

Primljen / Received: 23.5.2013.
 Ispravljen / Corrected: 28.12.2013.
 Prihvaćen / Accepted: 6.3.2014.

Dostupno online / Available online: 10.4.2014.

Utjecaj početnih uvjeta na čvrstoću nezasićenog zbijenog lesnog tla

Autori:



Dr.sc. **Gordana Hadži-Niković**, dipl.ing.geol.
 Sveučilište u Beogradu
 Rudarsko-geološki fakultet
ghnikovic@rgf.bg.ac.rs



Prof.dr.sc. **Slobodan Ćorić**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Beogradu
 Rudarsko-geološki fakultet
sloba.coric@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Laslo Čaki**, dipl.ing.geol.
 Sveučilište u Beogradu
 Rudarsko-geološki fakultet
laslo.caki@rgf.bg.ac.rs

Prethodno priopćenje

Gordana Hadži-Niković, Slobodan Ćorić, Laslo Čaki

Utjecaj početnih uvjeta na čvrstoću nezasićenog zbijenog lesnog tla

U radu je prikazan utjecaj granulometrijskog sastava, početne vlažnosti, suhe zapreminske težine i veličine kapilarnog usisa na uvećanu čvrstoću smicanja nezasićenog zbijenog prašinstog lesnog tla. Čvrstoća nezasićenog tla je određena na osnovi eksperimentalno ispitanih ovisnosti vlažnost-kapilarni usis i efektivnih parametara čvrstoće smicanja zasićenog tla, c' , φ' . Pokazano je da s povećanjem veličine zrna u tlu, opada utjecaj kapilarnog usisa, vlažnosti i suhe zapreminske težine na čvrstoću nezasićenog zbijenog tla.

Ključne riječi:

nezasićeno tlo, kapilarni usis, čvrstoća smicanja, početni uvjeti, zbijeno tlo

Preliminary note

Gordana Hadži-Niković, Slobodan Ćorić, Laslo Čaki

Effect of initial conditions on strength of unsaturated compacted loess soil

The influence of grain size distribution, initial moisture, dry bulk density, and capillary suction on an increase in shear strength of unsaturated compacted silty loess soil is presented in the paper. The unsaturated soil strength is determined via the experimentally determined dependencies between the moisture-capillary suction and the effective shear strength parameters for saturated soil, c' , φ' . It is demonstrated that the influence of capillary suction, moisture and dry bulk density on the strength of unsaturated compacted soil reduces with an increase of grain size in soil.

Key words:

unsaturated soil, capillary suction, shear strength, initial conditions, compacted soil

Vorherige Mitteilung

Gordana Hadži-Niković, Slobodan Ćorić, Laslo Čaki

Einfluss der Anfangsbedingungen auf den Widerstand ungesättigten verdichteten Lössbodens

In dieser Arbeit ist der Einfluss der Kornzusammensetzung, der Ausgangsfeuchte, der Rohdichte und der kapillaren Saugwirkung auf die erhöhte Scherfestigkeit von ungesättigtem verdichtetem schluffigem Lössboden dargestellt. Der Widerstand des ungesättigten Bodens wird aufgrund der experimentell ermittelten Verhältnisse von Feuchtigkeit und kapillarer Saugwirkung und der effektiven Scherfestigkeitswerte c', j' des gesättigten Bodens bestimmt. Mit zunehmender Korngröße ist ein verringerter Einfluss der kapillaren Saugwirkung, der Feuchtigkeit und der Rohdichte auf den Widerstand ungesättigten verdichteten Bodens festgestellt.

Schlüsselwörter:

ungesättigter Boden, kapillare Saugwirkung, Scherfestigkeit, Anfangsbedingungen, verdichtet

1. Uvod

Nezasićena tla su prirodno nezasićena tla iznad nivoa podzemne vode kao i sva umjetno zbijena tla [1]. Ona su izložena kombiniranim promjenama količine vlage i zraka u porama. Sve promjene vlažnosti u nezasićenom tlu prati strujanje vode i zraka [2]. Nezasićeno tlo predstavlja četverofazni sustav koji se sastoji od čvrstih čestica, vode, zraka i kontaktne površine zrak-voda. Voda formira meniskuse sa zakrivljenim površinama u zoni kontakta sa čvrstim česticama, slično meniskusu koji nastaje pri izdizanju vode u kapilarnoj cijevi [3]. Površinsko naprezanje na kontaktnoj membrani zrak-voda osigurava manji pritisak vode u odnosu na vanjski pritisak zraka. Tada se kapilarni usis definira kao razlika između pritiska zraka s vanjske strane meniskusa (u_a), i pritiska vode unutar meniskusa (u_w), tj. kapilarni usis je $u_a - u_w$. Kapilarni usis u tlu povećava njegovu čvrstoću i time bitno smanjuje intenzitet sile aktivnog pritiska tla na potpurnu konstrukciju, a značajno povećava silu pasivnog otpora, kritičnu visinu vertikalnog iskopa, granično opterećenje tla kao i stabilnost padina i kosina. Konvencionalne analize bočnih pritisaka tla, dopuštenog opterećenja tla i stabilnosti kosina, naročito tla izgrađenog od prašinstih i prašinsto-glinovitih sedimenata ako se ne uzme u obzir kapilarni usis kao neovisna varijabla naprezanja, često daju nerealno niske faktore sigurnosti [1, 4].

Unatoč tome što se mnogi problemi u geotehničkoj praksi rješavaju upravo u nezasićenom tlu i što je dokazano da čak i mala veličina usisa povećava stabilnost padina, kosina [5] i visinu vertikalnih iskopa [6], mehanička svojstva nezasićenog tla se ne istražuju dovoljno. Razlog za to treba tražiti u činjenici da su rezultati dobiveni na osnovi geostatičkih analiza, provedenih koristeći parametre zasićenog tla, na strani sigurnosti, ali i u činjenici da su laboratorijska ispitivanja određivanja čvrstoće smicanja nezasićenog tla dugotrajna, skupa i zahtijevaju prilagodbu konvencionalne laboratorijske opreme.

U radu su prikazani rezultati određivanja čvrstoće smicanja nezasićenih lesnih sedimenata područja Beograda, na osnovi ovisnosti vlažnost-kapilarni usis, SWRC (eng. *soil water retention curve*) i efektivnih parametara čvrstoće smicanja zasićenog tla, c' , ϕ' , prema modelu Vanapallia [7]. Ovisnosti vlažnost – usis određene su na osnovi rezultata laboratorijskih pokusa istiskivanja vlage iz uzoraka tla pod različitim pritiscima u ekstraktoru s polupropustljivom pločom (15 bar Pressure Plate Extractor 1500 - Soilmoisture Equipment Corporation, Santa Barbara, California). Pokusi su provedeni prema normama Američkog društva za ispitivanje i materijale ASTM [8, 9].

Ispitivanja su se izvodila na umjetno pripremljenim uzorcima, i to iz dva razloga. Prvo, ispitivanja na umjetnim uzorcima su omogućila analizu utjecaja pojedinih čimbenika na karakteristične ovisnosti vlažnost-kapilarni usis i na čvrstoću smicanja zbijenog nezasićenog tla. Drugo, u nasipima koji se grade pod određenim zahtijevanim početnim uvjetima upravo

dolaze do izražaja svi fenomeni nezasićenog tla. Tla, koja su zbijena pri različitoj vlažnosti i do različite gustoće, promatraju se kao različita tla [10].

Na umjetno pripremljenim uzorcima lesnog tla: prašinstog, serije A, lesa s povećanim udjelom sitnozrnatih čestica serije B, i lesa s povećanim udjelom krupnozrnatih čestica serije C, provedena su ispitivanja koja su omogućila analizu utjecaja pojedinih čimbenika, kao što su granulometrijski sastav, početna vlažnost i struktura tla, na čvrstoću smicanja nezasićenog tla. Dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima inozemnih autora i dobivena su dobra slaganja [11].

2. Osnovne karakteristike nezasićenog tla

Dok se mehanička svojstva zasićenog tla određuju pomoću efektivnog naprezanja ($\sigma - u_w$), [12], kao jedinstvene varijable naprezanja, za određivanje mehaničkih svojstava nezasićenog tla nužne su dvije varijable naprezanja: neto normalno naprezanje ($\sigma - u_a$) i kapilarni usis ($u_a - u_w$) [13].

Primarna konstitucijska ovisnost, nužna pri interpretaciji mehaničkih svojstava nezasićenog tla, ovisnost je vlažnost-kapilarni usis ili stupanj zasićenosti - kapilarni usis, SWRC, [14]. Zbog sličnosti između utjecaja promjene kapilarnog usisa na promjenu stupnja zasićenosti na krivulji vlažnost-usis i utjecaja kapilarnog usisa, kao varijable naprezanja, na čvrstoću smicanja [15], uspostavljena je korelacija između ponašanja tla pri eksperimentalnom smicanju i ponašanja tla pri eksperimentalnom isušivanju u ekstraktoru [16]. Brojni autori su predlagali različite jednadžbe za čvrstoću smicanja nezasićenog tla na osnovi karakteristične ovisnosti vlažnost-kapilarni usis i efektivnih parametara čvrstoće smicanja zasićenog tla, c' , ϕ' [17, 18].

Parametri tla, bitni za određivanje nezasićene čvrstoće: pritisak prodiranja zraka ($u_a - u_w$)_{br}, rezidualni stupanj zasićenosti S_{rez} i indeks raspodjele pora λ , lako se mogu odrediti iz dijagrama vlažnost-kapilarni usis, ako se stupanj zasićenosti izrazi kao efektivni stupanj zasićenosti – S_e [19]:

$$S_e = \frac{S_r - S_{rez}}{1 - S_{rez}} \quad (1)$$

S_e - efektivni stupanj zasićenosti,

S_r - stupanj zasićenosti za određenu veličinu kapilarnog usisa određen iz pokusa u ekstraktoru,

S_{rez} - rezidualni stupanj zasićenosti, koji je jednak onoj veličini stupnja zasićenosti pri kojem daljnje povećanje kapilarnog usisa ne utječe na njegovu promjenu.

Da bi se definirala konstitucijska ovisnost vlažnost – kapilarni usis, potrebno je za određenu veličinu rezidualnog stupnja zasićenosti definirati ovisnost efektivnog stupnja zasićenosti o kapilarnom usisu, tako da za veličine kapilarnog usisa veće od pritiska prodiranja zraka, tj. $(u_a - u_w) > (u_a - u_w)_{br}$, ta ovisnost bude linearna. Tada je ovisnost efektivni stupanj zasićenosti – kapilarni usis definirana izrazom:

$$S_e = \left[\frac{(u_a - u_w)_b}{(u_a - u_w)} \right]^\lambda \quad (2)$$

gdje je λ – indeks raspodjele pora, koji se definira kao negativni nagib linearnog dijela ovisnosti efektivni stupanj zasićenosti – kapilarni usis.

Na osnovi tako dobivenih veličina efektivnog stupnja zasićenosti, S_e i efektivnih parametara čvrstoće smicanja zasićenog tla, c' i ϕ' , dobivene su ovisnosti čvrstoće smicanja nezasićenog tla o kapilarnom usisu [7]:

$$\tau_f = [c' + (\sigma - u_a) \tan \phi'] + (u_a - u_w) \tan \phi' S_e \quad (3)$$

τ_f – čvrstoća smicanja nezasićenog tla za veličinu kapilarnog usisa ($u_a - u_w$),

c', ϕ' – efektivni parametri čvrstoće smicanja zasićenog tla, $(\sigma - u_a)$ – neto normalno naprezanje,

$(u_a - u_w)$ – veličina usisa za koji se određuje čvrstoća smicanja nezasićenog tla

Parametar čvrstoće smicanja nezasićenog tla ϕ^b , u ovisnosti o veličini kapilarnog usisa ($u_a - u_w$), također se može izraziti preko efektivnog stupnja zasićenosti sljedećom jednadžbom [7]:

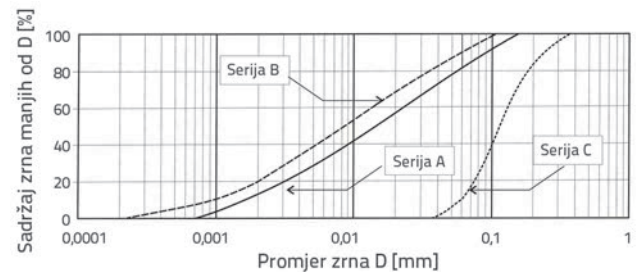
$$\tan \phi^b f_n(u_a - u_w) = S_e \tan \phi' \quad (4)$$

3. Karakteristike tla i program laboratorijskih ispitivanja

Radi utvrđivanja utjecaja granulometrijskog sastava, kao i početnih stanja vlažnosti i suhih zapreminskih težina, na čvrstoću nezasićenog zbijenog tla, odabrano je lesno tlo. U većem dijelu, zonu aeracije područja Beograda izgrađuju lesni sedimenti, često i više tipova lesa. Ti se slojevi često, tijekom izvođenja geotehničkih radova, pri izgradnji različitih objekata, moraju zbijati, a budući da su pri površini terena i ostaju u nezasićenom stanju, posebno je važno odrediti kako različita početna stanja ovih sredina utječu na njihovu čvrstoću u nezasićenom stanju. Zbog toga su sva ispitivanja provedena na lesnim sedimentima s područja Zemuna: na dominantno prašinstom lesu serije A, lesu s nešto povećanim udjelom sitnozrnatih čestica serije B i na lesu sa znatno povećanim udjelom krupnozrnatih čestica serije C. Rezultati identifikacijsko-klasifikacijskih ispitivanja uzoraka različitih serija prikazani su u tablici 1., a dijagrami granulometrijskog sastava na slici 1.

Tablica 1. Rezultati identifikacijsko-klasifikacijskih pokusa

Uzorak	γ	γ_d	w	G_s	e	S_r	w_L	I_p	Frakcija [%]		
	[kN/m ³]		[%]	-	-		[%]		< 0,002 [mm]	0,06 - 0,002 [mm]	> 0,06 [mm]
Serija A	16,4	14,2	16,0	2,70	0,901	45	32	10	12	70	18
Serija B	20,2	17,1	17,9	2,75	0,605	81	35	15	20	70	10
Serija C	17,5	15,0	16,7	2,74	0,827	55	24	7	-	10	90



Slika 1. Dijagrami granulometrijskog sastava za uzorke različitih serija

Za različita tla, serija A, B i C, najprije su pripremljeni umjetni uzorci, a zatim su na njima izvedeni pokusi dreniranja u ekstraktoru s polupropustljivom pločom radi određivanja SWRC, i pokusi direktnog smicanja na zasićenim uzorcima radi određivanja efektivnih parametara čvrstoće smicanja c' i ϕ' .

3.1. Priprema uzoraka

Radi pripreme umjetnih uzoraka, najprije su izvedeni pokusi određivanja optimalne vlažnosti prema normi SRPS [20]. Kada je određena optimalna vlažnost, w_{opt} , za svaku seriju, određeni su i parovi točaka na suhoj i vlažnoj grani, koji se razlikuju za po $\pm 2-3$ % vlažnosti u odnosu na optimalnu vlažnost. Tako su određena po tri para točaka s dijagrama Proctorovog pokusa za svaku seriju (suhi uzorak: w_s, γ_{ds} ; optimalno vlažan uzorak: w_{opt}, γ_{dmax} i vlažan uzorak: w_v, γ_{dv}). Zatim je pripremljena veća količina uzoraka s tim vlažnostima, jer svi pokusi koji su kasnije rađeni izvedeni su na prethodno pripremljenim uzorcima "zahtijevane" vlažnosti, a statičkim zbijanjem određene mase materijala u kalupe poznatih zapremina postignute su zahtijevane suhe zapremine težine uzoraka.

Pri dreniranju uzoraka u ekstraktoru s keramičkom pločom nije moguće prethodno opterećivanje uzoraka. S druge strane, prilikom određivanja efektivnih parametara čvrstoće CD pokusom direktnog smicanja, uzorci su izlagani vertikalnom naprezanju konsolidacije $\sigma = 50$ kPa. Da bi se prevladao problem različitosti uvjeta ispitivanja, uzorci koji su pripremljeni za ispitivanje u ekstraktoru "prekonsolidirani" su ekvivalentnim normalnim neto naprezanjem (tzv. pseudoneto normalnim naprezanjem) u edometaru tijekom 24 sata, kako bi nakon rasterećenja, vađenja "malih" uzoraka i postavljanja u ekstraktor imali isti koeficijent poroznosti kao da je obavljena konsolidacija pod opterećenjem $\sigma = 50$ kPa. Tako su formirani "umjetni" uzorci za dreniranje pod pritiskom u ekstraktoru i za CD pokuse direktnog smicanja, koji su za svaku seriju imali poznatu vlažnost, suhu zapreminsku

Tablica 2. Početni uvjeti za suhe, optimalno vlažne i vlažne zbijene uzorke različitih serija

Serije uzoraka	Početni uvjeti vlažnosti i suhe zapremine težine		
	Suhi uzorak	Optimalno vlažni uzorak	Vlažni uzorak
Serija A	$w_s^A = 15,0\%$ $\gamma_{ds}^A = 17,1 \text{ kN/m}^3$	$w_{opt}^A = 17,5\%$ $\gamma_{dmax}^A = 17,5 \text{ kN/m}^3$	$w_v^A = 20,0\%$ $\gamma_{dv}^A = 17,0 \text{ kN/m}^3$
Serija B	$w_s^B = 16,0\%$ $\gamma_{ds}^B = 16,8 \text{ kN/m}^3$	$w_{opt}^B = 19,0\%$ $\gamma_{dmax}^B = 17,2 \text{ kN/m}^3$	$w_v^B = 22,0\%$ $\gamma_{dv}^B = 16,2 \text{ kN/m}^3$
Serija C	$w_s^C = 11,5\%$ $\gamma_{ds}^C = 17,8 \text{ kN/m}^3$	$w_{opt}^C = 14,0\%$ $\gamma_{dmax}^C = 18,1 \text{ kN/m}^3$	$w_v^C = 16,5\%$ $\gamma_{dv}^C = 17,5 \text{ kN/m}^3$

težinu i koeficijent poroznosti. Identifikacijsko-klasifikacijski pokusi, Proctorovi pokusi, priprema uzoraka statičkim zbijanjem do zahtijevane gustoće, konsolidacija uzoraka u edometaru i CD pokusi direktnog smicanja izvedeni su u akreditiranom Laboratoriju za mehaniku tla Instituta za puteve u Beogradu, a prema nacionalnim SRPS normama. Pokusi dreniranja uzoraka u ekstraktoru, s keramičkim pločama različite poroznosti i pod različitim pritiscima, izvedeni su u Laboratoriju za fiziku zemljišta Poljoprivrednog fakulteta u Beogradu.

3.2. Dreniranje uzoraka u ekstraktoru s polupropustljivom pločom pod pritiskom

Radi određivanja ovisnosti između vlažnosti i kapilarnog usisa, provedena su ispitivanja uzoraka u ekstraktoru s polupropustljivom pločom. Princip pokusa dreniranja uzoraka u ekstraktoru s keramičkom pločom je sljedeći: ako se na uzorak vodom zasićenog tla primijeni određeni pritisak, on će istisnuti iz mase tla svu vodu koja je vezana za tlo jednakom ili manjom silom vezivanja vode. Znači, što je veći primijenjeni pritisak, to se iz tla istiskuje više vode, a istisnuta količina vode je uvijek proporcionalna naprezanju kojim se "drži" u tlu. Pokusi, čiji su rezultati izloženi u ovom radu, izvedeni su u ekstraktoru, pod različitim pritiscima, u rasponu od 20 do 1500 kPa. Keramičke ploče, koje su služile kao podloga uzorcima, imale su različite veličine pora, što je omogućilo veliki raspon veličina pritisa u uređaju. Ukupno su korištene četiri ploče različitih veličina pora. Pokusi su se izvodili prema normama Američkog društva za ispitivanje i materijale ASTM, za određivanje ovisnosti vlažnost – kapilarnost pomoću ekstraktora, i to: D 2325-68 za krupnozrnata i srednjezrnata tla i za veličine usisa od 10 do 100 kPa i D 3152-72 za sitnozrnata tla i za veličine usisa od 100 do 1500 kPa. Uzorci tla, promjera $D = 56,5 \text{ mm}$ i visine $H = 9,0 \text{ mm}$, zasićeni su kapilarnim penjanjem u posudi s destiliranom vodom do pojave slobodne vode na gornjoj površini uzoraka ili u vremenskom trajanju 24 sata. Zasićeni uzorci postavljani su na, također zasićenu, poroznu keramičku ploču u ekstraktoru. Tijekom zasićenja nije bilo kolapsa, manje bubrenje je primijećeno kod nekih uzoraka, ali nije uzeto u obzir prilikom određivanja stupnja zasićenosti. Nakon svih pokusa određene su, povratno, veličine stupnja zasićenosti za sve veličine kapilarnih usisa kojima su uzorci bili izloženi,

S. Rezultati pokusa dreniranja u ekstraktoru s keramičkom pločom tablično su i grafički prikazani u sljedećim poglavljima.

3.3. Određivanje čvrstoće smicanja zasićenog tla

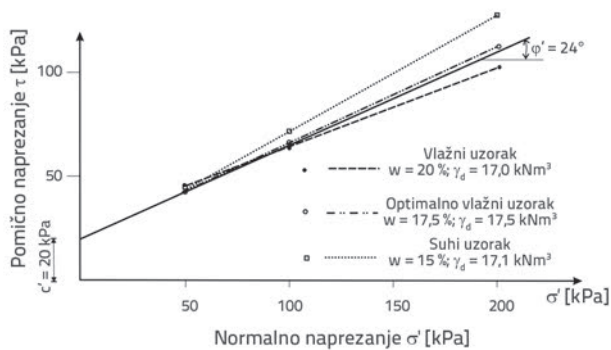
Parametri čvrstoće smicanja za efektivna naprezanja mogu se odrediti iz pokusa direktnog smicanja ili triaksijalne kompresije. Na osnovi rezultata prikazanih u korištenoj literaturi i po preporuci Vanapalli-a [21], obično se koristi CD pokus direktnog smicanja. Zbog toga su efektivni parametri smicanja određeni sporim CD pokusima direktnog smicanja prema normi SRPS [22].

Parametri čvrstoće smicanja za efektivna naprezanja, kohezija c' i kut unutrašnjeg trenja φ' , dobiveni su za statički zbijene uzorke s različitim početnim vlažnostima i različitim suhim gustoćama. Uzorci su konsolidirani pod naprezanjem od $\sigma = 50 \text{ kPa}$ tijekom 24 sata. Uzorci s unaprijed definiranim početnim uvjetima vlažnosti, gustoće i koeficijenta poroznosti ispitivani su pod normalnim naprezanjima od 50, 100 i 200 kPa. Smicanje konsolidiranih uzoraka je izvedeno brzinom koja je, s obzirom na to da je ispitivano prašinasto tlo, omogućavala dreniranje uzorka tijekom pokusa – 0,0125 mm/min.

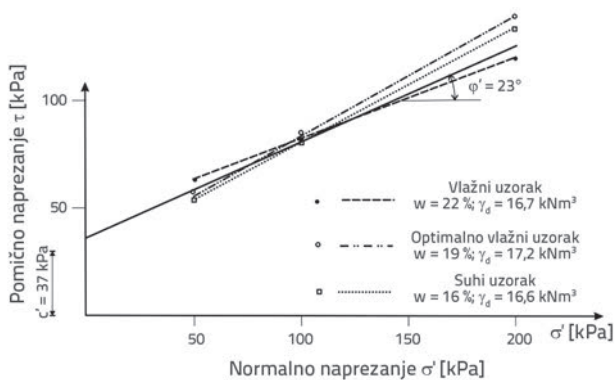
Tijekom pokusa direktnog smicanja dolazi do razaranja prirodnih veza duž površine smicanja (i fizičkog razdvajanja unutar samog uzorka) kod svih ispitivanih uzoraka, bez obzira na njihove početne vlažnosti. Na osnovi toga može se zaključiti da se tijekom dreniranog smicanja zapravo svlada sva otpornost koja je posljedica strukture tla i da dolazi do zbijanja uzorka. Disperzija se povećava s povećanjem veličine primijenjenog naprezanja i s povećanjem zapremine težine tla. Budući da su ovdje male razlike u suhim zapreminskim težinama uzoraka iste serije (od 17,0 do 17,5 kN/m³ za uzorke serije A, od 16,2 do 17,2 kN/m³ za uzorke serije B i od 17,5 do 18,1 kN/m³ za uzorke serije C), dobivaju se slični rezultati parametara smicanja za uzorke s različitim početnim uvjetima iste serije tla.

Zanemarujući manja rasipanja – odstupanja u anvelopama loma, dobivene su sljedeće prosječne veličine parametara čvrstoće smicanja za efektivna naprezanja, c' i φ' :

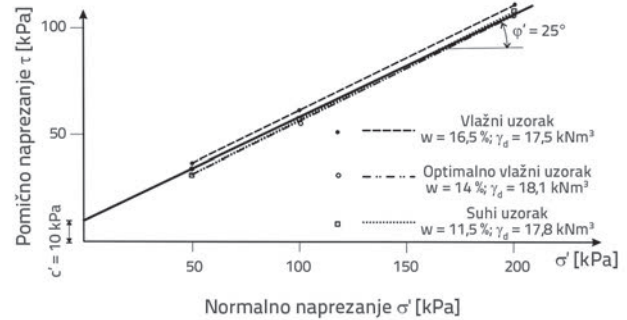
- za les serije A: $c' = 20 \text{ kPa}$ i $\varphi' = 24^\circ$, (slika 2.)
- za les serije B: $c' = 37 \text{ kPa}$ i $\varphi' = 23^\circ$, (slika 3.)
- za les serije C: $c' = 10 \text{ kPa}$ i $\varphi' = 25^\circ$, (slika 4.)



Slika 2. Prosječne veličine efektivnih parametara čvrstoće smicanja za uzorke serije A



Slika 3. Prosječne veličine efektivnih parametara čvrstoće smicanja za uzorke serije B



Slika 4. Prosječne veličine efektivnih parametara čvrstoće smicanja za uzorke serije C

4. Analiza rezultata istraživanja

4.1. Promjene stupnja zasićenosti

Promjene stupnja zasićenosti S_r , kao i efektivnog stupnja zasićenosti $S_{e,r}$ s kapilarnim usisom ($u_a - u_w$) za umjetno pripremljene uzorke s različitim početnim uvjetima prikazane su u tablicama 3., 4. i 5.

Za određivanje efektivnog stupnja zasićenosti nužno je poznavati rezidualni stupanj zasićenosti, S_{rez} . Za čiste pijeske, rezidualno se stanje općenito postiže pri veličinama kapilarnog usisa manjim od 1500 kPa. Međutim, kod sitnozrnatih tala nije jednostavno odrediti – kvantificirati rezidualno stanje. Van Genuchten predlaže da se veličina kapilarnog usisa od 1500 kPa smatra rezidualnom

Tablica 3. Promjene stupnja zasićenosti s kapilarnim usisom za umjetne uzorke serije A

Les serije A - suhi uzorci $w = 15,0\%$, rezidualni stupanj zasićenosti $S_{rez} = 0,25$								
$u_a - u_w$ [kPa]	20	40	80	160	300	500	1000	1500
Stupanj zasićenosti S_r	0,79	0,76	0,70	0,65	0,60	0,56	0,50	0,46
Efekt. stupanj zasić. S_e	0,72	0,68	0,60	0,53	0,47	0,41	0,33	0,28
Les serije A - optimalno vlažni uzorci $w_{opt} = 17,5\%$, rezidualni stupanj zasićenosti $S_{rez} = 0,30$								
$u_a - u_w$ [kPa]	20	40	100	300	600	1000	1500	
Stupanj zasićenosti S_r	0,85	0,82	0,77	0,70	0,66	0,61	0,58	
Efekt. stupanj zasić. S_e	0,79	0,74	0,67	0,57	0,51	0,44	0,40	
Les serije A - vlažni uzorci $w = 20,0\%$, rezidualni stupanj zasićenosti $S_{rez} = 0,32$								
$u_a - u_w$ [kPa]	20	40	100	300	500	1000	1500	
Stupanj zasićenosti S_r	0,87	0,83	0,81	0,77	0,67	0,63	0,59	
Efekt. stupanj zasić. S_e	0,81	0,75	0,72	0,59	0,51	0,46	0,40	

Tablica 4. Promjene stupnja zasićenosti s kapilarnim usisom za umjetne uzorke serije B

Les serije B - suhi uzorci $w = 16,0\%$, rezidualni stupanj zasićenosti $S_{rez} = 0,40$										
$u_a - u_w$ [kPa]	20	40	80	120	200	300	500	700	900	1300
Stupanj zasićenosti S_r	0,86	0,80	0,76	0,70	0,68	0,65	0,61	0,59	0,55	0,47
Efektivni stupanj zasićenosti S_e	0,77	0,67	0,60	0,50	0,47	0,42	0,35	0,31	0,25	0,12
Les serije B - optimalno vlažni uzorci $w_{opt} = 19,0\%$, rezidualni stupanj zasićenosti $S_{rez} = 0,45$										
$u_a - u_w$ [kPa]	20	40	80	150	300	500	1000	1500		
Stupanj zasićenosti S_r	0,88	0,84	0,82	0,80	0,78	0,75	0,72	0,68		
Efektivni stupanj zasićenosti S_e	0,78	0,71	0,67	0,64	0,60	0,54	0,49	0,42		
Les serije B - vlažni uzorci $w = 22,0\%$, rezidualni stupanj zasićenosti $S_{rez} = 0,48$										
$u_a - u_w$ [kPa]	20	40	80	150	300	600	1000	1500		
Stupanj zasićenosti S_r	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,82	0,79	0,77		
Efektivni stupanj zasićenosti S_e	0,83	0,81	0,77	0,75	0,71	0,71	0,60	0,56		

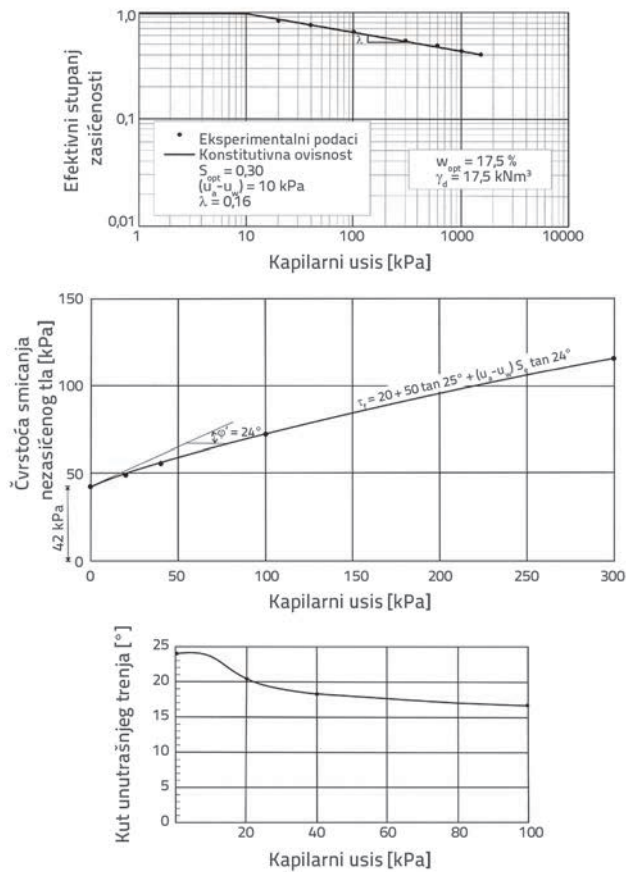
Tablica 5. Promjene stupnja zasićenosti s kapilarnim usisom za umjetne uzorke serije C

Les serije C - suhi uzorci $w = 11,5\%$, rezidualni stupanj zasićenosti $S_{rez} = 0,13$								
$u_a - u_w$ [kPa]	20	40	80	160	300	600	1000	1300
Stupanj zasićenosti S_r	0,60	0,43	0,36	0,31	0,27	0,23	0,22	0,21
Efektivni stupanj zasićenosti S_e	0,54	0,34	0,26	0,21	0,16	0,11	0,10	0,09
Les serije C - optimalno vlažni uzorci $w_{opt} = 14,0\%$, rezidualni stupanj zasićenosti $S_{rez} = 0,16$								
$u_a - u_w$ [kPa]	20	40	80	160	300	600	1000	1300
Stupanj zasićenosti S_r	0,68	0,48	0,39	0,35	0,29	0,28	0,27	0,25
Efektivni stupanj zasićenosti S_e	0,60	0,44	0,34	0,26	0,19	0,14	0,13	0,11
Les serije C - vlažni uzorci $w = 16,5\%$, rezidualni stupanj zasićenosti $S_{rez} = 0,17$								
$u_a - u_w$ [kPa]	20	40	80	160	300	600	1000	1300
Stupanj zasićenosti S_r	0,73	0,55	0,47	0,41	0,36	0,29	0,28	0,27
Efektivni stupanj zasićenosti S_e	0,67	0,45	0,36	0,29	0,23	0,14	0,13	0,12

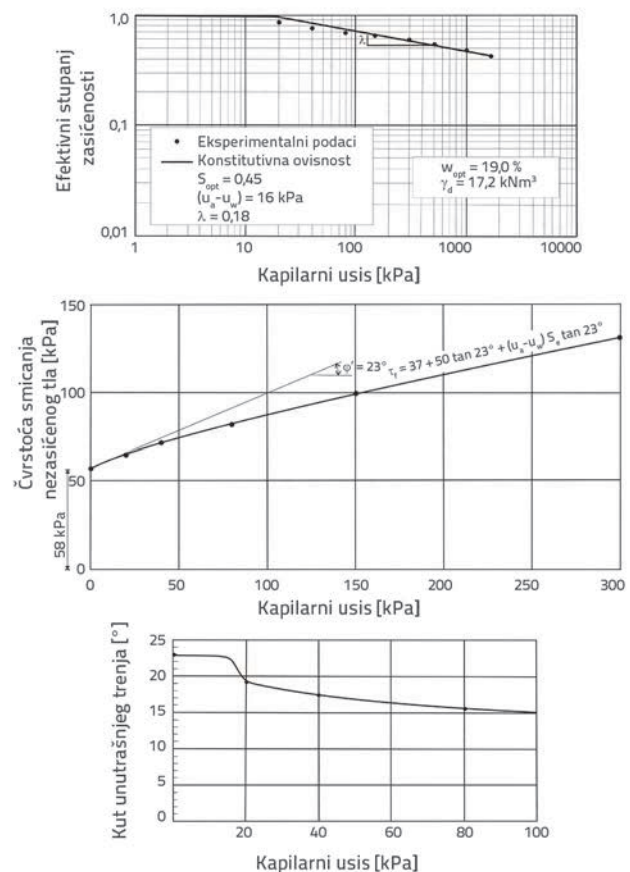
veličinom [23]. U ovom radu rezidualni stupanj zasićenosti je određen sukcesivnim aproksimacijama dok se sve točke na dijagramu "efektivni stupanj zasićenosti-kapilarni usis", u logaritamskom mjerilu, nakon pritiska prodiranja zraka, nisu našle na pravcu [13]. Dobivene vrijednosti su provjerene i pomoću grafičkog postupka koji je predložio Vanapalli [24].

Stupanj se zasićenosti, za istu veličinu kapilarnog usisa, povećava s povećanjem postotnog u sitnozrnate frakcije tla.

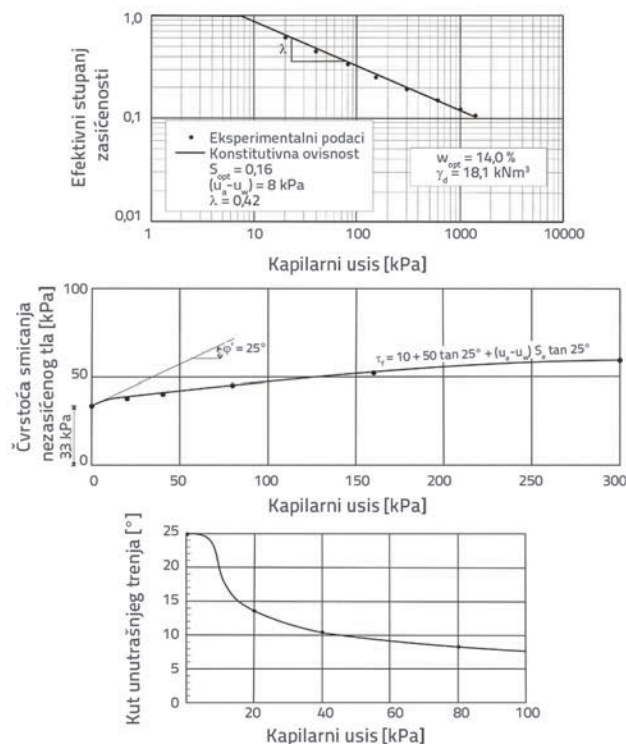
Zbog veličine pora, iz pjeskovitijeg tla se dreniranje izvodi brže u usporedbi s prašinstim ili glinovitim tлом. Stupanj zasićenosti optimalno vlažnog uzorka (s najvećom suhom zapreminskom težinom) za bilo koju veličinu kapilarnog usisa je veći od stupnja zasićenosti suhog uzorka, ali je manji od stupnja zasićenosti vlažnog uzorka. To jasno potvrđuje da granulometrijski sastav i početna vlažnost [25] imaju dominantan utjecaj na ovisnost vlažnost-kapilarni usis nezasićenog tla.



Slika 5. Ovisnosti kapilarnog usisa optimalno vlažnog uzorka serije A i a) efektivnog stupnja zasićenosti; b) smicanja nezasićenog tla; c) kuta ϕ^b



Slika 6. Ovisnosti kapilarnog usisa optimalno vlažnog uzorka serije B i a) efektivnog stupnja zasićenosti; b) smicanja nezasićenog tla; c) kuta ϕ^b

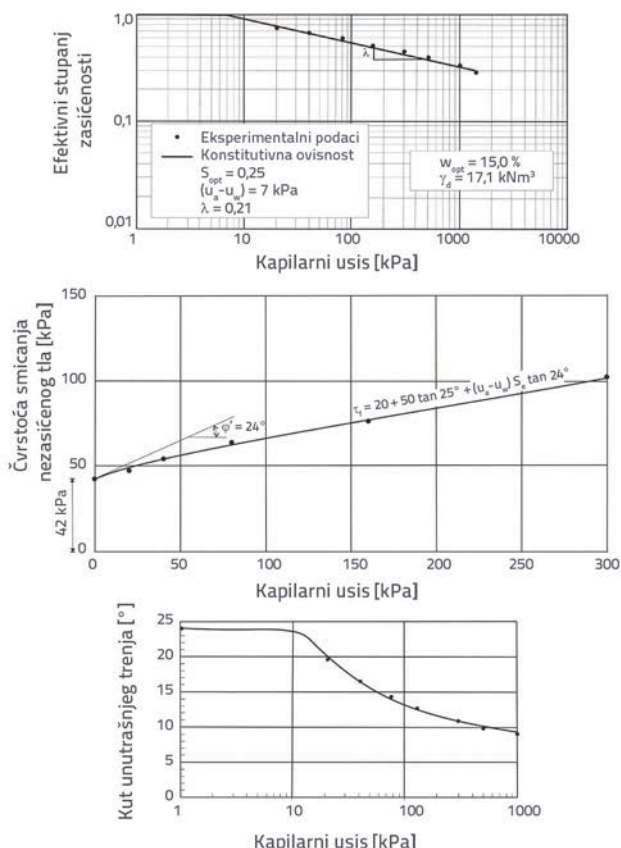


Slika 7. Ovisnosti kapilarnog usisa optimalno vlažnog uzorka serije C i a) efektivnog stupnja zasićenosti; b) smicanja nezasićenog tla; c) kuta ϕ^b

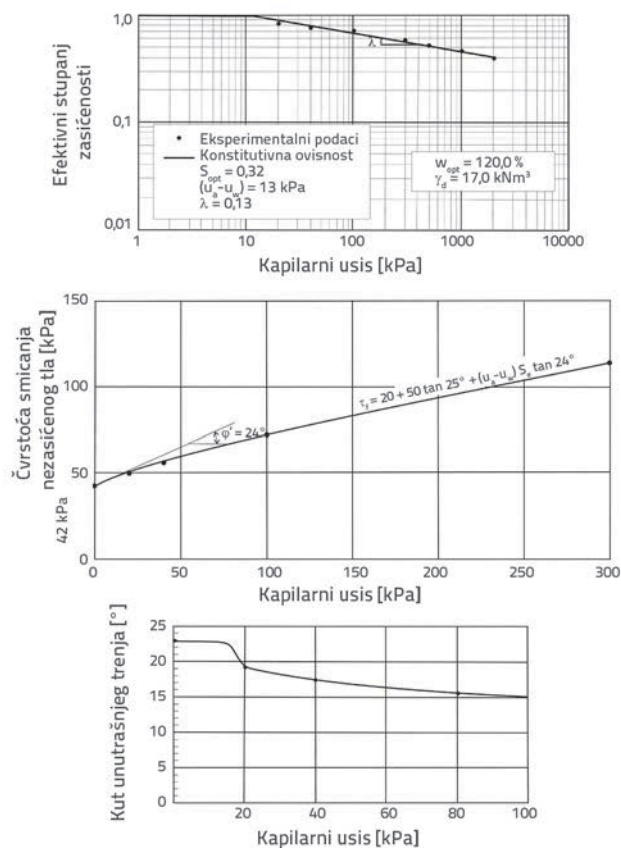
4.2. Prikaz ovisnosti vlažnosti, čvrstoće smicanja i kuta ϕ^b o kapilarnom usisu

Na osnovi rezultata pokusa dreniranja zasićenih uzoraka u ekstraktoru pod pritiskom i određenog stupnja zasićenosti S_r , koji je određen na osnovi mjerenja mase uzorka poslije svakog stupnja izvlačenja, određene su ovisnosti između efektivnog stupnja zasićenosti i kapilarnog usisa prema izrazu (1). Na osnovi efektivnog stupnja zasićenosti S_e i efektivnih parametara čvrstoće smicanja za zasićeno tlo c' i ϕ' određene su ovisnosti čvrstoće smicanja nezasićenog tla o kapilarnom usisu prema izrazu (3) kao i ovisnosti parametra smicanja nezasićenog tla ϕ^b i kapilarnog usisa prema izrazu (4).

U tablicama su prikazani rezultati za sve, a na dijagramima samo za neke uzorke, pripremljene pod različitim uvjetima, koji ilustriraju utjecaj različitih čimbenika na ovisnosti vlažnosti, čvrstoće smicanja i kuta ϕ^b o kapilarnom usisu. Za analizu utjecaja granulometrijskog sastava na konstitucijske ovisnosti, prikazani su dijagrami za optimalno vlažne uzorke serije A (slika 5.), serije B (slika 6.) i serije C (slika 7.). Za analizu utjecaja početne vlažnosti i suhe zapremine težine na konstitucijske ovisnosti, osim dijagrama za optimalno vlažne, prikazani su dijagrami za suhe (slika 8.) i vlažne uzorke (slika 9.) iste serije A.



Slika 8. Ovisnost kapilarnog usisa za suhi uzorak serije A i a) efektivnog stupnja zasićenosti; b) smicanja nezasićenog tla; c) kuta ϕ^b



Slika 9. Ovisnost kapilarnog usisa za vlažni uzorak serije A i a) efektivnog stupnja zasićenosti; b) smicanja nezasićenog tla; c) kuta ϕ^b

5. Analiza utjecaja različitih čimbenika

5.1. Utjecaj početnih uvjeta na karakteristične krivulje vlažnost-kapilarni usis

Analizirajući dobivene rezultate došlo se do zaključka da navedeni početni uvjeti utječu na rezidualni stupanj zasićenosti, veličinu pritiska prodiranja zraka i veličinu koeficijenta λ .

5.1.1. Rezidualni stupanj zasićenosti

Rezidualni stupanj zasićenosti i rezidualni kapilarni usis veći su ako je postotno veći udjel sitnozrnate frakcije u tlu. Veličine rezidualnog stupnja zasićenosti se povećavaju također i s povećanjem početne vlažnosti.

Rezidualno stanje se kod krupnozrnatih, nevezanih tala ostvaruje pri nižim kapilarnim usisima (0-500 kPa) u usporedbi sa sitnozrnatim vezanim prašinstim, glinovitim ili glinovito-prašinstim tлом (500-1500 kPa). Za srednje do visoko plastične gline, rezidualno stanje nastaje poslije 1500 kPa, a često ga je i tada teško precizno utvrditi.

Iako je poznato da su rezidualni kapilarni usis i indeks plastičnosti međusobno ovisni, jedinstvena ovisnost ipak ne postoji, jer jedno isto tlo s različitim početnim uvjetima

(vlažnosti i suhe gustoće) ima različite ovisnosti vlažnost-kapilarni usis (SWRC), pa samim tim i različite veličine rezidualnog usisa.

Zapravo, isto tlo s različitim početnim vlažnostima se ponaša različito. Općenito se primjećuje da se rezidualni stupanj zasićenosti povećava s povećanjem vlažnosti i najveći je za vlažan uzorak.

Veličine rezidualnog stupnja zasićenosti za prašinsti les su manje od istih (suhi, optimalno vlažni i vlažni) za sitnozrnatije uzorke serije B, a veće za krupnozrnatije uzorke serije C i iznose: 0,25 za suhi, 0,30 za optimalno vlažni (s najvećom suhom zapreminskom težinom) i 0,32 za vlažni uzorak.

Rezidualni stupanj zasićenosti za uzorke serije B, sitnozrnatijeg lesa iznosi 0,40 za suhi, 0,45 za optimalno vlažni i 0,48 za vlažni uzorak.

Za seriju C uzoraka krupnozrnatijeg lesa rezidualni stupanj zasićenosti iznosi 0,13 za suhe, 0,16 za optimalno vlažne uzorke, dok je za seriju vlažnih uzoraka 0,17.

Rezidualni stupanj zasićenosti S_{re} utječe na veličine efektivnog stupnja zasićenosti S_e . Veličina efektivnog stupnja zasićenosti S_e u ovisnosti o veličini kapilarnog usisa, može biti od jedinice u zasićenom stanju, do nule u rezidualnom stanju. Efektivni stupanj zasićenosti S_e je jednak jedinici u intervalu usisa od nule do pritiska prodiranja zraka.

Veličina efektivnog stupnja zasićenosti, S_e , postupno se smanjuje dostizanjem pritiska prodiranja zraka ($u_a - u_w$)_b i dalje s povećanjem kapilarnog usisa. Efektivni stupanj zasićenosti, S_e teži prema nuli kada tlo dostigne stanje rezidualnog kapilarnog usisa ($u_a - u_w$)_{rez}.

5.1.2. Veličine pritiska prodiranja zraka

Veličina usisa pri kojoj horizontalni dio krivulje dostiže konstantni nagib smatra se pritiskom prodiranja zraka. Pritisci prodiranja zraka za suhe uzorke su uvijek manji od pritiska prodiranja zraka za optimalno vlažne i vlažne uzorke.

- Za uzorke lesa serije A pritisak prodiranja zraka iznosi 7 kPa za suhe uzorke, 10 kPa za optimalno vlažne uzorke i 13 kPa za vlažne uzorke.
- Za uzorke lesa serije B pritisak prodiranja zraka iznosi 15 kPa za suhe uzorke, 18 kPa za optimalno vlažne uzorke i 25 kPa za vlažne uzorke.
- Za uzorke lesa serije C pritisci prodiranja zraka iznose 5 kPa za suhe uzorke, 8 kPa za optimalno vlažne uzorke i 10 kPa za vlažne uzorke.

Na osnovi dobivenih rezultata može se zaključiti da se veličina pritiska prodiranja zraka povećava s povećanjem postotnog udjela sitnozrnate frakcije i s povećanjem početne vlažnosti u tlu.

5.1.3. Veličine koeficijenta λ

Koeficijent λ predstavlja nagib pravolinijskog dijela ovisnosti efektivnog stupnja zasićenosti i kapilarnog usisa, nakon veličine kapilarnog usisa koja odgovara pritisku prodiranja zraka.

Za suhe uzorke lesa serije A vrijednost koeficijenta λ iznosi 0,21, za optimalno vlažne 0,16, a za vlažne 0,13, dok uzorci lesa serije B imaju koeficijent λ : za suhe uzorke 0,18, za optimalno vlažne uzorke 0,15, a za vlažne 0,10. Za suhe uzorke lesa serije C koeficijent λ iznosi 0,45, za optimalno vlažne uzorke 0,42, a za vlažne 0,35.

Na osnovi dobivenih rezultata može se zaključiti da se koeficijent λ povećava s povećanjem postotnog udjela krupnozrnate frakcije i sa smanjenjem početne vlažnosti u tlu.

5.2. Utjecaj strukture tla na konstitucijske ovisnosti

Tlo koje je zbijeno kad je vlažnost manja od optimalne, ima otvorenu strukturu s velikim međusobno povezanim i dobro

prohodnim porama koje omogućavaju brzu desaturaciju pod djelujućim kapilarnim usisom. Struktura makropora je dominantna u seriji suhih uzoraka.

U uzorcima tla koje je zbijeno kad je vlažnost veća od optimalne, pore nisu međusobno povezane, porni prostor je "zarobljen" i neprohodan, porni kanali su općenito nepovezani i ne omogućavaju desaturaciju. Njihove ovisnosti vlažnosti su blažeg nagiba od ovisnosti vlažnosti suhih uzoraka.

5.3. Ovisnost čvrstoće smicanja nezasićenog tla o kapilarnom usisu

Do veličine usisa pri kojoj zrak prodire u pore i počinje dreniranje, tj. ($u_a - u_w$)_b utjecaj usisa na čvrstoću smicanja je ekvivalentan utjecaju normalnog naprezanja na čvrstoću smicanja, tj. na kut ϕ' . Ovisnost čvrstoće smicanja nezasićenog tla o kapilarnom usisu je nelinearna od veličine pritiska prodiranja zraka u tlo [26]. Nakon toga, utjecaj usisa na čvrstoću smicanja, izraženu kutom ϕ^b , smanjuje se, ali još uvijek postoji sve do točke kada tlo dostigne rezidualni stupanj zasićenosti. Poslije tog rezidualnog stupnja zasićenosti više nema povećanja čvrstoće smicanja uslijed usisa.

Povećanjem veličine zrna u tlu, opada utjecaj veličine kapilarnog usisa na čvrstoću nezasićenog tla. Anvelope čvrstoće smicanja jasno pokazuju da se za istu veličinu kapilarnog usisa čvrstoća povećava s povećanjem vlažnosti i suhe zapremine težine. Utjecaj početne suhe zapremine težine je, međutim, zanemariv za pjeskoviti les. Uzorci krupnozrnatog lesa imaju veoma slične veličine čvrstoće bez obzira na početnu suhu zapreminsku težinu [27]. Iz ovoga se može zaključiti da utjecaj početne suhe zapremine težine opada s povećanjem veličine dominantnog zrna.

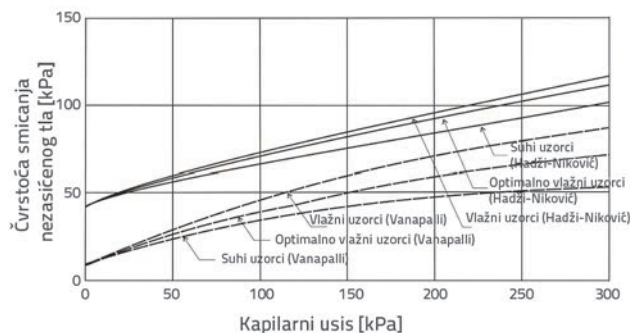
S povećanjem pritiska usisa, uzorci počinju ispuštati vodu iz pora tla. Najprije se dreniraju velike pore, a zatim i manje. Površina membrane zrak-voda između čvrstih čestica, koja pridonosi povećanju čvrstoće smicanja, pri desaturaciji se smanjuje s povećanjem pritiska usisa. To direktno dovodi do smanjenja kuta unutrašnjeg trenja ϕ^b s povećanjem pritiska usisa.

Veličina kuta ϕ^b povećava se s povećanjem naprezanja i s povećanjem početne vlažnosti [18]. Uzorci pjeskovitog lesa su pod manjim utjecajem i naprezanja i početne vlažnosti, u odnosu na uzorke lesa.

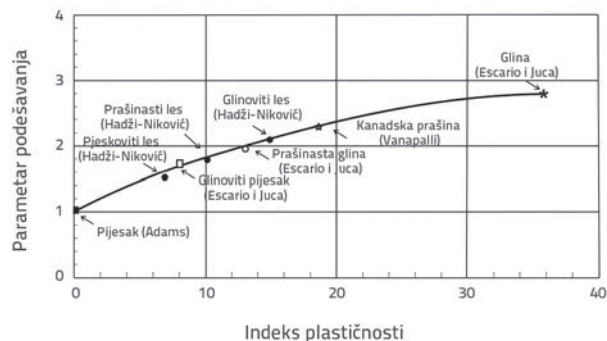
Kod umjetno pripremljenih uzoraka optimalne vlažnosti i u opsegu kapilarnog usisa ($u_a - u_w$) = 20-100 kPa, veličina kuta ϕ^b je: za uzorke lesa serije A $\phi^b = 21^\circ - 15^\circ$; za uzorke lesa serije B $\phi^b = 22^\circ - 16^\circ$, a za uzorke lesa serije C $\phi^b = 17^\circ - 7^\circ$

Tablica 6. Rezultati laboratorijskih ispitivanja kanadskog praha [17]

Uzorak	γ_d [kN/m ³]	G_s	e	w_l [%]	I_p [%]	Granulometrijski sastav		
						Glina [%]	Prašina [%]	Pijesak [%]
Kanadski prah	17,1	264	0,55	32	18,7	30	42	28



Slika 10. Čvrstoća smicanja nezasićenog tla za uzorke prašinatog lesa serije A i kanadskog glacijalnog praha različite početne vlažnosti



Slika 11. Ovisnost između parametra K i indeksa plastičnosti I_p

6. Provjera dobivenih rezultata

Dobiveni rezultati mogu se provjeriti:

- uspoređivanjem rezultata koji su ovdje prikazani s rezultatima drugih istraživača za slična tla,
- na osnovi dobivenih veličina bezdimenzijskog parametra K na uspostavljenoj ovisnosti parametra K i indeksa plastičnosti I_p .

Vanapalli [7] je proveo vrlo opsežna i kompleksna ispitivanja na uzorcima kanadskog praha, čije su karakteristike prikazane u tablici 6. Na slici 10. prikazani su rezultati određivanja čvrstoće smicanja nezasićenih uzoraka kanadskog praha i umjetno pripremljenih uzoraka serije A, različitih vlažnosti i suhe zapreminske težine. Vanapalli [7] je predložio i drugi izraz za određivanje čvrstoće nezasićenog tla:

$$\tau_r = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi'] + (u_a - u_w) \Theta^K (\tan \varphi') \tag{5}$$

gdje su:

- K - parametar podešavanja koji se koristi da bi se dobila bolja korelacija između predviđenih i mjerenih veličina čvrstoće smicanja,
- Q - w/w_s
- w - vlažnost uzorka nakon dreniranja nekom veličinom kapilarnog usisa ($u_a - u_w$)
- w_s - vlažnost uzorka u zasićenom stanju.

Na osnovi ovog izraza, i u ovom istraživanju je povratno određena veličina parametra K i dobiveni rezultati su prikazani na dijagramu već uspostavljene ovisnosti parametar K - indeks plastičnosti I_p [18], na slici 11.

Na dijagramu se vidi da postoji dobro slaganje parametra K i uspostavljene ovisnosti s indeksom plastičnosti I_p , za lesne sedimente serije A, B i C.

7. Zaključak

Prirast čvrstoće smicanja nezasićenog tla, u odnosu na čvrstoću smicanja zasićenog tla, izražava se veličinom kuta φ^b . Za umjetne uzorke lesnog tla različitog granulometrijskog sastava, pripremane pod različitim početnim uvjetima, određene su ovisnosti između čvrstoće smicanja i kapilarnog usisa na osnovi ovisnosti efektivni stupanj zasićenosti-kapilarni usis i uspostavljena je ovisnost između kuta φ^b i kapilarnog usisa. Povećanje čvrstoće smicanja, uslijed postojanja kapilarnog usisa ovisi o brzini dreniranja tla. Za isto normalno naprezanje i isti kapilarni usis, uzorci koji imaju veći efektivni stupanj zasićenosti imaju veću čvrstoću. Iako zapreminske promjene mogu biti vrlo značajne kod promjena vlažnosti zbijenog nezasićenog tla [28], tijekom ovih istraživanja one nisu razmatrane. Poznato je da se njihovo značenje povećava s povećanjem plastičnosti tla [29]. S obzirom na to da su u ovom radu prikazani rezultati ispitivanja tla čiji su indeksi plastičnosti $I_p=7-15$, smatralo se da njihov utjecaj na dobivene rezultate nije velik. Ipak, izvjesna odstupanja mjerenih vrijednosti od modela upućuju na to da ih svakako treba uzimati u obzir pri takvim istraživanjima.

Prikazani i objašnjeni relativno jednostavni, postupci i laboratorijska oprema mogu se koristiti za određivanje prirasta čvrstoće smicanja nezasićenog zbijenog tla uslijed postojanja kapilarnog usisa, ali prije svega za prašinasto tlo. Sa smanjenjem veličine zrna i povećanjem indeksa plastičnosti tla smanjuje se opravdanost primjene takvog postupka. Istraživanja su potvrdila značajan utjecaj pojedinih čimbenika i početnih uvjeta na nezasićenu čvrstoću zbijenog tla. To se, prije svega, odnosi na granulometrijski sastav i početnu vlažnost tla. S povećanjem veličine zrna u tlu, sve manje veličina kapilarnog usisa, vlažnost i suha zapreminska težina utječu na čvrstoću nezasićenog zbijenog lesnog tla.

LITERATURA

- [1] Fredlund, D.G.: Unsaturated soil mechanics in engineering practice, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering ASCE*, Vol. 132, Issue 3, pp. 286-321, 2006.
- [2] Boreli, M.: Podzemna voda u zoni aeracije tretirana jednačinama strujanja vode u nezasićenim sredinama, Seminar: Bilans podzemnih voda, Naučna redakcija publikacije: M. Boreli, Jugoslovenski komitet za međunarodnu hidrološku deceniju, pp. 87-118, Beograd, 20.12.1966. - 10.1.1967.
- [3] Gens, A.: The development of unsaturated soil mechanics, *Zbornik referata Šukljetovi dnevi 14. Slovensko geotehniško društvo*, Ljubljana, pp 1-35, Oct. 2013.
- [4] Hadži-Niković, G.: Konstitutive zavisnosti nezasićenih tla područja Beograda – doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 247 p. 2005.
- [5] Hadzi-Nikovic, G.: Effect of soil suction on slope stability in natural residual soil, 12 Danube-European Conference, *Geotechnical Engineering*, Passau, Germany, pp. 223-226, 2002.
- [6] Hadzi-Niković, G.: The slope stability in unsaturated overconsolidated clayey soil, *Proc.IAEG*, Durban, South Africa, 2002.
- [7] Vanapalli, S.H., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., Clinton, A.W.: Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal* 33, No 3, pp. 379-392, 1996.
- [8] ASTM D 2325-68, Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Coarse- and Medium Textured Soils by Porous-Plate Apparatus.
- [9] ASTM D 3152-72, Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Fine-Textured Soils by Pressure-Membrane Apparatus.
- [10] Vanapalli, S.H., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E.: The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till, *Geotechnical Testing Journal* 19/ 3, pp. 259-268, 1996.
- [11] Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G.: Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength, *Proc. Geo Denver Conf ASCE Special Publication*, No 99, Reston, Va, pp. 195-209, 2000.
- [12] Terzaghi, K.: *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1936.
- [13] Fredlund, D.G., Rahardjo, H.: *Soil mechanics for unsaturated soils*, Wiley & Sons, New York, 1993.
- [14] Barbour, S.L.: The soil-water characteristic curve – a historical perspective and application to the behaviour of unsaturated soils, *Canadian Geotechnical Journal* 35, pp. 873-894, 1998.
- [15] Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., Widger, R.A.: The shear strength of unsaturated soils, *Canadian Geotechnical Journal* 13, pp. 261-275, 1976.
- [16] Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D., Barbour, S.L.: The relationship of the unsaturated soil shear strength function to the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal* 33, No 3, pp. 440-448, 1996.
- [17] Guan, G.S., Rahardjo, H., Choon, L.E.: Shear strength equations for unsaturated soil under drying and wetting, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering ASCE*, Vol. 136, No. 4, pp. 594-606, 2010.
- [18] Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G.: Empirical procedures to predict the shear strength of unsaturated soils, 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Vol.1, pp. 93-96, 1999.
- [19] Brooks, R.H., Corey, A.T.: Hydraulic properties of porous media, *Colorado State Univ. Hydrol. Paper No.3*, 27 pp., Mar. 1964.
- [20] SRPS U.B1.038: Određivanje odnosa vlažnosti i suve zapremenske mase tla, 1997.
- [21] Vanapalli, S.K.: Personal correspondence, Jan. 2004. Ph.D.P.Eng. Professor at Faculty of Engineering, Ottawa University, Canada.
- [22] SRPS U.B1.028: Opić direktnog smicanja tla, 1996.
- [23] Van Genuchten, M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44. 892-898, 1980.
- [24] Vanapalli, S.K.: Simple test procedure and their interpretation in evaluating the shear strength of an unsaturated soil, PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1994.
- [25] Marinho, F.A.M., Oliveira, O.M., Adem, H., Vanapalli, S.: Shear strength behaviour of compacted unsaturated residual soil, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.7, No 1, pp 1-9, 2013.
- [26] Sheng, D., Zhou, A., Fredlund, D.G.: Shear strength criteria for unsaturated soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, No 29, Issue 2, pp. 145-159, 2011.
- [27] Hadži-Niković, G.: The influence of the grain-size distribution and soil structure on the unsaturated shear strength of loess sediments in Belgrade, *Anaales Geologiques de la Peninsule Balkanique* No 70, 83-91, 2009.
- [28] Maček, M., Majes, B., Petkovšek, A.: Influence of mould suction on the volume-change behavior of compacted soils during inundation. *Journal Acta Geotechnica Slovenica*, 2011-2, article 5. 2011.
- [29] Kavur, B., Vrkljan, I., Kovačić Zelić, B.: Analysis of hydraulic properties of unsaturated expansive soil, *Građevinar* 63 (2011), 3, pp. 245-253.