

Jednoosna tlačna i nedrenirana posmična čvrstoća tla

Doria Baletić¹, prof. dr. sc. **Danijela Jurić Kačunić²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, doria.baletic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, danijela.juric.kacunic@grad.unizg.hr

Sažetak

Jednoosna tlačna i nedrenirana posmična čvrstoća tla spadaju u najvažnije parametre tla u geotehničkom inženjerstvu. Određuju se nekonsolidiranim nedreniranim troosnim pokusom i pokusom s padajućim šiljkom. Jednoosna tlačna čvrstoća tla je najveće tlačno naprezanje koje tlo može preuzeti prije sloma, u dreniranim uvjetima, a nedrenirana posmična čvrstoća tla predstavlja najveće posmično naprezanje koje tlo može preuzeti prije sloma u nedreniranim uvjetima. U ovom radu, na primjeru modularne gline prikazani su i uspoređeni rezultati laboratorijskih pokusa kojima se ti parametri određuju prema hrvatskim normama.

Ključne riječi: nedrenirana čvrstoća, jednoosna tlačna čvrstoća, preša, troosni uređaj, uređaj padajućeg šiljka

Uniaxial compressive and undrained shear strength of soil

Abstract

Uniaxial compressive strength and undrained shear strength are among the most important soil parameters in geotechnical engineering. The unconsolidated undrained triaxial test and the falling cone test determine them. The uniaxial compressive strength of soil is the maximum compressive stress that the soil can withstand before failure in drained conditions. In contrast, the undrained shear strength of the soil represents the maximum shear stress that the soil can withstand before failure in undrained conditions. In this paper, using modular clay as an example, the results of laboratory tests that determine these parameters according to Croatian standards are presented and compared.

Key words: undrained strength, uniaxial compressive strength, press, triaxial device, fall cone device

1 Uvod

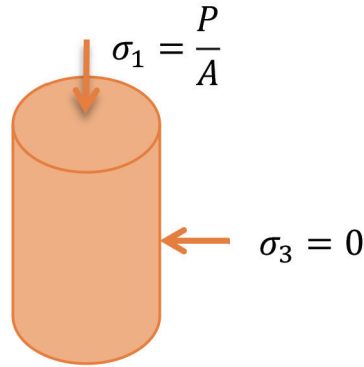
U suvremenom geotehničkom inženjerstvu, razumijevanje svojstava tla, metoda testiranja i interpretacija dobivenih rezultata ima značajnu ulogu kod sigurnog projektiranja i izvedbe zahvata u tlu kao što su temelji zgrada, nasipi, brane, potporne konstrukcije, tuneli i slično. Jedno od ključnih svojstava tla je njegova čvrstoća, koja predstavlja sposobnost tla da preuzme opterećenja bez gubitka nosivosti odnosno sloma. Kad se govori o čvrstoći tla potrebno je razlikovati pojmove jednoosne tlačne i nedrenirane posmične čvrstoće.

Jednoosna tlačna čvrstoća tla q_u predstavlja najveće tlačno naprezanje koje tlo može preuzeti prije nego što dođe do sloma, u uvjetima kada se naprezanje nanosi duž jedne osi i kada je omogućeno dreniranje vode iz tla. Primjenjuje se za razumijevanje ponašanja tla u dugotrajnim analizama stabilnosti i nosivosti [1]. Nedrenirana posmična čvrstoća c_u tla predstavlja najveće posmično naprezanje koje tlo može preuzeti u uvjetima troosnog stanja naprezanja kada drenaža vode iz tla nije dopuštena [2]. Ovakvi uvjeti se pojavljuju prilikom radova u sitnozrnatim tlima zbog nemogućnosti dreniranja vode iz pora. To rezultira povećanjem purnog tlaka i smanjenjem efektivnih naprezanja, što može značajno utjecati na njegovu posmičnu čvrstoću. U krupnozrnatim tlima velike propusnosti, ovi uvjeti su rjeđi. Primjenjuje se za razumijevanje ponašanja tla pri kratkotrajnom ili brzom opterećenju kao što su potresi ili dinamički opterećeni temelji.

Jednoosna tlačna i nedrenirana čvrstoća tla mogu se odrediti terenskim i laboratorijskim pokusima [3,4]. Prema hrvatskim normama, jednoosna tlačna i nedrenirana čvrstoća određuju se u laboratoriju pokusom jednoosnog tlaka, nekonolidiranim nedreniranim troosnim pokusom i pokusom s padajućim šiljkom prema. U radu su prikazane osnovne značajke sva tri pokusa. S obzirom na to da se pokus jednoosnog tlaka može provesti u troosnom uređaju nametanjem nultog odnosno minimalnog bočnog tlaka, prikazana je usporedba rezultata ispitivanja gline za modeliranje nekonolidiranim nedreniranim troosnim pokusom i pokusom s padajućim šiljkom.

2 Pokus jednoosnog tlaka

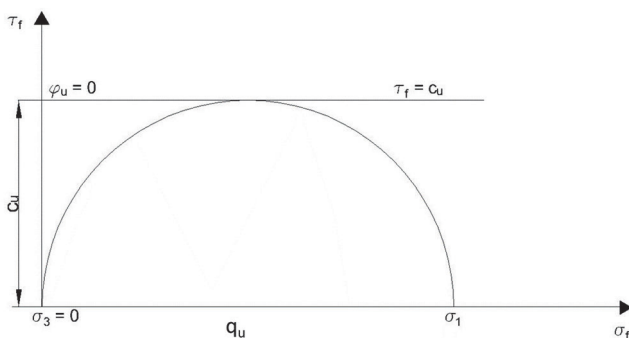
Pokus jednoosnog tlaka provodi se u uređaju koji omogućuje mjerenje promjene visine cilindričnog uzorka tla zbog nametnute promjene vertikalnog opterećenja. Uzorak tla nalazi se u jednoosnom stanju naprezanja i omogućeno mu je bočno širenje (slika 1).



Slika 1. Uređaj za provođenje pokusa jednoosnog tlaka i stanje naprezanja u uzorku

Pokus jednoosnog tlaka provodi se tako što se uzorak tla stavlja između dvije kape koje prenose vertikalnu silu P na uzorak. Povećanjem vertikalne sile, raste i normalno naprezanje na uzorku, dok istovremeno dolazi do smanjenja njegove visine. U trenutku kada uzorak doseže svoje maksimalno normalno naprezanje koje može podnijeti, dolazi do njegovog sloma. Bitna značajka ovog pokusa je da uzorak nije bočno pridržan, što znači da nema horizontalnih naprezanja. Uzorak se postavlja u jednoosno stanje naprezanja, gdje vertikalno naprezanje predstavlja najveće glavno naprezanje (σ_1), dok su drugo i treće glavno naprezanje (σ_2 i σ_3) jednaki nuli. Ipak, u realnim uvjetima, savršeno jednoosno stanje naprezanja postiže se uglavnom u središnjem dijelu uzorka. Na gornjoj i donjoj plohi uzorka mogu se pojaviti posmična naprezanja zbog trenja između uzorka i kapa za prijenos opterećenja. To može utjecati na mjerenja i rezultate pokusa, jer su ti posmični učinci izvan idealnog jednoosnog stanja naprezanja [5].

Najveća vrijednost normalnog naprezanja naziva se jednoosna tlačna čvrstoća i označava se sa q_u . Budući da u pokusu jednoosnog tlaka bočno ili najmanje glavno naprezanje (σ_3) iznosi nula, moguće je konstruirati samo jednu Mohrovu kružnicu pri slomu uzorka. Promjer ove kružnice jednak je jednoosnoj tlačnoj čvrstoći (slika 2).



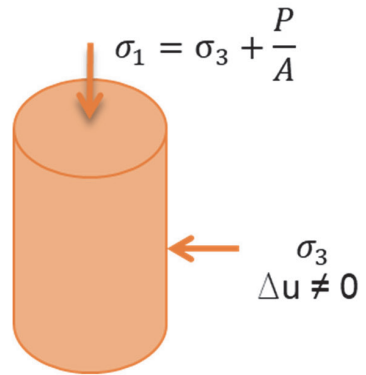
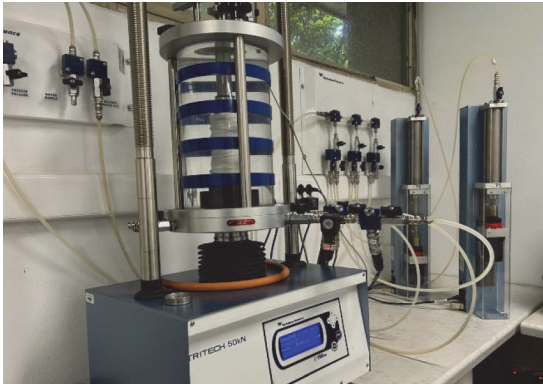
Slika 2. Mohrova kružnica pri slomu uzorka u pokusu jednoosnog tlaka

S obzirom na to da je jednoosna tlačna čvrstoća q_u jednaka promjeru kružnice, a nedrenirana posmična čvrstoća c_u jednaka radijusu kružnice, ove dvije čvrstoće su povezane izrazom:

$$c_u = \frac{1}{2} q_u \quad (1)$$

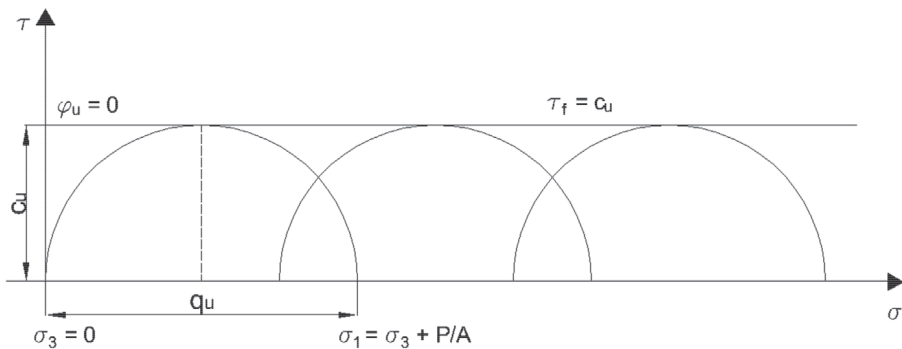
3 Nekonsolidirani nedrenirani troosni pokus

Nekonsolidirani nedrenirani troosni pokus (UU) provodi se u uređaju koji omogućuje mjerenje promjene visine cilindričnog uzorka tla uslijed promjene vertikalnog opterećenja. Uzorak se nalazi u osnosimetričnom stanju naprezanja, a prije nametanja inkremenata vertikalnog opterećenja nije omogućena disipacija porednog tlaka (slika 3). U ovom pokusu, uzorak tla obavijen je gumenom membranom i postavljen na postolje uređaja. Na uzorak se zatim postavlja gornja kapa, a gumeni membrana se hermetički brtvi s postoljem i kapom pomoću O-prstenova kako bi se izolirala od vode koja se nalazi u čeliji uređaja. Čelija se nakon toga puni vodom, stvarajući hidrostatski tlak koji djeluje jednako iz svih smjerova (čelijski tlak σ_3) na uzorak. Vertikalna sila P se neovisno povećava nakon primjene hidrostatskog tlaka, čime se inducira slom uzorka. Tijekom cijelog procesa, od nanošenja hidrostatskog tlaka do vertikalnog opterećenja, dreniranje vode iz uzorka nije dopušteno. Također, u ovom pokusu nije moguće mjeriti poredni tlak, što znači da se efektivni parametri čvrstoće tla ne mogu odrediti [5].



Slika 3. Troosni uređaj za provođenje UU pokusa i stanje naprezanja u uzorku

Kada je uzorak tla potpuno zasićen i brzina povećanja sile je dovoljno velika da stvori nedrenirane uvjete, svako povećanje normalnog naprezanja odgovara porastu poreznog tlaka unutar uzorka. U ovakvim okolnostima, efektivno naprezanje se ne mijenja, što znači da nema ni povećanja posmične čvrstoće. Pod takvim uvjetima, kut unutarnjeg trenja ϕ_u jednak nuli, a Coulombova anvelopa Mohrovih kružnica totalnih naprezanja pri slomu uzorka postaje horizontalni pravac koji tangira Mohrove kružnice. Ordinata tog pravca označava nedreniranu posmičnu čvrstoću c_u (slika 4).



Slika 4. Mohrove kružnice pri slomu uzorka kod UU pokusa

S obzirom na to da je devijatorsko naprezanje pri slomu $(\sigma_1 - \sigma_3)$ jednako promjeru kružnice, a nedrenirana posmična čvrstoća c_u jednaka radijusu kružnice, nedrenirana posmična čvrstoća iznosi:

$$c_u = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

4 Pokus s padajućim šiljkom

Pokus s padajućim šiljkom razvijen je u Skandinaviji za određivanje posmične čvrstoće potpuno poremećenog koherentnog tla [6]. Povezivanjem karakteristika i dubine prodiranja šiljka u uzorak tla Hansbo [7] je zaključio da je nedrenirana posmična čvrstoća tla u kN/m^2 izravno proporcionalna težini šiljka u kN i obrnuto proporcionalna kvadratu dubine prodiranja šiljka u uzorak tla u m^2 . Kao rezultat istraživanja predložio je izraz za nedreniranu posmičnu čvrstoću c_u :

$$c_u = c \frac{mg}{i^2} \quad (3)$$

gdje je:

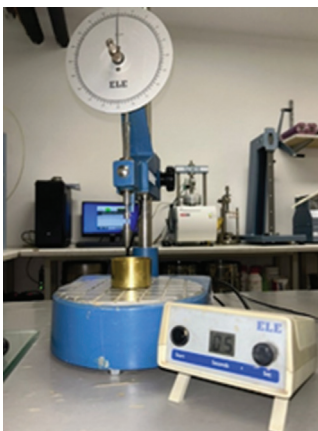
- c - konstanta šiljka
- m - masa šiljka
- g - gravitacijsko ubrzanje
- i - dubina prodiranja šiljka

Konstanta šiljka određuje se eksperimentalnim putem i ovisi o vrsti tla i kutu šiljka kojim se ispituje. U praksi vrijednosti konstante šiljka su:

c = 0.80 za kut šiljka 30°

c = 0.27 za kut šiljka 60°

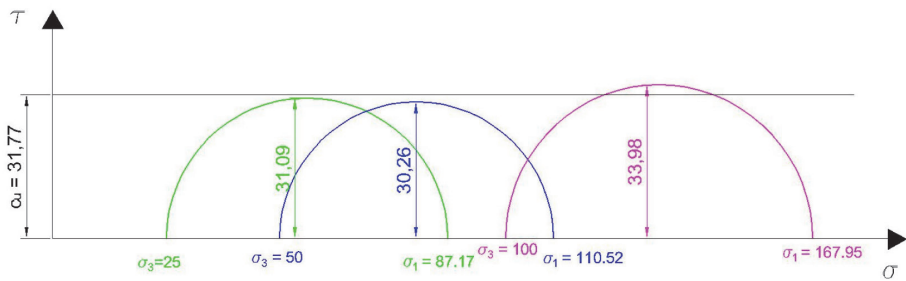
Ispitivanje se provodi uz pomoć Fall cone uređaja prikazanog na slici 5. Ovisno o stanju uzroka koji se ispituje (poremećen ili neporemećen), ispitivanje se provodi ugradnjom u posudu ili ispitivanjem dijela uzorka. Šiljak se postavlja na površinu uzorka te se otpušta. Ispitivanje traje 5 sekundi + 1 sekunda za kontrolu od nagnadnog potonuća šiljka. Očitana vrijednost predstavlja dubinu prodiranja u uzorak.



Slika 5. Fall cone uređaj – pokus s padajućim šiljkom

5 Rezultati ispitivanja

Provedeno je određivanje vrijednosti nedrenirane posmične čvrstoće na modularnoj glini provođenjem nekonsolidiranog nedreniranog UU pokusa i pokusa s padajućim šiljkom. U troosnom uređaju provedena su ispitivanja s čelijskim opterećenjima 25 kPa, 50 kPa i 100 kPa. Dobivene su vrijednosti nedrenirane čvrstoće 31.09 kPa, 30.26 kPa i 33.98 kPa. Prije ugradnje u troosni uređaj, na istom uzorku provedeno je ispitivanje padajućim šiljkom. Dobivene su vrijednosti nedrenirane čvrstoće 28.78 kPa, 31.00 kPa i 31.99 kPa. Dobiveni rezultati ispitivanja prikazani Mohrovim kružnicama na slici 6, a usporedba rezultata ispitivanja prikazana je u tablici 1.



Slika 6. Rezultati ispitivanja prikazani Mohrovim kružnicama

Tablica 1. Rezultati ispitivanja nedrenirane čvrstoće

Pokus s padajućim šiljkom [kPa]	UU pokus [kPa]	Odstupanje
28.78	31.09	8 %
31.00	30.26	2 %
31.99	33.98	6 %

6 Zaključak

Provedenim ispitivanjima, dobiveni su rezultati iz kojih je bilo moguće odrediti jednoosnu tlačnu i nedreniranu posmičnu čvrstoću tla. Troosnim uređajem i provođenjem UU pokusa, izravno se dobiva vrijednost nedrenirane čvrstoće. Do rezultata se najbrže dolazi korištenjem pokusa s padajućim šiljkom, ali je potrebno je paziti da ne dođe do naknadnog propadanja šiljka. Pogreška se može dogoditi i tijekom odabira konstante šiljka, koja ne mora nužno biti ona najčešće korištena. Navedene metode imaju različite teoretske osnove, postupke ispitivanja i mjerenja podataka zbog čega su odstupanja u rezultatima očekivana i prihvatljiva.

Literatura

- [1] Lebo, Ž., Bačić, M., Jurić-Kačunić, D., Kovačević, M. S.: *Zagrebačka glina poboljšana raznim vezivima*, GRAĐEVINAR, 73 (2021) 9, pp. 871-880
- [2] Karakan, E. (2023). *Influence of clay mineralogy on undrained shear strength using Fall cone test*, GRAĐEVINAR, 75 (7), 642-652.
- [3] O'Kelly, B.C.: *Fall-cone strength testing of municipal sludges and residues*, Environmental Geotechnics, 5 (2018)1, pp. 18-30.
- [4] Shimobe, S., Spagnoli, G.: *Relationships between undrained shear strength, liquidity index, and water content ratio of clays*, Bull Eng Geol Environ, 79 (2020), pp. 4817–4828.
- [5] Head, K.H.: *Manual of Soil Laboratory Testing. Volume 3, Effective Stress Tests*, Pentech Press, London, 2004.
- [6] Swedish State Railways: *Statens Jarnvagar Geotekniska Meddelanden 2*. Geotechnical Commission of the Swedish State Railways, 1914–1922, final report, 1922.
- [7] Hansbo, S.: *A new approach to determining the shear strength of clay by the fall-cone test*, Proceedings of Royal Swedish Geotechnical Institute, 1957.