

Ciklični triosni preizkusi **Cyclic triaxial tests**

Žlender Bojan

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

Povzetek: V prispevku so predstavljeni ciklični triosni preizkusi, ki smo jih v zadnjih dveh letih izvajali v Laboratoriju za mehaniko tal, na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru. Podani so opis cikličnega triosnega aparata in opreme, izvedba preizkusa ter interpretacija rezultatov. Kratak pregled preiskav na različnih materialih (zasičeni dravski peski, grušči iz plazu Stože, karbonski skrilavci z območja Trojan in prodno peščeni material za cestni tampon) kaže na široko uporabnost cikličnih triosnih preizkusov.

Abstract: The paper presents cyclic triaxial tests performed in last two years in the Laboratory of soil mechanics, Faculty of Civil Engineering, University of Maribor. Short description of cyclic triaxial apparatus with equipment, cyclic test procedure and interpretation of test results are given. A presentation of cyclic loading triaxial test on different materials (Drava river saturated sands, carboniferous slates from the Trojane hilly area, gravely sandy siltstone from the Stože landslide and pavement granular base material) shows wide applicability of cyclic triaxial tests.

1. UVOD

Triosni preizkusi naravnih geoloških materialov (zemljin in kamnin), kot tudi umetnih zemeljskih materialov, so pomemben del laboratorijskih geomehanskih preiskav. Z njimi dobimo več parametrov fizikalnih in mehanskih lastnosti preizkušanih materialov, ki jih kasneje uporabimo v geotehničnih analizah. Triosne preizkuse praviloma izvajamo v cilindričnih triosnih (triaksialnih) aparatih, kjer vzpostavljamo osnosimetrične napetostne in deformacijske pogoje. Prvotno so bili razviti t.i. inkrementalni preizkusi, ki obravnavajo obnašanje statično obremenjenih tal. Takšni preizkusi so zaradi stopenjskega obremenjevanja pogosto zamudni in lahko tudi nerealni zaradi visokih začetnih gradientov pornih tlakov. Zaradi dolgotrajnosti izvedbe posameznega preizkusa so tudi stroški preiskav dokaj visoki. Zato je smiselno konvencionalne inkrementalne preizkuse dopolniti še z drugače izvedenimi preizkusi.

Dosedanji razvoj je šel v dveh smereh: vpeljani so bili preizkusi z zveznim obremenjevanjem (ki simulirajo statične obremenitve) in preizkusi s cikličnim obremenjevanjem (ki simulirajo dinamične in/ali ponavljajoče obremenitve). Rezultati statičnih preizkusov z zveznim obremenjevanjem se podajo s parametri odziva na statične obremenitve, podobno kot pri stopenjskem obremenjevanju. Njihova prednost je predvsem v hitrejši izvedbi preizkusa, slabost pa nerealnost parametrov pri prehitrem obremenjevanju. Rezultati preizkusov s cikličnim obremenjevanjem so parametri odziva na dinamične obremenitve ter parametri utrujanja materiala zaradi ponavljajoče obtežbe.

S problemi dinamično obremenjenih tal se raziskovalci intenzivneje ukvarjajo v zadnjih treh desetletjih. Plasti zemljin in kamnin, ki so razporejene v tleh ter tudi konstrukcije iz zemeljskih materialov (nasipi, pregrade itd.), so izpostavljeni dinamičnim obtežbam zaradi potresov, eksplozij, zabijanja pilotov, prometa, vplivov strojev, valovanja vode in drugih vplivov. Iz opazovanja navedenih pojavov vemo, da so nekateri navedeni vplivi dokaj kratkotrajni (nekaj sekund) in dinamični v smislu teorije mehanike, nekateri vplivi pa so tudi ponavljajoči v daljšem časovnem obdobju. Obtežbe, ki obravnavajo prve vplive bomo tukaj imenovali **dinamične, ciklične obtežbe** pa bomo definirali kot ponavljajoče obtežbe.

Razvitih je bilo nekaj tipičnih geomehanskih laboratorijskih preizkusov, ki simulirajo dinamične napetostno-deformacijske pogoje v tleh in podajajo kot rezultat parametre dinamičnih lastnosti. Ti so: enostavni ciklični strižni preizkus, ciklični torzijski preizkus (polni ali votli), resonančni preizkus in ciklični triosni preizkus. Navedeni preizkusi se izvajajo na različnih aparatih, med seboj se precej razlikujejo v opremi, preizkusnih postopkih in rezultatih (dobljenih parametrih).

Enostavni ciklični strižni preizkus se izvaja na enostavnem cikličnem strižnem aparatu. Preizkušanece je valjaste ali kvadraste oblike višine 20 do 30 mm in premera 60 do 80 mm. Izpostavljen je statični vertikalni napetosti σ_z in ciklični strižni napetosti τ , na vplive se odziva s strižno deformacijo γ . Prednost enostavnega cikličnega strižnega preizkusa je dobro simuliranje strižnih valov in direktno določevanje strižnega modula G in faktorja dušenja ζ , pri zasičenih zemljinah služi tudi za študij likvifikacije.

Ciklični torzijski preizkus omogoča vzpostavitev vertikalne σ_z , dveh bočnih σ'_m , σ'_{rz} in torzijske komponente napetosti τ ter spremljanje pornih tlakov u v preizkušancu. Na vplive se odziva s torzijsko strižno deformacijo γ . Pri polnih cilindričnih vzorcih so deformacije v radialni smeri neenakomerne, zato je primernejši preizkus na votlih cilindričnih vzorcih.

Resonančni preizkus je postopek določanja Youngovega modula E in strižnega modula G ter faktorja dušenja ζ iz odnosov med vzbujanjem vibriranja in njegovega odziva. Prednost preizkusa je v njegovi natančnosti.

Ciklični triosni preizkus je v osnovi podoben statičnemu triosnemu preizkusu in je v bistvu njegova nadgradnja. Tako lahko v več korakih enega preizkusa določimo tudi statične parametre.

Prispevek podaja pregled triosnih preizkusov s cikličnim obremenjevanjem, ki smo jih v zadnjih dveh letih izvajali v Laboratoriju za mehaniko tal (LMT), na Fakulteti za gradbeništvo, Univerze v Mariboru. Podan je kratek prikaz opreme, izvedbe preizkusov in tipičnih rezultatov. Prikazani so rezultati preizkusov izrazito različnih materialov (zasičeni peski, grušči iz plazu Stože, karbonski skrilavci, prodno peščeni material za cestni tampon), ki kažejo na široko uporabnost triosnih preizkusov s cikličnim obremenjevanjem.

2. IZVEDBA PREIZKUSA

Za izvedbo preizkusa so pomembni naslednji koraki: vzorčenje in določitev fizikalnih lastnosti, priprava in vgradnja preizkušancev, oprema, postopek preizkusa in interpretacija rezultatov glede na izbrano teorijo.

Začetni koraki so podobni pri statičnih (stopenjskih ali zveznih) in cikličnih (dinamičnih) preizkusih. Pri cikličnih preizkusih se praviloma izvedejo predhodne faze saturacije, izotropne in/ali neizotropne konsolidacije. Bistvene razlike med statičnimi in cikličnimi preizkusi so v potrebni opremi, v postopkih izvedbe preizkusov in interpretaciji rezultatov (statični ali dinamični odnosi). Oprema za ciklično obremenjevanje mora biti primerno dopolnjena z mehansko opremo, z računalniško strojno in programsko opremo, z merilno opremo ter povezavami, ki omogočajo izvedbo računalniško vodenih preizkusov ter zbiranje podatkov, shranjevanje in interpretacijo rezultatov.

2.1 Oprema

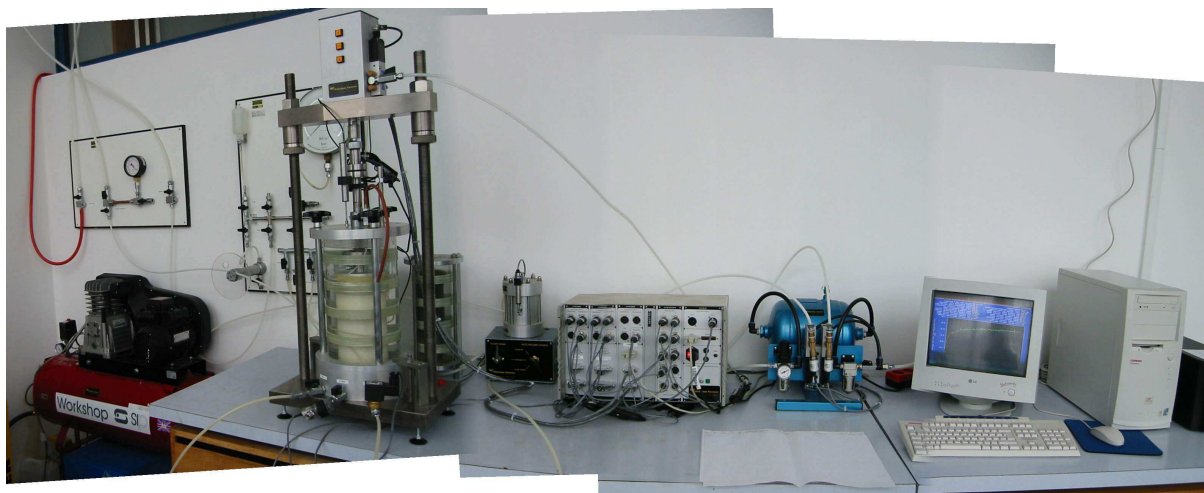
Triosni preizkus spada med zahtevnejše laboratorijske geomehanske preizkuse. V LMT razpolagamo s starejšimi triosnimi aparati Wykeham Farrance (WF), ki omogočajo izvedbo kompresijskih preizkusov s stopenjskim statičnim obremenjevanjem. Novejši triosni aparat Wille s pripadajočo merilno in računalniško opremo omogoča izvedbo preizkusov z zveznim

obremenjevanjem s poljubnimi potni obremenjevanja. Najnovejši triosni aparat WF omogoča ob statičnih tudi izvedbo preizkusov s cikličnim obremenjevanjem. Ciklični triosni aparat WF z opremo sestavljajo:

- avtomatska triaksialna naprava UP/100 TR
- celica za valjaste preizkušance premera do 100 mm in višine do 200 mm
- stiskalnica s pripadajočo elektro-mehansko opremo
- avtomatska hidravlična pogonska enota za dinamične obtežbe
- merilna oprema s senzorji za meritve
 - vodnega tlaka v celici σ_{3c}
 - pornega vodnega tlaka v preizkušancu u
 - povratnega vodnega tlaka u_{bp}
 - tlačne osne sile N
 - pomikov δ in
 - sprememb volumna ΔV
- sistem za krmiljenje in pridobivanje podatkov (Control and Data Acquisition System)
- računalniška strojna in programska oprema
- naprava za odzračevanje vode
- rezervoar odzračene vode
- kompresor
- sušilec zraka

2.2 Postopek preizkusa

Postopek preizkusa je odvisen od vrste preizkusa (ciklične spremembe napetosti ali deformacij). Običajno poteka v naslednjih korakih: priprava preizkušanca, postopek na aparatu, izvedba preizkusa, interpretacija rezultatov.



Slika 1: Univerzalni triosni aparat Wykeham Farrance - UP 100 TR

Postopek priprave preizkušanca iz vzorca je odvisen od vrste materiala (pesek, kamnina, umetni zemeljski material). Velikost preizkušanca je praviloma v razmerju višina/premer = 2/1, s premeri 100 mm ali manj. Priprava preizkušanca obsega naslednje korake:

- Izdelava preizkušanca iz vzorca
- Določitev fizikalnih lastnosti (gostota, vlažnost itd.)
- Nastavitev gumijaste membrane preko kovinskega obroča
- Vgradnja materiala
- Meritev velikosti in teže preizkušanca

Na aparatu se izvede standardni postopek, ki se prilagodi preizkusu. Praviloma poteka v naslednjih korakih:

1. Odzračujemo vodo
2. Odzračimo osnovo celice
3. Vključimo računalnik, pripravimo merilno opremo, odzračimo pokrov
4. Vgradimo preizkušane
5. Namestimo triosno celico
6. Celico napolnimo z odzračeno vodo
7. Vključimo kompresor in sušilec zraka
8. Nastavimo merilce na začetno stanje

Sledi izvedba računalniško vodenega preizkusa, ki poteka v naslednjih korakih:

1. Vnesemo parametre preizkusa
2. Izvedemo zasičenje, preverimo vrednost $B = \Delta u / \Delta \sigma_3$
3. Če je vrednost $B < 0.96$ postopek ponovimo z višjim pritiskom in povratnim tlakom.
4. Ponavljamo koraka 2 in 3, dokler ni vrednost $B \geq 0.96$
5. Izberemo konsolidacijske napetosti za izotropno ali neizotropno konsolidacijo
6. Sledi ciklično obremenjevanje
7. Ko je preizkus končan sledi razbremenitev, odvzem preizkušanca iz celice in določitev fizikalnih lastnosti po preizkusu

2.3 Izvedba preizkusa in določitev parametrov

Sodobna oprema omogoča izbiro različnih preizkusov in poti obremenjevanja. Izbiramo lahko med dreniranimi in nedreniranimi, kompresijskimi ali ekstenzijskimi preizkusi. To nam omogoča širok spekter preizkusov in prilagoditev glede na pogoje v naravi. Pred izvedbo cikličnega obremenjevanja običajno izvedemo naslednje faze:

- saturacija (eden od standardnih postopkov)
- konsolidacija (izotropna-hidrostatska napetost ali neizotropna-ustrezno K_0)
- statični preizkus: obremenitev, razbremenitev, ponovna obremenitev (drenirani ali nedrenirani, kompresijski ali ekstenzijski)

Ciklične preizkuse izvedemo s cikličnim spreminjanjem:

- napetosti (funkcije ciklov napetosti – sinusne, trikotne, impulzne itd.)
- pomikov (funkcije pomikov)

Prva faza preizkusa je ponavadi zasičenje. Izvedemo ga z izbrano napetostjo v celici in povratnim tlakom. Pri takšni obremenitvi porni vodni tlak počasi narašča do nekega končnega stanja. Čakamo tako dolgo, da postane porni vodni tlak konstanten in preverimo vrednost količnika B , t.j. razmerja med pornim vodnim tlakom in pritiskom v celici. Iz teorije geomehanike nam je znano, da smatramo preizkušane za zasičene, ko je B večji od 0.96. Če je B manjši, postopek ponovimo z novim višjim pritiskom v celici. Ponavadi je za zasičenje potrebno vsaj dvakrat ponoviti postopek. Seveda lahko izvedemo tudi delno zasičenje, kadar je to smiselno, ali pa to fazo preizkusa preskočimo.

Naslednja faza preizkusa je konsolidacija preizkušanca. Glede na namen preizkusa izvedemo popolno ali delno konsolidacijo. Pri popolni konsolidaciji pustimo preizkušane konsolidirati tako dolgo, da porni vodni tlak upade na stanje pred obremenitvijo in preizkušane preide v fazo lezenja. Pri delni konsolidaciji izvedemo le to do neke želene stopnje U_v (%).

Konsolidacija je lahko izvedena kot izotropna ali neizotropna. Pri izotropni konsolidaciji je preizkušane izpostavljen vplivu sfernih napetosti. Pri neizotropni konsolidaciji je praviloma vertikalna napetost višja od bočne.

Faza konsolidacije je pogosto dolgotrajna, pri peščenih materialih lahko traja samo nekaj ur ali pa do nekaj dni, pri zaglinjenih preizkušancih pa več tednov. Tipični rezultati konsolidacije so koeficient konsolidacije c_v , koeficient stisljivosti m_v in koeficient prepustnosti k_z .

Izračun parametrov togosti E , ν , K , G sledi iz napetostno deformacijskih odnosov. Strižne parametre c , ϕ običajno določimo iz treh vzporednih preizkusov.

Ciklično obremenjevanje

Začetni podatki so: napetost σ_{3c} , efektivna napetost σ'_{3c} , porni tlak u_{max} , dinamična distorzijska napetost q_{cyc} in razmerje napetosti q_{cyc}/σ'_{3c} .

Iz meritev izračunamo naslednje napetostne parametre: ciklična napetost v kompresiji, ciklična napetost v ekstenziji, srednja ciklična napetost, količnik ciklične napetosti, količnik srednje ciklične napetosti, procent odstopanja ΔP_{err} za n-ti cikel in ciklični količnik pornega vodnega tlaka.

$$\text{Ciklična napetost v kompresiji} \quad \sigma_c = \frac{P_c}{A_c}$$

$$\text{Ciklična napetost v ekstenziji} \quad \sigma_e = \frac{P_e}{A_c}$$

$$\text{Srednja ciklična napetost} \quad \sigma_a = \frac{\sigma_c + \sigma_e}{2}$$

$$\text{Količnik ciklične napetosti} \quad SR = \frac{\sigma_a}{2 \cdot \sigma'_{3c}} \cdot 100$$

$$\text{Količnik srednje ciklične napetosti} \quad SR_{ave} = \left[\left(\frac{1}{m} \right) \cdot \sum SR_n \right] \cdot 100 \quad \text{za } n=1 \text{ do } m \text{ ciklov}$$

Procent odstopanja ΔP_{err} za n-ti cikel – POGOJ

$$\Delta P_{err} = \frac{(\Delta P_c + \Delta P_e)_{max} - (\Delta P_c + \Delta P_e)_n}{(\Delta P_c + \Delta P_e)_{max}} \cdot 100 \leq 5\%$$

kjer so:

- ΔP_c sprememba obtežbe v kompresiji
- ΔP_e sprememba obtežbe v ekstenziji
- A_c površina preizkušanca po konsolidaciji
- σ'_{3c} efektivna izotropna konsolidacijska napetost
- SR_n količnik ciklične napetosti za n-ti cikel
- m število ciklov

Ciklični količnik pornega vodnega tlaka se izračuna iz odnosa $U = \frac{u_{max}}{2\sigma'_{3c}} \cdot 100$

kjer sta:

- σ'_{3c} efektivna izotropna konsolidacijska napetost
- u_{max} maksimalen povzročen porni vodni tlak znotraj cikla

Deformacijski parametri so: osna deformacija v kompresiji, osna deformacija v ekstenziji, dvojna srednja osna deformacija.

Osna deformacija v kompresiji	$\varepsilon_c = \frac{\delta_c}{H_c}$
Osna deformacija v ekstenziji	$\varepsilon_e = \frac{\delta_e}{H_c}$
Dvojna srednja osna deformacija	$\varepsilon_{da} = \frac{\delta_c + \delta_e}{H_c} = \varepsilon_c + \varepsilon_e$

kjer so:

ε_c osna deformacija v kompresiji
 ε_e osna deformacija v ekstenziji
 ε_{da} dvojna srednja osna deformacija
 H_c višina preizkušanca po konsolidaciji

Dinamični parametri trdnosti so: Youngov modul E , strižni modul G in faktor dušenja ζ (%).
 Izračunajo se iz naslednjih relacij:

Youngov modul E $E = \frac{L_{da}}{S_{da}} \cdot \frac{L_s}{A_s}$ (GPa)

kjer so:

L_{da} dinamična obtežba v kompresiji plus ekstenziji (kN)
 S_{da} deformacija v kompresiji plus ekstenziji (mm)
 L_s višina preizkušanca po konsolidaciji (mm)
 A_s površina preizkušanca po konsolidaciji (mm²)

Strižni modul G (kPa) $G = \rho \cdot v_s^2 = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$

kjer so:

E Young-ov modul (kPa)
 ν Poisson-ov količnik (-)
 ρ gostota (g/cm³)
 v hitrost strižnega valovanja (m/s)
 γ strižna specifična deformacija (-)
 τ strižna napetost (kPa)

Faktor dušenja ζ (%) $\zeta = \frac{A_L}{4\pi \cdot A_T} \cdot 100$

kjer sta:

A_L površina histerezne zanke
 A_T površina trikotnika OAB in OA'B'

Sledi interpretacija rezultatov za posamezni cikel in množico ciklov (N) za: deformacije, napetosti, porne tlake in količnik ciklične napetosti. Interpretacija rezultatov za posamezni cikel in množico ciklov (N) (npr. $E - N$, $G - N$, $G/G_0 - N$, $\zeta - N$) sledi iz naslednjih odnosov:

- $\varepsilon_c - N$, $\varepsilon_e - N$, $\varepsilon_{da} - N$
- $\sigma_c - N$, $\sigma_e - N$, $\sigma_a - N$
- $u - N$, $U - N$
- $\sigma_{3min}/\sigma_{3c} - N$, $SR_n - N$
- Odstopanje od programirane obremenitve $P_{error} - N$

3. REZULTATI PREIZKUSOV

Prikazani so rezultati preizkusov izrazito različnih materialov.

3.1 Dinamični triosni preizkusi dravskih peskov

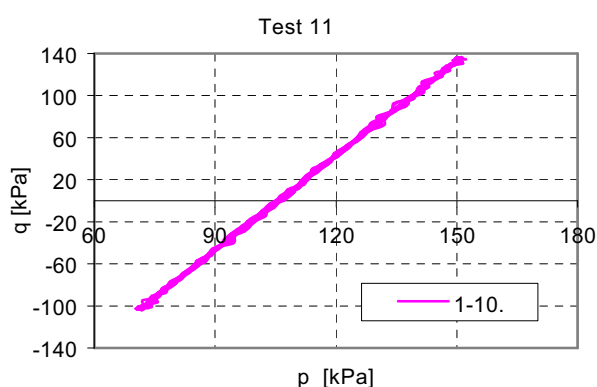
Leta 2001 je bila izvedena preiskava dravskih peskov, ki je obsegala tudi 50 cikličnih triosnih preizkusov. Preizkuse smo izvajali s cikličnim spreminjanjem napetosti in s simuliranjem potresnih pomikov. Namen preiskave je bil določiti dinamične karakteristike in verjetnost pojava likvifikacije pri različnih pogojih. Vsak posamezni preizkus je bil izveden v treh korakih; najprej je bila izvedena saturacija, nato konsolidacija in v tretjem koraku dinamična obremenitev. Spreminjali smo naslednje pogoje: sferno napetost, stopnjo zasičenosti, stopnjo konsolidacije, začetni porni tlak in spremembe, distorzijsko ciklično obremenitev.

Rezultati preizkusov varirajo glede na navedene pogoje. V nadaljevanju so prikazani rezultati za dva preizkusa s podobnimi fizikalnimi lastnostmi in izrazito različnim razmerjem napetosti. Vhodni podatki za oba preizkusa so podani v tabeli 1.

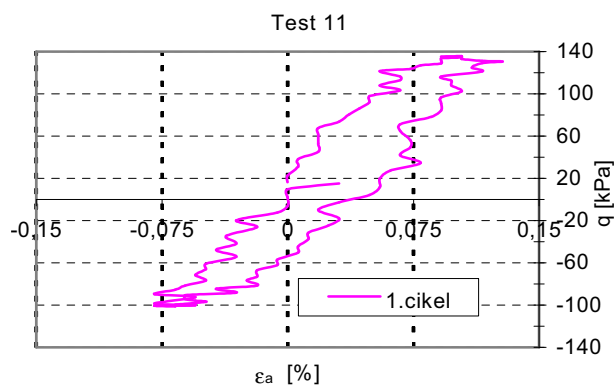
Tabela 1: Vhodni podatki za Test 11 in Test 14

		Test 11	Test 14
Napetost	σ_{3c}	105.5 kPa	85.0 kPa
Efektivna napetost	σ'_{3c}	78.1 kPa	24.9 kPa
Maksimalni porni tlak	u_{max}	27.4 kPa	35.2 kPa
Dinamična distorzijska napetost	q_{cyc}	120.2 kPa	119.6 kPa
Razmerje napetosti	q_{cyc}/σ'_{3c}	1.54	4.8

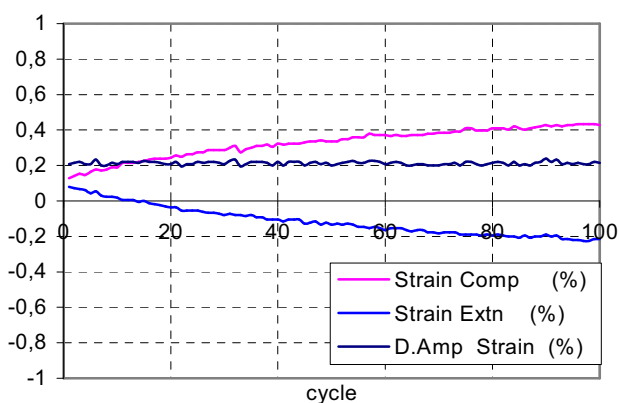
Slika 2a prikazuje sferne in distorzijske komponente napetosti, ki se spreminjajo v posameznem preizkusu. Na sliki 2b je prikazana deformacijska histereza znotraj posameznega cikla, ki je odvisna od pogojev sprememb napetosti.



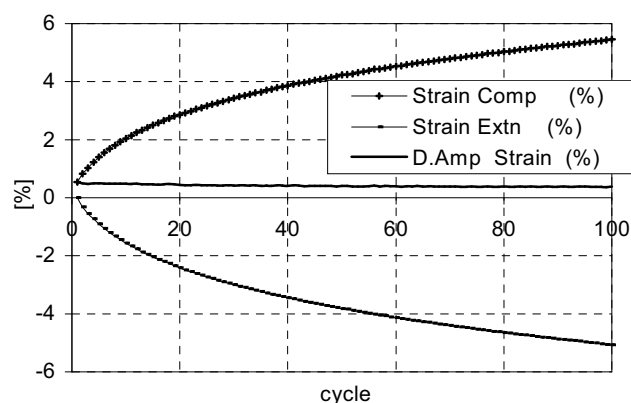
Slika 2a: Spremembe napetosti $p - q$



Slika 2b: Deformacije v posameznem ciklu $q - \varepsilon$



Slika 3a: Deformacije po 100 ciklih za Test-11



Slika 3b: Deformacije po 100 ciklih za Test-14

Sliki 3a in 3b prikazujeta ciklične prirastke deformacij za razmerje napetosti $q_{cyc}/\sigma'_{3c}=1,54$ in $q_{cyc}/\sigma'_{3c}=4,8$. Vidimo, da z višanjem distorzijskih cikličnih napetosti deformacije izrazito rastejo. Odnos se poda grafično z relacijo med q_{cyc}/σ'_{3c} in številom ciklov N potrebnih za neko stopnjo deformacije ali likvifikacijo.

Rezultati za primerjana preizkusa so podani v tabeli 2.

Tabela 2: Rezultati za Test 11 in Test 14

	Test 11	Test 14
Ciklična napetost v kompresiji	119.7 kPa	119.7 kPa
Ciklična napetost v ekstenziji	120.6 kPa	119.4 kPa
Srednja ciklična napetost	120.2 kPa	119.6 kPa
Količnik ciklične napetosti	76.89 %	239.98 %
Količnik srednje ciklične napetosti	76.61 %	240.16 %
Procent odstopanja ΔP_{err} za n-ti cikel		
Osna deformacija v kompresiji	0.214 %	5.46 %
Osna deformacija v ekstenziji	0.427 %	5.08 %
Dvojna srednja osna deformacija	0.213 %	0.385 %
Ciklični količnik pornega tlaka	29.37 %	141.18 %
Parametri za N=10 ciklov		
Youngov modul	106.7 MPa	29.9 MPa
Strižni modul	42.0 MPa	11.6 MPa
Faktor dušenja	0.98 %	2.1 %

3.2 Grušči s plazu Stože

V laboratorij LMT smo prejeli vzorce gruščnih kompozitov iz vplivnega območja plazu Stože, konkretno iz območja nasute pregrade pri Meleh (SM-1 do SM-4) in nasute pregrade pod Počivalnikom (SP-1a). Namen preiskav je bil določitev mehanskih lastnosti vzorcev. Večina vzorcev je bila zaradi sestave tal v ne-intaktnem stanju. Pri izvedbi preizkusov smo izhajali iz predpostavke, da so nekatere fizikalne lastnosti (vlažnost, zrnavost, ...) ustrezne stanju v naravi.

V LMT smo izvedli naslednje preiskave:

1. mineraloško petrografska sestava: mineralna sestava, oblika zrn, površina zrn, slaba zrna
2. laboratorijski preizkusi: klasifikacija zemljin, konsistence po Atterbergu, določitev prostorninske teže, določitev prostorninske teže v razsutem in zbitem stanju, sejalne in sedimentacijske analize zrnivosti, določitev enosne tlačne trdnosti, triaksialni preizkusi trdnosti, določitev strižne trdnosti v triaksialnem aparatu, preizkusi trdnosti s cikličnim obremenjevanjem.

Že osnovne fizikalne karakteristike posameznih vzorcev izrazito odstopajo. Glede na lastnosti jih lahko delimo v tri tipe: trdne, poltrdne (delno razmočene) in izrazito razmočene.

V tabeli 3 so podani tipični rezultati za trdni grušč iz vrtine SM-2, globina 12,70-13,00 m, poltrdni in delno razmočen grušč (SM-4 14,50-14,80 m) in za izrazito razmočen grušč (SM-4 3,00-4,00 m).

Tabela 3: Fizikalne lastnosti

			Trdni grušč	Delno razmočen	Razmočen
Naravna vlažnost	w	%	6.85	10.62	13.41
Gostota	ρ	g/cm^3	2.62	2.40	2.31
Meja plastičnosti	w_P	%	10.37	12.07	14.20
Meja židkosti	w_L	%	12.85	22.55	40.31
Indeks plastičnosti	I_p	-	2.42	10.48	26.11

V tabeli 4 so podani konsolidacijski parametri, prepustnost in parametri trdnosti. V triaksialnem aparatu Wille so bili izvedeni kompresijski preizkusi trdnosti z zveznim prirastkom napetosti. Določeni so bili modul elastičnosti in Poissonov količnik ter strižna trdnost. V triaksialnem aparatu Wykeham Farrance so bili izvedeni preizkusi trdnosti s cikličnim obremenjevanjem.

Preizkusi so se izvajali v treh stopnjah.

1. Najprej je bila izvedena saturacija preizkušancev s standardnim postopkom po BS 1377, z inkrementalnim dviganjem pornih vodnih tlakov (back pressure) do doseženega kriterija za koeficient B po Skempton-u $B \geq 0,95$.
2. Nato je bila izvedena delna izotropna in/ali neizotropna konsolidacija pri izbranih stanjih totalnih in efektivnih napetosti.
3. V tretjem koraku je bila izvedena dinamična obremenitev preizkušancev z izbranimi ciklično ponavljajočimi obtežbami.

Tabela 4: Parametri trdnosti, konsolidacije in prepustnosti

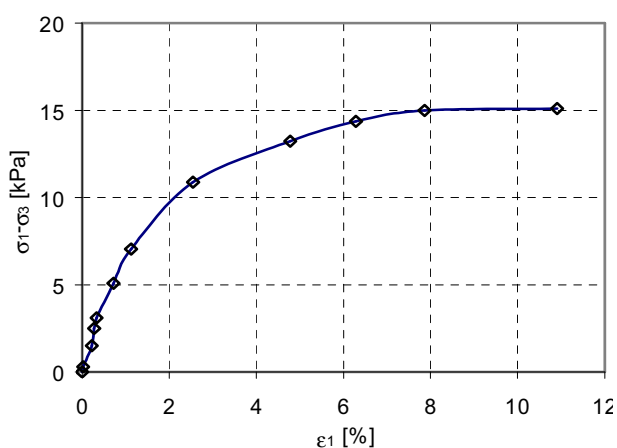
			Trdni grušč	Delno razmočen	Razmočen
Modul elastičnosti	E_{50}	MPa	>300	6 - 10	1 - 5
Poissonov količnik	ν	-	0.24	0.3	0.3 - 0.4
Kohezija	c	kPa	0	0	0
Strižni kot	φ	°	29	30	10 - 20
Koeficient konsolidacije	c_v	m ² /s	30	0.6 - 1	0.1 - 0.5
Prepustnost	k	m/s	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³

Vrednosti dinamičnih parametrov trdnih vzorcev so visoke, delno razmočenih vzorcev pa nizke (Tabela 5). Razmočeni gruščiči so praktično utekočinjeni, v preizkusih so nastopile porušitve po največ nekaj deset ciklih.

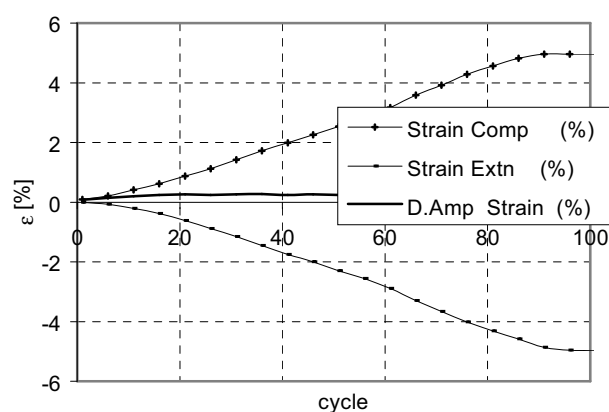
Tabela 5: Rezultati cikličnih preizkusov

Po 10 ciklih			Trdni grušč	Delno razmočen
Modul elastičnosti	E	MPa	267.5	15.1
Začetni strižni modul	G_0	MPa	107.0	5.8
Faktor dušenja	ζ	%	0.91	5.1

Na slikah 4a in 4b sta prikazana rezultata za statični preizkus (naraščanje deformacije z višanjem distorzijske napetosti in dinamični preizkus (naraščanje deformacije s številom ciklov) za vzorec iz vrtine SM-4 ter globine 3.0-4.0 m).



Slika 4a: Statični preizkus, naraščanje deformacije z višanjem distorzijske napetosti (SM-4, 3.0-4.0 m)



Slika 4b: Dinamični preizkus, naraščanje deformacije s številom ciklov (SM-4, 3.0-4.0 m)

3.3 Triosne preiskave karbonskih skrilavcev

Karbonski glinasti skrilavci z območja AC preko Trojan so nastali iz zelo drobnokratnih klastičnih sedimentov. Dinamometamorfni procesi so glinavce in meljevce spremenili v

glinaste skrilavce. Glinasti skrilavci navadno niso homogeni, temveč heterogeni in neizotropni, z laminirano do tanko plastovito zgradbo. Lastnosti kot so tektonska deformiranost, tekstura, mineralna sestava in struktura imajo velik vpliv na mehanske lastnosti. Ena najpomembnejših značilnosti, ki jo moramo upoštevati, je nizka strižna trdnost. Karbonski glinasti skrilavec je vodoneprepustna kamnina. Sekundarna tektonska aktivnost je povzročila krhke deformacije. Nastal je sistem razpok in s tem razpoklinska poroznost, ki omogoča pronicanje vode. Kamninski drobir z vmesno glino imata zelo veliko specifično površino. Nanje se adsorpcijsko in absorpcijsko lahko veže velika količina vode. Pri obilnejših padavinah se povečata hidrostatični in porni tlak. S tem se med delci zdrobljenega glinastega skrilavca zniža kohezija in tudi celotna strižna trdnost. Razmočen glinast material postane masten, hribinska masa pa podvržena plazenju. V strmih predelih z nagibom skrilavosti in/ali plasti vzdolž pobočja prihaja praviloma do polzenja ob vsakem dolgotrajnejšem deževju.

Podobno se zgodi, če je kamnina dodatno obremenjena (povečana napetost). Zaradi dviga pornega tlaka se hribini zmanjša strižna trdnost. Ko je voda iztisnjena iz razpok, se kohezija in strižni kot ponovno povečata s tem pa tudi celotna strižna trdnost. Če ja ta čas (pre)dolg, se hribina izrazito deformira, ali se že poruši. Premiki med ploskvami skrilavosti so v začetni fazi praktično nevidni, prav tako se ne oblikuje jasna drsna ploskev, dokler material ne splazi.

Smeri porušitev so povezane z anizotropijo kamnine. Čeprav sta spremljajoča meljevec do peščenjak z geomehanskega stališča trdni kamnini se zaradi anizotropij, predvsem tankih prekinitev v obliki glinastega skrilavca vzdolž njih z lahkoto prestrižeta.

Pri razbremenitvi totalna napetost v kamnini naglo upade, porni tlak pa upade počasneje. To privede do visokih distorzij efektivne napetosti in velikih strižnih deformacij. Če takšno stanje traja predolgo, kamnina strižno popusti in nastopi porušitev.

Porušitev naravnega ravnovesja z gradbenimi posegi v glinastih skrilavcih praviloma povzroči težave. Pri geomehanski analizi nastopajo naslednji problemi:

- Osnovne fizikalne lastnosti so neenakomerne in neugodne.
- Mehanske lastnosti glinastih skrilavcev so glede na ostale fizikalne lastnosti in napetostno-deformacijske pogoje spremenljive in težko predvidljive. Iz izkušenj vemo, da pri uporabi različnih teorij oz. modelov, trdnostni parametri pogosto niso bili primerno izbrani.
- Problem je kako te lastnosti predvidevati v geomehanskem modelu.
- Natančnejši opis problema nas vodi v mikro-mehaniko, ki pa ni dovolj uporabna v inženirski praksi. Zato je primerneje hribino obravnavati kot kontinuum.



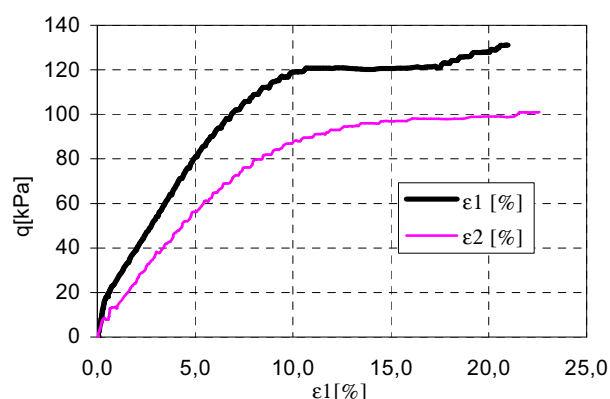
Slika 5: Vzorec karbonskega skrilavca

Izvedena je bila preiskava karbonskih skrilavcev, ki je med drugim obsegala tudi izvedbo serije triaksialnih preizkusov s statičnim in dinamičnim obremenjevanjem. Preizkusi so bili izvedeni na valjastih preizkušancih povprečne višine 170 mm in premera 85 mm. Preiskava anizotropije se je izvedla na prizmatičnih preizkušancih.

Preizkusi s statičnim obremenjevanjem so bili izvedeni kot obremenilni in razbremenilni. Izvedeni so bili klasični preizkusi z inkrementalnimi spremembami osne (vertikalne) napetosti in preizkusi z zveznimi spremembami osne (vertikalne) napetosti. Pri obeh vrstah preizkusov je bilo v začetnem napetostnem stanju simulirano napetostno stanje podobno tistemu v naravi. Nato so bile pri vsakem posameznem preizkusu izvedene spremembe napetosti. Le te so bile pri seriji preizkusov izbrane tako, da je ustvarjen spekter različnih napetostnih stanj. Rezultati preizkusov z inkrementalnimi spremembami napetosti dajejo dober vpogled v lastnosti pojavov pornih tlakov, nabrekanja in lezenja. Prednost preizkusov z zveznim obremenjevanjem je v hitrosti izvedbe, kar omogoča izvedbo serije preizkusov v bistveno krajšem času. Izbrana je bila hitrost obremenjevanja v povprečju $d\varepsilon/dt = 0.001\%/min$, ob pogoju $d\sigma/dt \leq 1\text{ kPa}/min$ in hitrost razbremenjevanja $d\sigma/dt \leq 1\text{ kPa}/min$. Pomembno je, da je izbrana primerna hitrost obremenjevanja, ob prehitrem zveznem obremenjevanju rezultati odstopajo od inkrementalnih in postanejo nerealni.



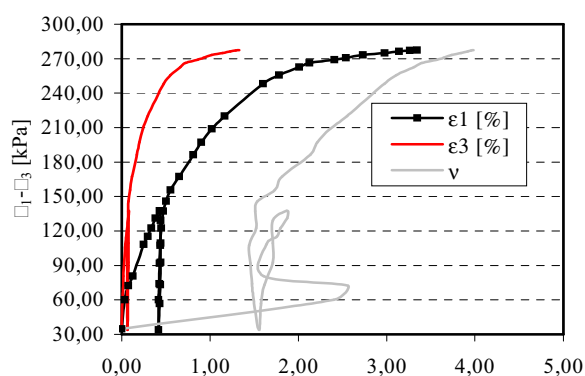
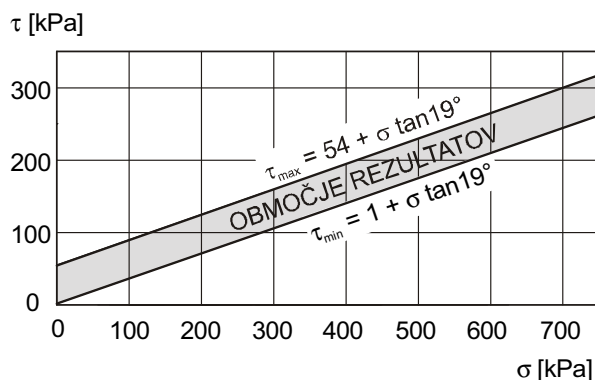
Slika 6a: Prizmatičen preizkušanelec po preizkusu



Slika 6b: Prizmatičen preizkušanelec, naraščanje deformacije z višanjem distorzijske napetosti

Slika 6 prikazuje preizkušanelec po preizkusu in rezultat kompresijskega nedreniranega preizkusa (CU), ki je bil izveden na treh preizkušancih identičnega vzorca. Pri izbranih sfernih napetostih 50, 100 in 200 kPa je bila izvedena osna obremenitev, razbremenitev, ponovna obremenitev in obremenitev do porušitve. To omogoča določitev obremenilnih in razbremenilnih modulov E , E_{50} , E_{ur} , Poissonovega količnika in strižnih parametrov c , φ .

Iz serije inkrementalnih in zveznih statičnih preizkusov na podobnih vzorcih lahko ocenimo strižno trdnost kot je prikazano na sliki 7.

Slika 7a: Deformacije in Poissonov količnik za spremembe distorzijske napetosti pri $\sigma_3 = 200\text{ kPa}$ 

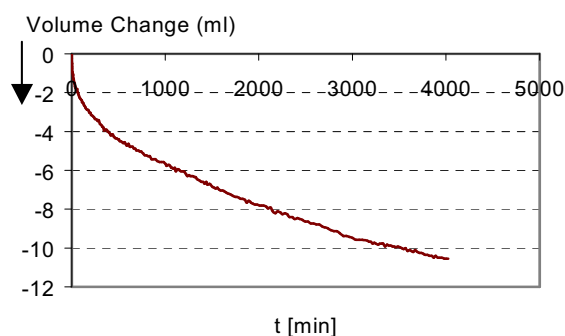
Slika 7b: Območje strižnega odpora po Mohr-Coulumbu za serijo preizkusov

Youngov modul je variral med 70 in 120 MPa pri sferni napetosti 100 kPa. Obremenilno razbremenilni modul je višji od 300 MPa. Modul E_{50} se spreminja kot je podano v tabeli 4. Poissonov količnik se spreminja med vrednostmi 0.15 and 0.25 in narašča z višanjem distorzijske napetosti (slika 7).

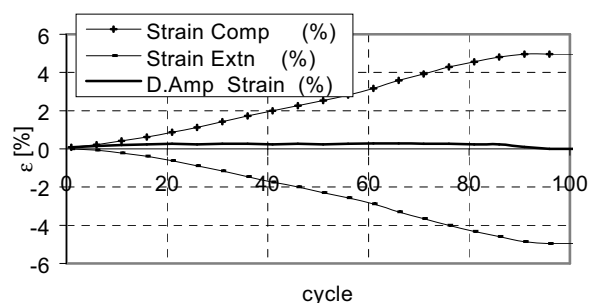
Konsolidacija in lezenje sta bila raziskana na majhnem številu vzorcev. Dokaj visoka prepustnost je posledica razpokanosti kamnine.

Preizkusi z dinamičnim (cikličnim) obremenjevanjem so bili izvedeni tako, da je bilo vzpostavljeno neko začetno izotropno ali neizotropno napetostno stanje. Preizkušanece je bil nato distorzijsko obremenjen z izbrano dinamično osno silo ali frekvenco pomikov. Izvedena je bila serija preizkusov s spektrom različnih napetostnih stanj in dinamičnih obremenitev.

Iz rezultatov preizkusov z dinamičnim obremenjevanjem je očitno, da so za stabilnost materiala bistvenega pomena ploskve skrivalosti. Kadar so le te zlepljene, se material obnaša dokaj nedeformabilno. Ko pa se te ploskve omočijo, postane material pri cikličnem obremenjevanju nestabilen. Na sliki 8a je prikazano spreminjanje prostornine v fazi konsolidacije, na sliki 8b pa specifične deformacije v odvisnosti od števila ciklov obremenjevanja.



Slika 8a: Ciklični preizkus, faza konsolidacije



Slika 8b: Ciklični preizkus, deformacije

Parametri za analize

Za izbrano serijo preizkusov so predlagani parametri za geotehnične analize z uporabo MKE.

Mohr-Coulombov model

Je primeren za začetne analize. V tabeli 6 so podane predlagane vrednosti parametrov.

Tabela 6: Parametri za Mohr-Coulombov model

Parameter		vrednost
Youngov modul	E	20 MPa
Poissonov količnik	ν	0.25
Strižni kot	φ'	18°
Kohezija	c'	16 kPa

Model izotropnega utrjevanja (Isotropic Hardening model)

Nekateri parametri modela izotropnega utrjevanja sovpadajo s parametri Mohr-Coulombovega modela. Ostali so podani v tabeli 7.

Tabela 7: Karakteristike za Isotropic-Hardening model.

Parameter		vrednost
Strižni kot	φ	18 °
Kohezija	c	16 kPa
Youngov modul	E	75 MPa
Sekantni elastični modul	E_{50}	20 MPa
Referenčna napetost	p_{ref}	100 kPa
Količnik napetosti	m	0.7
Poissonov količnik	ν	0.25
Količnik porušitve	R_f	0.9

Konsolidacija in lezenje

Lastnosti konsolidacije in lezenja sta bili raziskani na malem številu vzorcev. Velikost parametrov (tabela 8) je relativno visoka, kar je verjetno posledica razpok in glinastih vložkov.

Tabela 8: Parametri za model lezenja

Parameter		vrednost
Modificiran indeks nabrekanja	κ	0.003
Modificiran kompresijski indeks	λ	0.015
Modificiran indeks lezenja	μ	<0.001

Neizotropni model (Jointed Rock model)

Je neelastičen model, ki upošteva slojevitost hribine in smeri porušitev. Za analizo so predlagane naslednje vrednosti parametrov.

Tabela 9: Karakteristike skrilavca za neizotropni model (Jointed Rock model).

Parameter		vrednost
<i>Kontinuum</i>		
Youngov modul	E	75 MPa
Poissonov količnik	ν	0.20
<i>Slojevitost</i>		
Youngov modul	E	20 MPa
Poissonov količnik	ν	0.20
<i>Parametri trdnosti</i>		
Strižni kot	φ'	18 °
Kohezija	c'	16 kPa
Kot dilatacije	ψ	0 °
Raztezna trdnost	σ_t	0
Usmerjenost	N	1
Kot smeri	α_1	30 °
Kot smeri	α_2	0 °

Dinamične lastnosti

Dinamični parametri za analizo so predlagani iz malega števila preizkusov. Predlagane vrednosti so podane v tabeli 10.

Tabela 10: Dinamične karakteristike

Parameter		Vrednost
Gostota	ρ	2.3 g/cm ³
Začetni strižni modul	G_0	200 MPa
Poissonov količnik	ν	0.20
Faktor dušenja	ξ	1-2 %

3.4 Ciklični triosni preizkusi tamponskega materiala

V LMT smo izvedli preiskavo, katere namen je bil preučiti, kako se obnaša tamponski material pod vplivom ponavljajoče obtežbe in kateri faktorji vplivajo na njegovo deformabilnost. Preizkusi so bili izvedeni na gramoznem materialu. Izvedenih je bilo 77 preizkusov. Preizkušanci iz gramoznega materiala so bili vgrajeni v triaksialne celice. Izpostavljeni so bili statičnemu napetostnemu stanju in obremenjeni s ponavljajočo dinamično obtežbo. S statično napetostjo je bilo vzpostavljeno neko konstantno napetostno stanje v materialu. S ponavljajočo dinamično obtežbo pa smo simulirali pogoje obremenitev tamponskega sloja pri prehodih vozil.

Preizkušanci so bili cilindrične oblike. Velikost preizkušancev je bila 100 mm premera in 200 mm višine. V preizkusih so bili zrnavost, oblika zrn in mineraloški sestav konstantni. Večina preizkušancev je imela vlažnost v območju 10% odstopanja.

Pri posameznih preizkusih so imeli preizkušanci različno zbitost (gostoto), vlažnost in stopnjo zasičenosti. Spreminjali smo pogoje statične in ponavljajoče dinamične obtežbe. Statična obtežba je bila izbrana kot izotropna ali neizotropna, velikosti $\sigma_v = 20 - 70$ kPa; $\sigma_h/\sigma_v \leq 1$. Simulirane so bile ponavljajoče prometne obtežbe. Ponavljajoča dinamična obtežba je bila izvajana samo v vertikalni smeri $q_{cyc} = \sigma_{v,cyc} - \sigma_h$, velikosti obtežb so bile 25 – 200 kPa. Ponavljanje obtežb v preizkusih (N_{cyc}) je bilo različno, od 100 do 36.000 ciklov.

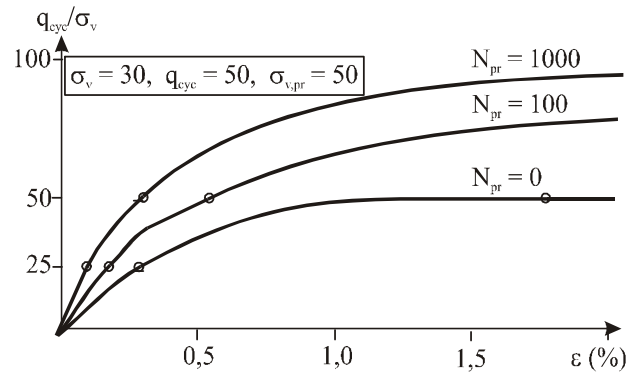
Simulirani so bili primeri obremenitev brez predhodnega obremenjevanja ($N_{pri}=0$) in z različnim predhodnim obremenjevanjem ($N_{pri}=100 - 1000$ prehodov).

V vsakem preizkusu je bil opazovan odnos med distorzijsko napetostjo q (kPa) ter kompresijsko in ekstenzijsko deformacijo ε_i (%) ($q - \varepsilon$ diagram) pri vsaki (i -ti) dinamični obremenitvi, ter naraščanje skupne deformacije ε zaradi ponavljajoče obtežbe, pri čemer je N število prehodov ($\varepsilon - N$ diagram).

Izkaže se, da je primerna (optimalna) vlažnost bistvenega pomena za vgrajevanje materiala in togost tamponskega sloja E , ν , G .

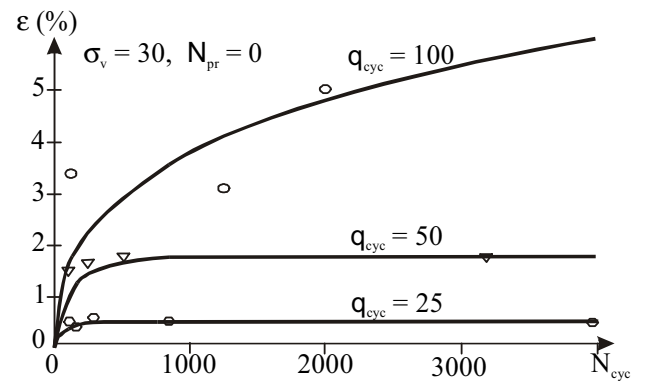
Tamponski sloj je možno primerno zbiti samo v območju optimalne vlažnosti (kar je znano). Le takrat bo malo deformabilen. Ko vlažnost preveč odstopa, se deformabilnost rapidno poveča.

Na sliki 9 je prikazano naraščanje deformacije (ε) z višanjem distorzijske napetosti q_{cyc}/σ . Vidimo, da predhodna ciklična predobremenitev bistveno poveča nosilnost tamponskega materiala.



Slika 9: Odnos (ε) - q_{cyc}/σ

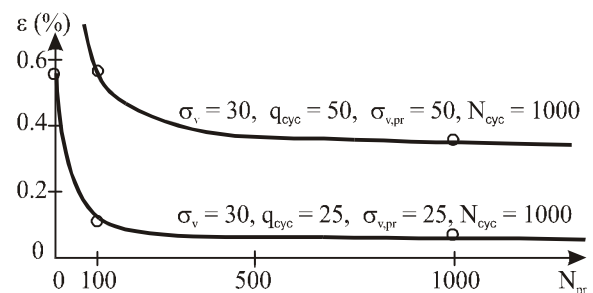
Iz $\varepsilon - N_{cyc}$ diagramov (slika 10) se lepo vidi, da pri utrjenih tamponih med $N=100 - 1000$ prehodov krivulja izrazito konvergira k neki asimptotični vrednosti. Iz tega sledi, da samo veliko število prehodov s časom ne vpliva bistveno na večanje deformacij. Deformacije se večajo pri začetnih prehodih, razen če material ne prenese distorzijskih obremenitev. Takrat ni konvergence in deformacija narašča, lahko tudi do porušitve. Na sliki 10 so prikazani rezultati deformabilnosti (ε) glede na število prehodov (N) za ciklične obtežbe $q_{cyc} = 25, 50$ in 100 kPa, brez predhodnih obremenitev ($N_{pr}=0$).



Slika 10: Odnos (ε) - N_{cyc}

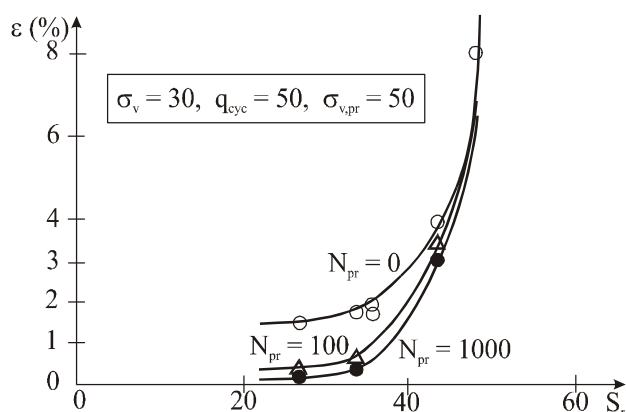
V primeru neustreznih pogojev vgrajevanja (zbitost, vlažnost, zasičenost) ali prevelikih distorzijskih obremenitev deformacije torej ne bodo samo večje ampak bodo tudi naraščale s številom prehodov (konvergenca ne bo izrazita ali pa je sploh ne bo).

Iz rezultatov preizkusov je tudi očitno, da so preizkušanci, ki niso bili izpostavljeni predhodnim cikličnim obremenitvam (N_{prl}) mnogo bolj deformabilni, četudi so bili pri vgradnji optimalno zbiti. Deformabilnost materiala se z večanjem števila predhodnih obremenitev N_{prl} manjša.



Slika 11: Deformabilnost (ε) glede na število predobremenitev (N_{prl})

Na deformabilnost bistveno vplivajo zbitost materiala, njegova vlažnost in stopnja zasičenosti. Povečana stopnja zasičenosti povzroči izrazito deformabilnost materiala. Na sliki 12 je prikazan odnos med deformacijo (ε) in stopnjo zasičenosti (S_r) za materiale predobremenjene z različnim številom dinamičnih predobremenitev. Odnos med deformacijo (ε) in stopnjo zasičenosti (S_r) je bil raziskan še za spreminjanje ostalih pogojev. Iz slike 12 vidimo, da se pri malo povečani stopnji zasičenosti deformacije povečajo minimalno, nato pa pri neki meji (območju) strmo narastejo ne glede na pogoje priprave preizkušanca. Zanimivo je, da deformabilnost narašča pri bistveno nižji stopnji zasičenosti od tiste pri optimalni vlažnosti.



Slika 12: Odnos med deformacijo (ε) in stopnjo zasičenosti S_r .

4. ZAKLJUČEK

Uvedba cikličnih triosnih preizkusov predstavlja pomembno dopolnitev pri raziskovanju zemeljskih materialov. Ciklični triosni preizkusi so uporabni za izotropne, ortotropne ali neizotropne materiale kot so zemljine, mehke kamnine in umetni zemeljski materiali. Izbrane so lahko različne poti obremenjevanja (napetostne, deformacijske); za kompresijske (HC, CTC, TC, RTC) in ekstenzijske (TE, RTE, CTE) napetostne pogoje ter za različne pogoje dreniranja. V LMT izvajamo ciklične triosne preizkuse od leta 2001. Preiskave na materialih, predstavljene v prispevku, kažejo na široko uporabnost cikličnih triosnih preizkusov.

Preizkusi dravskih peskov so bili izvedeni na preizkušancih iz identičnega materiala. Rezultat preizkusov so dinamični parametri, ki varirajo glede na pogoje priprave preizkušanca (zbitost, zasičenost itd.) in pogoje napetosti (velikost začetnih pornih tlakov, razmerje distorzijske in sferne napetosti itd.).

Preizkusi gruščnih kompozitov s plazu Stože so bili izvedeni na preizkušancih s takšnimi fizikalnimi lastnostmi, kot smo jih prejeli v laboratorij. Iz preiskav so razvidna velika odstopanja rezultatov. Lastnosti vzorcev so tako različne, da jih je smiselno deliti v tri tipe materialov. Trdni grušči imajo visoke vrednosti statičnih in dinamičnih karakteristik iz katerih je očitno, da dinamične obremenitve niso vzrok za pojav plazenja. Karakteristike delno razmočenih gruščnatih kompozitov so nizke, razmočeni grušči pa so bili praktično utekočinjeni. To kaže na pojav zemeljskega toka, kot posledico razmočenosti in utekočinjenja materiala. Razmočeni materiali niso odporni na dinamične vplive.

Raziskani karbonski skrilavci po lastnostih izrazito odstopajo. Tukaj so podani rezultati za serijo preizkusov na podobnih vzorcih. Izvedeni so bili statični in ciklični triosni preizkusi. Rezultati preizkusov so statični in dinamični parametri, ki so uporabni v geotehničnih analizah.

Za deformabilnost tamponskega sloja je pomembna izbira materiala (granulometrija, oblika zrn, mineraloški sestav itd.) in vgrajevanje (zbitost, vlažnost). Ob primerni izbiri je deformabilnost majhna, kompresijski modul in strižni parametri pa imajo visoke vrednosti. Pod vplivom ponavljajočih obtežb se material utruja in deformacija narašča. Velikost deformacije narašča z višanjem distorzijskih komponent ponavljajočih obtežb. Če material ni

bil izpostavljen predhodnim obremenitvam, bo izrazito bolj deformabilen. Če je distorzijska napetost v sprejemljivih mejah, se deformabilnost bistveno manjša s številom predobremenitev. Na deformabilnost bistveno vplivajo zbitost materiala, njegova vlažnost in stopnja zasičenosti.

Zahvala

Začetne raziskave s cikličnim triosnim aparatom so bile izvedene v okviru raziskovalne naloge Dinamični triaksialni aparat, ki jo je financiral DARS.

Literatura

- ASTM – D3999-91 Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial apparatus, Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.09., 1996
- ASTM – D5311-92 Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil, Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.09., 1996
- BRINKGREVE, R.B.J., VERMER, P.A. PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, A.A. Balkema, 2001
- LENART, S. Dinamične karakteristike zemljin na primeru kompozita prodnato peščenega melja iz plazu Stože, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2003
- TRAJANOVA, M. O stabilnosti karbonskega glinastega skrilavca ob avtocesti Ljubljana – Celje s petrografskega stališča, GEOLOGIJA 44/1, Ljubljana, 2001
- VRECL, H. s sod. Triaxialni preizkusi permo karbonskih skrilavcev, konferenca SloGeD, 1999
- WYKEHAM FARRANCE - Cyclic Triaxial Testing System, 2001
- WYKEHAM FARRANCE UTM - Universal Testing Machine, Reference manual, 2001
- ŽLENDER, B. Continuously loaded triaxial tests, Proceedings of the 15. International conference ISSMGE, Istanbul, 2001
- ŽLENDER, B. Triaxial tests of carboniferous slates with static and dynamic loading, Proceedings of the International conference ISRM, Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, Sandton, 2003
- ŽLENDER, B., MACUH, B. Response of pavement granular base material on repetitional traffic loads, Proceedings of the 13. International conference ECSMGE, Praga, 2003