Utjecaj brzine smicanja na posmičnu čvrstoću tla

Bek, Anja

Undergraduate thesis / Završni rad

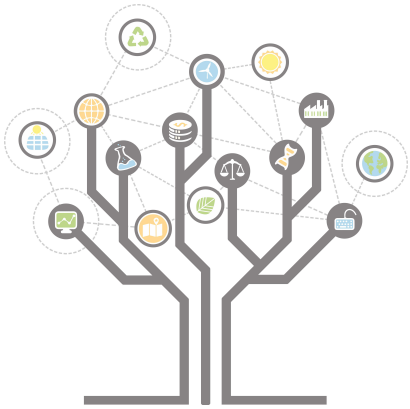
2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:668487

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANJA BEK

UTJECAJ BRZINE SMICANJA NA POSMIČNU ČVRSTOĆU TLA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2020.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva

za _____ u _____ sa

Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred

ispitnim povjerenstvom u Varaždinu

Varaždin, _____

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Igor Petrović

Članovi povjerenstva

1) Prof. dr. sc. Stjepan Strelec
2) Izv. prof. dr. sc. Boris Varga
3) Izv. prof. dr. sc. Krešo Ivanušić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANJA BEK

UTJECAJ BRZINE SMICANJA NA POSMIČNU ČVRSTOĆU TLA

ZAVRŠNI RAD

KANDIDAT:
Anja Bek

MENTOR:
Prof. dr. sc. Stjepan Strelec

VARAŽDIN, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnica: ANJA BEK

Matični broj: 2776 - 2017./2018.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

UTJECAJ BRZINE SMICANJA NA POSMIČNU ČVRSTOĆU TLA

Rad treba sadržati:
1. Uvod
2. Općenito o tlu
3. Maseni i volumni odnosi
4. Klasifikacija tla
5. Naprezanja i deformacije u tlu
6. Posmična čvrstoća tla
7. Brzina smicanja
8. Praktični rad
9. Zaključak

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 24.04.2020.

Rok predaje: 03.09.2020.

Mentor:

Prof.dr.sc. Stjepan Strelec

REPUBLIKA HRVATSKA 1 VARAŽDIN GEOTEHNIČKI FAKULTET SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

Utjecaj brzine smicanja na posmičnu čvrstoću tla

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof. dr. sc. Stjepana Strelec.** Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 26.08.2020.

Anja Bek
(Ime i prezime)

Bek
(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

Utjecaj brzine smicanja na posmičnu čvrstoću tla

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 26.08.2020.

Prof. dr. sc. Stjepan Strelec
(Mentor)

(Vlastoručni potpis)

Zahvala:

Zahvaljujem prof. dr. sc. Stjepanu Strelec na mentorstvu, smjernicama prilikom izrade završnog rada i utrošenom vremenu u brojnim obavezama koje je uvijek pronašao za moje upite i konzultacije. Hvala!

Nadalje, veliku zahvalu dugujem Geotehničkom laboratoriju Varaždin na mogućnosti provedbe pokusa za potrebe praktičnog dijela završnog rada. U prvom redu, zahvaljujem, dipl. ing. geot. Goranu Jeftić na pomoći od pripreme, ispitivanja, do obrade rezultata ispitivanja uzoraka tla.

Hvala mojoj obitelji za razumijevanje, bezuvjetnu ljubav i potporu u teškim trenucima tijekom preddiplomskog studija.

SAŽETAK

Posmična čvrstoća jedno je od najvažnijih mehaničkih svojstava tla prilikom građenja. Uvjetovana je vrijednošću maksimalnog posmičnog naprezanja koje tlo može podnijeti prije sloma. Prekoračenjem posmične čvrstoće dolazi do klizanja jedne čestice uz drugu, što uzrokuje slom tla. Posmična čvrstoća tla za efektivna naprezanja predstavlja kombinaciju dreniranih parametara čvrstoće: kuta unutrašnjeg trenja (φ) i kohezije (c) koje definira Mohr-Coulombov zakon sloma. Određuje se "in situ" i laboratorijskim pokusima. Izravan posmik se smatra najstarijim i najjednostavnijim laboratorijskim pokusom određivanja posmične čvrstoće tla. U prvoj fazi pokusa uzorak se konsolidira pod određenim vertikalnim naprezanjem, a u drugoj fazi smiče zadanom brzinom koja ovisi o uvjetima dreniranja, propusnosti i debljini uzorka. Nekoherentna tla se smiču velikom brzinom, dok je za koherentna tla iznos brzine manji. Brzina smicanja i uvjeti dreniranja utječu na veličinu parametara čvrstoće tla.

Rad se temelji na uspoređivanju i prikazivanju utjecaja različitih brzina smicanja na posmičnu čvrstoću nisko plastične gline u uređaju za izravni posmik.

KLJUČNE RIJEČI: posmična čvrstoća, brzina smicanja, parametri posmične čvrstoće, direktno smicanje

ABSTRACT

Shear strength is one of the most important mechanical properties of soil during construction. It is conditioned by the value of a maximum shear stress that a soil can withstand before failure. Exceeding the shear strength causes one particle to slide next to another, which results in soil failure. The shear strength of soil for effective stresses is a combination of drained strength parameters: internal friction angle (φ) and cohesion (c) defined by Mohr-Coulomb failure law. It is determined “in situ” and by laboratory experiments. Direct shear is considered to be the oldest and the simplest laboratory experiment which is used for determining the shear strength of soil. In the first phase of an experiment, a sample is consolidated under a certain vertical stress, and in the second phase it is sheared at a given velocity depending on drainage conditions, permeability and thickness of the sample. Incoherent soils are sheared at high speed, while for coherent soils lower velocity is needed. Shear velocity and drainage conditions affect the magnitude of soil strength parameters.

The paper is based on the comparison and demonstration of the influence of different shear velocities on the shear strength of low plastic clay in a direct shear device.

KEYWORDS: shear strength, shear velocity, shear strength parameters, direct shear

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. OPĆENITO O TLU 2

2.1. Nastanak tla 2

2.2. Trofazni karakter tla 2

3. MASENI I VOLUMNI ODNOSI 3

3.1. Relativni porozitet 3

3.2. Koeficijent pora 4

3.3. Stupanj zasićenosti 4

3.4. Vlažnost 5

4. KLASIFIKACIJA TLA 5

4.1. Konzistencija tla i Atterbergove granice 6

4.1.1. Granica stezanja 7

4.1.2. Granica plastičnosti 7

4.1.3. Granica tečenja 7

4.1.4. Indeksni pokazatelji 7

4.1.5. Dijagram plastičnosti 8

5. NAPREZANJA I DEFORMACIJE U TLU 10

5.1. Sila 10

5.2. Naprezanja 11

5.3. Princip efektivnih naprezanja 12

5.4. Slijeganje i vremenski tok slijeganja tla (konsolidacija) 12

5.4.1. Stupanj konsolidacije i koeficijent konsolidacije 13

6. POSMIČNA ČVRSTOĆA 15

6.1. Trenje 16

6.2. Slom tla 17

6.3. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće 18

6.3.1. Kohezija 21

6.3.2. Kut unutrašnjeg trenja 22
6.4. POKUSI ODREĐIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE TLA 23
6.4.1. “ In situ“ pokusi 23
6.4.2. Laboratorijski pokusi 24
6.5. DIREKTNO SMICANJE 24
6.5.1. Uređaj za izravni posmik 24
6.6. Pokusi direktnog smicanja 26
6.6.1. Drenirani ili spori pokus (CD pokus) izravnog posmika 26
6.6.2. Prikaz rezultata ispitivanja 28
7. BRZINA SMICANJA 28
7.1. Pomak pri slomu 30
7.2. Potrebno vrijeme do sloma 31
8. PRAKTIČNI RAD 33
8.1. Obrada i priprema uzorka 34
8.2. Ugradnja uzorka 35
8.3. Postupak ispitivanja 36
8.3.1. Faza konsolidacije 36
8.3.2. Faza smicanja 38
8.4. Rezultati pokusa 39
8.4.1. Tabelarni prikaz rezultata pokusa 40
8.4.2. Grafički prikaz rezultata 42
8.4.3. Korelacija kuta unutrašnjeg trenja s indeksom plastičnosti 48
9. ZAKLJUČAK 50
10. LITERATURA 51
11. POPIS SLIKA 53
12. POPIS TABLICA 55

1. UVOD

Mehanika tla je grana tehničke znanosti geotehnike koja se bavi ispitivanjem, proučavanjem i određivanjem fizikalnih i mehaničkih svojstava tla. Tlo je sveprisutan materijal u svakodnevnom životu. Na tlu živimo, u njemu gradimo i koristimo ga kao građevni materijal. Da bi se projektiranje neke građevinske konstrukcije pravilno izvelo, važno je poznavanje vrijednosti čvrstoće tla i njegovih deformacijskih svojstava.

Tlo je kompleksan materijal koji se sastoji od manjih i većih čestica minerala i pora koje mogu biti ispunjenje fluidom (voda, zrak…). Značajke i priroda tla nisu jednostavni pa različite vrste tla imaju različitu čvrstoću, ovisno o klasifikaciji i fizikalno-mehaničkim svojstvima. Čvrstoća tla se promatra u dreniranim i nedreniranim uvjetima. U dreniranim uvjetima omogućen je izlazak vode iz pora i dolazi do smanjenja pora i ukupnog volumena. Taj postupak se naziva konsolidacijom tla. U nedreniranim uvjetima vodi nije omogućen izlazak iz pora i nema promjene volumena tla.

Naprezanja u tlu dijele se na vertikalna (normalna) i horizontalna (posmična). Do sloma tla dolazi prekoračenjem maksimalnog posmičnog naprezanja koje tlo može podnijeti pa je posmična čvrstoća od velike važnosti kod izvedbe projekata i građenja.

Kod ispitivanja posmične čvrstoće tla u uređaju za izravni posmik važan je odabir ispravne brzine smicanja. Koherentna (vezana) tla se smiču manjom brzinom, a brzina smicanja nekoherentnog (nevezanog) tla je većeg iznosa.

Tema ovog završnog rada obrađuje utjecaj različitih brzina smicanja na posmičnu čvrstoću tla. Pokusi su provedeni na uzorku nisko plastične gline (CL) prema normi BS1377 Part 7 :1990 Clause 4 u uređaju za izravni posmik pri dreniranim uvjetima. Svi rezultati su prikazani grafički i tabelarno s popratnim objašnjenjima.

2. OPĆENITO O TLU

U inženjerskom pogledu, tlo je vrlo rastresita skupina minerala i organskih tvari. Minerali se javljaju u obliku sedimenata anorganskih čestica i organske materije sedimenata koji se nalaze iznad čvrste stijenske podloge. Različitim postupcima tlo je moguće razdvojiti na njegove sastavne dijelove [1].

2.1. Nastanak tla

Tlo je prirodni materijal za čije je stvaranje potreban dugi niz godina pod utjecajem različitih fizičkih, mehaničkih, kemijskih, biokemijskih i drugih procesa koji su doveli do promjena osobina tla. Zbog djelovanja različitih procesa, površinski dio koji je najinteresantniji i najvažniji za praktične probleme pretežito je anizotropnih i heterogenih svojstava. Površinski dio tla sadrži slojeve različitih debljina, prostiranja i fizikalno-mehaničkih deformacijskih osobina. Zbog neujednačenog sastava, osobine tla nije moguće definirati jednostavnim matematičkim izrazima. Heterogenost i anizotropnost tla glavni su razlozi potrebe za većim sistematskim rasuđivanjem i proučavanjem kako bi se otklonile potencijalne opasnosti karakteristične za takav materijal.

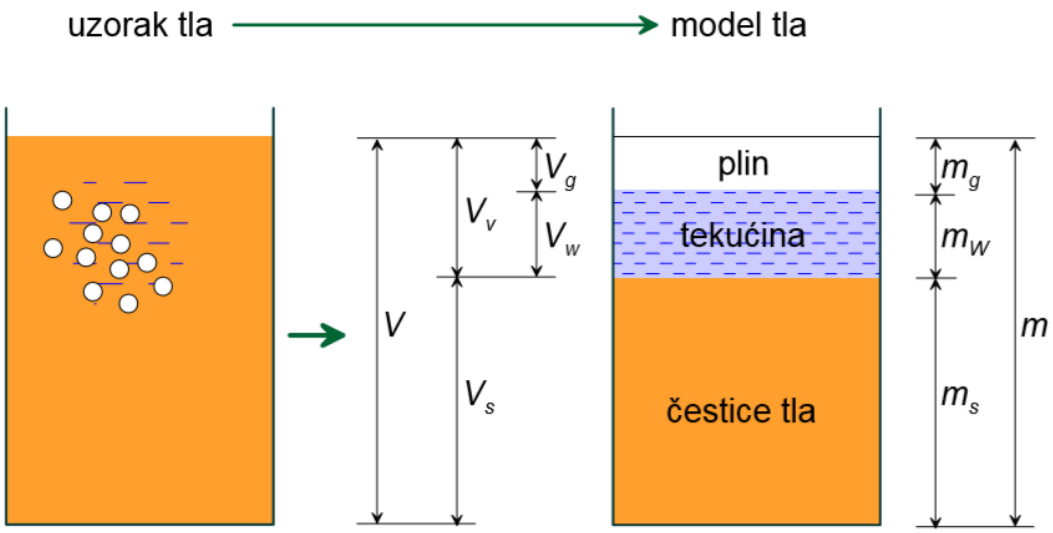
Tlo je nastalo kao posljedica djelovanja različitih faktora koji su doveli do formiranja njegove strukture, a u osnovi se dijele na [1]:

1) mehaničko i kemijsko raspadanje prvobitnih stijena
2) transport raspadnutog materijala pod utjecajem vjetra, vode, gravitacije…
3) sedimentacija transportiranog materijala

2.2. Trofazni karakter tla

Tlo je materijal sastavljen od tri faze (komponente). Prva faza su čvrste čestice tla koje karakterizira različiti oblik, veličina i mineraloški sastav. Tekućine i plinovi ispunjavaju pore pa čine preostale dvije faze. Tekućinu u porama većinom predstavlja voda, ali pore mogu biti ispunjenje naftom, uljem… U mehanici tla najčešće se

proučavaju potpuno "suha" ili vodom zasićena tla iz razloga što se o plinovitoj komponenti u porama vrlo malo zna. Zbog jednostavnijeg shvaćanja trofaznog karaktera tla koristi se model na temelju jediničnog odnosa mase i volumena u uzorku tla prikazan na Slici 1. [2].



Slika 1. Trofazni model tla [2]

3. MASENI I VOLUMNI ODNOSI

3.1. Relativni porozitet

Porozitet n predstavlja omjer volumena pora V_v i ukupnog volumena V, a izražava se u postocima [2].

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot 100\ [\%] \tag{1}$$

3.2. Koeficijent pora

Koeficijent pora e definiran je omjerom volumena pora V_V i volumena čvrstih čestica tla V_S.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \tag{2}$$

Bezdimenzionalna je veličina, a raspon se kreće između e_{min} = 0,10 i e_{max} = 1,20. Tijekom slijeganja volumen čvrstih čestica tla se ne mijenja jer se deformacije odvijaju zbog smanjenja volumena pora.

Relativni porozitet i koeficijent pora međusobno su zavisne veličine, a njihova veza definirana je izrazima [2]:

$$n = \frac{e}{1+e} \tag{3}$$

$$e = \frac{n}{1-n} \tag{4}$$

3.3. Stupanj zasićenosti

Stupanj zasićenosti S_r predstavlja postotak ispunjenosti pora vodom. Definiran je omjerom volumena vode V_w i volumenom pora V_V, a izražava se u postocima ili kao bezdimenzionalna veličina.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100\ [\%] \tag{5}$$

Stupanj zasićenosti kreće se u rasponu $0\% \leq S_r \leq 100\%$, gdje $S_r = 0\%$ predstavlja suho tlo, a $S_r = 100\%$ potpuno zasićeno tlo (sve pore su ispunjene vodom) [2].

3.4. Vlažnost

Vlažnost w definirana je odnosom mase vode m_w i mase suhog uzorka tla m_d koja je jednaka masi čvrstih čestica tla m_s.

$$w = \frac{m_w}{m_d} = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100\ [\%] \tag{6}$$

Vlažnost tla najčešće je $w < 100\%$. Kada vlažnost iznosi w = 0% tlo je u potpunosti suho [2].

4. KLASIFIKACIJA TLA

Za inženjersku klasifikaciju tla koristi se nekoliko klasifikacija, a neke od njih su: Jedinstveni klasifikacijski sustav USCS, Europski klasifikacijski sustav ESCS, Britanski klasifikacijski sustav BSCS i „Airfield“ klasifikacija AC. Prema USCS klasifikaciji tlo se dijeli na dvije osnovne grupe [3]:

1) **krupnozrnato** (nevezano, nekoherentno)
2) **sitnozrnato** (vezano, koherentno)

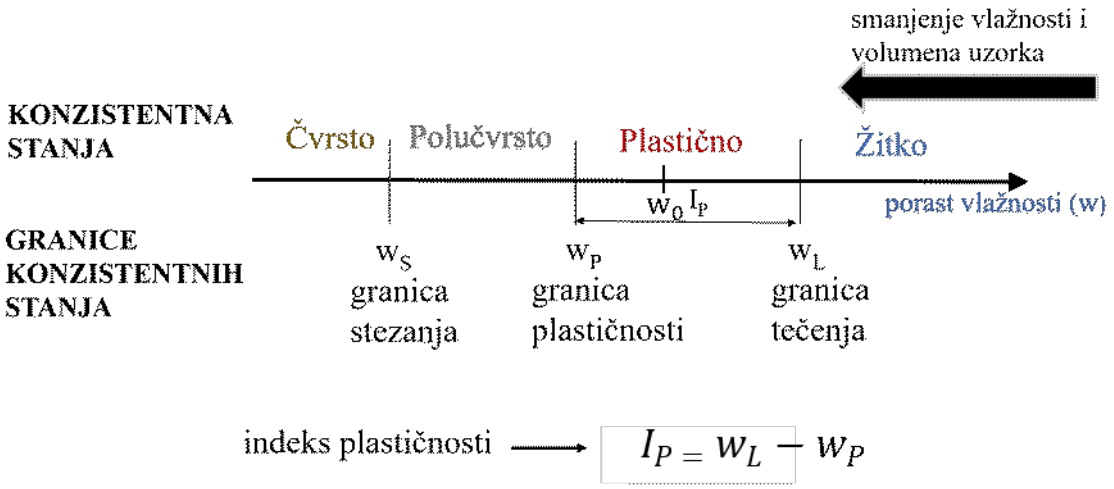
U krupnozrnata tla ubrajaju se šljunak (eng. *gravel*- oznaka G) i pijesak (eng. *sand*- oznaka S). Sitnozrnato tlo čine prah (od švedske riječi *myala*- oznaka M), glina (eng. clay- oznaka C), organsko tlo (eng. *organic soil*- oznaka O) i treset (eng. *peat*- oznaka Pt).

Granulometrijski sastav krupnozrnatih čestica (šljunka i pijeska) određuje se sijanjem. Ukoliko je tlo sastavljeno od sitnozrnatog materijala, nije moguće provoditi

postupak sijanja. U takvom tlu krupnoća čestica određuje se hidrometrijskom analizom (areometriranjem). Tla koja su jednako klasificirana prema USCS-u imaju slična inženjerska svojstva kao što su čvrstoća, stišljivost i propusnost. Klasifikacija tla služi za lakše sporazumijevanje između inženjera i za grafičko prikazivanje rezultata terenskih istraživanja [4].

4.1. Konzistencija tla i Atterbergove granice

Konzistencija tla odražava ponašanje tla pri određenom sadržaju vode za vrijeme deformacije. Nekoherentna tla nemaju konzistenciju, dok konzistencija gline i praha značajno ovisi o količini vode u tlu. S obzirom na količinu sadržaja vode, koherentna tla mogu biti u čvrstom, polučvrstom, plastičnom i žitkom konzistentnom stanju. Između konzistentnih stanja nalazi se kontinuirani prijelaz ovisno o promjeni sadržaja vode. Prijelazne faze između dva konzistentna stanja nazivaju se granice konzistencije ili Atterbergove granice, a određene su sadržajem vode u tlu pri prijelazu iz jednog konzistentnog stanja u drugo. Granice konzistencije su: granica stezanja w_s, granica plastičnosti w_P i granica tečenja w_L.



Slika 2. Konzistentna stanja i granice konzistencije [5]

Granice konzistencije određene su na temelju iskustva i empirijskog opažanja. Dobro predstavljaju karakteristične osobine koherentnog tla i omogućuju uspoređivanje

različitih vrsta tla. Za praktične potrebe Atterbergove granice se određuju jednostavnim laboratorijskim pokusima na poremećenom uzorku [5].

4.1.1. Granica stezanja

Granica stezanja w_S postignuta je kada se daljnjim sušenjem (smanjenjem vlage) ne smanjuje volumen tla [5].

4.1.2. Granica plastičnosti

Granica plastičnosti w_P je minimalna vlažnost kod koje se valjčić uzorka tla promjena 3 mm još može plastično deformirati. Određuje se bez upotrebe aparature, valjanjem uzorka tla u valjčiće promjera 3 mm [4].

4.1.3. Granica tečenja

Granica tečenja w_L je vlažnost pri prijelazu iz tekućeg u plastično konzistentno stanje, a određena je sadržajem vode pri tom prijelazu. Granica tečenja određuje se Casagrandeovim aparatom ili pomoću padajućeg šiljka [5].

4.1.4. Indeksni pokazatelji

Indeks plastičnosti I_P predstavlja razliku vlažnosti između granice tečenja w_L i granice plastičnosti w_P.

$$I_P = w_L - w_P \tag{7}$$

Indeks plastičnosti je vrlo važna veličina i služi za uspoređivanje različitih vrsta tla koja imaju sličnu granicu tečenja. Ako materijal ima veći indeks plastičnosti, karakterizira ga veća žilavost i veća suha čvrstoća. Ove osobine su karakteristične za

materijale s većom kohezijom, a ukazuju na veću zastupljenost minerala glina i veću specifičnu površinu [5].

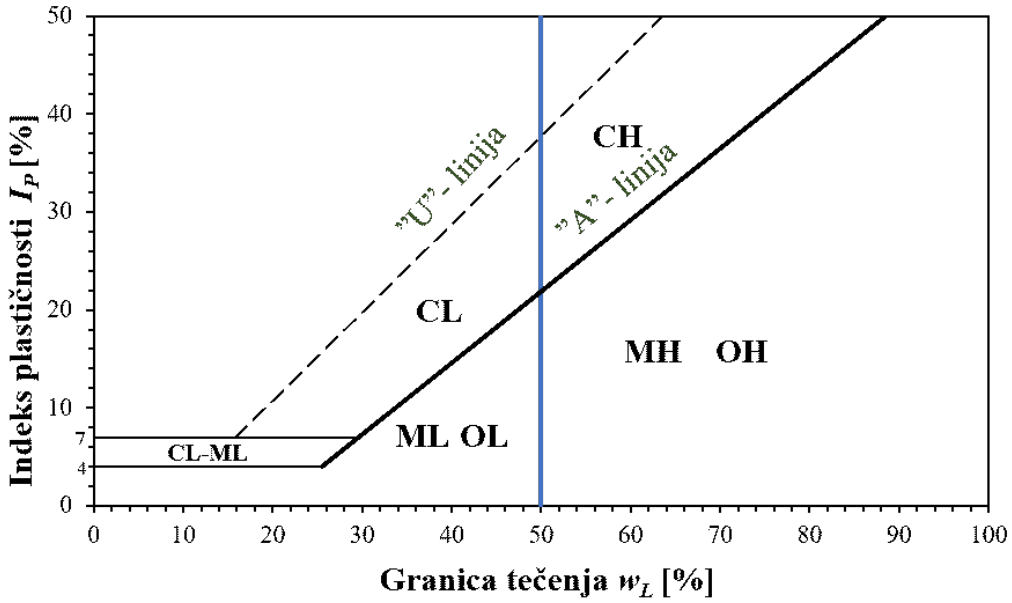
Indeks konzistencije I_C predstavlja omjer razlike vlažnosti na granici tečenja w_L i prirodne vlažnosti w_0 i indeksa plastičnosti I_P.

$$I_C = \frac{w_L - w_0}{w_L - w_P} = \frac{w_L - w_0}{I_P} \tag{8}$$

Materijal ima prirodni sadržaj vlage jednak granici plastičnosti kada je indeks konzistencije jednak jedan. Kada je jednak nuli, prirodna vlažnost se nalazi na granici tečenja [4].

4.1.5. Dijagram plastičnosti

Koherentna tla klasificiraju se u grupe i podgrupe određene prema Atterbergovim granicama i indeksnim pokazateljima. Povezujući indeks plastičnosti I_P i granicu tečenja w_L dobiva se dijagram plastičnosti prikazan na Slici 3. Na apscisu dijagrama se nanosi granica tečenja w_L, a na ordinatu indeks plastičnosti I_P.



Slika 3. Dijagram plastičnosti [4]

Anorganske gline se u dijagramu plastičnosti nalaze iznad (imaju veći indeks plastičnosti) organskih glina i praha pri istoj vrijednosti granice tečenja. "A" – linija ima jednadžbu :

$$I_P = 0{,}73 \cdot (w_L - 20) \tag{9}$$

Klasifikacijske oznake podgrupa koherentnih materijala određuju se na temelju vrijednosti granice tečenja. Oznake su [4]:

L = nisko plastično ($0 < w_L < 50\%$)

H = visoko plastično ($50\% < w_L < 100\%$)

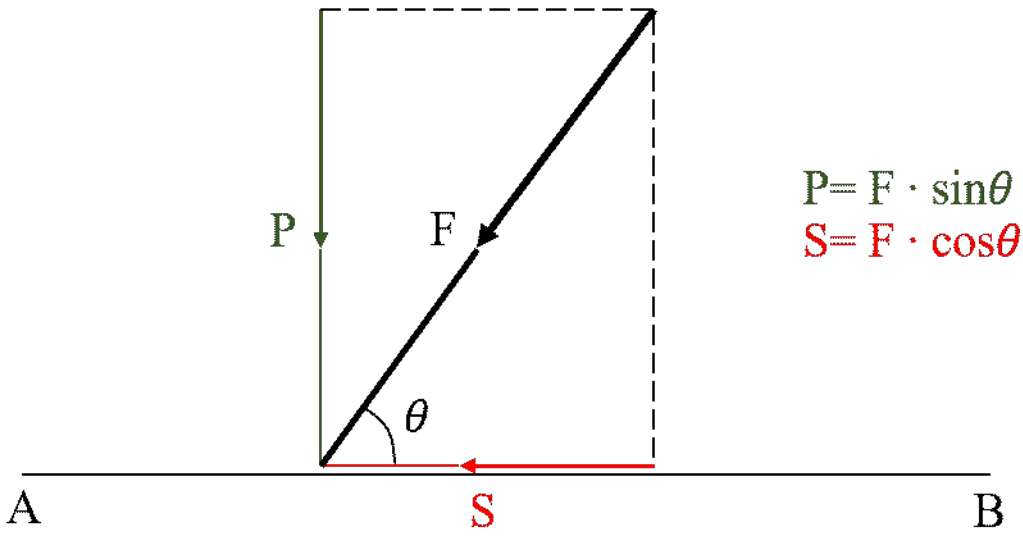
5. NAPREZANJA I DEFORMACIJE U TLU

5.1. Sila

Sila se opisuje kao utjecaj koji mijenja stanje gibanja tijela, a definirana je umnoškom mase i ubrzanja. Jedan newton (N) jednak je kilogram metru po sekundi na kvadrat ili

$$1N = \frac{kg \cdot m}{s^2} \tag{10}$$

Kod statičkih problema u tlima, sila se definira kao utjecaj koji izaziva deformaciju prilikom nanošenja. Vektorska je veličina, određena je iznosom, smjerom i orijentacijom. Sila F koja djeluje pod određenim kutom θ može se rastaviti na horizontalnu komponentu S i vertikalnu komponentu P kao što je prikazano na Slici 4. [6].



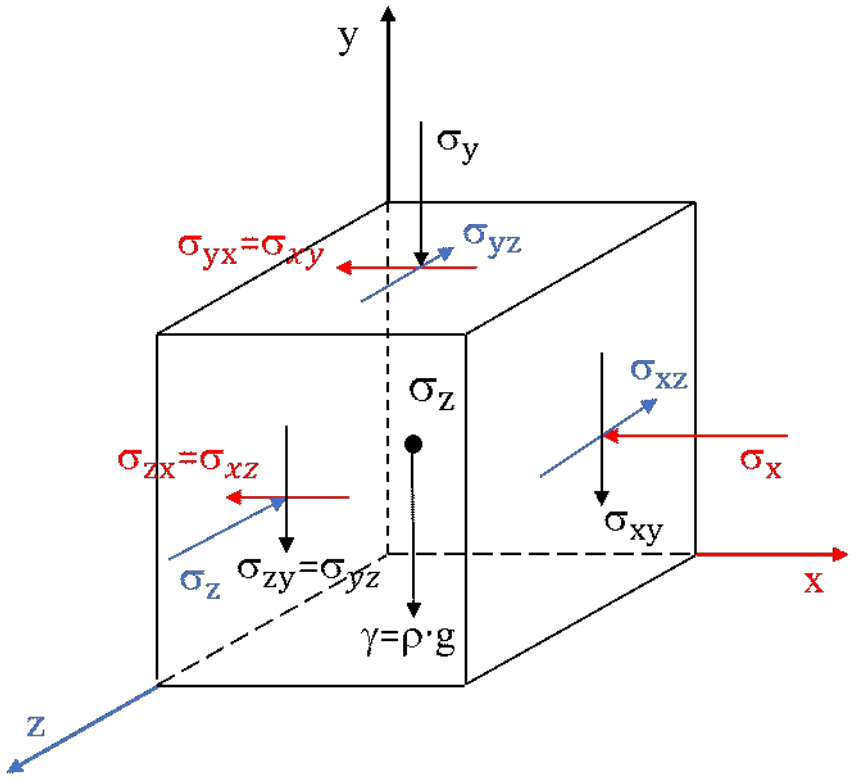
Slika 4. Rastavljanje sile na horizontalnu i vertikalnu komponentu [6]

5.2. Naprezanja

Naprezanje je određeno prijenosom sile između dva infinitezimalno mala susjedna dijela preko zamišljene ravnine presjeka. Mjerna jedinica naprezanja je kN/m^2 ili kPa, a definirano je djelovanjem sile na površinu presjeka. Naprezanja u nekoj točki tla dijele se na:

1) normalna naprezanja: σ_x, σ_y *i* σ_z
2) posmična naprezanja: σ_{xy}, σ_{yz} *i* σ_{xz} (često se označuju s τ umjesto σ)

Prema dogovoru, u mehanici tla tlačna naprezanja su pozitivna. Slika 5. prikazuje interpretaciju komponenti matrice naprezanja [7].



Slika 5. Interpretacija komponenti matrice naprezanja [7]

5.3. Princip efektivnih naprezanja

Princip efektivnih naprezanja predložio je austrijski građevinski inženjer i geolog Karl von Terzaghi 1923. godine. Efektivno naprezanje σ′ predstavlja razliku ukupnog naprezanja σ i tlaka porne vode u.

$$\sigma' = \sigma - u \tag{11}$$

Efektivna naprezanja se ne mogu neposredno mjeriti. Ukupna naprezanja i tlak porne vode se mjere, a efektivna naprezanja određena su njihovom razlikom.

Skelet tla prenosi samo efektivna naprezanja, a porni tlak se prenosi vodom. Voda ne preuzima posmična naprezanja, a deformacije tla događaju se isključivo zbog promjene efektivnih naprezanja. Čvrste čestice tla su nestišljive pa se deformacija odvija zbog smanjena volumena pora. Voda je također nestišljiva i ne mijenja svoj volumen. Tijekom opterećenja voda izlazi iz pora i dolazi do strujanja vode u tlu [7].

5.4. Slijeganje i vremenski tok slijeganja tla (konsolidacija)

Slijeganje predstavlja vertikalni pomak tla ili temeljne konstrukcije nastao zbog djelovanja opterećenja. Iako je opterećenje najčešći razlog nastanka slijeganja, uslijed snižavanja razine podzemne vode, puzanja i dinamičkih efekata također dolazi do slijeganja tla.

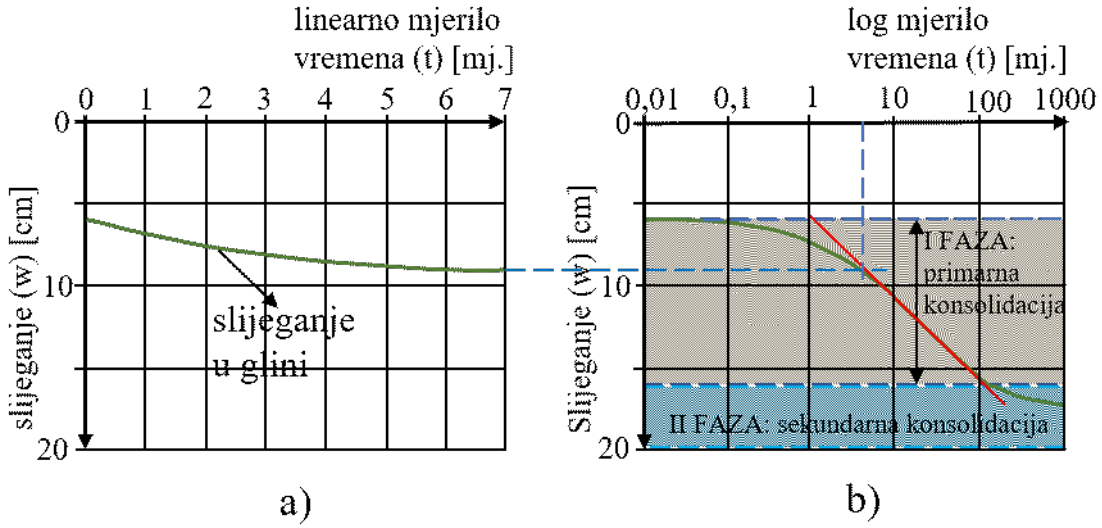
Slijeganje u nekoherentnim materijalima događa se istovremeno s nanošenjem opterećenja. Koherentna tla imaju slabu propusnost pa nastali višak pornog tlaka od opterećenja sporo disipira, a efektivna naprezanja i slijeganje sporo rastu. Ukupno slijeganje s_u se sastoji od trenutnog slijeganja s_t, primarnog konsolidacijskog s_c i sekundarnog konsolidacijskog s_s.

$$s_u = s_t + s_c + s_s \tag{12}$$

Trenutno slijeganje predstavlja najizraženiju komponentu slijeganja, a događa se odmah nakon nanošenja opterećenja. Kod slabo propusnih i potpuno zasićenih tla odražava se u promjeni oblika tla bez promjene volumena (onemogućeno brzo istjecanje vode iz pora).

Primarno konsolidacijsko slijeganje posljedica je istjecanja viška vode iz pora uslijed čega dolazi do promjene oblika i volumena tla. Istjecanje vode iz pora je vrlo sporo kod slabo propusnih tla (glina i pijesak) pa se naziva vremenskim tokom slijeganja.

Sekundarno konsolidacijsko slijeganje izazvano je puzanjem tla kao posljedica deformacije samih čestica tla (nema istjecanja vode iz pora). Proces puzanja izražen je kod visoko plastičnih glina i treseta. Slika 6. prikazuje vremenski tok slijeganja gline u linearnom i logaritamskom mjerilu vremena [2].



Slika 6. Vremenski tok slijeganja gline [2]

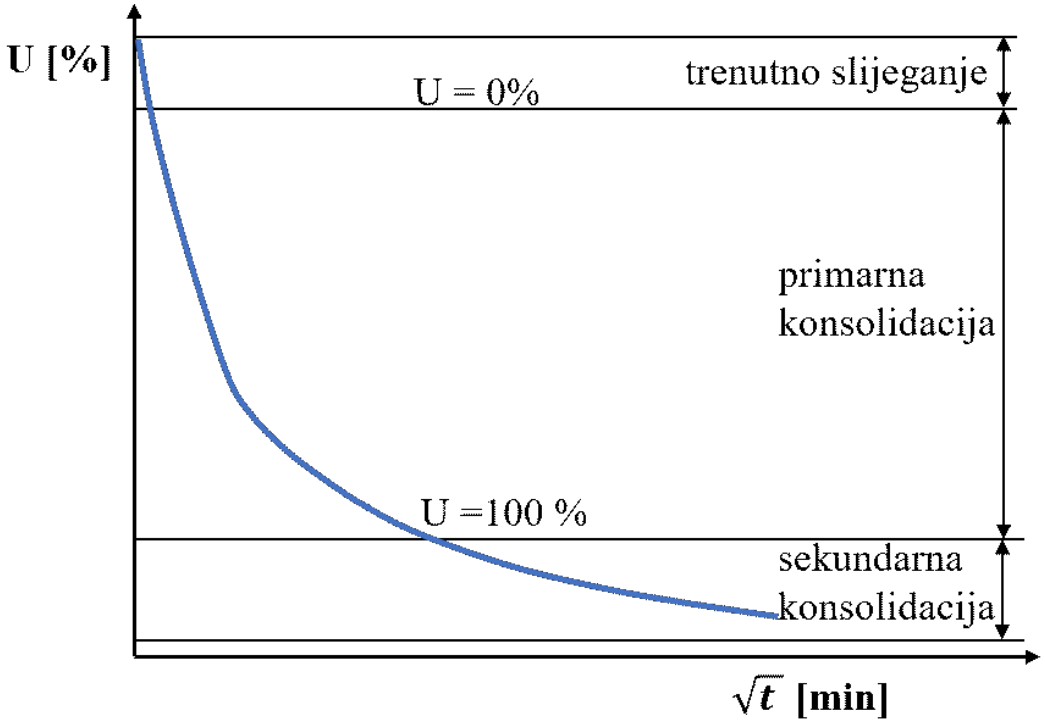
5.4.1. Stupanj konsolidacije i koeficijent konsolidacije

Krivulja vremenskog toka slijeganja može se prikazati na više načina. Na osi apscisa prikazuje se proteklo vrijeme u logaritamskom mjerilu ili u mjerilu drugog

korijena. Os ordinata prikazuje jedno od sljedećih značajki: ukupno slijeganje u vremenu (mm), relativnu deformaciju u vremenu [%], promjenu poroziteta u vremenu ili stupanj konsolidacije (U) u vremenu [%]. Stupanj konsolidacije U(t) predstavlja omjer slijeganja u vremenu *s(t)* i konačnog slijeganja s_c, a izražava se u postocima.

$$U(t) = \frac{s(t)}{s_c} \cdot 100\ [\%] \tag{13}$$

Krivulja vremenskog toka slijeganja, ovisnost stupnja konsolidacije (U) o proteklom vremenu u mjerilu drugog korijena prikazana je na Slici 7. Iz navedene krivulje određuje se potrebno vrijeme za određeni stupanj konsolidacije [3].



Slika 7. Krivulja vremenskog toka slijeganja, ovisnost stupnja konsolidacije U o proteklom vremenu t u mjerilu drugog korijena [3]

Koeficijent konsolidacije ovisi o svojstvima materijala, a definiran je izrazom [6] :

$$c_V = \frac{T_V \cdot H^2}{t} = \frac{0{,}103 \cdot H^2}{t_{100}} \tag{14}$$

gdje je:

c_V - koeficijent konsolidacije [m^2/god]

T_V - vremenski faktor [-]

H - visina uzorka [mm]

t - vrijeme konsolidacije [min]

t_{100} - vrijeme potrebno za 100% konsolidacije

6. POSMIČNA ČVRSTOĆA

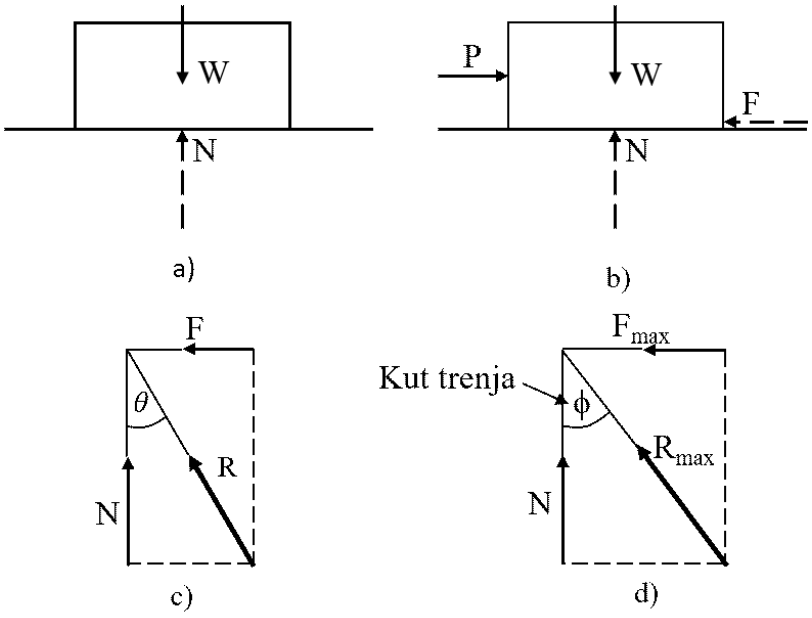
Posmična čvrstoća je najveći iznos posmičnog naprezanja koji se može nanijeti na strukturu tla u određenom pravcu. Predstavlja jedno od najvažnijih inženjerskih osobina tla. Naprezanja svestranog i različitog pritiska zbijaju tlo pri čemu se povećava krutost i nivo normalnih naprezanja. Posmično naprezanje povećava distorzijske deformacije do maksimalne veličine naprezanja koje predstavlja posmičnu čvrstoću tla. Postizanjem najvećeg posmičnog naprezanja popraćenog plastičnim deformacijama dolazi do sloma tla. U trenutku sloma, posmično naprezanje pomiče dio mase ako je lom realiziran samo u ravnini smicanja.

Različitim analizama utvrđeno je da čvrstoća tla ovisi o normalnom efektivnom naprezanju, koheziji, trenju između čestica, lomu pojedinih zrna i mnogim drugim faktorima. Zbog otpora trenja po kontaktima između zrna, tlo pokazuje najveći dio posmične čvrstoće. Da nema pojave trenja između zrna, tlo bi pokazivalo isto ponašanje kao tekućina. Posmična naprezanja prima samo skelet tla, a naprezanje se prenosi preko kontaktnih sila susjednih zrna [7].

6.1. Trenje

Blok težine W leži na ravnoj površini koja nije savršeno glatka (Slika 8.a)). Sila reakcije N djeluje okomito na blok prema gore i jednaka je težini W. Ako na blok djeluje sila iznosa P (Slika 8.b)), manja nego što je potrebno za pomicanje bloka, sila F suprotnog smjera će djelovati na površini dodira, suprotstavljajući se pomicanju bloka. Sila F je posljedica trenja između bloka i površine. Rezultanta sila R dobiva se kombinacijom vektora sile N i F i nagnuta je za kut θ (Slika 8.c)). Kako se sila P povećava, sila F raste dok ne dostigne svoju najveću vrijednost F_{max}, kad se blok počinje kretati. Budući da sila N ostaje konstantna, kut θ postepeno raste kao i sila F dok ne dostigne najveću vrijednost. Omjer F_{max}/N predstavlja koeficijent trenja, a označava se sa μ. Kut ϕ je najveći otklon sile R i predstavlja kut trenja (Slika 8.d)) [6].

$$tan\,\phi = \frac{F_{max}}{N} = \mu \tag{15}$$



Slika 8. Trenje i kut trenja [6]

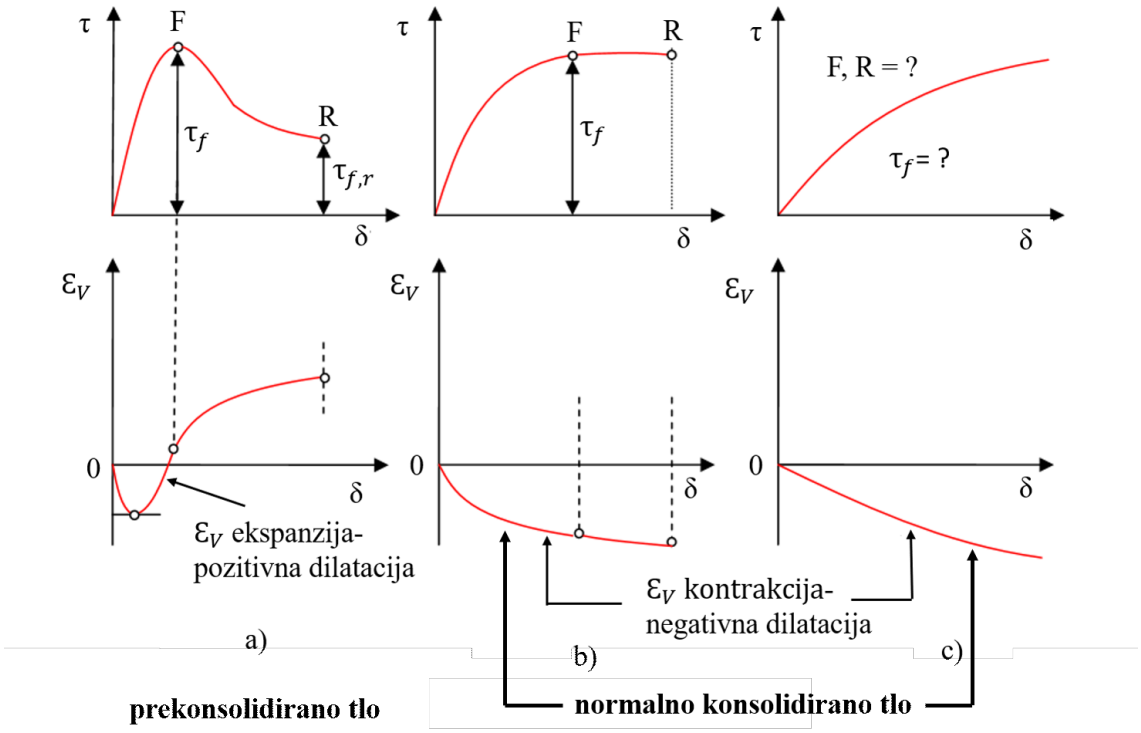
6.2. Slom tla

Kada posmična naprezanja dosegnu posmičnu čvrstoću tla dolazi do sloma, klizanja jedne čestice po drugoj. U mehanici tla razlikuju se tri kvalitativno različita oblika sloma tla.

Kod **krto-plastičnog sloma** (Slika 9.a)) dolazi do povećanja posmičnog naprezanja do najveće vrijednosti, vršnog posmičnog naprezanja τ_f pri malim deformacijama. Zatim posmično naprezanje opada pri daljnjim horizontalnim deformacijama do konstantne vrijednosti naprezanja, rezidualne čvrstoće $\tau_{f,r}$. Vršna čvrstoća je najveća vrijednost posmičnog naprezanja, a rezidualna (trajna) čvrstoća je čvrstoća pri velikim deformacijama.

Pri **plastičnom slomu** (Slika 9.b)), porastom deformacija posmično naprezanje se povećava do svoje najveće vrijednosti (vršne čvrstoće), a zatim ostaje konstantno pri daljnjim deformacijama.

Tlo se ponaša **žilavo** (Slika 9.c)) kada se povećanjem deformacija i posmičnog naprezanja ne postiže najveća vršna čvrstoća. Razlog tome je nedovoljno velika deformacija da bi se mobilizirala sva posmična čvrstoća.



Slika 9. Različiti oblici sloma tla [9]

Različiti elementi tla pokazuju različita ponašanja pri slomu. Ponašanje ovisi o zbijenosti, vrsti tla i nivou normalnih naprezanja. Za prekonsolidirana i zbijena tla karakteristične su vršna i rezidualna čvrstoća. Rahla i normalno konsolidirana pokazuju vršnu čvrstoću koja se postiže nakon velikih deformacija [8, 9].

6.3. Mohr-Coulombov zakon čvrstoće

Posmična čvrstoća tla definirana je Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće za efektivna naprezanja. Određena je parametrima drenirane čvrstoće: kutom unutrašnjeg trenja i kohezijom.

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot tg\,\varphi' \qquad (16)$$

gdje je:

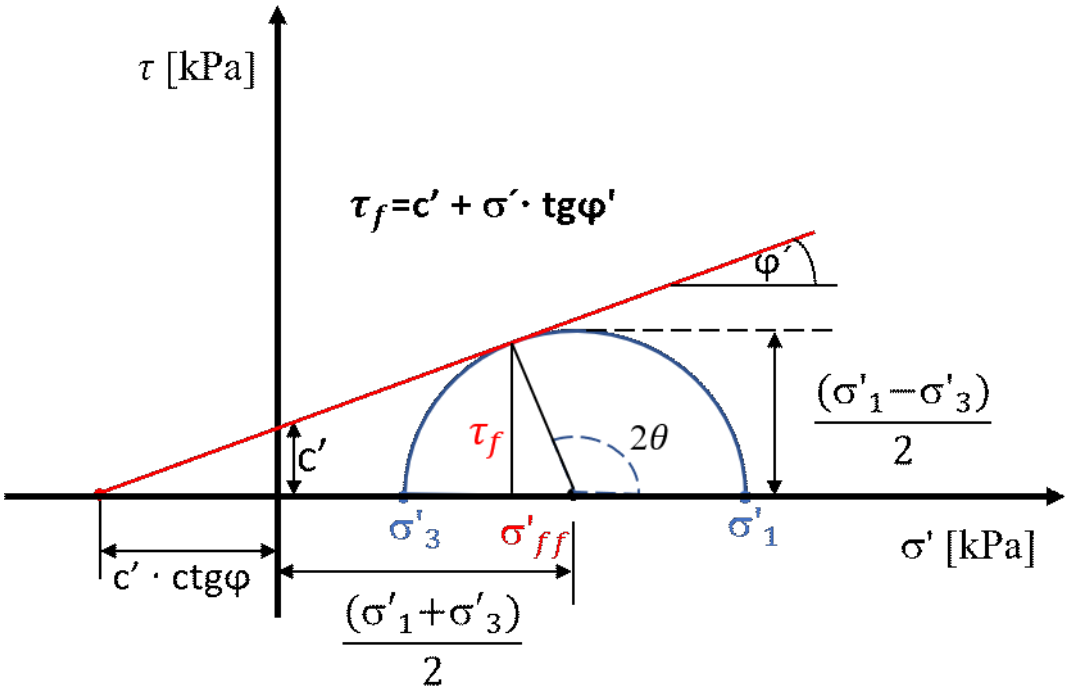
τ_f - posmična čvrstoća tla

c' - kohezija

σ'- normalno efektivno naprezanje

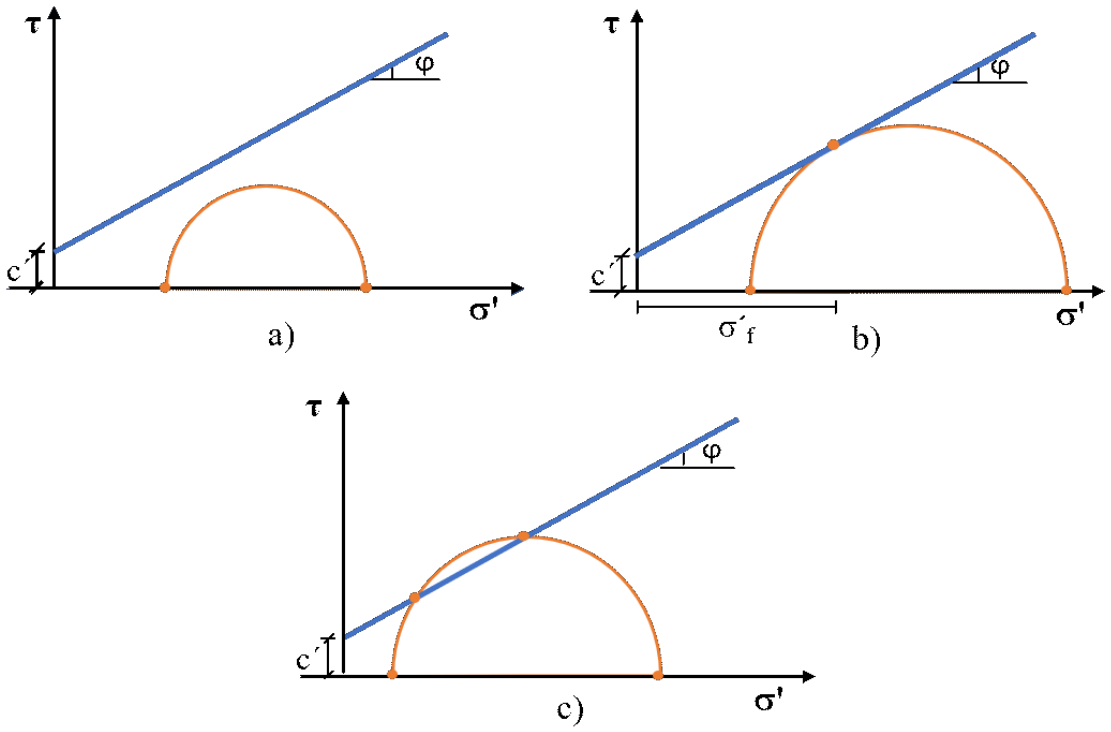
φ'- kut unutrašnjeg trenja

Anvelopa sloma (granična linija čvrstoće tla) definira odnos između efektivnih normalnih naprezanja i posmične čvrstoće tla. Blago je zakrivljena, a u praksi se zamjenjuje pravcem (Slika 10.)



Slika 10. Mohr-Coulombova kružnica naprezanja i anvelopa sloma [9]

Slom tla nastaje kada kružnica naprezanja tangira anvelopu sloma. Plohe na kojima je prekoračena otpornost tla tangencijalno se deformiraju. Situacija prikazana na slici 11.a) predstavlja sigurnost od sloma jer kružnica ne tangira anvelopu sloma. Kod stanja naprezanja prikazanog na slici 11.b) dolazi do sloma (anvelopa tangira kružnicu). Situacija 11.c) je nemoguća jer sve ravnine s točkama na kružnici leže iznad anvelope sloma.



Slika 11. Anvelopa sloma i Mohrova kružnica. Moguća stanja a) i b) i nemoguće stanje c) [10]

Također, posmična čvrstoća tla može se izraziti preko glavnih efektivnih naprezanja pri slomu u nekoj promatranoj točki [9, 10].

$$\tau_f = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \cdot sin\ 2\theta \tag{17}$$

$$\sigma'_{ff} = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} + \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \cdot cos\ 2\theta \tag{18}$$

$$\theta = 45° + \frac{\varphi'}{2} \tag{19}$$

gdje je:

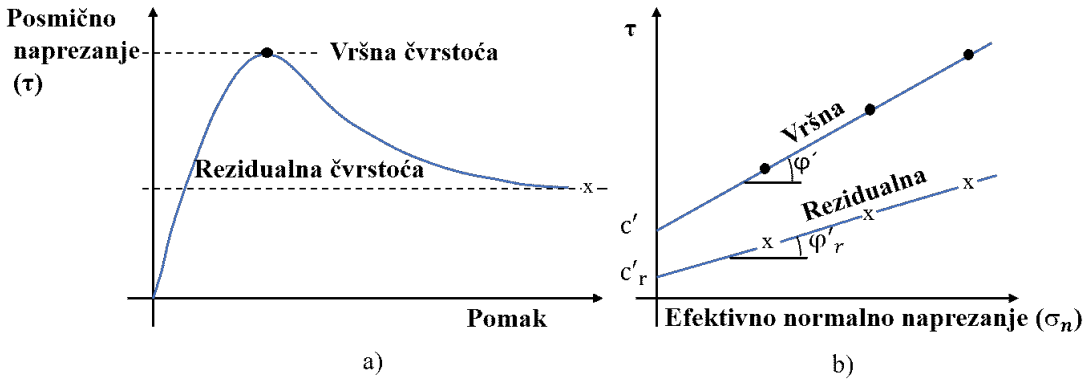
σ'_1 - maksimalno efektivno glavno naprezanje

σ'_3 - minimalno efektivno glavno naprezanje

θ - kut između ravnine na koju djeluje maksimalno glavno naprezanje i ravnine sloma

σ'_{ff} - normalno efektivno naprezanje pri slomu

Slika 12.a) prikazuje vršnu i rezidualnu čvrstoću, a Slika 12.b) anvelopu sloma za vršne i rezidualne uvjete [6].



Slika 12. Vršna i rezidualna čvrstoća a) i anvelopa sloma za vršne i rezidualne uvjete b) [6]

6.3.1. Kohezija

Sitnozrnata (koherentna) tla posjeduju svojstvo kohezije. Na dodirnim točkama susjednih zrna djeluju električne i Van der Waalsove sile. Djelovanje sila rezultira privlačenjem čestica. Intenzitet privlačenja smanjuje se povećanjem razmaka između čestica. Ukupno privlačenje intenzivnije je ako u jediničnom volumenu ima više čestica i više međusobno dodirnih točaka. Ako su čestice manje krupnoće, bit će intenzivnije djelovanje električnih i Van der Waalsovih sila. Razlog nastajanja kohezije je međusobni položaj čestica materijala fiksiran silama koje djeluju na njihovim kontaktima, a one nisu uvjetovane djelovanjem vanjskih sila. Kohezija materijala ovisi o veličini čestica, njihovom mineraloškom sastavu, granulometrijskom sastavu, granicama konzistencije, međusobnom razmaku susjednih čestica, koeficijentu pora, elektrokemijskom sastavu porne vode …

Kada su normalna naprezanja jednaka nuli, tlo još uvijek pruža otpor smicanju zbog kohezije. Vlačna čvrstoća tla uvjetovana je kohezijom. Kohezija nije konstantan parametar tla, njezina vrijednost ovisi o vlažnosti. Pri većoj vlažnosti jakost elektrokemijskih sila je manja, a u potpunosti se uklanja ako se tlo rastopi u vodi. Veličina kohezije se očituje u konzistentnim stanjima [9, 11].

6.3.2. Kut unutrašnjeg trenja

Nekoherentna tla imaju veću vrijednost kuta unutrašnjeg trenja (φ) od koherentnih. Kod šljunka i pijeska kut unutrašnjeg trenja je kut prirodnog pokosa. To je kut koji može zadržati nagib kosine u takvom materijalu, a ovisi o porozitetu. Zbijanjem tla kut unutrašnjeg trenja se povećava.

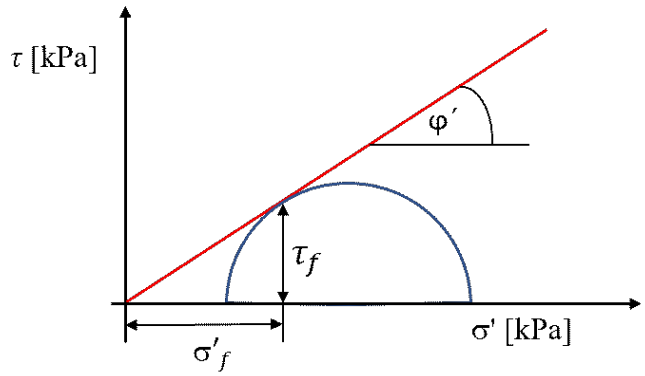
Anvelopa sloma kod nekoherentnih tla teoretski je određena pravcem koji se može izraziti u obliku (Slika 13.) [9] :

$$tg\,\varphi = \frac{\tau_f}{\sigma_f} = \varphi(G, f) \qquad (20)$$

gdje je:

G - struktura i geometrija zrna

f - koeficijent trenja među zrnima



Slika 13. Anvelopa sloma kod nekoherentnih tla [9]

Kut unutrašnjeg trenja koherentnih materijala ovisi o veličini čestica i konzistentnom stanju. Smanjuje se smanjenjem krupnoće čestica i povećanjem vlažnosti.

U Tablici 1. prikazane su vrijednosti kuta unutrašnjeg trenja kod koherentnih i nekoherentnih tla [12].

Tablica 1. Vrijednosti kuta unutrašnjeg trenja nekoherentnih i koherentnih tla [12]

Opis	**USCS**	**Kut unutrašnjeg trenja [°]**		
		Minimalna vrijednost	**Maksimalna vrijednost**	**Specifična vrijednost**
Dobro graduirani šljunak	GW	33	40	-
Slabo graduirani šljunak	GP	32	44	-
Dobro graduirani pijesak	SW	33	43	-
Dobro graduirani pijesak-zbijen	SW	-	-	38
Slabo graduirani pijesak	SP	30	39	-
Prašinasti pijesci	SM	32	35	-
Prah visoke plastičnosti	MH	23	33	-
Prah i glinoviti prah-zbijen	ML	-	-	32
Glina visoke plastičnosti	CH	17	31	-
Glina visoke plastičnosti-zbijena	CH	-	-	19
Glina niske plastičnosti	CL	27	35	-
Glina niste plastičnosti-zbijena	CL	-	-	28
Treset i ostala organska tla	Pt	0	10	-

6.4. POKUSI ODREĐIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE TLA

6.4.1. “ In situ“ pokusi

“In situ“ ili terenskim pokusima osobine slojeva tla određuju se mjerenjem otpora prodiranju ili otpora okretanju utisnutog uređaja. Mogu se koristiti za nadopunu podataka dobivenih ispitivanjem poremećenih i neporemećenih uzoraka. Pokusi su vrlo primjenjivi kod ispitivanja nekoherentnih materijala i mjerenja posmične čvrstoće u

mekim glinovitim naslagama jer se ponekad teško izdvaja neporemećen uzorak za laboratorijsku analizu. Najčešće terenske pokuse ispitivanja tla predstavljaju [9]:

1) dinamički penetracijski pokusi
2) statički penetracijski pokusi
3) krilna sonda za mjerenje otpora tla na smicanje

6.4.2. Laboratorijski pokusi

Posmična čvrstoća tla jednoznačno je određena odnosom čvrstoće prema efektivnim naprezanjima. Čvrstoća tla ovisi o porozitetu koji se konstantno mijenja (smanjuje) u vremenu pod djelovanjem konstantnog efektivnog naprezanja. Rezultati ispitivanja posmične čvrstoće tla ne ovise samo o vrsti materijala. Veliki utjecaj na rezultate imaju uvjeti dreniranja uzorka i brzina izvođenja pokusa. Drenirane uvjete predstavlja slobodno kretanje i istjecanje vode iz pora, dok u nedreniranim uvjetima nema istjecanja vode iz tla. Primjenjivi laboratorijski pokusi određivanja posmične čvrstoće su [11]:

1) pokus direktnog smicanja
2) triaksijalni pokus
3) jednoaksijalni pokus
4) laboratorijska krilna sonda

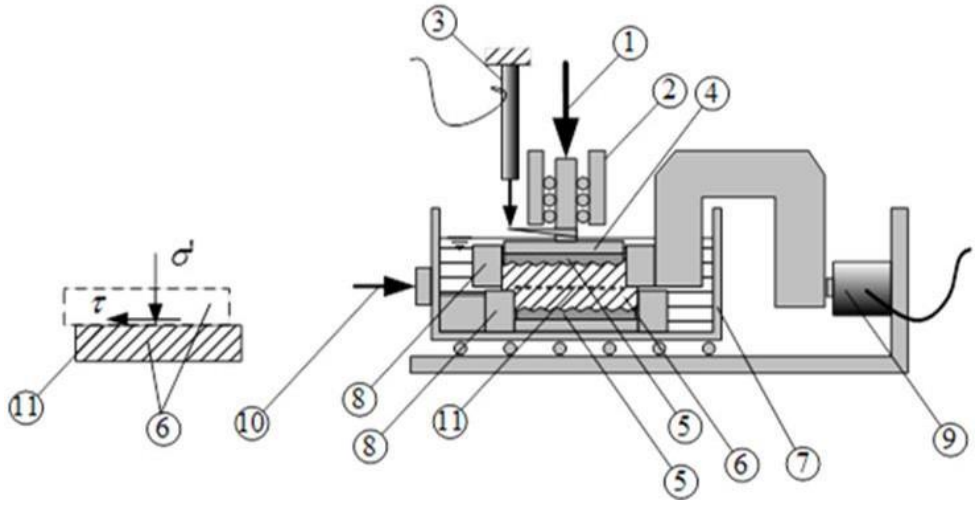
6.5. DIREKTNO SMICANJE

6.5.1. Uređaj za izravni posmik

Za određivanje posmične čvrstoće tla u primjeni su dvije vrste uređaja za izravni posmik:

1) uređaj sa stalnim prirastom sile
2) uređaj sa stalnim prirastom deformacija

Uređaj za izravni posmik čine vanjska kutija kvadratnog oblika i dvodijelni okvir. Donji dio je nepokretan, a gornji dio kutije se smiče. Uzorak tla se ugrađuje u okvir, a zatim smješta na nazubljenu poroznu propusnu ploču i pokriva istom takvom pločom. Donji dio okvira fiksiran je u otvorenoj kutiji koja leži na kugličnim ležajevima zbog smanjenja trenja prilikom klizanja. Vanjska kutija pomiče se pomoću pogonske jedinice u kojoj se nalazi motor koji pokreće cijeli sustav. Sila otpora tla na smicanje mjeri se pomoću mjernog instrumenta (transducera) za mjerenje horizontalne sile. Uzorak se vertikalno opterećuje preko stremena koji zajedno s utezima visi u sredini gornje površine uzorka. Okviri su uronjeni u vanjsku kutiju ispunjenu vodom, a porozne ploče koje su u kontaktu s vanjskom kutijom omogućuju dreniranje vode iz ispitivanog uzorka tla. Slika 14. prikazuje dijelove uređaja za izravni posmik [9, 13].



Slika 14. Dijelovi uređaja za izravni posmik [13]

1- uređaj za nametanje vertikalne sile
2- vodilice uređaja za vertikalno opterećenje (sprječavanje naginjanja gornje ploče)
3- mjerilo vertikalnog pomaka gornje ploče
4- gornja ploča
5- nazubljeni šupljikavi kamen
6- uzorak tla

7- pomična posuda na ležajevima

8- gornji (pomični) i donji (nepomični) okvir potopljen u vodi

9- mjerilo horizontalne sile

10- uređaj za nametanje horizontalnog pomaka

11- pretpostavljena ploha sloma

6.6. Pokusi direktnog smicanja

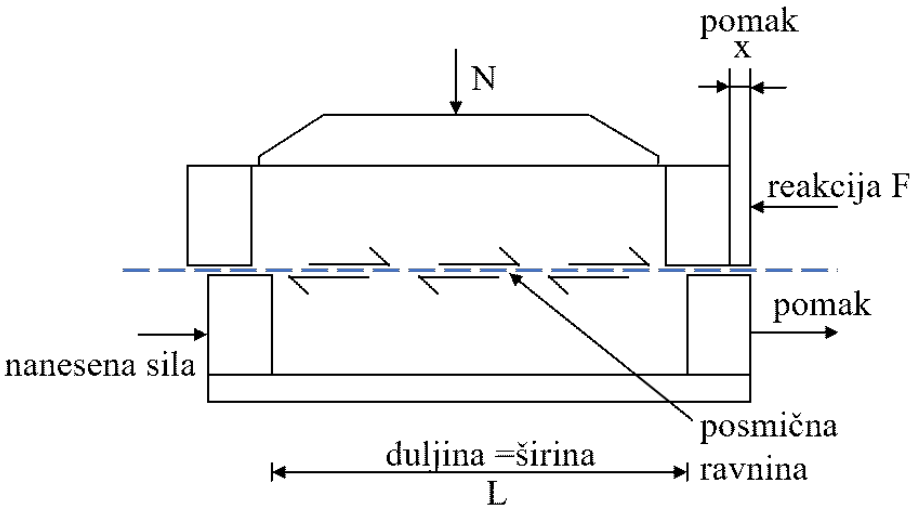
Uzorak tla u uređaju za izravni posmik ispituje se na tri načina, primjenjujući tri različita standardna pokusa koji se prvenstveno razlikuju po tome kako se uzorak drenira [8] :

1) **Drenirani ili spori pokus** (CD pokus) - dreniranje je dozvoljeno u obje faze provođenja pokusa. Rezultat pokusa je vršna čvrstoća tla za efektivna naprezanja koja su jednaka totalnim u slučaju male brzine smicanja koja omogućuje potpunu disipaciju pornog tlaka.
2) **Nedrenirani ili brzi pokus** (UU pokus) - dreniranje tla je onemogućeno u obje faze postupka. Pokusom se dobiva nedrenirana čvrstoća za totalna naprezanja. Ako se ispitivanje provede u nezasićenim glinama, rezultat je "nedrenirana kohezija" koja je jednaka nedreniranoj čvrstoći, a kut unutrašnjeg trenja iznosi nula.
3) **Povratni ili reversni pokus** – dobiva se rezidualna (trajna) čvrstoća tla pri velikim deformacijama za efektivna naprezanja. Pokus je drenirani, a najčešće služi za ispitivanje materijala koji sadrže sitnozrnate frakcije (minerale glina) i pločastog su oblika.

6.6.1. Drenirani ili spori pokus (CD pokus) izravnog posmika

Pokus izravnog posmika najstariji je pokus za određivanje posmične čvrstoće tla, vrlo je jednostavan i često se koristi. Smicanjem jednog dijela uzorka u odnosu na drugi izaziva se slom tla po unaprijed definiranoj horizontalnoj plohi sloma pod djelovanjem sile klipa. Ispitivanje se provodi na tri ili četiri uzorka tla u dvije različite faze. U prvoj fazi svaki se uzorak podvrgava konsolidaciji pod različitim vertikalnim naprezanjem.

Svako sljedeće naprezanje je duplo veće od prethodnog. Druga faza pokusa je smicanje uzoraka konsolidiranih pri različitim iznosima vertikalnog naprezanja i pod njegovim stalnim djelovanjem. Na Slici 15. prikazana je shema izravnog posmika.



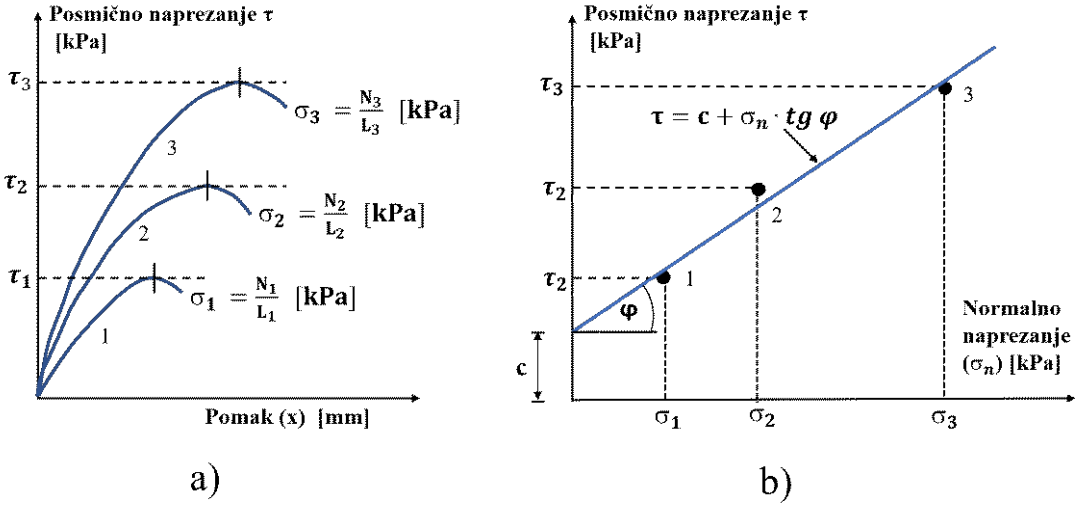
Slika 15. Shema izravnog posmika [14]

Prije ispitivanja provodi se priprema uzorka tla i kalibracija uređaja (povremeno) zbog mogućnosti pojave pasivnog trenja kod horizontalnog opterećenja i pasivne stišljivosti kod mjerenja vertikalnog pomaka. Pokus se izvodi kao drenirani na poremećenim, neporemećenim i zbijenim uzorcima tla kvadratnog ili kružnog presjeka dimenzije 60 x 60 mm, 100 x 100 mm ili veće.

Tijekom pokusa nije u potpunosti poznato stanje naprezanja u uzorku jer je spriječena bočna deformacija. Predlaže se interpretacija rezultata u obliku ovisnosti sile o pomaku, a ne odnosa naprezanje-deformacija (npr. modula). Tijekom provođenja pokusa, oko spoja dviju kutija, formira se plastična zona sloma u kojoj se volumen drugačije mijenja nego u ostatku uzorka. Uzorak za vrijeme ispitivanja nema homogeno raspoređenu gustoću. Navedena pojava ovisi o vertikalnom naprezanju, vrsti tla i razmaku između kutija. Tijekom smicanja dviju polu kutija mijenja se površina kontakta između gornjeg i donjeg dijela uzorka i trenje između tla i metalnog dijela ćelije pa je rezultate izravnog posmika potrebno često korigirati [14].

6.6.2. Prikaz rezultata ispitivanja

Rezultati ispitivanja dobiveni pokusom izravnog posmika interpretiraju se u obliku tri dijagrama. Prvi dijagram je krivulja vremenskog toka slijeganja gdje je na osi apscisa prikazano proteklo vrijeme od početka konsolidacije, a na ordinati vertikalni pomak (slijeganje). U drugom dijagramu prikazuje se odnos posmičnog naprezanja i horizontalne deformacije (pomaka) (Slika 14.a)), a u treći dijagram se unose vršna posmična naprezanja i pripadna vertikalna naprezanja. Kroz sve točke ispitivanja crta se regresijski pravac (Slika 14.b)). Nejednakost početnih gustoća uzoraka može dovesti do većeg odstupanja točaka od pravca. Odsječak pravca na osi ordinata predstavlja koheziju (c), a nagib pravca je kut unutrašnjeg trenja (φ) [14].



Slika 16. Dijagrami rezultata ispitivanja izravnog posmika [14]

7. BRZINA SMICANJA

Brzina kojom će se uzorak smicati ovisi o karakteristikama dreniranja, propusnosti i debljini uzorka. Brzina smicanja mora biti dovoljno spora kako bi se omogućilo potpuno dreniranje uzorka i disipacija pornih tlakova koji se ne mogu mjeriti. Porni tlakovi imaju pozitivnu vrijednost kod normalno konsolidiranog, a negativnu kod prekonsolidiranog tla. Negativni porni pritisci povećavaju posmičnu čvrstoću u zoni smicanja što često rezultira visokom kohezijom. Nekoherentna tla se smiču velikom brzinom, a koherentna manjom brzinom koja se određuje prema izrazu:

$$v = \frac{\delta_f}{t_f} \tag{21}$$

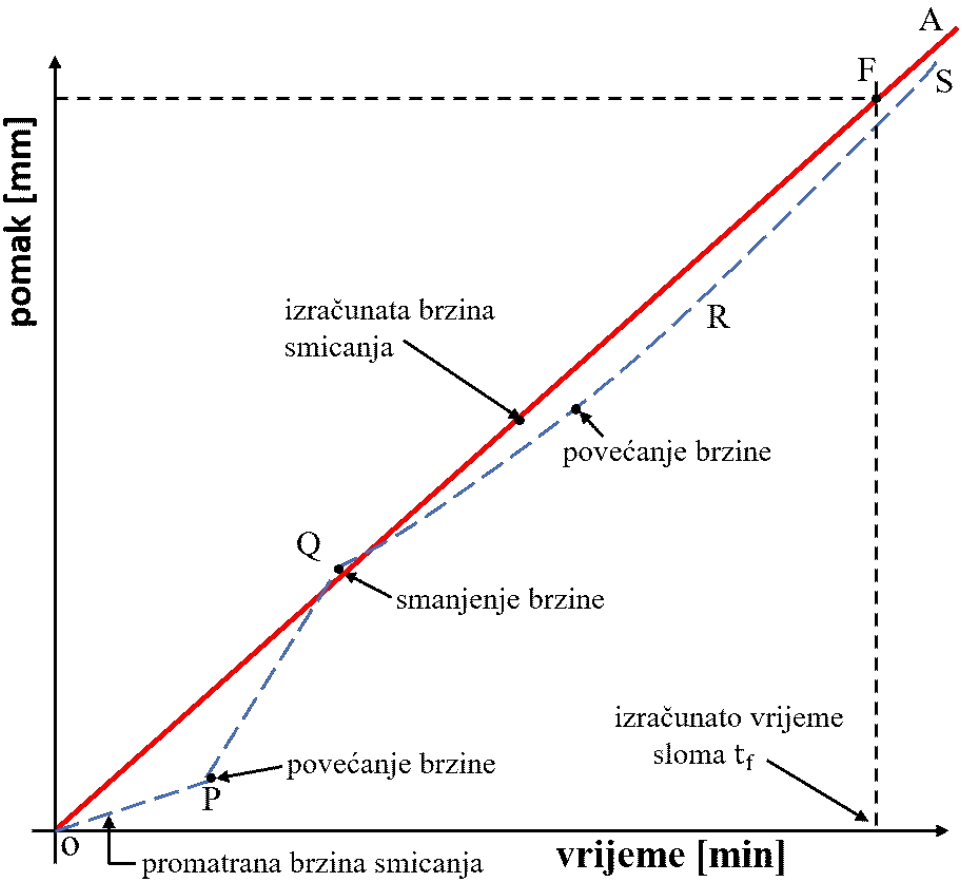
gdje je:

v - brzina smicanja

δ_f - deformacija (pomak) pri slomu

t_f - potrebno vrijeme do sloma

Stvarna brzina smicanja može se pratiti grafički crtanjem promatranih pomaka u ovisnosti o vremenu, prikazano na Slici 17. Ako promatrane točke padnu ispod linije OA, brzina smicanja je manja od izračunate, a ako se promatrane točke nalaze iznad linije, brzina smicanja je prevelika i potrebno ju je smanjiti. Nedugo nakon početka ispitivanja s pojavom deformacija pri povećavanju posmične sile stvarna relativna brzina može biti manja od izračunate (linija OP). U ovom slučaju dopušteno je povećanje brzine smicanja uz daljnu kontrolu deformacija. Kada crta promatranih točaka dosegne liniju OA (točku Q), brzinu je potrebno smanjiti tako da tvori krivulju QRS. Tijekom cijelog postupka ispitivanja brzinu smicanja potrebno je održavati na izračunatoj vrijednosti (linija OA) ili manjoj [6, 14].



Slika 17. Grafičko praćenje brzine smicanja [6]

7.1. Pomak pri slomu

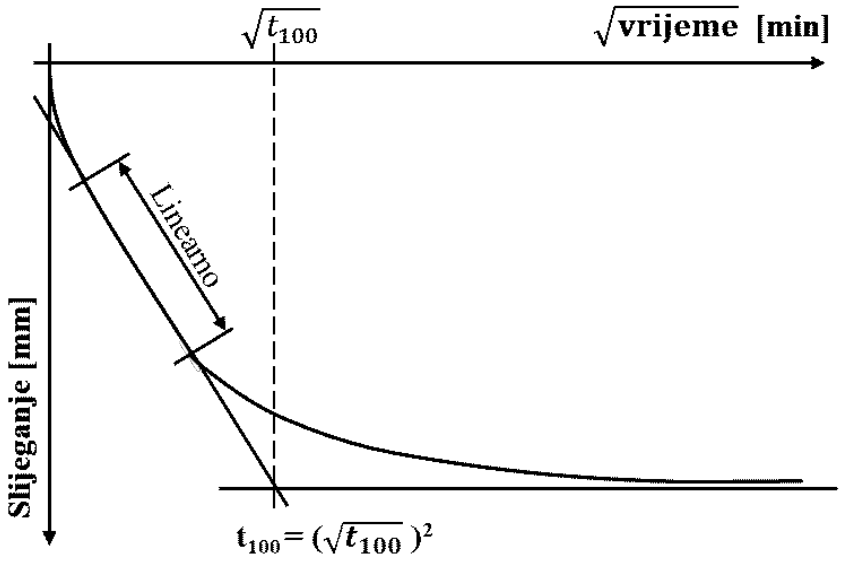
Pomak pri slomu je pretpostavljena vrijednost pri kojoj će se mobilizirati vršna posmična čvrstoća. Tablica 2. prikazuje raspon vrijednosti pomaka pijeska i gline do sloma (posmične čvrstoće) u 60 mm uređaju za izravni posmik [6].

Tablica 2. Raspon vrijednosti pomaka pijeska i gline do sloma u uređaju za izravni posmik [6]

Vrsta tla	Pomak [mm]
Rahli pijesak	5-8
Zbijeni pijesak	2-5
Plastična glina	8
Kruto plastična glina	2-5
Čvrsta glina	1-2

7.2. Potrebno vrijeme do sloma

Propusnost tla povezana je s koeficijentom konsolidacije pa se potrebno vrijeme do sloma određuje iz krivulje vremenskog toka slijeganja dobivene tijekom faze konsolidacije. Na temelju krivulje određuje se vrijeme potrebno za 50 % (t_{50}) ili vrijeme potrebno za 100% (t_{100}) primarne konsolidacije. Vrijednost vremena $\sqrt{t_{100}}$, koje je potrebno kvadrirati za dobivanje vremena $t_{100,}$ se određuje na način (Slika 18.) da se povlači tangenta na pravolinijski dio primarne konsolidacije. Linija se produžuje do sjecišta sa horizontalnom linijom koja predstavlja 100% konsolidacije. Točka sjecišta predstavlja vrijednost $\sqrt{t_{100}}$.



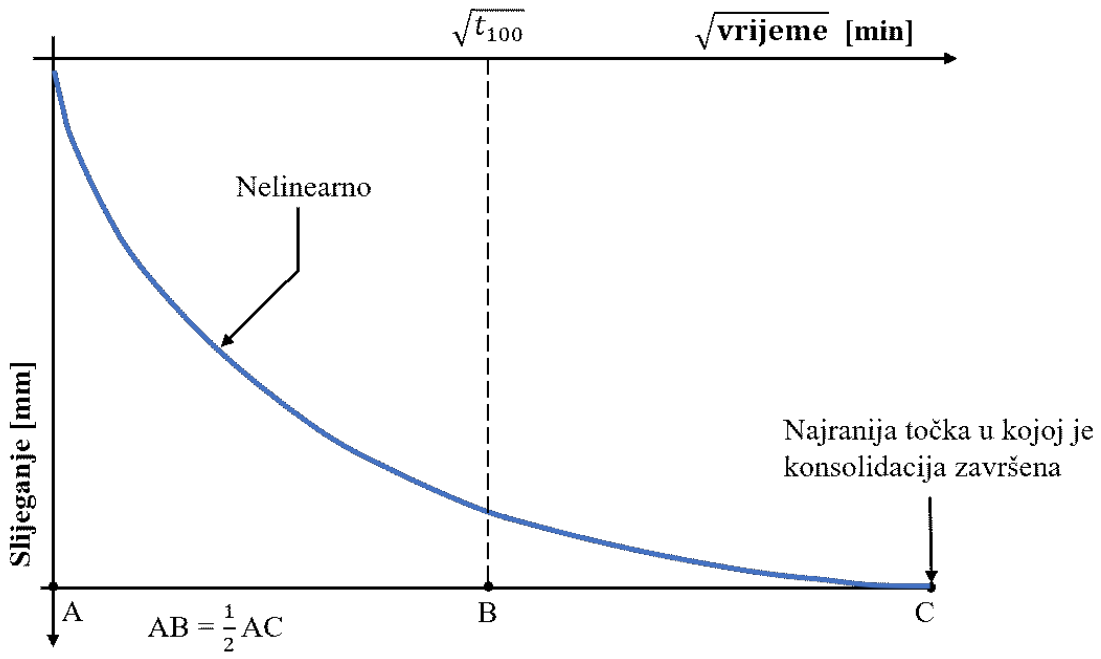
Slika 18. Grafički način određivanja vremena $\sqrt{t_{100}}$ [6]

Potrebno vrijeme do sloma određuje se temeljem dva izraza [14, 15] :

$$t_f = 12{,}7 \cdot t_{100} \tag{22}$$

$$t_f = 50 \cdot t_{50} \tag{23}$$

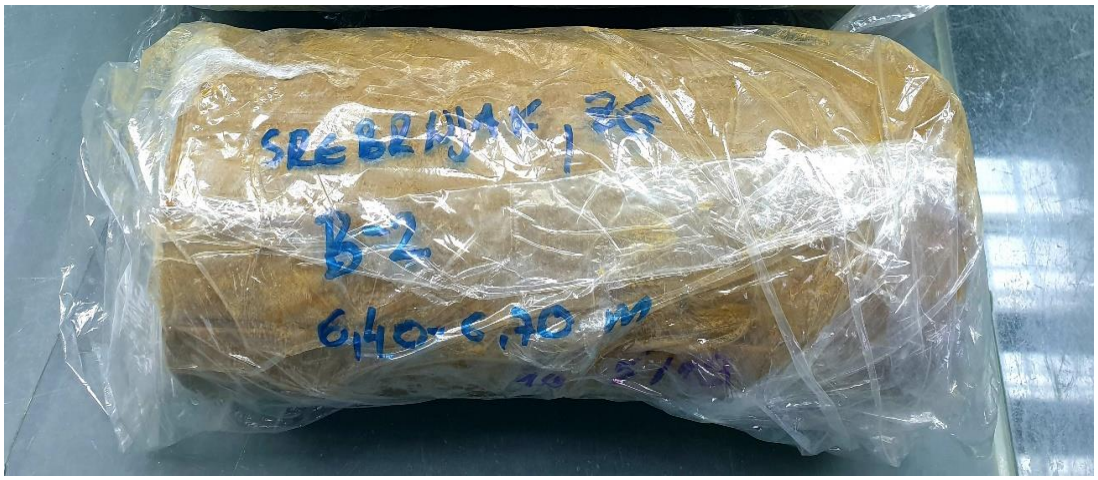
Opisani način određivanja potrebnog vremena do sloma nije primjenjiv ako dobivena krivulja konsolidacije ne nalikuje na teorijsku krivulju tj. početni dio do oko 50% konsolidacije nije linearan. Ta pojava može biti posljedica pojave zraka u porama tla. Pravilan način određivanja vremena $\sqrt{t_{100}}$ kod navedene pojave prikazan je na Slici 19. Označi se točka C u kojoj je konsolidacija potpuna (izvan koje je krivulja ravna). Polovište dužine AC je dužina AB koja predstavlja vrijednost $\sqrt{t_{100}}$ [6, 15].



Slika 19. Grafički način određivanja vremena $\sqrt{t_{100}}$ kod "nestandardne" konsolidacijske krivulje [6]

8. PRAKTIČNI RAD

U praktičnom dijelu rada opisani su i analizirani postupci laboratorijskog ispitivanja uzorka tla u uređaju za izravni posmik, a rezultati su prikazani tabelarno i grafički. Uspoređene su tri različite brzine smicanja istog uzorka tla i njihov utjecaj na parametre posmične čvrstoće tla, koheziju (c) i kut unutrašnjeg trenja (φ). Ispitivanje se provodilo prema normi BS 1377 Part 7 :1990 Clause 4 – Determination of the shear strenght by direct shear (small shear box apparatus) pri drenirano-konsolidiranim uvjetima. Uzorak tla za laboratorijsko ispitivanje prikazan je na Slici 20.



Slika 20. Uzorak tla za laboratorijsko ispitivanje

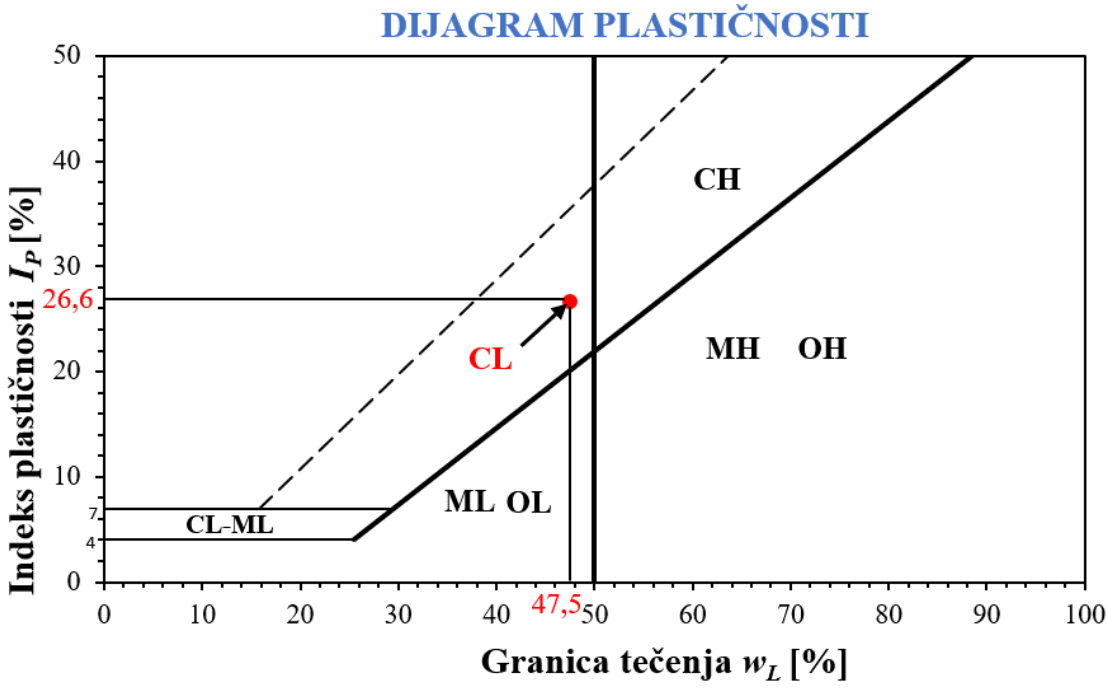
Na temelju vrijednosti granice tečenja i indeksa plastičnosti prikazanih u Tablici 3., uzorak tla je klasificiran kao glina niske plastičnosti (CL) i prikazan u dijagramu plastičnosti (Slika 21.).

Tablica 3. Granice konzistencije i indeksni pokazatelji uzorka tla

Oznaka uzorka	**Dubina uzorka**	**Vlažnost**	**Granica tečenja**	**Granica plastičnosti**	**Indeks plastičnosti**	**Indeks konzistencije**
	[m]	w_0[%]	w_L [%]	w_P [%]	I_P [%]	I_C [-]
B-2	6,40-6,70	24,2	47,5	20,9	26,6	0,88

$$I_P = 47{,}5\% - 20{,}9\% = 26{,}6\%$$

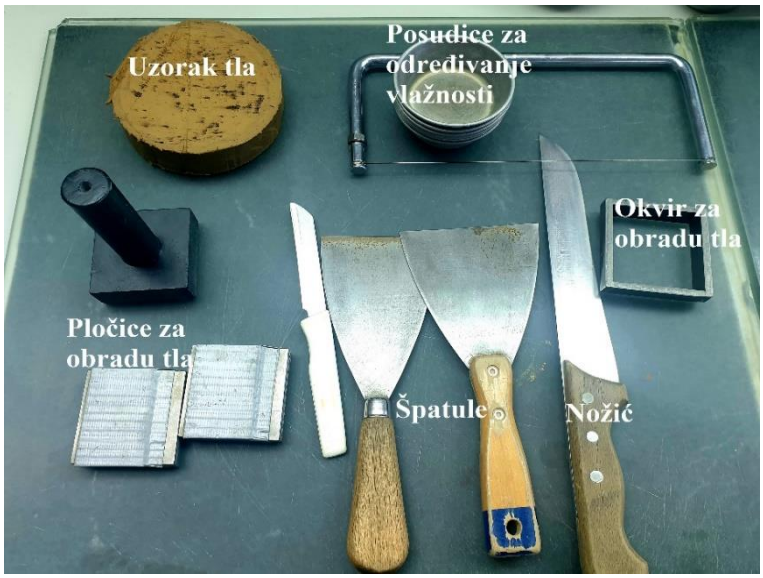
$$I_C = \frac{47{,}5\% - 24{,}2\%}{26{,}6\%} = 0{,}88$$



Slika 21. Dijagram plastičnosti uzorka tla za laboratorijsko ispitivanje

8.1. Obrada i priprema uzorka

Iz dopremljenog uzorka izreže se devet manjih komada tla iz kojih se izrađuju probna tijela (Slika 23.), malo veća nego što je okvir za obradu uzorka, dimenzija 60×60×20 mm, koji odgovara dimenzijama ćelije za smicanje. Komad uzorka se utisne u okvir za obradu i dodatno obradi pomoću špatule i nožića (Slika 22). Višak od obrade tla se važe i stavlja u posudice, a zatim u sušionik na sušenje do stalne mase za potrebe određivanja vlažnosti.



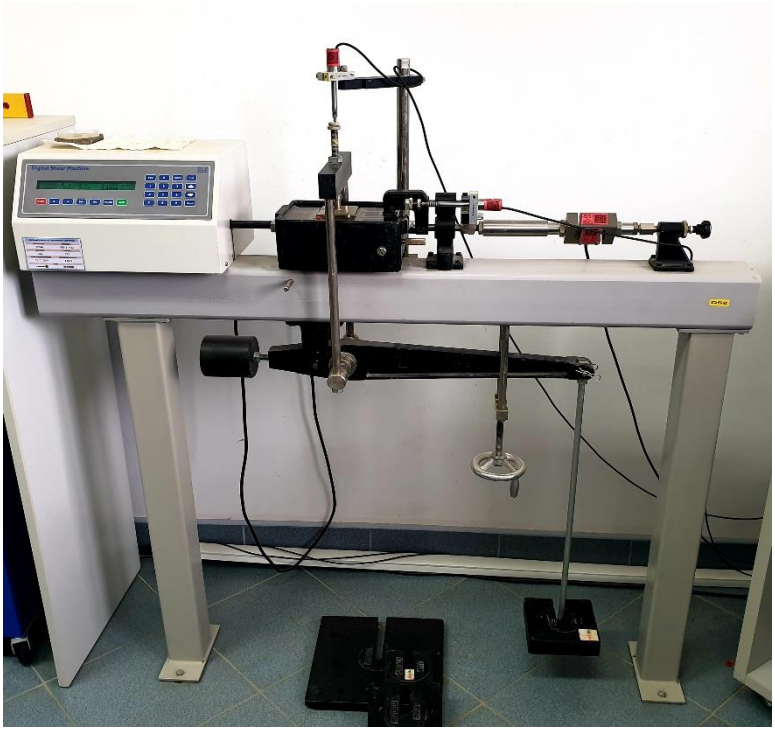
Slika 22. Pribor za obradu uzorka tla



Slika 23. Obrađeno probno tijelo

8.2. Ugradnja uzorka

Obrađeno probno tijelo ugradi se u ćeliju za smicanje na način da se s obje strane probnog tijela stave porozne pločice koje omogućuju dreniranje vode. Gornja porozna pločica se poklopi poklopcem ćelije, a ćelija pričvrsti vijcima. Sve zajedno se ugradi u uređaj za izravno smicanje (Slika 24.) povezanim s računalom koji automatski bilježi sve vrijednosti očitanja, a kutija uređaja izravnog posmika u koju je ugrađena ćelija ispunjava se destiliranom vodom.



Slika 24. Uređaj za izravno smicanje

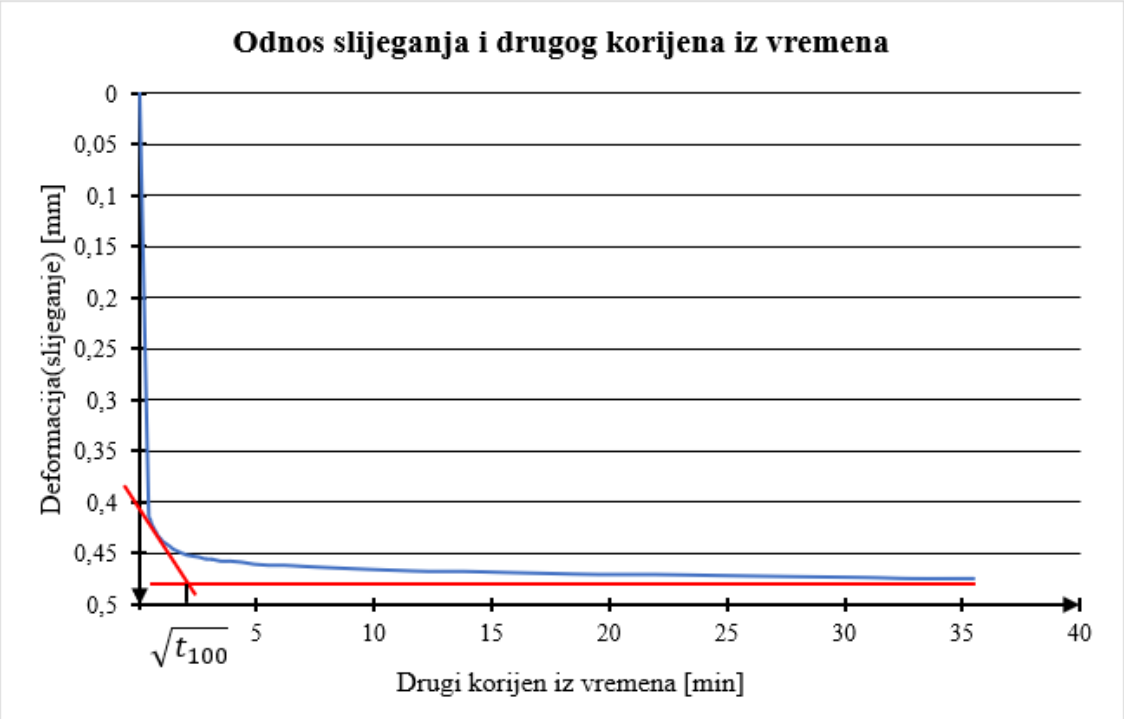
8.3. Postupak ispitivanja

Iz dopremljenog uzorka tla obrađeno je devet manjih probnih tijela (kockica) tla koja će se ispitivati u dvije faze. Prva faza ispitivanja je konsolidacija tla. Nakon završetka konsolidacije pokreće se druga faza, smicanje uzorka. Uzorak tla se ispituje CD (konsolidirano-dreniranim) pokusom izravnog posmika.

8.3.1. Faza konsolidacije

Grupe od tri probna tijela koja će se smicati istom brzinom konsolidiraju pod različitim vertikalnim naprezanjima. Prvo vertikalno naprezanje je manje od geološkog, a iznos svakog sljedećeg naprezanja je duplo veći od prethodnog. Prvo probno tijelo konsolidira pod vertikalnim naprezanjem od 54,4 kPa, drugo probno tijela od 108,9 kPa, a treće od 217,8 kPa. Faza konsolidacije je završena unutar 24 h, kad višak vode drenira iz pora.

Rezultati faze konsolidacije unose se u dijagram vremenskog toka slijeganja koji prikazuje odnos slijeganja (deformacije) na ordinati i proteklog vremena (drugog korijena iz vremena) na apscisi. Iz dijagrama se određuje potrebno vrijeme za potpuno slijeganje uzorka (t_{100}) na način kao što je opisano u poglavlju 7.2. (Slika 25.) .



Slika 25. Grafički način određivanje vremena $\sqrt{t_{100}}$

$$\sqrt{t_{100}} = 2{,}266\ min$$

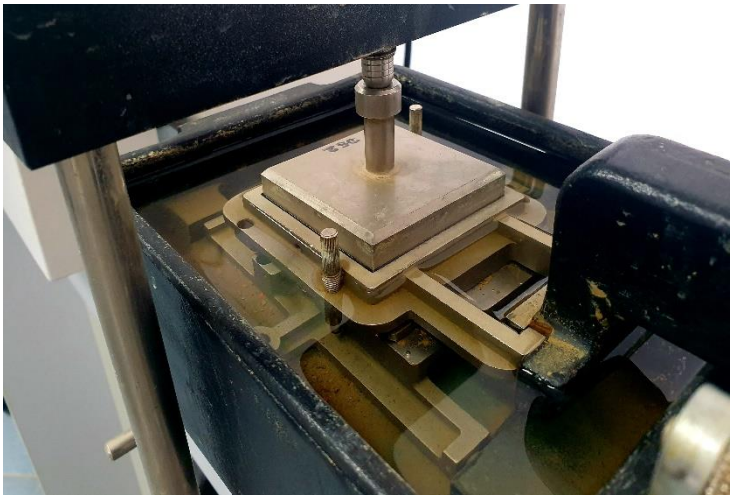
$$t_{100} = 5{,}135\ min$$

Za uzorak visine H = 19,02 mm, koeficijent konsolidacije iznosi:

$$c_v = \frac{0{,}103 \cdot (19{,}02\ mm)^2}{5{,}135\ min} = 7{,}25\ \frac{m^2}{god}$$

8.3.2. Faza smicanja

Nakon faze konsolidacije pokreće se posmik probnog tijela (Slika 26). Prije početka posmika potrebno je izvaditi vijke i provjeriti da li je gornji dio ćelije odvojen od donjeg kako bi se omogućilo smicanje probnog tijela. Postavi se brzina smicanja i cijeli postupak se pokreće pomoću računala koje bilježi vrijednosti očitanja, crta grafove i nadgledava se sam tijek postupka.



Slika 26. Faza smicanja

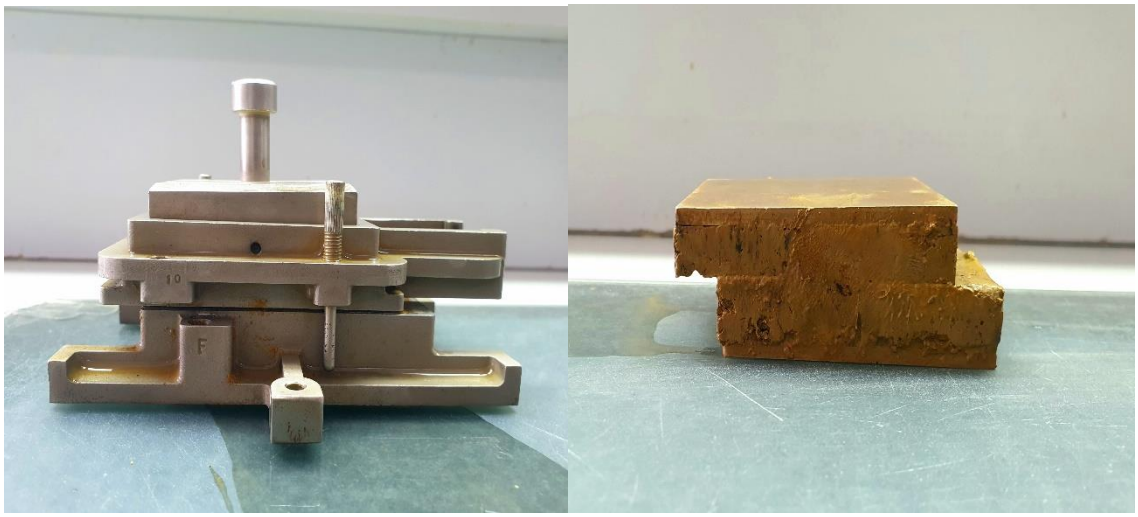
Brzina smicanja se određuje na način da se pretpostavljeni pomak pri slomu od 2 mm podijeli s vremenom potrebnim za slom uzoraka:

$$v = \frac{\delta_f}{t_f}$$

$$v = \frac{\delta_f}{t_f} = \frac{\delta_f}{12{,}7 \cdot t_{100}} = \frac{2\ mm}{12{,}7 \cdot 5{,}135\ min} = 0{,}03\ mm/min$$

Računska brzina smicanja iznosi 0,03 mm/min, koja je referentna brzina. Grupe od tri probna tijela smiču se referentnom brzinom (0,03 mm/min), tri puta sporije od referentne brzine, koja iznosi 0,01 mm/min i tri puta brže od referentne brzine, čiji je iznos 0,1 mm/min. Slom svih probnih tijela desio se između 1 mm i 3 mm horizontalnog pomaka.

Probna tijela koja su konsolidirana pod manjim naprezanjem slomila su se kod manjih horizontalnih deformacija pri istoj brzini smicanja nego probna tijela koja su konsolidirana pod većim naprezanjem. Iako se slom desio nakon malih deformacija, smicanje se nastavilo do deformacije 8-10 mm da bi se dobilo dovoljno podataka za konstrukciju dijagrama odnosa horizontalne deformacije i posmičnog naprezanja i dijagrama odnosa posmičnog vršnog i vertikalnog naprezanja. Nakon smicanja uzima se komadić tla iz unutrašnjosti uzorka i stavlja na sušenje za određivanje vlažnosti. Probno tijelo nakon smicanja prikazano je na Slici 27.



a) b)

Slika 27. Probno tijelo nakon smicanja
a) ćelija s probnim tijelom nakon smicanja
b) probno tijelo nakon smicanja

8.4. Rezultati pokusa

Nakon provedenih ispitivanja smicanja probnih tijela pri različitim brzinama, podaci i zapisi dobiveni pomoću računala obrađeni su primjenom odgovarajućih računskih postupaka, a rezultati su prikazani tabelarno i grafički s popratnim objašnjenjima u sljedećim poglavljima. Dobivene su vrijednosti vršnog posmičnog naprezanja, kuta unutrašnjeg trenja i kohezije pri različitim brzinama smicanja. Iz dobivenih vrijednosti parametara komentiran je utjecaj različitih brzina smicanja na posmičnu čvrstoću tla.

8.4.1. Tabelarni prikaz rezultata pokusa

U Tablici 4. prikazane su vrijednosti karakteristika za svako ispitivano probno tijelo.

Tablica 4. Karakteristike ispitivanih probnih tijela

Brzina smicanja [mm/min]	Uzorak	Početna visina [mm]	Početni koeficijent pora [-]	Gustoća vlažnog uzorka [Mg/m^3]	Vlaga prije ispitivanja [%]	Gustoća suhog uzorka [Mg/m^3]	Površina uzorka [mm^2]	Stupanj zasićenosti [%]
0,01	**A**	19,02	0,6988	1,97	23,9	1,59	3604,00	92,32
	B	19,02	0,6191	2,04	22,2	1,67	3604,00	96,64
	C	19,02	0,6153	2,03	21,2	1,67	3604,00	92,87
0,03	**A**	19,02	0,6255	2,02	21,7	1,66	3604,00	93,87
	B	19,02	0,6254	2,03	22,2	1,66	3604,00	96,04
	C	19,02	0,6340	2,03	22,6	1,65	3604,00	96,29
0,3	**A**	19,02	0,6403	2,01	22,4	1,65	3604,00	94,29
	B	19,02	0,6899	1,97	23,0	1,60	3604,00	90,08
	C	19,02	0,6899	1,98	24,0	1,60	3604,00	94,01

Tablica 5. prikazuje izvješće svih rezultata dobivenih pokusom izravnog posmika pri konsolidirano-dreniranim uvjetima.

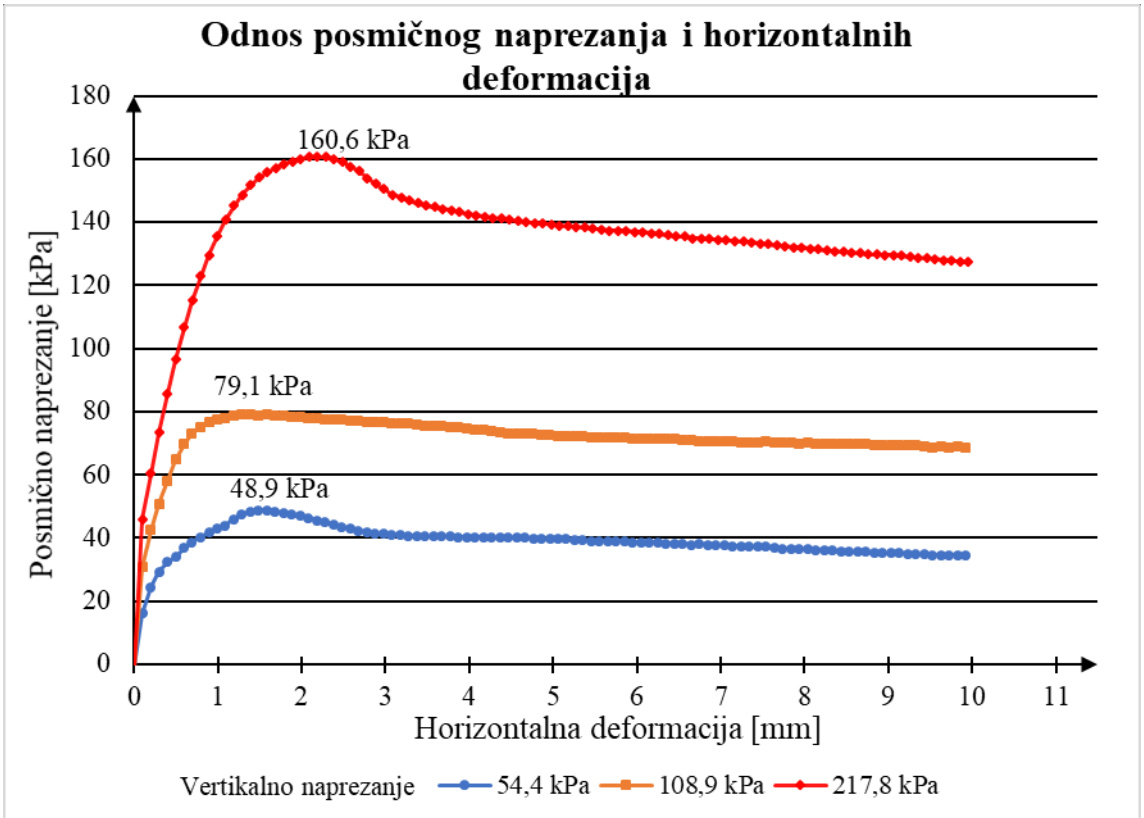
Tablica 5. Izvješće svih rezultata dobivenih pokusom izravnog posmika

Brzina smicanja [mm/min]	Uzorak	Vertikalno naprezanje [kPa]	Vršna posmična čvrstoća [kPa]	Horizontalna deformacija pri vršnoj čvrstoći [mm]	Visina uzorka nakon ispitivanja [mm]	Ukupna horizontalna deformacija [mm]	Kohezija [kPa]	Kut unutrašnjeg trenja [°]
0,01	**A**	54,4	48,9	1,5	18,83	9,92	**8,91**	**34,13**
	B	108,9	79,1	1,3	18,85	9,92		
	C	217,8	160,6	2,1	18,32	9,96		
0,03	**A**	54,4	53,0	0,4	18,85	8,53	**26,01**	**27,78**
	B	108,9	84,4	1,1	18,73	8,36		
	C	217,8	141,0	2,6	17,87	9,96		
0,1	**A**	54,4	58,4	1,1	18,99	9,97	**31,06**	**24,78**
	B	108,9	78,6	2,1	18,70	10,02		
	C	217,80	133,2	2,2	18,12	10,00		

8.4.2. Grafički prikaz rezultata

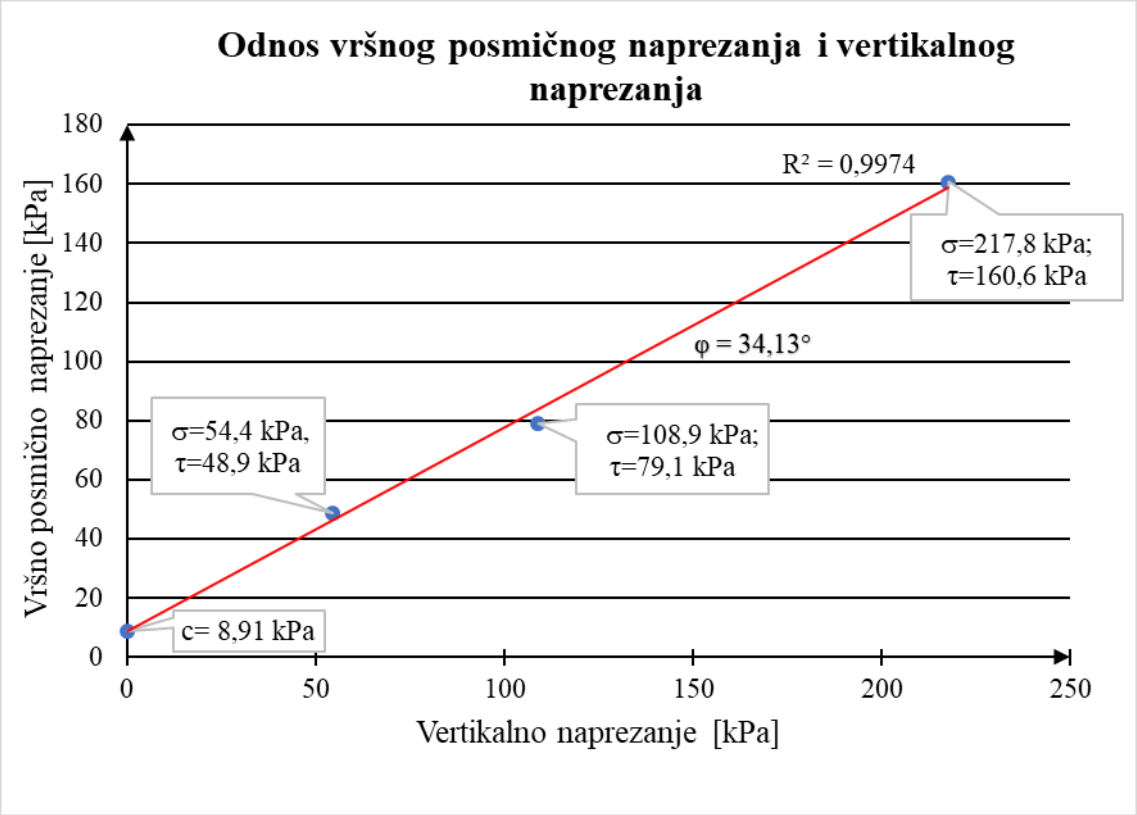
Rezultati ispitivanja pokusa prikazani su u dijagramu odnosa posmičnog naprezanja i horizontalne deformacije. Iz dijagrama se dobiva posmično vršno naprezanje i pomak pri slomu za zadano vertikalno naprezanje. Drugi dijagram prikazuje odnos vršnog posmičnog naprezanja i vertikalnog naprezanja. U navedeni dijagram crta se regresijski pravac koji određuje vrijednost kohezije i kuta unutrašnjeg trenja.

Kod brzine 0,01 mm/min za vertikalno naprezanje od 54,4 kPa, vršno posmično naprezanje iznosi 48,9 kPa. Kod 108,9 kPa, njegov iznos je 79,1 kPa, a kod vertikalnog naprezanja od 217,8 vrijednost vršnog posmičnog je 160,6 kPa (Slika 28.).



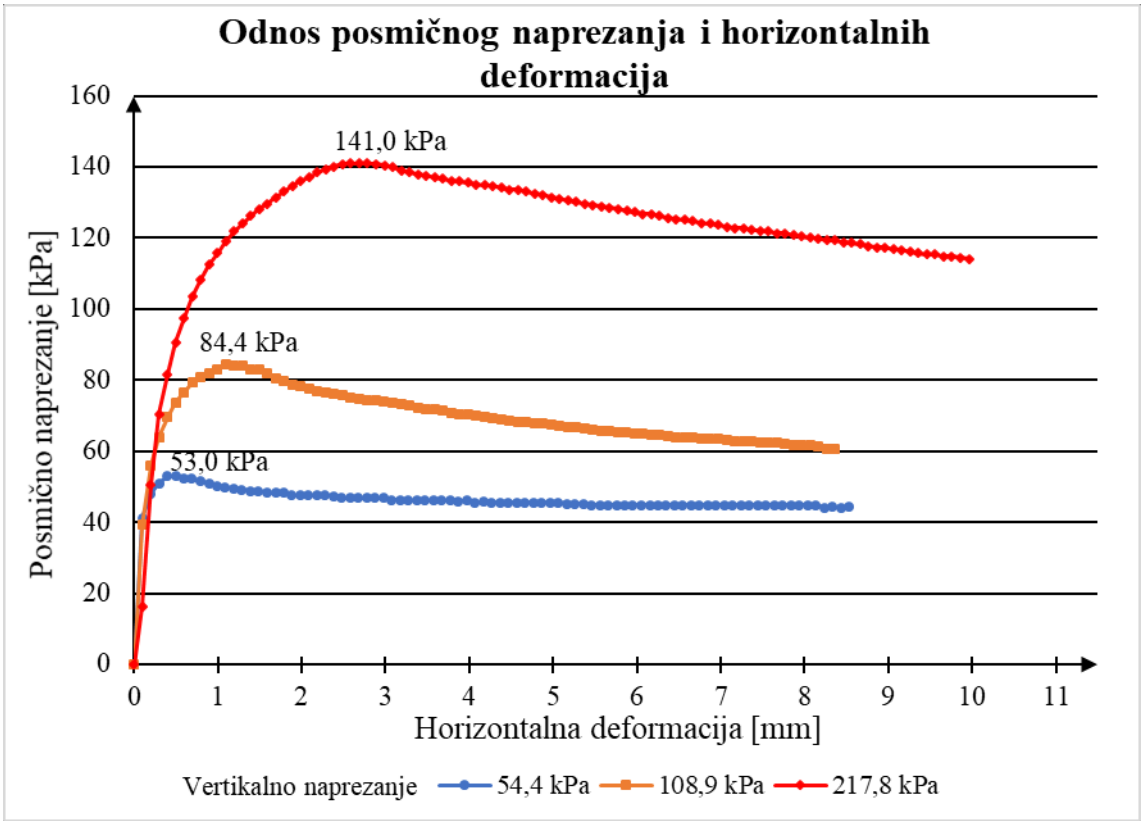
Slika 28. Odnos posmičnog naprezanja i vertikalnih deformacija kod brzine 0,01 mm/min

Iz dijagrama odnosa vršnog posmičnog i vertikalnog naprezanja određuje se vrijednost parametara posmične čvrstoće tla. Kod brzine 0,01 mm/min, vrijednost kohezije iznosi 8,91 kPa, a kuta unutrašnjeg trenja 34,13° (Slika 29.).



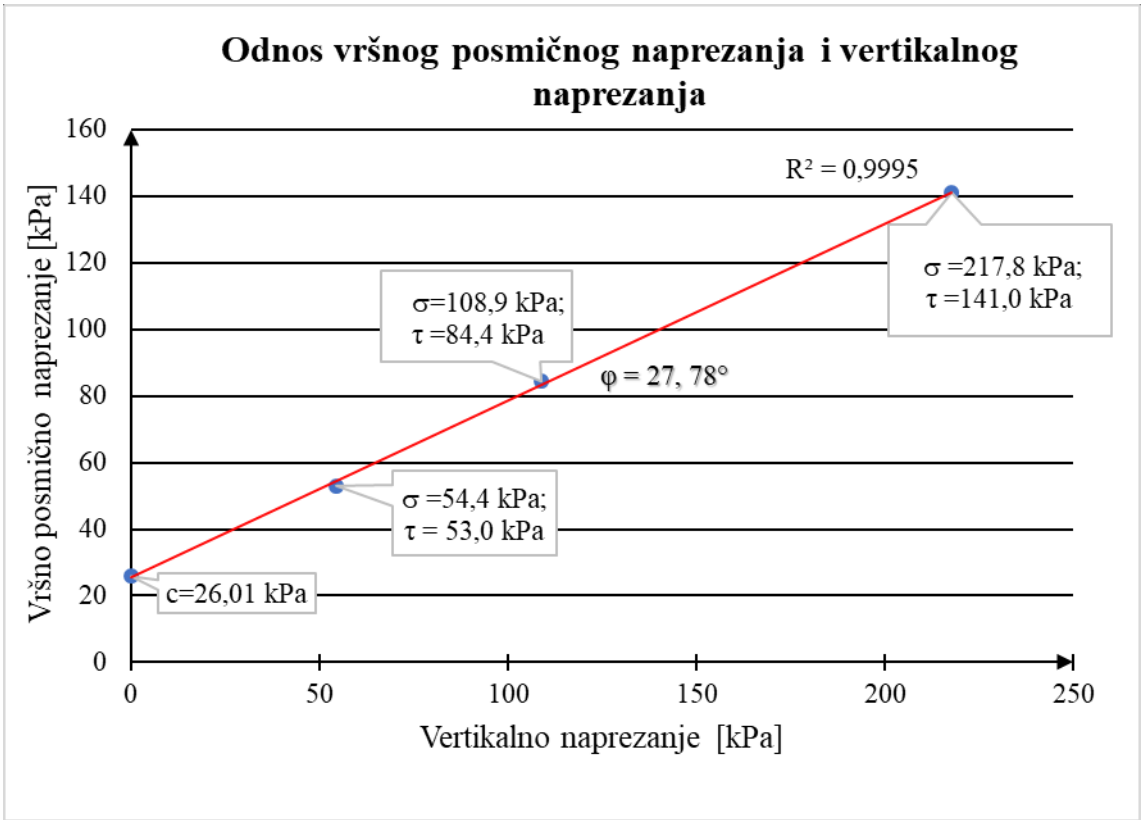
Slika 29. Odnos vršnog posmičnog i vertikalnog naprezanja kod brzine 0,01 mm/min

Kod tri puta veće brzine, 0,03 mm/min vršno posmično naprezanje pri vertikalnom naprezanju od 54,4 kPa iznosi 53,0 kPa. Pri duplo većem vertikalnom naprezanju od 108,9 kPa, njegova vrijednost je 84,4 kPa, a kod 217,9 kPa, vršno posmično naprezanje ima vrijednost 141,0 kPa (Slika 30.).



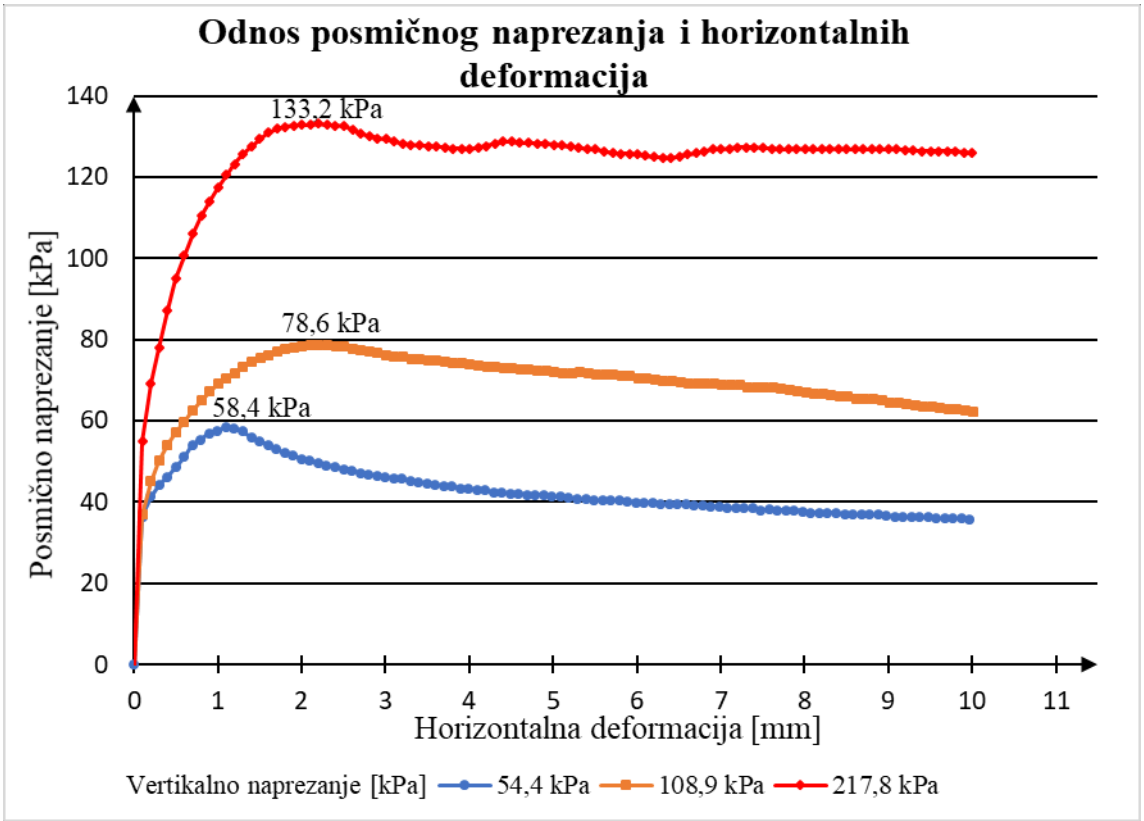
Slika 30. Odnos posmičnog naprezanja i horizontalnih deformacija kod brzine 0,03 mm/min

Iz Slike 31. vidljivo je da kohezija kod brzine 0,03 mm/min ima vrijednost 26,01 kPa, a kut unutrašnjeg trenja iznosi 27,78°.



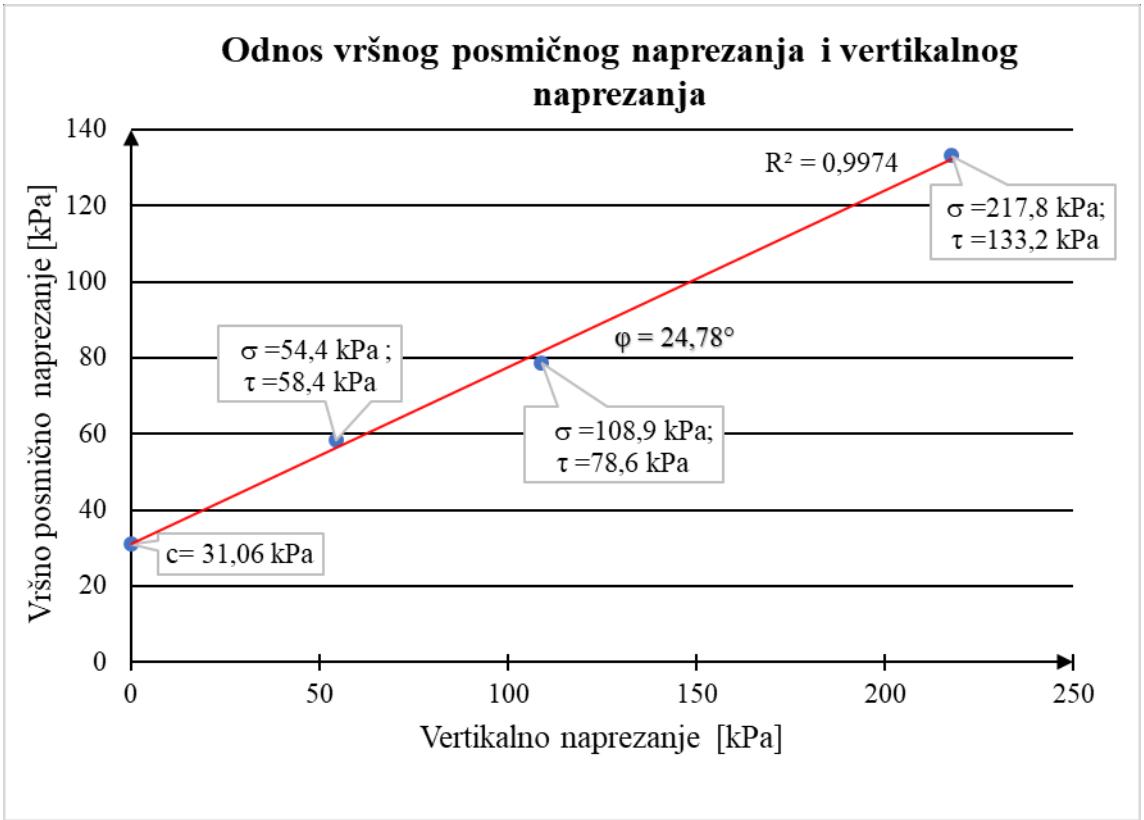
Slika 31. Odnos vršnog posmičnog naprezanja i vertikalnog naprezanja kod brzine 0,03 mm/min

Najveća brzina smicanja iznosi 0,1 mm/min. Vršno posmično naprezanje kod vertikalnog naprezanja od 54,4 kPa iznosi 58,4 kPa, kod 108,9 kPa ima vrijednost 78,6 kPa, a kod vertikalnog naprezanja od 217,8 kPa, vršno posmično naprezanje iznosi 133,2 kPa (Slika 32.).



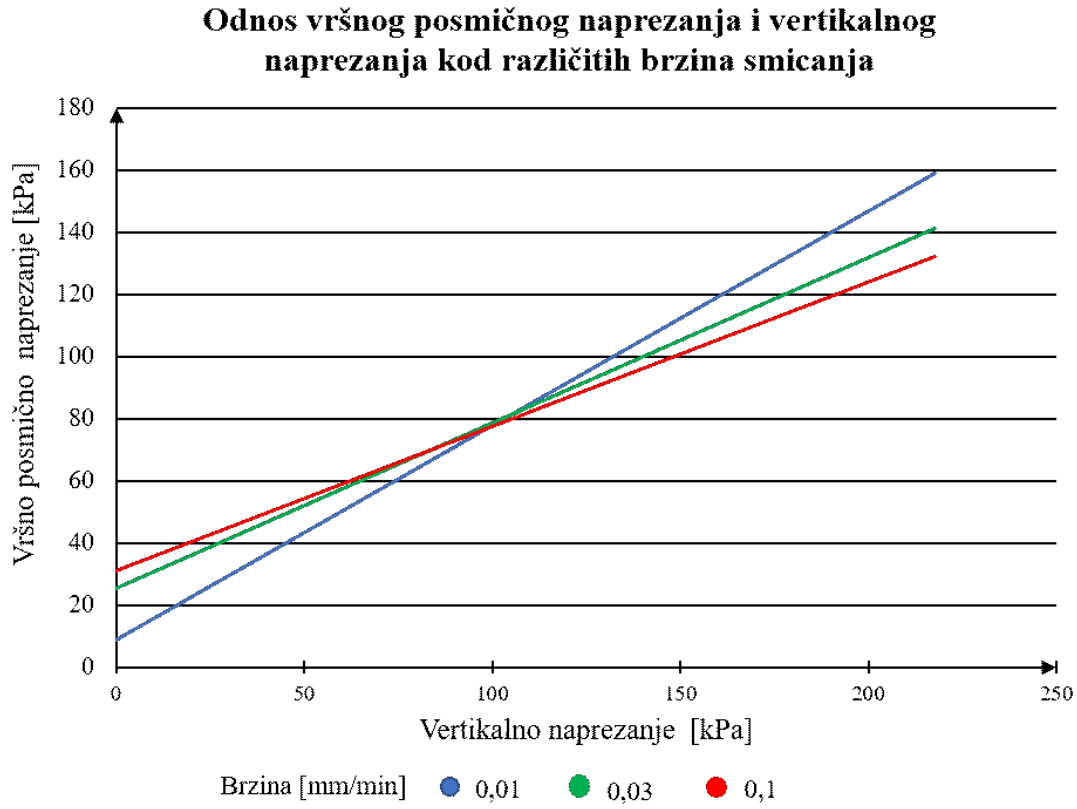
Slika 32. Odnos posmičnog naprezanja i horizontalnih deformacija kod brzine 0,1 mm/min

Kod brzine smicanja 0,1 mm/min kohezija ima vrijednost 31,06 kPa, a kut unutrašnjeg trenja 24,78° (Slika 33.).



Slika 33. Odnos vršnog posmičnog i vertikalnog naprezanja kod brzine 0,1 mm/min

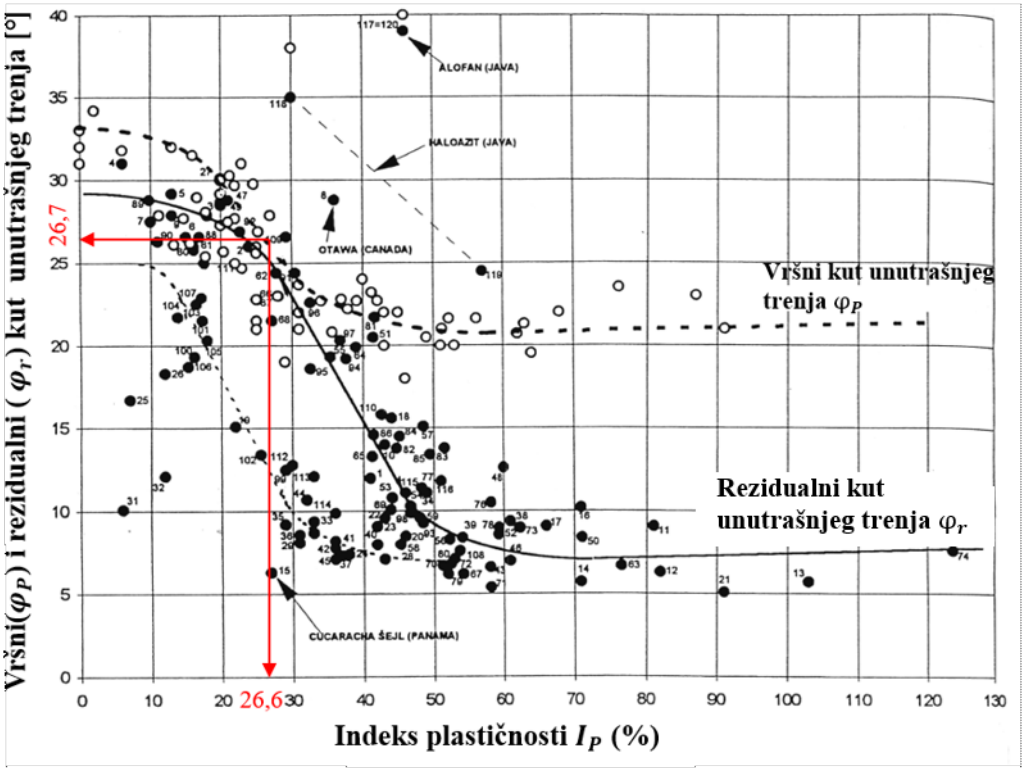
Na Slici 34. prikazani su odnosi regresijskih pravaca kod provedenih različitih brzina smicanja u dijagramu vršnog posmičnog naprezanja i vertikalnog naprezanja. Kod najvećeg nagiba pravca (kuta unutrašnjeg trenja), odsječak na osi ordinata (kohezija) je najmanjeg iznosa i obrnuto.



Slika 34. Odnos vršnog posmičnog naprezanja i vertikalnog naprezanja kod različitih brzina smicanja

8.4.3. Korelacija kuta unutrašnjeg trenja s indeksom plastičnosti

Dijagram korelacije vršnog i rezidualnog kuta unutrašnjeg trenja s indeksom plastičnosti prema Ortolan/Mihalinec, 1998, prikazan je na Slici 35. Za ispitivani uzorak nisko plastične gline indeks plastičnosti iznosi $I_p = 26{,}6\ \%$, a pripadajući vršni kut prema korelaciji 26,7°. Kod referentne (izračunate) brzine (0,03 mm/min) kut unutrašnjeg trenja ima vrijednost 27,78°, što predstavlja dobru povezanost i malo odstupanje od kuta dobivenog temeljem dijagrama korelacije.



Slika 35. Korelacija kuta unutrašnjeg trenja s indeksom plastičnosti nisko plastične gline

9. ZAKLJUČAK

Pokus direktnog smicanja jedan je od najstarijih i najbržih načina određivanja parametara posmične čvrstoće tla (kohezije i kuta unutrašnjeg trenja). Rezultati laboratorijskog ispitivanja pokazuju da parametri posmične čvrstoće tla nisu konstantne vrijednosti već ovise o karakteristikama tla, uvjetima dreniranja, iznosu vertikalnog naprezanja i o brzini smicanja. Uvjeti ispitivanja trebaju biti odabrani tako da najbolje aproksimiraju stvarne uvjete u kojima se nalazi uzorak da bi dobiveni rezultati bili što točniji.

Provedeno ispitivanje utjecanja različitih brzina smicanja na posmičnu čvrstoću tla pokazuje da se povećanjem brzine smicanja kohezija povećava, a kut unutrašnjeg trenja smanjuje. Kod brzine 0,1 mm/min kohezija je veća, a kut unutrašnjeg trenja manji nego kod brzina 0,03 mm/min i 0,01 mm/min. Dobiveni kut unutrašnjeg trenja kod referentne brzine od 0,03 mm/min najmanje odstupa (3,9%) od kuta dobivenog iz dijagrama korelacije sa indeksom plastičnosti. Kod veće brzine od referentne dobiveni kut unutrašnjeg trenja je manji, a kod manje brzine veći od kuta dobivenog iz dijagrama korelacije. Brzina 0,03 mm/min predstavlja najbolje odgovarajuću brzinu smicanja za ovaj uzorak tla nisko plastične gline. Odabir odgovarajuće brzine smicanja je od velike je važnosti. Ako je brzina smicanja prevelika, dolazi do nemogućnosti disipacije pornog tlaka (stvaranja viška tlaka porne vode) što rezultira visokom kohezijom. Koherentna tla imaju slabu propusnost pa ih je potrebno smicati malom brzinom jer manja brzina omogućuje potpuno dreniranje vode iz tla i disipaciju tlaka porne vode.

10. LITERATURA

[1] Selimović, M., *Mehanika tla i temeljenje, Dio I Mehanika tla.* Univerzitet "Džemal Bijedić" Mostar, Građevinski fakultet; Mostar 2000.

[2] Kvasnička, P., Domitrović D., *Mehanika tla*, Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – Geološko – Naftni fakultet; Zagreb, 2007.

[3] Kalinski, M. E., Ph.D., P.E., *Soil Mechanics, Lab manual*. 2nd Edition. University of Kentucky; Kentucky 2006.

[4] Roje-Bonacci, T., *Mehanika tla*. Treće izdanje. Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet; Split 2007.

[5] Stević, M., *Mehanika tla i stijena.* Univerzitet u Tuzli, Rudarsko-geološki fakultet; Tuzla 1991.

[6] Head K.H. & Epps R. J., *Manual of soil laboratory testing,* Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility tests, Third edition.

[7] Szavits-Nossan, V., *Mehanika tla i stijena*, Deformacije i naprezanja, efektivna naprezanja, potencijali u mirnoj vodi. Članak, dostupno na: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/4._Predavanje_MT.pdf [25.5.2020.]

[8] Maksimović, M., *Mehanika tla.* Četvrto izdanje. AGM knjiga; Beograd 2008.

[9] Strelec S., Štuhec D., *Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi*, Interna skripta, Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2011

[10] Gonzalez de Vallejo, Luis I.& Mercedes F., *Geological Engineering,* with a Foreword by M.H. de Freitas Imperial College, London

[11] Nonveiller, E., Mehanika tla i temeljenje građevina. Školska knjiga; Zagreb 1979.

[12] Geotechdata, *Angle of friction,* dostupno na: http://geotechdata.info/parameter/angle-of-friction [02.07.2020.]

[13] Szavits-Nossan, V., *Mehanika tla i stijena,* Posmična čvrstoća tla. Članak, dostupno na: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/7._Predavanje_MT.pdf [03.04.2020]

[14] Mulabdić, M., *Ispitivanje tla u geotehničkom laboratoriju,* Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet; Osijek 2018.

[15] BS 1377 Part 7 :1990 Clause 4 – Determination of the shear strenght by direct shear (small shear box apparatus)

11. POPIS SLIKA

Slika 1. Trofazni model tla [2] 3
Slika 2. Konzistentna stanja i granice konzistencije [5] 6
Slika 3. Dijagram plastičnosti [4] 9
Slika 4. Rastavljanje sile na horizontalnu i vertikalnu komponentu [6] 10
Slika 5. Interpretacija komponenti matrice naprezanja [7] 11
Slika 6. Vremenski tok slijeganja gline [2] 13
Slika 7. Krivulja vremenskog toka slijeganja, ovisnost stupnja konsolidacije U o proteklom vremenu t u mjerilu drugog korijena [3] 14
Slika 8. Trenje i kut trenja [6] 16
Slika 9. Različiti oblici sloma tla [9] 18
Slika 10. Mohr-Coulombova kružnica naprezanja i anvelopa sloma [9] 19
Slika 11. Anvelopa sloma i Mohrova kružnica. Moguća stanja a) i b) i 20
Slika 12. Vršna i rezidualna čvrstoća a) i anvelopa sloma za vršne i 21
Slika 13. Anvelopa sloma kod nekoherentnih tla [9] 22
Slika 14. Dijelovi uređaja za izravni posmik [13] 25
Slika 15. Shema izravnog posmika [14] 27
Slika 17. Grafičko praćenje brzine smicanja [6] 30
Slika 18. Grafički način određivanja vremena $\sqrt{t_{100}}$ [6] 31
Slika 19. Grafički način određivanja vremena $\sqrt{t_{100}}$ kod "nestandardne" konsolidacijske krivulje [6] 32
Slika 20. Uzorak tla za laboratorijsko ispitivanje 33
Slika 21. Dijagram plastičnosti uzorka tla za laboratorijsko ispitivanje 34
Slika 22. Pribor za obradu uzorka tla 35
Slika 23. Obrađeno probno tijelo 35
Slika 24. Uređaj za izravno smicanje 36
Slika 25. Grafički način određivanje vremena $\sqrt{t_{100}}$ 37
Slika 26. Faza smicanja 38
Slika 27. Probno tijelo nakon smicanja 39
Slika 28. Odnos posmičnog naprezanja i vertikalnih deformacija kod brzine 0,01 mm/min 42

Slika 29. Odnos vršnog posmičnog i vertikalnog naprezanja kod brzine 0,01 mm/min 43
Slika 30. Odnos posmičnog naprezanja i horizontalnih deformacija kod brzine 0,03 mm/min 44
Slika 31. Odnos vršnog posmičnog naprezanja i vertikalnog naprezanja kod brzine 0,03 mm/min 45
Slika 32. Odnos posmičnog naprezanja i horizontalnih deformacija kod brzine 0,1 mm/min 46
Slika 33. Odnos vršnog posmičnog i vertikalnog naprezanja kod brzine 0,1 mm/min 47
Slika 34. Odnos vršnog posmičnog naprezanja i vertikalnog naprezanja kod različitih brzina smicanja 48
Slika 35. Korelacija kuta unutrašnjeg trenja s indeksom plastičnosti 49

12. POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti kuta unutrašnjeg trenja nekoherentnih i koherentnih tla [12] 23
Tablica 2. Raspon vrijednosti pomaka pijeska i gline do sloma u uređaju za 31
Tablica 3. Granice konzistencije i indeksni pokazatelji uzorka tla..... 33
Tablica 4. Karakteristike ispitivanih probnih tijela..... 40
Tablica 5. Izvješće svih rezultata dobivenih pokusom izravnog posmika..... 41