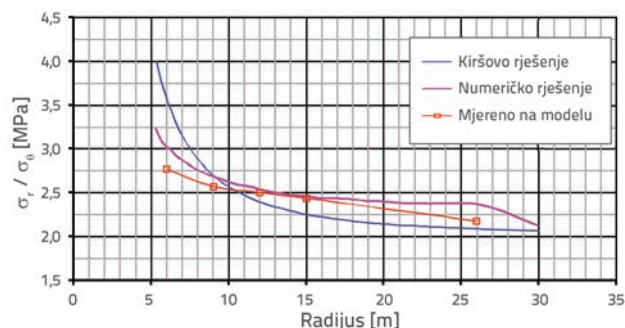
Tangencijalna naprezanja, izračunana prema numeričkom modelu, manja su u blizini otvora od Kirschovih, a veća su kada polumjer prijeđe vrijednost od  $1,75 a$ . Moduli elastičnosti ovisni o naprezanju u tangencijalnom pravcu ne pokazuju veći utjecaj na radijalna naprezanja. Slične rezultate prezentirali su Santarelli i drugi, ispitivajući naprezanja oko bušotine [12].

### 5.3. Stanje naprezanja u stijeni nakon bušenja otvora na pločastom modelu

Numerički model zasnovan je na metodi konačnih elemenata, a iterativni postupak uvođenja modula elastičnosti ovisnih o naprezanju proveden je prema empirijskoj ovisnosti (5) i (6). Stanje naprezanja u pločastom uzorku je približno jednako ravninskom stanju naprezanja ( $\sigma_3 \cong 0$ ,  $\sigma_1 > \sigma_2$ ) pa je nužno provesti korekciju koeficijenta  $k$  u formuli (5). Koeficijent napregnutog stanja  $k$  određen je iz uvjeta da površina dijagrama tangencijalnog naprezanja, pri sekundarnom stanju naprezanja, mora odgovarati površini pri

primarnom stanju naprezanja. Naime, tijekom ispitivanja obavljeno je mjerenje dilatacija u tangencijalnom pravcu na različitim radijalnim udaljenostima od sredine otvora, pa je korištenjem izraza (5) na osnovi poznatih dilatacija (slika 6.) u tim diskretnim točkama izračunano tangencijalno naprezanje. Vrijednost koeficijenta  $k = 0,6$  određena je iz zahtjeva da površina dijagrama tangencijalnog naprezanja za  $\theta = 90^\circ$  bude jednaka površini dijagrama pri primarnom stanju naprezanja.

Na slici 9. prikazan je usporedni dijagram tangencijalnih naprezanja prema: Kirschovom rješenju, numeričkom modelu pri modulima elastičnosti ovisnim o naprezanju i mjerenjima na modelu. Analitičko Kirschovo rješenje, zasnovano na Youngovom modulu elastičnosti, daje veće vrijednosti tangencijalnih naprezanja u blizini konture otvora. Ako se modelom obuhvate efekti modula elastičnosti ovisnog o naprezanju, dobije se rješenje koje se značajno približava vrijednostima tangencijalnih naprezanja izračunanih iz mjerenja na modelu.



Slika 9. Usporedni dijagram tangencijalnih naprezanja prema: Kirschovom rješenju, numeričkom modelu pri modulima elastičnosti ovisnim o naprezanju i mjerenjima na modelu

Svrha je obavljenih pokusa na pločastim modelima pri kratkotrajnom opterećenju provjeriti rezultate dobivene iz numeričkih modela i definirati najutjecajnije parametare i fenomene uvrštene u matematički model. Usporedna analiza rješenja ovdje razmatranog problema dobivenih prema matematičkom modelu i na osnovi rezultata mjerenja na modelu poukazuje da se značajna poboljšanja, pri analizi naprezanja i deformacija stijene oko tunelskog otvora, dobiju ako se u matematički model uvedu moduli elastičnosti ovisni o naprezanju. Osim toga, analiza dijagrama na slikama 8. i 9. sugerira da su pogreške, koje su posljedice zanemarivanja modula deformacija ovisnih o naprezanju, značajno veće od pogreške koja se javlja zbog linearizacije veze naprezanje - deformacija.

## 6. Rezultati ispitivanja vremenski ovisnih deformacija

### 6.1. Pokus puzanja na jednoosno opterećenim prizmatičnim uzorcima

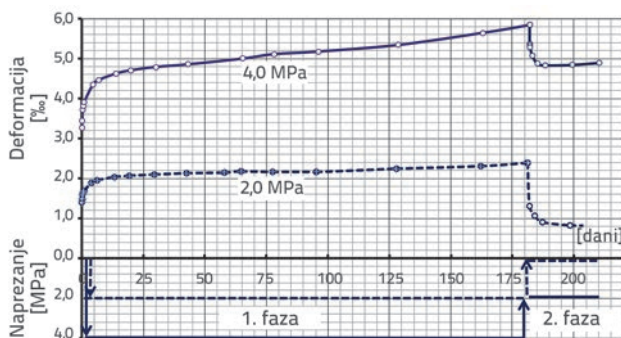
Pokus puzanja na jednoosno opterećenim uzorcima proveden je u dvije faze. Prva faza je opterećenje do željenog nivoa



napreznja i održavanje opterećenja tijekom idućih 180 dana. Druga faza je potpuno ili djelomično rasterećenje i mjerenje deformacija relaksacijskog puzanja tijekom tridesetak idućih dana, kako je prikazano na dijagramu slike 10.

Srednje vrijednosti mjerenja deformacija pri pokusu puzanja na po tri prizmatična uzorka svake različito opterećene grupe uzoraka, pri uzdužnom napreznju od 2,0 MPa i 4,0 MPa, prikazane su na slici 8. Na dijagramu je uočljiva nelinearna zona intenzivnog puzanja materijala u uzdužnom pravcu u prvih dvadeset dana nakon opterećenja. Nakon zone intenzivnog nelinearnog puzanja, deformacije su manje i njihov prirast je približno linearan.

Nakon rasterećenja, u drugoj fazi pokusa najprije dolazi do trenutačne povratne deformacije, a zatim i do razvoja vremenski ovisnih deformacija. Potpuno rasterećeni uzorci pokazuju konvergiranje povratne vremenske deformacije. Djelomično rasterećeni uzorci, u prvih sedam do deset dana, pokazuju povratnu deformaciju puzanja, a zatim dolazi do promjene predznaka vremenski ovisne deformacije, tj. do puzanja materijala pod utjecajem preostalog napreznja na uzorku. Ovo ponašanje je potpuno opisano reološkim modelom, [8, 15].



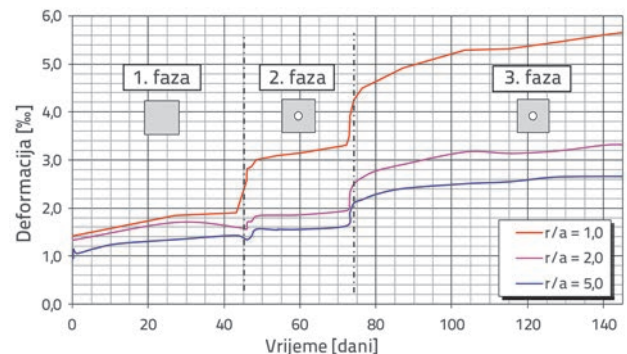
Slika 10. Dijagram puzanja uzdužno opterećenih prizmatičnih uzoraka

## 6.2. Vremenski ovisne deformacije oko kružnog otvora na pločastom modelu

Usporedna analiza vremenskih deformacija u stijeni oko otvora pločastog modela i vremenski ovisnih deformacija razvijenih na uzorcima stijene, pri različitim stanju napreznja, trebaju dati odgovor na pitanje ima li značajnih fenomenoloških razlika i mogu li se materijalni parametri, dobiveni iz pokusa na uzorcima koristiti za formiranje reološkog modela. S tim ciljem izvršena je analiza vremenskih deformacija koje su se razvile u modelu u tangencijalnom pravcu na udaljenosti od  $\rho \cong 1a$ ,  $2a$  i  $5a$  (koncentrični krugovi na slici 2.) pri rotacijsko simetričnom stanju primarnih napreznja.

Na slici 11. prikazan je dijagram ukupnih deformacija pločastog modela u tangencijalnom pravcu, pri rotacijsko simetričnom polju primarnih napreznja ( $k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = 1,0$ ), kroz tri faze ispitivanja. U prvoj fazi ispitivanja, bez otvora, pri jednakom vertikalnom i horizontalnom napreznju od 2,0 MPa razvija se trenutačna deformacija kao posljedica promjene napreznja. Relativne

deformacije dobivene su iz promjene dužine mjerenih deformacija opsega pojedinih krugova prikazanih na slici 2. U prvoj fazi ispitivanja, nakon nanošenja inicijalnog opterećenja, razvijaju se vremenske deformacije ujednačenog nivoa na svim polumjerima (razlike su uglavnom posljedica odstupanja inicijalnih deformacija u horizontalnom i vertikalnom pravcu).



Slika 11. Ukupna deformacija na pločastom modelu (PL-3) u tangencijalnom pravcu u radijalnim razmacima  $\rho \cong 1a$ ,  $2a$  i  $5a$  oko kružnog otvora pri različitim fazama ispitivanja

Nakon bušenja otvora, u drugoj fazi ispitivanja, kao posljedica promjene napreznja pojavljuju se trenutačne deformacije. Trenutačna deformacija je značajna jedino sasvim blizu konture otvora i u ukupnom iznosu brzo opada s povećanjem polumjera, tako da nakon polumjera  $\rho \cong 2a$  inicijalna deformacija malo raste. Vremenski ovisne deformacije u tangencijalnom pravcu pokazuju iste značajke ovisnosti o napreznju kao i prizmatični uzorci pri jednoosnom ispitivanju puzanja. Naime, u blizini otvora tangencijalno napreznje raste, a s udaljavanjem od otvora prirast napreznja opada. U skladu s napreznjima, brzina prirasta vremenske deformacije brže raste bliže otvoru u odnosu na zone koje su na većem polumjeru gdje je prirast napreznja manji (prema tangencijalnom napreznju prikazanom na slici 11.). Nakon povećanja tlačnog napreznja, u trećoj fazi ispitivanja, sa 2,0 MPa na 3,0 MPa, uočava se isti efekt na napreznje kao pri bušenju otvora (skok napreznja i brži prirast vremenski ovisne deformacije - puzanja u blizini otvora). Dakle, vremenski ovisne deformacije u stijeni oko otvora u tangencijalnom pravcu, u kojem dolazi do povećanja napreznja uslijed bušenja otvora, pokazuju gotovo istu ovisnost o napreznju kao i pri jednoosnim pokusima na prizmatičnim uzorcima.

## 7. Zaključak

Istraživanje u ovom radu usredotočeno je na deformacije uzrokovane napreznjima (kratkotrajne) i vremenski zavisne deformacije stijene pri konstantnom stanju napreznja koje se nalazi ispod "kratkotrajne" granice popuštanja. Analizom je obuhvaćeno ponašanje stijenskog monolita (stijenskog matriksa) s mikropukotinama i procjepima, a izlomljene stijenske mase s efektima značajne volumetrijske promjene nisu bili bliži predmet izučavanja. Istraživanje prezentirano u

radu usmjereno je na definiranje materijalnih parametara iz jednostavnih pokusa, koji u fazi projektiranja omogućavaju proučavanje vremenski ovisno stanje naprezanja i deformacija tijekom iskopa i u tijeku uporabe tunela.

Usporedna analiza rezultata sekundarnog stanja naprezanja, izračunanog na osnovi klasične teorije elastičnosti, primjenom modula elastičnosti koji ovise o naprezanju i na osnovi mjerenja na pločastom modelu, upućuje na značajna odstupanja stanja naprezanja izračunanog primjenom klasične teorije elastičnosti u odnosu na mjerene vrijednosti na modelu. Nivo pogreške, koje su posljedica linearizacije veze naprezanja i deformacija u uporabnom nivou naprezanja, zanemariv je u odnosu na pogrešku koja je posljedica neuzimanja u obzir utjecaja manjega glavnog naprezanja na deformabilnost, tj. na početni modul elastičnosti.

Usporedna analiza kratkotrajnih i vremenski ovisnih deformacija pri jednoosnom pokusu puzanja i deformacija oko malog kružnog otvora, na modelu tunela, upućuje na slične oblike dijagrama puzanja. Iako s dosta složenijim stanjem naprezanja oko kružnog

otvora, fenomenološki vremenski zavisni odgovor materijala vrlo je sličan odgovoru materijala pri najjednostavnijem jednoosnom stanju naprezanja. Doprinos ovog istraživanja ograničen je na naprezanja ispod granice popuštanja materijala i ponašanje stijenskog uzorka. Unatoč navedenim ograničenjima, izloženi eksperimentalni podaci pokazuju da se rezultati jednoosnih pokusa puzanja, za praktičnu primjenu, mogu koristiti pri analizi vremenski ovisnih deformacija oko tunelskog otvora.

Eksperimentalna evidencija za pojedine fenomene ponašanja stijene, razmatrane u ovom radu, kao što su efekt omjera vezan za veličinu otvora u modelu i stvarne veličine otvora tunela, zahtijeva određena dopunska ispitivanja kako bi se kvantificirali svi parametri materijala ili funkcije potrebne za potpuno opisivanje odgovora naprezanja i deformacija ispitivane vrste stijene u stvarnim zahtjevima radne sredine. U prvom redu, ovo se odnosi na opisivanje i obuhvaćanje efekata transverzalne izotropije, utjecaja diskontinuiteta i efekta odnosa između dimenzija otvora na modelu i stvarnih dimenzija tunelskog otvora.

## LITERATURA

- [1] Rabcewicz, L.V., Golser, J.: The principles of dimensioning the supporting system for the "New Austrian Tunnelling method". *Water Power*, 25 (1973) 3, pp. 88-93.
- [2] Pacher F.: Ground reaction and lining curves, *Geomechanics and Tunnelling* 3, No. 4, pp. 402-408, 2010.
- [3] Ladanyi, B.: Use of the long-term strength concept in the determination of ground pressure on tunnel linings. *Proc., 3rd Congress of ISRM, National Academy of Sciences, Vol. 2\_B\_*, Washington, D.C., pp. 1150-1156, 1974.
- [4] Sakurai, S.: Approximate time-dependent analysis of tunnel support structure considering progress of tunnel face, *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, 2, (1978) 2, pp. 147-159.
- [5] Goodman, R. E.: *Introduction to rock mechanics*, John Wiley&Sons, 1989, New York, pp. 250-256.
- [6] Cristescu, N.D., Hunsche, U.: *Time Effects in Rock Mechanics*, John Wiley and Sons, 1979, New York, pp. 119-179.
- [7] Xu, T., Tang, C., Zhao, J.: Modeling of Rheological Deformation of Inhomogeneous Rock and Associated Time-Dependent Response of Tunnels, *Int. J. Geomechanics* 12 (2012) 2, pp. 147-159.
- [8] Tomanovic, Z.: The stress and time dependent behaviour of soft rock, *GRAĐEVINAR* 64 (2012) 12, pp. 993-1007.
- [9] Phienweij, N., Thakur, P.K., Cording, E.J.: Time-dependent response of tunnels considering creep effect., *Int. J. Geomech.*, 7(4), 2007, pp. 296-306.
- [10] Barla, G.: Contributions to the understanding of time dependent behaviour in deep tunnels, *Geomechanics and Tunnelling*, 4, No. 3, pp. 255-264, 2010.
- [11] Tomanovic, Z.: Testing of creep phenomena on soft rock, *Materials and Structure*, No 3, pp. 21-42, 2014.
- [12] Santarelli, F.J., Brown, E.T., Maury, V.: Analysis of Borehole Stress Using Pressure-dependent, Linear Elasticity, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Apstr.*, Vol. 23. pp. 445-449, 1986.
- [13] Kaiser, P.K., Morgerstern, N.R.: Time deperendent Deformation of Small Tunnels-I. Experimental facilities, *Int. J. rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Apstr.* Vol.18, pp. 129-140, 1981.
- [14] Kaiser, P.K., Morgerstern, N.R.: Time deperendent Deformation of Small Tunnels-II. Typical Test data, *Int. J. rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Apstr.* 1981. Vol.18, pp. 141-152, 1981.
- [15] Tomanovic, Z.: Rheological model of soft rock based on test on marl, *Int. J. Mechanics of Time-Dependent Materials*, Springer, pp. 135-154., 2006.