

**ODREĐIVANJE PARAMETARA SMIČUĆE ČVRSTOĆE NA
TRIAKSIJALNIM UREĐAJIMA**

**DETERMINATION OF THE SHEAR STRENGTH PARAMETERS ON
TRIAXIAL DEVICES**

Ivan Jovanović^{1a}, Dragan Ignjatović^{1b}, Katarina Milivojević^{1c}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Srbija,
e-mail: ivan.jovanovic@irmbor.co.rs

Orcid:

^{1a} <https://orcid.org/0009-0000-5174-3734>;

^{1b} <https://orcid.org/0000-0003-2333-6853>; ^{1c} <https://orcid.org/0009-0000-1306-4044>

Izvod

U mehanici tla proučavaju se osobine tla, odnosno važne osobine prema kojima se može tlo klasifikovati. Na osnovu toga dobijaju se informacije kako se ispitivano tlo može koristiti, na primer kakvo je tlo povoljno za izgradnju različitih vrsta objekata, koje je tlo povoljno za izgradnju nasipa, itd. Postoji više načina određivanja elemenata unutrašnjeg otpora tla, kohezije i ugla unutrašnjeg trenja, pomoću laboratorijskih opita, među kojima su najpoznatiji opit direktnog smicanja, opit triaksijalne kompresije i opit jednoaksijalne čvrstoće na pritisak. U ovom radu će biti opisani rezultati „CU“ triaksijalnog opita.

Ključne reči: mehanika tla, triaksijalni opit, smičuća čvrstoća, ugao unutrašnjeg trenja

Abstract

The soil properties are studied in mechanics, that is, the important properties according to which the soil can be classified. Based on mechanics, the information is being obtained on how the tested soil can be used. For example: which soil is favorable for the construction of various types of structures, which soil is favorable for the construction of embankments, etc. There are several ways to determine the elements of internal soil resistance, cohesion and angle of internal friction, using the laboratory tests, among which the most famous are the direct shear test, triaxial compression test and uniaxial compressive strength test. This paper will describe the "CU" triaxial test results.

Keywords: soil mechanics, triaxial test, shear strength, angle of internal friction

1. UVOD

Mehanika tla je grana fizike tla i primenjene mehanike koja izučava i opisuje tlo u prostoru na kojem ili unutar koga se gradi. [1] Ona koristi laboratorijske metode ispitivanja i terenske „in-situ“ metode ispitivanja. Rezultati terenskih ispitivanja često daju tačnije rezultate od laboratorijskih. [2]

Uporedo sa mehanikom stena, mehanika tla pruža teoretsku osnovu za analizu u geotehničkom inženjerstvu i inženjerskoj geologiji. [3] Mehanika tla se koristi za analiziranje deformacija tla, protoka fluida unutar prirodnih i veštačkih struktura koje su podržane tlom ili napravljene od tla, ili struktura koje su zakopane u tlu. [4] Primer su građevinski i mostovski temelji, potporni zidovi, brane i ukopani cevovodni sistemi.

Mehanikom tla se opisuje geneza i sastav zemljišta, razlika između poreznog pritiska vode i intergranularnog efektivnog stresa, kapilarnog dejstva fluida u porama tla, klasifikuju tla, njihovo curenje i propusnost, daje se vremenski zavisna promena zapremine usled istiskivanja vode iz sićušnih pora tkz. konsolidacija, određuje otpornost na smicanje i krutost tla. [1,2]

Postoji više načina određivanja elemenata unutrašnjeg otpora tla, kohezije i ugla unutrašnjeg trenja, pomoću laboratorijskih opita, među kojima su najpoznatiji opiti direktnog smicanja, opit triaksijalne kompresije i opit jednoaksijalne čvrstoće na pritisak [4].

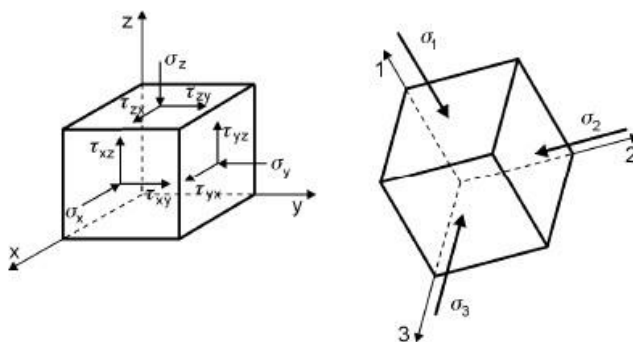
U ovom radu će biti opisani rezultati „CU“ triaksijalnog opita.

2. TEORIJSKE OSNOVE

Naponsko-deformacijsko stanje tla ima veliki značaj pri projektovanju i izgradnji objekata na njegovoj površini. [5]

S obzirom na veliku raznolikost tla i njegovih svojstava, teško je razraditi model koji može opisati njegovo naponsko-deformacijsko stanje. [6] Zato je veoma važno razraditi jednostavan strukturni model koji odražava sve osobenosti tla i njegova fizičko-mehanička i deformaciona svojstva.

Na slici 1 prikazan je opšti slučaj stanja napona na modelu kocke. Na svaku površ elementarne kocke deluju normalni i smičući naponi na šest ravni, od kojih su svake dve međusobno paralelne. [7]



Sl. 1. Naponi u tački

Prema datoj slici, postoje tri međusobno upravne ravni u kojima su smičući naponi jednaki nuli, a normalni naponi su glavni naponi označeni sa σ_1 , σ_2 i σ_3 [8,9].

Matematički gledano, veličine glavnih napona su tri međusobno nezavisne veličine, što znači da ovi naponi mogu biti tri proizvoljne vrednosti sa istim ili različitim predznacima. [10]

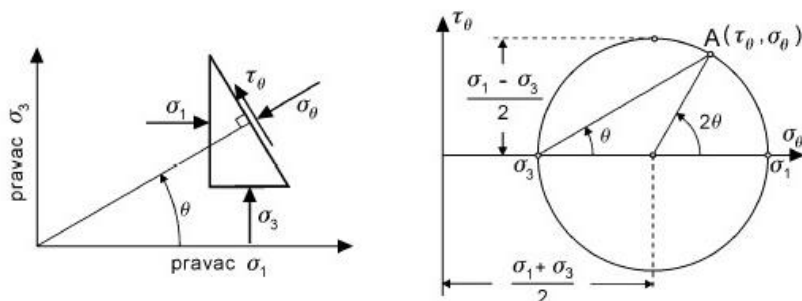
U praksi se često analiziraju stanja napona u dve dimenzije, tj. ravno stanje deformacija, kada su naponi upravni na razmatranu ravan po veličini negde između maksimalnog i minimalnog glavnog napona.

Dakle, postoji normalni napon σ_z , ali su tangencijalni naponi τ_{zx} i τ_{zy} jednaki nuli. Problemi ove vrste su veoma česti u mehanici tla.

Jedna od važnijih veličina, koje figurišu u ovakvom pristupu, je razlika glavnih napona ($\sigma_1 - \sigma_3$) koja se naziva devijatorom napona. [8,9]

Ako su date veličine i pravci glavnih napona σ_1 i σ_3 , prema slici 2, moguće je izračunati normalni napon i napon smicanja u ravni sa proizvoljnom orijentacijom korišćenjem uslova ravnoteže.

Jednačine koje u potpunosti opisuju naponsko stanje definišu jednačinu Morovog kruga (slika 2). [10] Svaka tačka A predstavlja stanje napona koji deluju na ravan čija normala zaklapa pravac Θ sa pravcem maksimalnog glavnog napona.



Sl. 2. Opis napona Morovim krugom

Jednačine normalnog i tangencijalnog napona pri smicanju su:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \quad (1)$$

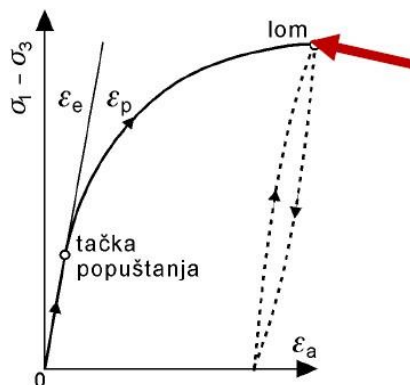
$$\tau_{\theta} = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \quad (2)$$

Iz pomenutih izraza i sa slike 2 može se videti da je maksimalni napon smicanja τ_{\max} uvek jednak $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, odnosno da je maksimalni smičući napon jednak poluprečniku Morovog kruga napona. Taj napon deluje u ravnima koje zaklapaju ugao od $\pm 45^\circ$ u odnosu na pravac maksimalnog glavnog napona.

Veoma često je poželjno na jednom dijagramu opisati više naponskih stanja u različitim tačkama mase tla ili sukcesivnu promenu naponskog stanja u nekom posmatranom elementu tla ili u uzorku tla. Prikazivanje stanja napona tačkom omogućava da se sukcesivne promene totalnih i efektivnih napona u σ - τ dijagramu, opišu jednom linijom koja se naziva putanja napona.

Smičuća čvrstoća tla predstavlja najveći smičući napon koji se može naneti strukturi tla u određenom pravcu. Smičući naponi povećavaju deformacije do granične maksimalne veličine napona koja predstavlja smičuću čvrstoću tla.

Kada je dostignut najveći smičući napon, praćen plastičnim deformacijama, kaže se da je došlo do loma, pri čemu je mobilisana sva smičuća čvrstoća tla, slika 3. [2,5] Tada smičući naponi imaju tendenciju da pomere deo mase u odnosu na ostalu masu tla ukoliko je lom lokalizovan samo u ravni smicanja tj. gde se pojavljuje klizna površ.



Sl. 3. Zavisnost smičućeg napona od plastične deformacije do loma [5]

3. ISPITIVANJE SMICANJA U TRIAKSIJALNOM APARATU

Ispitivanje smicanja vrši se na triaksijalnom aparatu, kojih ima različitih konstrukcija, ali se svi zasnivaju na istom principu.

Neporemećeni uzorak u obliku valjka postavi se vertikalno na postolje i izloži se bočnom pritisku tečne mase sa svih strana, a zatim vertikalnom pritisku

koji se postupno povećava, dok se ne izazove lom uzorka po površini najmanjeg otpora smicanja. Na osnovu čvrstoće smicanja pri lomu izračunavaju se kohezija i ugao unutrašnjeg trenja tla.

Triaksijalni aparati se prema nameni mogu svrstati u tri grupe: za sitnozrna, srednjozrna i krupnozrna tla.

Za sitnozrna tla, u koja spadaju glina, prašina i pesak, upotrebljavaju se triaksijalni aparati za uzorke malog prečnika, većinom $\varnothing=3,8$ cm, visine $h=2,0-2,5$ \varnothing najčešće 7,6 cm. [1]

Za srednjozrna tla, u koja spadaju gline sa peskom i sitnim šljunkom do veličine 3 cm, upotrebljavaju se aparati za uzorke prečnika 7 do 10 cm, visine, $h=2,0-2,5$ \varnothing najčešće 14 cm odnosno 20 cm. [1]

Za krupnozrna tla, u kojoj spadaju šljunak i drobina do veličine zrna 20 cm, upotrebljavaju se veliki triaksijalni aparati za uzorke prečnika 50, 75 i 100 cm, visine najčešće $h = 2 \varnothing$. [1]

Međutim, danas se rade triaksijalni aparati koji se mogu upotrebljavati za uzorke sitnozrnog i srednjozrnog tla prečnika $\varnothing=3,5-10,0$ cm, s tim što su oni tako konstruisani da se u njih mogu po potrebi uključiti i odgovarajuće ćelije.

4. KONSOLIDOVANI NEDRENIRANI ILI „CU“ OPIT TRIAKSIJALNE KOMPRESIJE

Nedrenirani opiti sa konsolidacijom, nazvani „CU“ opiti (consolidated and undrained tests). Opiti se vrše sa konsolidacijom uz dreniranje uzorka za vreme primene svestranog pritiska sve dok se pritisak porne vode ne izjednači u celom uzorku, što traje nekoliko časova, u zavisnosti od vrste tla.

Ovi opiti se najčešće primenjuju, jer najviše odgovaraju naponskom stanju u prirodnom tlu. Vrše se za koherentna i nekoherentna tla.

Opit se sprovodi na prirodno zasićenim uzorcima ili na uzorcima koji se zasićuju vodom pre opterećenja. Meri se porni pritisak i mogu se odrediti parametri smičuće čvrstoće za efektivne napone.

Opit se izvodi tako da se u prvoj fazi omogućava dreniranje i promena zapremine na račun istisnute vode iz uzorka koja se meri u bireti pri otvorenom ventilu i zatvorenom ventilu. Pri tome se meri promena zapremine u funkciji vremena i registruje se proces konsolidacije. Nakon završetka primarne konsolidacije u drugoj fazi se nanosi aksijalni pritisak kontrolisanom brzinom i meri se promena pornih pritisaka u funkciji aksijalne deformacije.

Problem nepotpunog zasićenja i tačnosti merenja pornih pritisaka se u određenim okolnostima može rešiti dopunskim zasićenjem i primenom sistema povratnog hidrostatičkog pritiska koji se preko porozne ploče nanosi u uzorak uz istovremeno i jednako povećanje svestranog napona u prvoj fazi opita.

Rezultati ovog opita mogu se prikazati Morovim krugovima totalnih napona i efektivnih napona.

5. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA DOBIJENIH REZULTATA

U ovom radu biće prikazani rezultati dobijeni konsolidovanim nedreniranim „CU“ opitom, koji su izvedeni na triaksijalnom aparatu firme GDS instruments, iz Velike Britanije [11], koji se nalazi u Laboratoriji za geomehaniku Instituta za rudarstvo i metalurgiju u Boru.

Triaksijalni automatizovani aparat je sistem za triaksijalno testiranje zasnovan na opterećenju. Sistem je konfigurisan izborom iz niza ramova opterećenja, triaksijalne ćelije, kontrolera pritiska i softvera. Korisnik može sam da izabere okvir opterećenja, kontrolere pritiska, i triaksijalnu ćeliju. Softver direktno kontroliše ćeliju i povratni pritisak, kao i brzinu testiranja za upravljanje svim prikupljenim podacima. Automatska kontrola omogućava stalni nastavak testova i povećanje propusnosti testova. Aparat ima niz standardnih podešavanja kako bi pomogao korisniku da identifikuje ispravnu postavku. Podešavanja su zasnovana na pritisku na kojem će sistem raditi.

Materijali, koji su korišćeni za triaksijalno „CU“ ispitivanje su uzorkovani sa tla čije su karakteristike date u tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike uzoraka

Broj uzorka	1
Dužina, mm	100
Prečnik, mm	50
Sadržaj vlage, %	25,81
Nasipna jedinična težina, kN/m ³	19,96
Suva jedinična težina, kN/m ³	15,86

Materijal se uzorkuje cilindrom, dimenzija 100 x 50 mm. Uzorak se istisne i ugradi u gumenu membranu, koja se na krajevima pričvršćuje gumenim prstenovima za laku ploču (kapu). Potom se odozgo na uzorak postavi cevčica sa pločicom za dovod vode pod pritiskom. Tako pripremljeni materijal se ugradi u tri cilindrične ćelije od pleksiglasa. Ćelije se pričvrste velikim zavrtnjima za poklopac i u njih se pusti voda.

Kada je cilindar ispunjen vodom, može se primeniti bočni pritisak na uzorak. Veličina bočnog pritiska se može podesiti prema potrebi. U ovom slučaju je za prvi korak merenja primenjen bočni pritisak od 50 kPa. Tokom primene ovog pritiska, preko računara se može očitavati grafika zavisnosti pornog pritiska od vremena. U ovoj fazi se može očitati i parametar B, koji se određuje merenjem pritiska porne vode Δu za različite priraštaje svestranog pritiska $\Delta\sigma_3$ u ćeliji triaksijalnog aparata. Cilj je da parametar B dostigne vrednost oko 0,95 i tada možemo reći da je uzorak zasićen. Ovo predstavlja prvu fazu „CU“ opita.

Ako je parametar B manji od 0,95 prelazi se na sledeći korak.

To je korak u kome se ide na drugi stepen zasićenja. Preko uređaja, koji služi za nanošenje povratnog hidrostatskog pornog pritiska, nanosi se kontrolisana veličina hidrostatskog pritiska u unutrašnjosti uzorka, kako bi se najveći deo vazduha između membrane i uzorka i u porama istisnuo, a ostatak rastvorio u pornoj vodi. Prilikom primene povratnog pornog pritiska, mora se voditi računa da se njegova veličina bira tako da ne menja veličinu efektivnog napona, što zahteva istovremeno povećanje svestranog pritiska za istu veličinu. U našem slučaju, zadržana je vrednost bočnog pritiska od 50 kPa, i aplikovan je povratni hidrostatski pritisak od 30 kPa. Ovaj korak se primenjuje sve dotle dok se vrednost pornog pritiska ne ustali odnosno smanji. Vrednost pornog pritiska možemo očitati tokom samog procesa na dijagramu vreme-porni pritisak.

Ako i nakon ovog koraka zasićenje uzorka nije potpuno, potrebno je ponovo primeniti samo bočni pritisak na sam uzorak. Isključuje se vod sa povratnim pritiskom, a na uzorak se nanosi veći bočni pritisak. U našem slučaju, bočni pritisak je povećan na 100 kPa. Tokom procesa se proverava vrednost parametra B. Ako parametar B dostigne vrednost 0,95 prekidamo ovaj korak i nastavljamo sa ogledom. U slučaju da parametar B nije dostigao željenu vrednost, potrebno je ponoviti drugi korak zasićenja uzorka, uz primenu hidrostatskog pritiska u unutrašnjosti uzorka.

Kada parametar B dostigne željenu vrednost, znači da je proces zasićenja završen i da se može preći na proces konsolidacije. U procesu konsolidacije povećava se ćelijski pritisak. U ovom koraku dolazi do smanjenja zapremine uzorka, što možemo očitati na dijagramu promene zapremine u jedinici vremena.

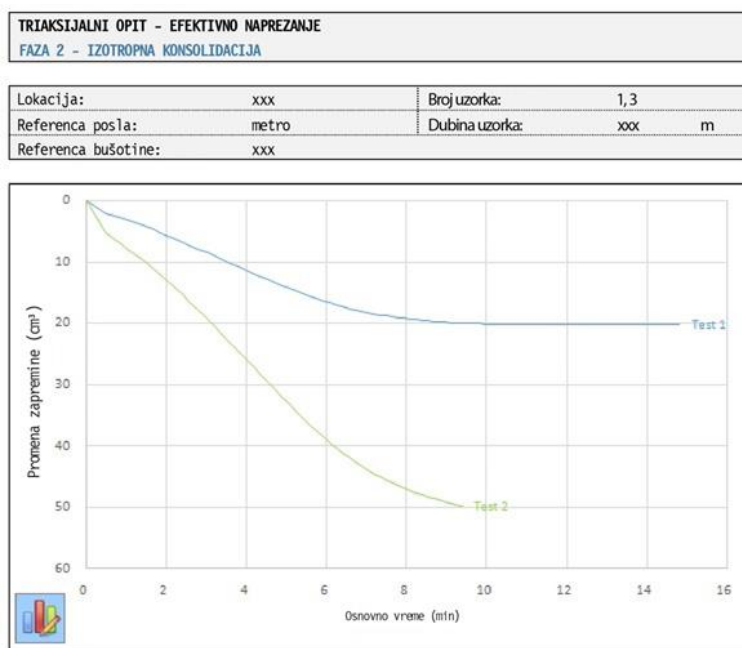
Nakon završetka procesa konsolidacije i pre početka nanošenja aksijalnog opterećenja, otvara se ventil, kako bi se merio porni pritisak tokom deformisanja do loma.

Princip nanošenja aksijalnog opterećenja je sledeći:

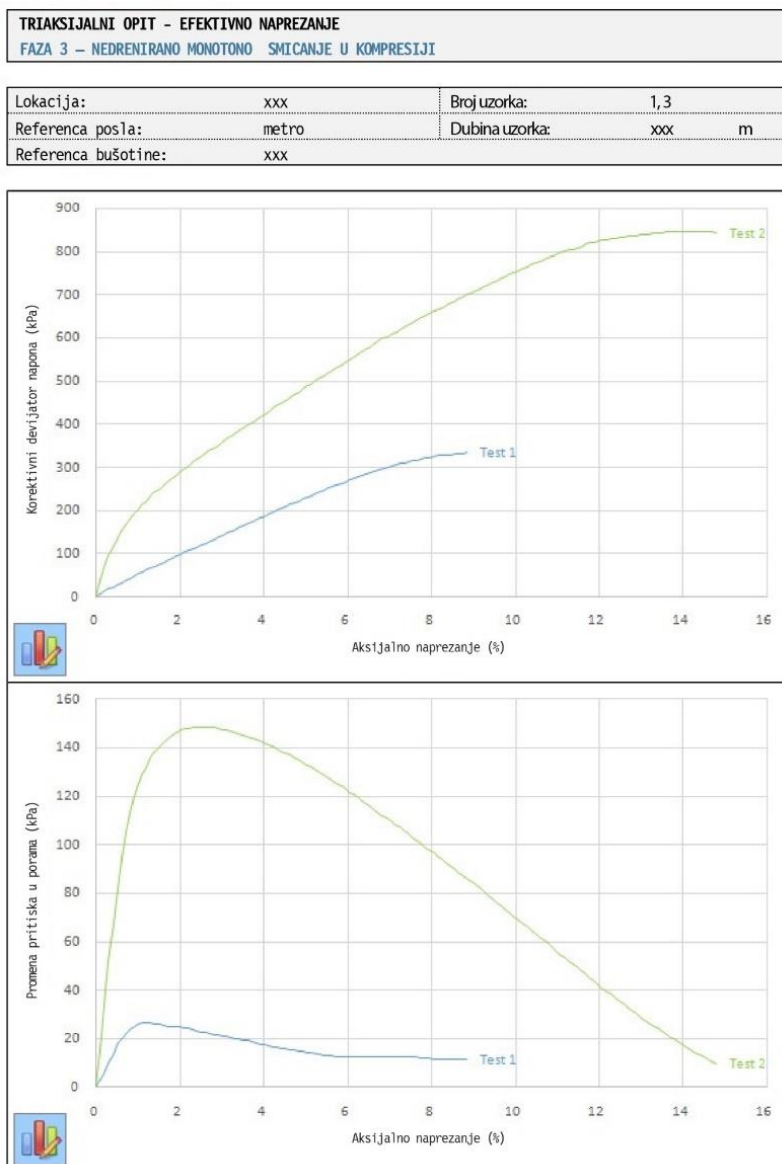
Uz pomoć numeričkog selektora koji se nalazi na prednjoj ploči, podešava se početna brzina (mm/min) u skladu sa vrstom ispitivanja koja će se obaviti. Prema izabranoj brzini, mikroprocesor prenosi impulse koji aktiviraju elektronsku ploču, i obezbeđuju konstantno kretanje pokretne poprečne grede. Nanošenje opterećenja ide sve dotle dok se na uzorku ne registruju deformacije loma uzorka.

Za kompletan opit se najčešće ispituju najmanje 3 uzorka sa različitim veličinama svestranih (bočnih) pritisaka σ_3 u ćeliji. U suštini, prvi uzorak se izlaže najmanjim usvojenim naponima, drugi sa najmanje dvostrukom veličinom pritiska primenjenim na prvom uzorku, treći sa najmanje dvostrukom veličinom pritiska upotrebljenim za drugi uzorak.

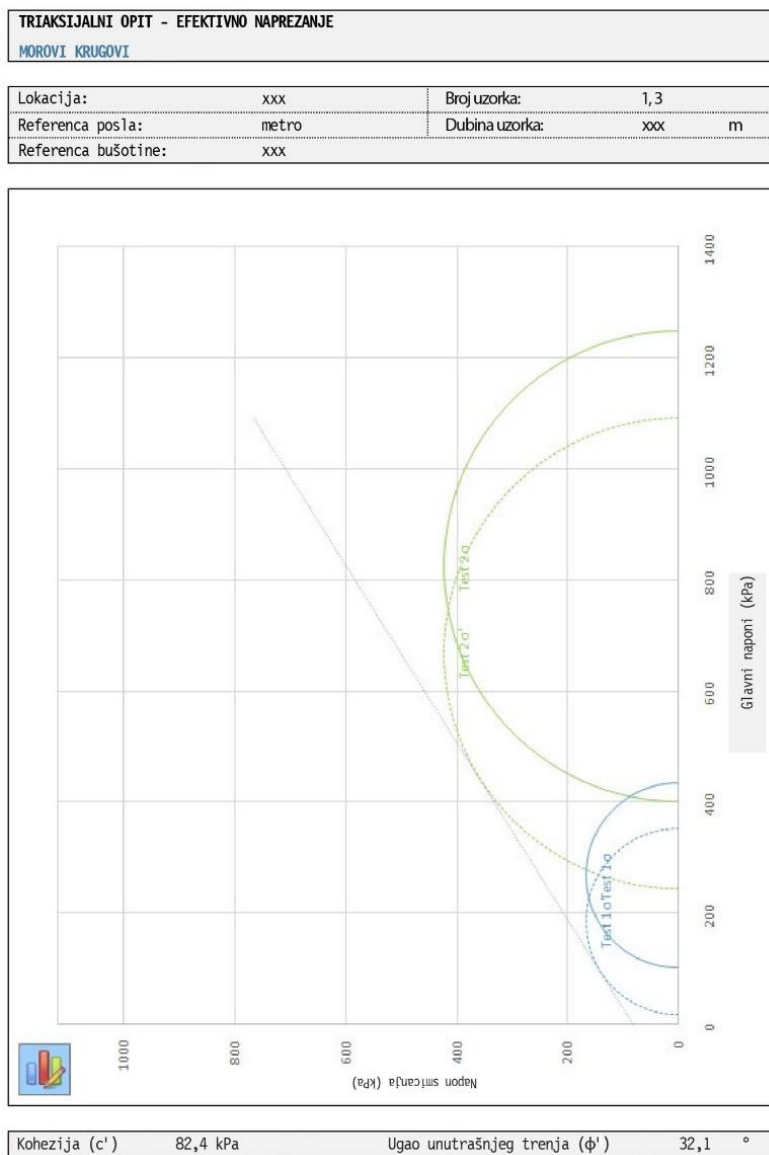
Grafički prikazi dobijenih rezultata triaksijalnog opita za uzorak 1 prikazani su na slikama od 4 do 6.



Sl. 4. Grafički prikaz rezultata triaksijalnog opita - izotropna konsolidacija za uzorak 1



Sl. 5. Grafički prikaz rezultata triaksijalnog opita - nedrenirano monotono smicanje u kompresiji za uzorak 1



Sl. 6. Grafički prikaz rezultata triaksijalnog opita – Morovi krugovi za uzorak 1

Kod procesa konsolidacije dolazi do promene zapremine u vremenu. Na uzorak deluju bočni pritisci i smanjuju mu zapreminu odnosno vrše njegovo sabijanje. Onog trenutka kada se uzorak prilagodio i više ne reaguje na delovanje bočnih pritisaka, znači da je došlo do konsolidacije. Na slici 4 je prikazana promena zapremine u vremenu. Dolazi do promene zapremine u

vremenu zbog delovanja bočnih pritisaka. Kada se uzorak prilagodio bočnim pritiscima linija počinje da bude ravna što znači da je došlo do konsolidacije. Na slici 4 su prikazana dva probna tela Test 1 i Test 2.

Nakon procesa konsolidacije sledi proces loma i o tome govori grafički prikaz na slici 5. Na uzorak se deluje i bočno i aksijalno. To znači da uzorak počinje da se stiska, i na taj način se vrši i njegovo smicanje. Na prvom delu grafika na slici 5 imamo korektivni devijator napona i aksijalno naprezanje. Korektivni devijator napona predstavlja razliku između bočnih pritisaka i aksijalnog napona. Aksijalno naprezanje predstavlja sabijanje uzorka, odnosno koliko je njegovo smanjenje. Grafik pokazuje koliko je uzorak sabijen dok nije pukao. Napon raste, a samim tim raste i aksijalno pomeranje i smanjuje se visina uzorka. Onog trenutka kada se linija ispravi uzorak se polomio. Na dalje bi linija opadala.

Drugi deo grafika je promena pornog pritiska i aksijalno pomeranje. Porni pritisak predstavlja otpor vode prilikom pritiskanja uzorka. Dok se pritiska uzorak, voda vrši otpor i što je pritisak veći samim tim i porni pritisak je veći. Kada uzorak krene da se lomi linija počinje da pada, a voda u uzorku napušta sam uzorak. Voda je napustila uzorak, pošto je došlo do loma i pošto je brzina nanošenja opterećenja veća.

Na slici 5 su prikazana dva probna tela Test 1 i Test 2.

I na kraju, grafik prikazan na slici 6 (Morovi krugovi) predstavlja krajnji rezultat ispitivanja. On nam je potreban radi nalaženja kohezije i ugla unutrašnjeg trenja. Isprekidani krugovi označavaju efektivne napone, odnosno napone koje primi sam uzorak bez vode. Puni krugovi označavaju totalne napone odnosno napone koje primi uzorak sa pornim pritiskom, Δu . Ugao unutrašnjeg trenja je ugao koji zaklapa tangenta sa x osom. A kohezija se očitava na y osi i ona se nalazi u tački dodirivanja tangente i y ose.

Na osnovu izvršenog ispitivanja i prikazanih grafika, dobijeno je da za uzorak 1, kohezija iznosi 82,4 kPa, a ugao unutrašnjeg trenja je 32,1 stepen, što ukazuje da je uzorak 1 kompaktniji i tvrdi, odnosno dobijeni rezultati nam ukazuju da se radi o laporovitom uzorku. Što je veća vrednost kohezije to je materijal čvršći i kompaktniji. Samim tim je i sila loma veća.

6. ZAKLJUČAK

Triaksijalni opit je najprecizniji opit za određivanje unutrašnjeg otpora tla (kohezije i ugla unutrašnjeg trenja). Ova vrsta opita („CU“) se najčešće primenjuje, jer najviše odgovara naponskom stanju u prirodnom tlu. Vrše se na koherentnom i nekoherentnom tlu. Pošto nedrenirani opiti sa konsolidacijom uz merenje pritiska porne vode daje praktično iste rezultate kao i ostale vrste triaksijalnih opita, ovaj opit se i najčešće primenjuje.

Smičuća čvrstoća tla se ispituje radi izgradnje objekata čije je opterećenje veće nego obično. Naročito je bitna za ispitivanje kada postoji promena bočnih pritisaka po dubini. Kod izgradnje privrednih i stambenih objekata, brana, nasipa, metroa, „CU“ opiti se najčešće primenjuju, jer najviše odgovaraju naponskom stanju u prirodnom tlu.

Kod ovih ispitivanja uzorak se stavlja u ćeliju triaksijalnog aparata, opterećuje pritiskom sa svih strana, a zatim se opterećuje povećanjem aksijalnog napona do loma, pri čemu su radijalni naponi konstantni. U toku opita pod raznim uslovima registruju se naponi i deformacije uzorka i na osnovu dobijenih podataka izračunava se čvrstoća tla pri pritisku.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja, zaključuje se da je ispitivani uzorak više laporovit, da ima visoke vrednosti kohezije i ugao unutrašnjeg trenja.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada u 2023. godini za Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, br. 451-03-47/2023-01/ 200052.

LITERATURA

- [1] R. Obradović, N. Najdanović, *Mehanika tla u inženjerskoj praksi*, Treće dopunjeno i prošireno izdanje, Rudarski institut Beograd - Zemun, 1999, str. 1-19.
- [2] M. G. Uljarević, *Mehanika tla od teorije do prakse*, AGM knjiga doo Beograd – Zemun, 2019, str. 21-28.
- [3] W. Powrie, *Soil Mechanics*, 2nd Edition, Spon Press, Abingdon, Oxon, USA, 2004, p. 702.
- [4] W. T. Lambe, Robert V. Whitman. *Soil Mechanics*, Wiley, 1991, p. 29.
- [5] S. Kostić, *Mehanika stijena i tla*, Skripta, Univerzitet u Banja Luci, Rudarski fakultet, 2014, str. 203-241.
- [6] N. Doneva, *Principi stabilizacije stenskog masiva nakon izrade podzemne prostorije*, Podzemni radovi, br. 17, 2010, str. 13-19.
- [7] *Naponi i deformacije*, Predavanja iz mehanike tla, Rudarsko-geološki fakultet Beograd, 2021, str. 1-22.
- [8] S. Jocković, *Čvrstoća tla*, Građevinski fakultet Beograd, 2021, str. 1-15.
- [9] M. M. Maksimović, *Mehanika tla*, četvrto izdanje, AGM knjiga doo Beograd – Zemun, 2008, str. 90-95.
- [10] S. Brčić, *Otpornost materijala*, Državni univerzitet u Novom Pazaru, 2016, str. 26-57.
- [11] <https://www.gdsinstruments.com/gds-products/type/static-triaxial-testing>