

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni študij gradbeništva,  
Konstrukcijska smer

Kandidatka:

**Barbara Likar**

# **Napetnostno-deformacijska stanja v peščenih materialih**

**Diplomska naloga št.: 3109**

**Mentor:**  
prof. dr. Bojan Majes

**Somentor:**  
dr. Stanislav Lenart

Ljubljana, 2010

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

Raziskovalno delo je bilo opravljeno na Zavodu za gradbeništvo Slovenije.

### **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana **BARBARA LIKAR** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:  
»**NAPETOSTNO-DEFORMACIJSKA STANJA V PEŠČENIH MATERIALIH**«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 09.04.2010

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>642.131(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Barbara Likar</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Bojan Majes</b>
<b>Somentor:</b>	<b>dr. Stanislav Lenart</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Napetostno-deformacijska stanja v peščenih materialih</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>93 str., 8 pregl., 58 sl., 100 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>geotehnika, preizkuševanje zemljin, torzijske triosne preiskave votlih vzorcev, dinamični strižni modul zemljin</b>

### **Izvleček**

Diplomsko delo obravnava raziskave dinamičnega strižnega modula zemljin pri različnih napetostnih stanjih, dobljenega s pomočjo torzijskega triosnega aparata za votle vzorce. Prvi del naloge predstavlja teoretično osnovo torzijskih triosnih preiskav votlih vzorcev v smislu predstavitve napetosti in deformacij, ki se pojavijo v vzorcu med preiskovanjem, ter zaključke že opravljenih tovrstnih preiskav predstavljenih v strokovni literaturi. Sledi študij postopka izvajanja preiskav od pripravljanja peščenih vzorcev do samega poteka preiskav, povzetega po japonskem standardu za določitev deformacijskih lastnosti zemljin s pomočjo torzijske triosne preiskave votlega vzorca (JGS 0543-2000). V nadaljevanju so bile opravljene preiskave z namenom ugotavljanja vpliva anizotropne konsolidacije na strižni modul zemljine. Opravljenih je bilo šest preiskav na dveh različnih materialih pri različnih začetnih efektivnih napetostih v obročni smeri. Vse preiskave so bile v prvem delu vodene deformacijsko po omenjenem japonskem standardu. Z njimi smo želeli potrditi začetno predpostavko o vplivu anizotropne konsolidacije na strižno togost zemljin. V drugem delu je bil vzorec obremenjen z napetostno vodeno obremenitvijo v več stopnjah z namenom ugotavljanja vpliva različnih smeri obremenjevanja (strižna, vertikalna, strižna in vertikalna) na obnašanje zemljine. Vzorci iz enozrnatega peska so bili pripravljene po metodi suhega nasipavanja in zbijanja, medtem ko je bila za pripravo vzorcev iz peščenega melja izbrana sedimentacijska metoda.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

<b>UDC:</b>	<b>642.131(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Barbara Likar</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>prof. dr. Bojan Majes</b>
<b>Cosupervisor:</b>	<b>dr. Stanislav Lenart</b>
<b>Title:</b>	<b>Stress-strain states in sandy materials</b>
<b>Notes:</b>	<b>93 p., 8 tab., 58 fig., 100 eq.</b>
<b>Key words:</b>	<b>Geotechnical, Soil Testing, Torsional Shear Test on Hollow Cylindrical Soil Specimens, dynamic shear modulus</b>

### **Abstract**

This thesis compares dynamic shear modulus of soil in different stress states obtained by tests in hollow cylinder apparatus. The first part of the thesis represents the theoretical background of cyclic torsional shear test on hollow cylindrical specimens in terms of stresses and strains which appear in hollow cylindrical specimens during testing. This part includes also conclusions of tests mentioned in the literature. The next part is a study of a procedure for preparation of sandy specimens and testing procedure according to the Japanese standards for determination of deformation properties of soil with hollow cylinder apparatus (JGS 0543-2000). After literature review in the first part of the thesis the experimental part follows in which cyclic torsional shear tests on hollow cylindrical specimens were done with the purpose to determine the impact of anisotropic consolidation on dynamic shear modulus of soil. Six tests were made in two different sandy materials with different initial effective circumferential stresses. All tests were in the first part deformation controlled like it is prescribed in the mentioned Japanese standard. The assumption of the impact of anisotropic consolidation on the shear stiffness of soil planned to be confirmed. The second part of the tests were stress controlled tests in few steps to see what is the impact of different direction (shear, axial, shear and axial) of loading up on the response of soil. The specimens of one-granular sand were prepared after dry deposition method, while samples of sandy silt were prepared after sedimentation method.

## **ZAHVALA**

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Bojanu Majesu in somentorju dr. Stanislavu Lenartu. Hvala tudi sodelavcem geomehanskega laboratorija Zavoda za gradbeništvo Slovenije za pomoč in ustvarjanje prijetnega vzdušja pri izvajanju preiskav.

Posebno zahvalo namenjam svoji družini, staršema in bratu Mateju, ki so mi omogočili študij in me spodbujali na tej poti. Hvala Mitju, ki se je trudil študijski dan narediti prijaznejši ter lepši.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Nameni in cilji naloge</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Začetne predpostavke</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>NAPETOSTI V TEMELJNIH TLEH</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Totalne napetosti</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>Efektivne napetosti</b>	<b>7</b>
<b>2.3</b>	<b>Porni tlaki</b>	<b>8</b>
<b>2.4</b>	<b>Glavne napetosti</b>	<b>9</b>
<b>2.5</b>	<b>Konsolidacija</b>	<b>10</b>
<b>2.6</b>	<b>Deformacije v temeljnih tleh</b>	<b>11</b>
<b>2.7</b>	<b><math>p</math>, <math>q</math> invariants napetostnega tenzorja in pripadajoči deformaciji</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>TORZIJSKA TRIOSNA PREISKAVA VOTLIH VZORCEV ZEMLJIN</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Razvoj torzijske triosne preiskave votlih vzorcev</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Opis torzijske triosne preiskave votlih vzorcev</b>	<b>20</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Osnovne značilnosti</b>	<b>20</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Izračuni napetosti, deformacij ter njihovih invariant</b>	<b>23</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Predstavitev rezultatov nekaterih opravljenih preiskav na torzijskem triosnem aparatu za votle vzorce</b>	<b>28</b>
<b>3.3</b>	<b>Torzijski triosni aparat na ZAG-u</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>PRIPRAVA VZORCEV</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Metoda vlažnega nasipavanja in zbivanja peska</b>	<b>35</b>
<b>4.2</b>	<b>Metoda suhega nasipavanja in zbivanja peska</b>	<b>37</b>
<b>4.3</b>	<b>Sedimentacijska metoda</b>	<b>39</b>
<b>4.4</b>	<b>Izdelovanje votlih vzorcev in pridobljene izkušnje</b>	<b>40</b>
<b>4.5</b>	<b>Doseganje enakomerne zgoščenosti vzorcev</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>EKSPERIMENTALNO DELO</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Vrste preiskav</b>	<b>48</b>

<b>5.2</b>	<b>Osnovne lastnosti preiskovanega materiala</b>	<b>50</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Enozrnat pesek</b>	<b>50</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Peščen melj</b>	<b>51</b>
<b>5.3</b>	<b>Opis metode za deformacijsko in napetostno vodene torzijske triosne preiskave zasičenih votlih vzorcev</b>	<b>53</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Zahtevane lastnosti aparata</b>	<b>53</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Preplavljanje vzorca, b-parameter ter postopek zasičevanja</b>	<b>54</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Konsolidacija</b>	<b>56</b>
<b>5.4</b>	<b>Deformacijsko vodene torzijske triosne preiskave zasičenih vzorcev</b>	<b>57</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Postopek obremenjevanja</b>	<b>57</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Obdelava rezultatov in poročilo preiskave</b>	<b>59</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Rezultati</b>	<b>65</b>
<b>5.4.4</b>	<b>Vpliv anizotropne konsolidacije na strižno togost zemljin</b>	<b>70</b>
<b>5.5</b>	<b>Napetostno vodene torzijske triosne preiskave zasičenih vzorcev</b>	<b>74</b>
<b>5.5.1</b>	<b>Opis metode</b>	<b>74</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Obremenjevanje v strižni smeri</b>	<b>76</b>
<b>5.5.3</b>	<b>Obremenjevanje v vertikalni smeri</b>	<b>79</b>
<b>5.5.4</b>	<b>Obremenjevanje v strižni in vertikalni smeri</b>	<b>82</b>
<b>5.5.4.1</b>	<b>Fazno obremenjevanje</b>	<b>82</b>
<b>5.5.4.2</b>	<b>Izvenfazno obremenjevanje</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>91</b>
	<b>VIRI</b>	<b>92</b>
	<b>PRILOGE</b>	



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 5.1: Lastnosti enozrnatega peska	50
Preglednica 5.2: Lastnosti peščenega melja	52
Preglednica 5.3: Potrebni zasuki za izbrane strižne deformacije	59
Preglednica 5.4: Lastnosti vzorcev pred preiskovanjem	66
Preglednica 5.5: Lastnosti vzorcev pred napetostnim obremenjevanjem v strižni smeri	77
Preglednica 5.6: Lastnosti vzorcev pred napetostnim obremenjevanjem v vertikalni smeri	79
Preglednica 5.7: Lastnosti vzorcev pred napetostnim obremenjevanjem v dveh smereh	82
Preglednica 5.8: Lastnosti vzorcev pred napetostnim obremenjevanjem v dveh smereh pri spreminjanju faznega kota	85

## KAZALO SLIK

Slika 2.1: Diagram vertikalnih napetosti	6
Slika 2.2: Diagram horizontalnih napetosti	6
Slika 2.3: Diagram vertikalnih efektivnih in totalnih napetosti	8
Slika 2.4: Diagram horizontalnih efektivnih in totalnih napetosti	8
Slika 3.1: Prikaz možnosti izvajanja cikličnih torzijskih triosnih preiskav polnih vzorcev	18
Slika 3.2: Vzorec za torzijske triosne preiskave votlih vzorcev (Buchheister, 2007, str. 5)	19
Slika 3.3: Prvi vzorec (a) in popolno votel vzorec (b) za torzijske triosne preiskave votlih vzorcev (Das, 1993, str. 116 in Buchheister, 2007, str. 5)	21
Slika 3.4: Enostavni torzijski triosni aparat za votle vzorce (Ishihara, 1996, str. 45)	21
Slika 3.5: Prikaz napetosti v horizontalni ravnini vzorca (Das, 1993, str. 117)	22
Slika 3.6: Komponente napetosti na elementu votlega vzorca (Buchheister, 2007, str. 5)	23
Slika 3.7: Prikaz delovanja obremenitev na votel vzorec (Nishimura, 2005, str. 90)	24
Slika 3.8: Glavne napetosti na elementu votlega vzorca (Buchheister, 2007, str. 5)	26
Slika 3.9: Prikaz možnosti izvajanja cikličnih torzijskih triosnih preiskav votlih vzorcev	28
Slika 3.10: Torzijski triosni aparat za votle vzorce na ZAG-u	30
Slika 3.11: Volumski kontrolniki pritiska (VPC-ji)	31
Slika 3.12: Primer sestavljenega vzorca	32
Slika 3.13: Notranji inkrementni merilnik zasukov	32
Slika 4.1: Metoda vlažnega nasipavanja peska (Ishihara, 1996, str. 338)	37
Slika 4.2: Metoda suhega nasipavanja peska (Ishihara, 1996, str. 338)	38
Slika 4.3: Sedimentacijska metoda (Ishihara, 1996, str. 338)	40
Slika 4.4: Sestavljanje peščenega votlega vzorca po metodi suhega nasipavanja	41
Slika 4.5: Primer votlega vzorca po preiskavi	42
Slika 4.6: Diagram spreminjanja procenta zgoščenosti po slojih (Ladd, 1978, str. 17)	43
Slika 4.7: Diagram indeksa ciklične trdnosti v odvisnosti od procenta zgoščenosti prvega sloja (Ladd, 1978, str. 19)	45
Slika 4.8: Diagram normirane deformacije v odvisnosti od normiranega števila ciklov (Ladd, 1978, str. 21)	46
Slika 5.1: Sejalna krivulja enozrnatega peska	51
Slika 5.2: Mikroskopska slika zrn enozrnatega peska	51

Slika 5.3: Sejalna krivulja peščenega melja	52
Slika 5.4: Mikroskopska slika zrn peščenega melja	53
Slika 5.5: Tipični torzijski triosni aparat za votle vzorce (JGS 0543-2000, str. 74)	54
Slika 5.6: Diagram ene od stopenj zasičevanja	56
Slika 5.7: Diagram konsolidacije	57
Slika 5.8: Sinusna funkcija obremenjevanja preko strižne deformacije (a) in sinusni odziv izmerjene strižne napetosti (b) (JGS 0543-2000, str. 77)	58
Slika 5.9: Prikaz pozitivne in negativna amplitude torzije (JGS 0543-2000, str. 75)	61
Slika 5.10: Histerezna zanka enega cikla obremenitve (JGS 0543-2000, str. 79)	62
Slika 5.11: Poročilo o dinamični torzijski triosni preiskavi votlega vzorca	64
Slika 5.12: Spreminjanje pornega tlaka med obremenjevanjem s kotom zasuka $0,012^\circ$ (a) in $0,896^\circ$ (b)	67
Slika 5.13: Diagram spreminjanja kota zasuka (a) in torzije (b) pri dveh različnih stopnjah	68
Slika 5.14: Histerezne zanke zadnje stopnje obremenjevanja	69
Slika 5.16: Primerjava dinamičnega strižnega modula v drugem, petem in desetem ciklu obremenitve	70
Slika 5.17: Primerjava strižnih modulov normiranih s funkcijo količnika por pri enozrnatem pesku	71
Slika 5.18: Primerjava strižnih modulov normiranih s funkcijo količnika por pri peščenem melju	72
Slika 5.19: Histerezne zanke tekom celotne preiskave	73
Slika 5.20: Spreminjanja zasuka (a) in torzije (b) v zadnji stopnji obremenjevanja	74
Slika 5.21: Spreminjanje strižne napetosti (a) in strižne deformacije (b)	77
Slika 5.22: Histerezne zanke pri strižnem napetostnem obremenjevanju	78
Slika 5.23: Spreminjanje pornega tlaka s časom (a) in strižno deformacijo (b) pri strižnem obremenjevanju	79
Slika 5.24: Spreminjanje vertikalne napetosti (a) in vertikalne deformacije (b)	80
Slika 5.25: Spreminjanje pornega tlaka pri vertikalnem napetostnem obremenjevanju	81
Slika 5.26: Histerezne zanke pri vertikalnem napetostnem obremenjevanju	81
Slika 5.27: Spreminjanje napetosti (a) in deformacije (b) pri obremenjevanju v strižni in vertikalni smeri	83
Slika 5.28: Oblika histerezne zanke pri obremenjevanju v strižni in vertikalni smeri	84

Slika 5.29: Spreminjanje pornega tlaka pri obremenjevanju v strižni in vertikalni smeri	84
Slika 5.30: Primerjava spreminjanja vertikalne in strižne napetosti: $\varphi=90^\circ$ (a) in $\varphi=45^\circ$ (b)	86
Slika 5.31: Primerjava spreminjanja vertikalne in strižne deformacije: $\varphi=90^\circ$ (a) in $\varphi=45^\circ$ (b)	87
Slika 5.32: Spreminjanje pornega tlaka pri različnih pornih tlakih: $\varphi=90^\circ$ (a) in $\varphi=45^\circ$ (b)	87
Slika 5.33: Histerezna zanka pri dvosmernem obremenjevanju in $\varphi=90^\circ$	88
Slika 5.34: Histerezna zanka pri dvosmernem obremenjevanju in $\varphi=45^\circ$	89



## 1 UVOD

Stik z naravo, uživanje njenih lepot in občudovanje njene moči ter istočasno skladnosti, uravnoteženosti me je že od ranega otroštva navdajalo z neizmerno željo po odkrivanju novega. Ob izletih, ko strmim v človeško znanje in željo po izjemnih dosežkih – gradnji stavb izjemnih dimenzij, premagovanje velikih razponov z mostovi, gradnjo predorov v nemogočih razmerah, se nenehno sprašujem, kaj na to poreče narava. Kljub upoštevanju zakonov fizike, temelječih na naravnih pojavih, vsi ti človeški dosežki izgubijo svoj sijaj v boju z naravo. Potres, poplava ali plaz... in marsikateri človeški dosežek izgine v pozabo. Želja po študiju gradbeništva, vseh teh naravnih zakonov prenesenih v ustvarjanje okolja, predvsem pa želja po čim boljšem poznavanju dogajanja v izhodišču gradnje me je pripeljala do izdelave tega diplomskega dela.

Vsak dogodek, ki se zgodi v naravi, je posledica neke spremembe. Vsak objekt je potrebno postaviti na trdne temelje, da lahko prenese večino neprijetnih naravnih dogodkov. Temelji pa so lahko trdni le, če poznamo, kako se bo zemljina, v kateri bodo zgrajeni, obnašala. Kakšno obtežbo je ta zemljina sposobna prenesti, kako se bo odzvala na dinamično obremenitev, na kakšen način bo vpliva podtalna voda... Na večino teh vprašanj je mogoče odgovoriti s preiskavami zemljine, ki morajo biti smiselne, da dobimo želene odgovore. Največkrat zemljine preiskujemo v smislu njihove tlačne trdnosti, določanja strižnega kota, nedrenirane strižne trdnosti ter prostorninske teže (naravne in suhe), naravne vlažnosti, specifične teže zrn ter same sestave (določitev leznih mej pri glinah in meljih oziroma sejalne krivulje za peske). Vse bolj se pojavlja potreba po novih preiskavah, predvsem v smislu nadgradnje navadnih triosnih preiskav za določitev strižne trdnosti zemljin, za potrebe dinamičnih lastnosti zemljin. Obnašanje zemljin med potresom ali pa pod stalnimi tresljaji v smislu zemljin pod železniškimi tiri je namreč še vedno velika uganka. Marsikaj je bilo na tem področju že odkritega z enostavno nadgradnjo navadnega triosnega aparata z omogočenim osnim dinamičnim obremenjevanjem. V zadnjih letih pa se uveljavlja torzijski triosni aparat za preiskovanje votlih vzorcev, ki omogoča istočasno dinamično obremenjevanje v vertikalni in strižni smeri. Prednost tega aparata je tudi možnost vzpostavitve osno-nesimetričnih napetostnih stanj in rotacije glavnih napetosti v vzorcu.

Nadgradnja pridobljenega znanja s področja zemljin tekom študija in možnosti, ki jih odpira omenjen aparat, sta postala glavno vodilo izdelave tega dela.

## 1.1 Nameni in cilji naloge

Poznavanje triosnih preiskav na podlagi znanja, pridobljenega med študijem, je predstavljalo osnovo za izdelavo ogrodja te naloge. Osnovni namen je tako predstavljal spoznavanje torzijskih triosnih preiskav, njihovih posebnosti in različne možnosti izvajanja le-teh, s katerimi je možno ugotavljati napetostno-deformacijska stanja v peskih. Spoznavanje omenjenih preiskav ne vsebuje zgolj poglobljanja teoretičnega znanja, temveč tudi uporabo pridobljenega znanja s praktičnim izvajanjem preiskav, ki bo pripeljalo do želenih zaključkov. Ob osnovnem spoznavanju zastavljene naloge se je izkazalo, da je področje široko in odpira številne možnosti tako izvajanja preiskav, kot tudi načrtovanja le-teh za želene rezultate. V ta namen sem si preko manjših ciljev zastavila pot dela, ki je pripeljala do ustreznih zaključkov in glavnega cilja – izdelave diplomskega dela.

Najprej je bilo potrebno obnoviti že pridobljeno znanje o napetostih in deformacijah v temeljnih tleh, njihovih pretvorbah v različne koordinatne sisteme, predvsem v smeri glavnih napetosti in deformacij ter omenjeno nadgraditi z novo invarianto napetosti ter pripadajočimi deformacijami, ki se uporabljajo predvsem v geomehaniki za prikaz rezultatov dvosmernega obremenjevanja. Sledil je podrobnejši študij torzijskih triosnih preiskav votlih vzorcev, ki je služil za načrtovanje praktičnega dela. Na tem mestu se je izoblikovala tudi začetna predpostavka, ki je predstavljala rdečo nit celotnemu izvajanju preiskav. Natančnejša predstavitev le-te bo sledila v naslednjem poglavju. Z zaključkom teoretičnega dela naloge se je pravo raziskovanje pravzaprav šele začelo. Za vsako korektno opravljeno preiskavo je potrebno imeti ustrezen vzorec. Pri umetno pridobljenih materialih (beton, opeka, jeklo...) so vzorci narejeni sočasno z izdelavo materiala. Zemljina pa je naraven material, ki je ni mogoče umetno pridobiti, zato se preiskuje vzorce odvzete v naravi, pravimo jim intaktni vzorci. Žal pa peskov večinoma ni mogoče preiskovati na intaktnih vzorcih, saj zrna peska med seboj

niso povezana. Tako je izdelava primerne vzorca za preiskovanje peskov zahtevno delo. Sprva je bilo posvečenega kar nekaj časa študiju različnih metod, kasneje pa ravno toliko pripravi samih vzorcev. Pred izvajanjem preiskav je sledil še študij standardov za preiskovanje zemljin v torzijskih triosnih aparatih za votle vzorce, ki natanko predpisujejo potek samih preiskav. Rezultati dobljenih preiskav pa nimajo nobenega smisla, če jih kritično ne presodimo. Tako je bil zadnji cilj, ki predstavlja tudi zaključek naloge, bolj kreativen v smislu komentiranja dobljenih rezultatov ter primerjave z zaključki, dobljenimi pri študiju literature.

## 1.2 Začetne predpostavke

Že prej omenjen načrt preiskav je bil narejen tako, da so se preiskave vodile z željo po potrditvi začetne predpostavke. Ob študiju torzijskih triosnih preiskav na votlih vzorcih in spoznavanju z možnostmi, ki jih ponuja uporabljen aparat, se je izoblikovala začetna predpostavka o vplivu anizotropne konsolidacije na strižno togost zemljin. V literaturi je bilo zaslediti že nekaj opravljenih preiskav na to temo, vendar pa so bile vse opravljene v direktnem strižnem aparatu. Na podlagi študija literature sem izoblikovala tezo, da je strižna togost zemljin odvisna od anizotropne konsolidacije in se manjša z manjšanjem obročne napetosti v vzorcu, ki v naravi predstavlja napetost v horizontalni smeri. Tako je bil načrt preiskav sestavljen na podlagi spreminjanja velikosti obročne napetosti, ki je posledica različnih vzpostavljenih začetnih napetostnih stanj v vzorcih. Predhodna utemeljitev resničnosti začetne predpostavke temelji na dejstvu, da so z manjšanjem vrednosti obročne napetosti zrna peska v vzorcu manj povezana, torej je vzorec fiktivno bolj rahel, kar posledično pomeni, da je sposoben prevzeti manjše obremenitve in je njegova trdnost manjša.

Poleg glavne začetne predpostavke je bila želja tudi ugotoviti vpliv dvosmernega obremenjevanja na obliko histereznih zank. Tako je bilo nekaj preiskav opravljenih v ta namen. Predhodno razmišljanje je sledilo ugotovitvam, da ima dvosmerno obremenjevanje vsekakor vpliv na obliko histereznih zank, ki se bo zagotovo razlikovala od oblike histereznih zank enosmernega obremenjevanja. V kolikšni meri bo razlika opazna, pa si nisem znala



predstavljati. Prav tako sem želela ugotoviti, kako se na histereznih zankah pozna vpliv faznega in izvenfaznega obremenjevanja.

Z zastavljenimi cilji naloge, začetnimi predpostavkami in željo po odkrivanju nečesa novega sem se lotila izpolnjevanja zastavljene naloge. Rezultati dobljeni ob doseganju ciljev in presenetljivi zaključki pa so vsebina diplomske naloge.

## 2 NAPETOSTI V TEMELJNIH TLEH

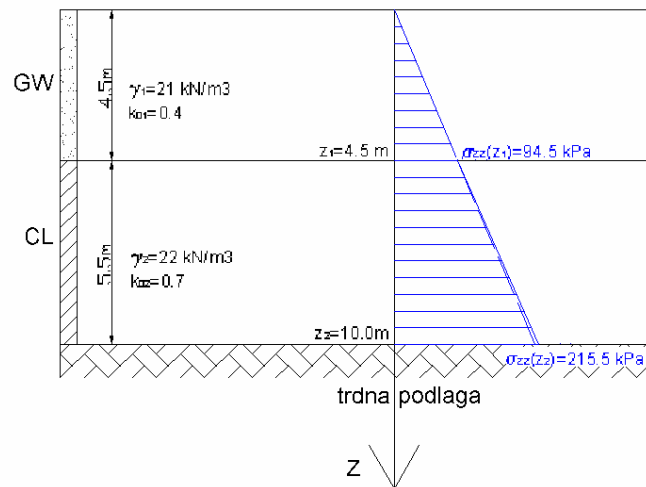
Zaradi lastne teže tal se v temeljnih tleh pojavljajo napetosti. Le-te so odvisne od prostorninske teže same zemljine in se z globino linearno spreminjajo. Temeljna tla obravnavamo kot polprostor, v katerem je zaradi lastne teže tal prisotno osno-simetrično napetostno stanje. V splošnem pri zemljinah ločimo napetosti glede na smer delovanja – vertikalne, horizontalne in strižne; glede na izvor – totalne, efektivne napetosti ter porni tlaki; iz zakonov mehanike pa so povzete glavne napetosti s pripadajočimi ravninami ter napetostne invariante.

Poznavanje napetostnega stanja v temeljnih tleh in njegovih sprememb zaradi delovanja dodatnih obtežb na površini temeljnih tal je pomembno, da lahko presodimo, ali je to še manjše od mejnih napetostnih stanj. Mejna napetostna stanja so tista, pri katerih pride v temeljnih tleh do brezkrajnega naraščanja deformacij – pomiki se večajo proti neskončnim vrednostim, saj pride do porušitve temeljnih tal in posledično gradbenega objekta na njih.

Vertikalne napetosti z globino linearno naraščajo in na mejnicah med sloji nimajo preskokov. Diagram vertikalnih napetosti je zvezen (Slika 2.1). Horizontalne napetosti so odvisne od vertikalnih napetosti ter od faktorja  $K_0$ , ki predstavlja mirni zemeljski pritisk. Le-ta je odvisen od mehanskih lastnosti posameznega sloja temeljnih tal, točneje od njegovega strižnega kota  $\varphi$  (2-1) oziroma Poissonovega količnika ( $\nu$ ) (2-2). Vse enačbe navedene v tem poglavju so povzete iz predavanj pri predmetu Mehanika tal.

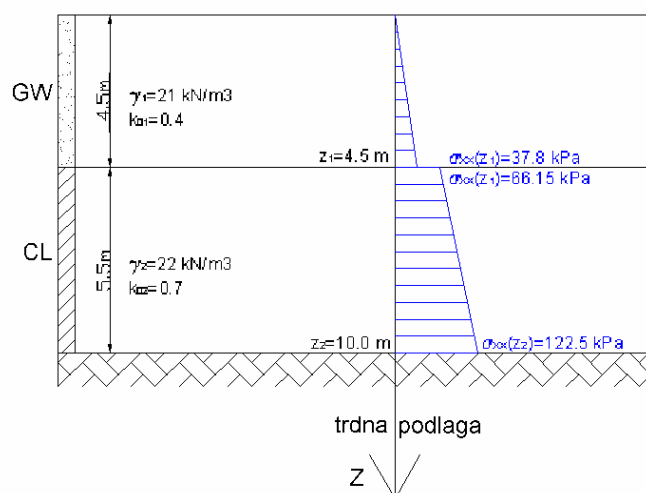
$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad (2-1)$$

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (2-2)$$



Slika 2.1: Diagram vertikalnih napetosti

Zato horizontalne napetosti z globino v posameznem sloju linearno naraščajo, na mejnicah med sloji pa so prisotni preskoki v horizontalnih napetostih in diagram horizontalnih napetosti je posledično nezvezen – žagast (Slika 2.2). Zaradi osno-simetričnega napetostnega stanja v temeljnih tleh strižne napetosti kot posledica lastne teže tal niso prisotne. V primeru delovanja obtežbe na vrhu temeljnih tal se spremenijo tako vertikalne kot horizontalne napetosti v temeljnih tleh, dodatno se pojavijo še strižne napetosti. Velikost spremembe in vplivno območje zaradi delovanja obtežbe na vrhu temeljnih tal sta odvisna od vrste obtežbe (točkovna, linijska, pasovna, ploskovna), njene oblike (krožna, kvadratna, pravokotna) in njene velikosti.



Slika 2.2: Diagram horizontalnih napetosti

## 2.1 Totalne napetosti

Najosnovnejše napetosti, ki so prisotne v temeljnih tleh zaradi lastne teže zemljin, so totalne napetosti. Le-te z globino linearno naraščajo in ne glede na slojevitost temeljnih tal je diagram totalnih vertikalnih napetosti zvezen, spreminja se le naklon premice glede na lastno prostorninsko težo posameznega sloja. Velikost totalnih vertikalnih napetosti je odvisna od prostorninske teže zemljine ( $\gamma$ ) ter od globine ( $z$ ), kjer opazujemo napetostno stanje (2-3).

$$\sigma_{zz}(z_2) = \sigma_{zz}(z_1) + \int_{z=z_1}^{z_2} \gamma(z) dz \quad (2-3)$$

## 2.2 Efektivne napetosti

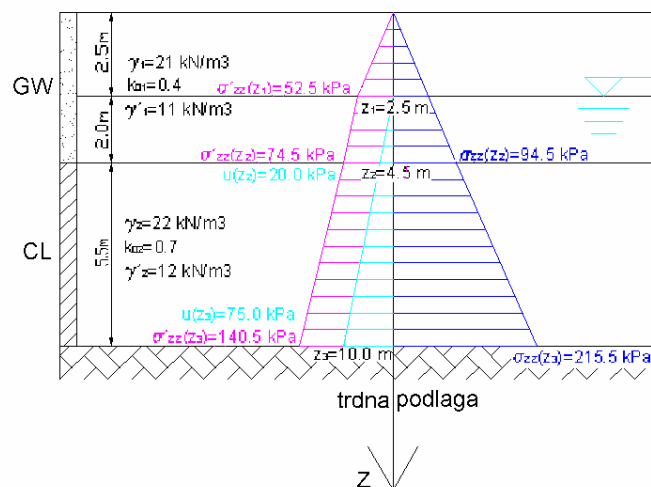
Efektivne napetosti, ki se pojavljajo v temeljnih tleh, se razlikujejo od totalnih napetosti glede na vodni pritisk. Kjer v temeljnih tleh ni prisotna voda, so vertikalne efektivne napetosti enake totalnim. V primeru prisotnosti talne vode v temeljnih tleh, pa so vertikalne efektivne napetosti enake vertikalnim totalnim napetostim zmanjšanim za vodni pritisk oz. porne tlake ( $u$ ), kot je poimenovan vodni pritisk v geomehaniki. Efektivne napetosti so torej napetosti, ki delujejo med zrnji zemljine in jih zato lahko imenujemo tudi medzrnski tlaki. Vertikalne efektivne napetosti so torej odvisne od efektivnih prostorninskih tež zemljin ( $\gamma'$ ) ter globine ( $z$ ), na kateri napetostno stanje opazujemo (2-5). Efektivne prostorninske teže zemljin so prostorninske teže zemljin zmanjšane za prostorninsko težo vode ( $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ ) (2-4).

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w \quad (2-4)$$

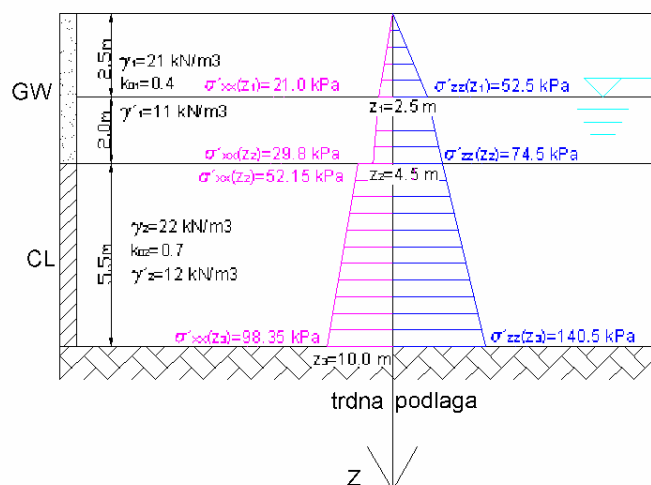
$$\sigma'_{zz}(z_2) = \sigma'_{zz}(z_1) + \int_{z=z_1}^{z_2} (\gamma(z) - \gamma_w) dz = \sigma_{zz}(z_2) - u(z_2) \quad (2-5)$$

S pomočjo vertikalni efektivnih napetosti ter količnika mirnega zemeljskega pritiska je moč določiti horizontalne efektivne napetosti na opazovani globini po enačbi (2-6).

$$\sigma'_{xx}(z) = \sigma'_{yy}(z) = \sigma'_{zz}(z) * K_0 \quad (2-6)$$



Slika 2.3: Diagram vertikalnih efektivnih in totalnih napetosti



Slika 2.4: Diagram horizontalnih efektivnih in totalnih napetosti

### 2.3 Porni tlaki

Porni tlaki (tlaki v prazninah) so napetosti v temeljnih tleh zaradi prisotnosti vode. Odvisni so od prostorninske teže vode ( $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ ) ter globine vode ( $z_w$ ), kjer napetostno stanje opazujemo (2-7). Velikost pornih tlakov je v horizontalni in vertikalni smeri enaka, saj voda deluje na vse strani z enakim pritiskom.

$$u(z_w) = u_{zz}(z_w) = u_{xx}(z_w) = u_{yy}(z_w) = u(z_{w1}) + \int_{z_w=z_{w1}}^{z_w2} \gamma_w dz \quad (2-7)$$

## 2.4 Glavne napetosti

Iz mehanike je znano, da lahko napetosti računamo v različnih koordinatnih sistemih. Najbolj splošen je račun napetosti v Kartezijevem koordinatnem sistemu, ki je bil predstavljen zgoraj. Za jasnejšo razlago obnašanja zemljin pod delovanjem dodatne obtežbe pa predstavljamo napetostno stanje z vrednostmi in smermi glavnih napetosti  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  in  $\sigma_3$ . Napetostno stanje lahko predstavimo tudi z oktaederskimi vrednostmi napetosti.

Glavne napetosti izračunamo iz lastne enačbe napetostnega tenzorja v Kartezijem koordinatnem sistemu s pomočjo invariant napetostnega tenzorja.

$$\begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} - \sigma & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad (2-8)$$

$$-\sigma^3 + I_1\sigma^2 - I_2\sigma + I_3 = 0 \quad (2-9)$$

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (2-10)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{vmatrix} \quad (2-11)$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yx} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} \quad (2-12)$$

V zgornjih enačbah so s črko  $I$  označene invariante tenzorja napetosti. Na podlagi poznavanja vrednosti komponent napetosti v Kartezijevem koordinatnem sistemu izračunamo napetostne invariante. S pomočjo teh pa rešimo lastno enačbo napetostnega tenzorja. Razvidno je, da je ta polinom tretje stopnje. Torej so rešitve lastne enačbe tri, ki jih razvrstimo po velikosti, tako da velja  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .

S pomočjo glavnih napetosti lahko izračunamo tudi oktaederske vrednosti napetosti. Poznamo normalno oktaedersko napetost  $\sigma^o$  ter tangencialno oz. strižno  $\tau^o$ , ki delujeta v ravnini, katere normala oklepa enak kot z osmi koordinatnega sistema, ki ga določajo smeri glavnih napetosti  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  in  $\sigma_3$ . Oktaederski napetosti tako izračunamo po sledečih enačbah.

$$\sigma^o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2-13)$$

$$\tau^o = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2-14)$$

Izračun je mogoč tudi na podlagi vrednosti napetosti v Kartezijevem koordinatnem sistemu.

$$\sigma^o = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} \quad (2-15)$$

$$\tau^o = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} \quad (2-16)$$

## 2.5 Konsolidacija

Eden najpomembnejših procesov, ki vplivajo na spreminjanje napetostnega stanja v temeljnih tleh, je pojav konsolidacije ali zgostitve. V splošnem ga lahko razložimo kot izcejanje vode ali iztiskanje zraka iz por na površje temeljnih tal. Zemljina je namreč kompozitni material, sestavljen iz zrnja in praznin – por zapoljenih z zrakom ali vodo. Posledično pa konsolidacija pomeni spreminjanje velikosti pornih tlakov v temeljnih tleh, če se le-ta obteži z dodatno obtežbo, oz. prenos napetosti zaradi dodatne obtežbe iz pornih tlakov na efektivne napetosti. Konsolidacija je napetostno in časovno odvisen pojav. Diplomsko delo podrobneje obravnava le napetostno komponento konsolidacije.

Hitrost procesa konsolidacije je odvisna od vrste zemljin. Na hitrost konsolidacije najbolj vpliva vodoprepustnost zemljine.

V nadaljevanju je poenostavljeno opisan proces konsolidacije. V temeljnih tleh se zaradi dodatne obtežbe spremeni napetostno stanje. Med samim procesom konsolidacije so totalne napetosti enake prvotnim napetostim zaradi lastne teže tal povečanih za napetosti zaradi

dodatne obtežbe na površju temeljnih tal, spreminja pa se razmerje med efektivnimi napetostmi in pornimi tlaki. Takoj po nanosu obtežbe se dodatne napetosti v temeljnih tleh zaradi obtežbe prenesejo na porne tlake. S procesom konsolidacije (iztekanjem vode iz zemljine) pa se dodatne napetosti v temeljnih tleh prenašajo na efektivne napetosti; porni tlaki se torej zmanjšujejo, efektivne napetosti pa povečujejo. Po končani konsolidaciji so porni tlaki enaki tistim pred začetkom konsolidacije, efektivne napetosti pa so enake začetnim efektivnim napetostim, povečanim za dodatne napetosti zaradi obtežbe.

Iz spodnjih enačb (2-17) in (2-18) je razvidno, da moramo poznati dve količini, če želimo izračunati tretjo. Pri zemljinah vedno poznamo totalne napetosti, zato lahko pri znani spremembi totalnih napetosti v vsakem času izračunamo spremembo pornih tlakov s pomočjo difuzne enačbe. Sedaj poznamo dve količini in lahko izračunamo efektivne napetosti kot razliko totalnih napetosti in pornih tlakov.

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij}u \quad (2-17)$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \Delta\sigma'_{ij} + \delta_{ij}\Delta u \quad (2-18)$$

Posledica procesa konsolidacije temeljnih tal so deformacije temeljnih tal. Te se izvršijo zaradi spremenjenega napetostnega stanja v temeljnih tleh in posledičnega zmanjševanja praznin med zrnjem. Ker je proces konsolidacije časovno odvisen pojav, se tudi deformacije ne izvršijo hipno (kljub hipni obremenitvi), temveč je za to potreben čas.

## 2.6 Deformacije v temeljnih tleh

Deformacije temeljnih tal v polprostoru se pojavijo zaradi obtežbe na temeljnih tleh. Deformacije temeljnih tal v polprostoru zaradi lastne teže so se že izvršile in jih zato pri računu ne upoštevamo. Za izračun deformacij temeljnih tal v polprostoru je potrebno poznati prvotno in novo napetostno stanje, saj sta od tega odvisna deformacijska parametra zemljin: Poissonovo število  $\nu$  ter elastični modul zemljin  $E$ .



Deformacije temeljnih tal v polprostoru računamo na različne načine, glede na vrsto in obliko obtežbe na temeljnih tleh (gibka ali toga obtežba; točkovna, linijska, brezkrajna pasovna, pravokotna tlorisna oblika, krožna tlorisna oblika in trikotna tlorisna oblika). Vsem računom je skupno, da temeljijo na osnovnih enačbah elastičnosti, poznanih iz mehanike trdnih teles, ki povezujejo napetosti in deformacije s pomočjo deformacijskih parametrov. Te enačbe so različni avtorji rešili za posamezne vrste obtežb, rešitve je potrebno še ustrezno integrirati in uporabiti ustrezne podatke (robne pogoje, geometrijo obtežbe...).

Posedke površja temeljnih tal lahko izračunamo na dva načina, s pomočjo modula stisljivosti ter po teoriji elastičnosti.

V primeru, da so za temeljna tla opravljene edometrijske preiskave, lahko posedek temeljnih tal izračunamo kot vsoto skrčkov posameznih slojev. Skrčke pa izračunamo tako, da ploščino diagrama dodatnih totalnih vertikalnih napetosti posameznega sloja ( $n$  predstavlja število slojev) delimo s povprečno vrednostjo modula stisljivosti (2-19).

$$\rho_{\infty i} = \frac{A_{\infty i}}{E_{oed,i}} \quad (2-19)$$

$$\rho_0 = \sum_{i=1}^n \rho_{\infty i} \quad (2-20)$$

Na ta način so izračunani posedki nekoliko drugačni od tistih, ki se bodo izvršili v naravi, saj ni upoštevanih bočnih deformacij (vzorec je oklenjen). Razlike bodo tem večje, čim bolj bodo temeljna tla deformabilna.

Natančneje pa izračunamo premike temeljnih tal po teoriji elastičnosti. Po tej metodi računamo skrček sloja kot razliko vertikalnih premikov vrha in dna  $i$ -tega sloja (2-21) in (2-22).

$$\rho_i = u_z(z_{\min}) - u_z(z_{\max}) \quad (2-21)$$

$$\rho_0 = \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (2-22)$$

Kot je že opisano, lahko računamo premike temeljnih tal v polprostoru, če poznamo elastični modul ( $E$ ) ter Poissonovo število ( $\nu$ ) zemljine. Tako kot modul stisljivosti ( $E_{\text{oed}}$ ) sta tudi ta dva parametra odvisna od spremembe efektivnih napetostnih stanj v naravi. Ta dva parametra ugotavljamo s triosnimi tlačnimi preiskavami valjastih ali prizmatičnih vzorcev zemljin. Direktna rezultata teh preiskav sta kompresijski ( $K$ ) in strižni modul ( $G$ ), ki jih preko poznanih zvez (2-23) in (2-24) prevedemo na želena deformacijska parametra: elastični modul ( $E$ ) ter Poissonovo število ( $\nu$ ).

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (2-23)$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \quad (2-24)$$

Posedek temeljnih tal je matematično gledano vektorska količina, zato ga lahko razdelimo na sferni in distorzijski del (2-25).

$$\rho_i = \rho_i^o - \rho_i^d \quad (2-25)$$

Na ta način lahko določimo, kdaj in kolikšen del deformacije oz. posedka se bo zgodil. Sprva se zgodi del posedka pri nespremenjeni prostornini temeljnih tal. Imenujemo ga distorzijski posedek in se pretežno izvrši na začetku konsolidacije temeljnih tal. Sferni del posedka pa se izvrši na račun zmanjšanja (spremembe) prostornine temeljnih tal med samo konsolidacijo in ga zato imenujemo tudi konsolidacijski posedek. Kot smo že omenili, deformacijske parametre ( $E$  in  $\nu$  oz.  $K$  in  $G$ ) določamo s triosnimi preiskavami. Poznamo dve vrsti teh preiskav: nekonsolidirano nedrenirano triosno preiskavo ter konsolidirano drenirano triosno preiskavo. Obe vrsti preiskav na valjastih vzorcih se izvajata v osno-simetričnih pogojih ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3$ ), ki omogočajo raziskovanje odnosa med napetostmi in deformacijami (2-26), (2-27) in (2-28).

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (2-26)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_1}{2} \quad (2-27)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (2-28)$$

Izvednotenje kompresijskega in strižnega modula iz triosnih preiskav dobimo s pomočjo spodaj navedenih enačb.

$$K = \frac{\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3}{3\Delta\varepsilon_V} \quad (2-29)$$

$$G = \frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3}{3\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_V} \quad (2-30)$$

Za nedrenirano triosno preiskavo velja, da so preprečene volumske spremembe vzorca zemljine. Torej je  $\varepsilon_V = 0$  in zato iz takih preiskav dobimo distorzijske (nedrenirane) deformacijske parametre (2-31), (2-32), (2-33) in (2-34).

$$K_u = K^d = \infty \quad (2-31)$$

$$G_u = G^d = \frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3}{3\Delta\varepsilon_1} \quad (2-32)$$

$$E_u = E^d = 3G_u \quad (2-33)$$

$$\nu_u = \nu^d = 0,5 \quad (2-34)$$

S pomočjo nedreniranih deformacijskih parametrov dobimo začetne oz. distorzijske skrčke in posledično posedke temeljnih tal ( $\rho_0^d$ ).

Potrebno je izračunati še skrčke, posedke temeljnih tal (iz vertikalnih pomikov) po teoriji elastičnosti z deformacijskimi parametri, ki jih dobimo iz drenirane (konsolidirane) triosne preiskave. Na ta način dobimo celoten posedek površja temeljnih tal ( $\rho_0$ ). Konsolidacijski posedek ( $\rho_0^o$ ) izračunamo kot razliko med končnim posedkom ter distorzijskim posedkom površja temeljnih tal (2-35).

$$\rho_0^o = \rho_0 - \rho_0^d \quad (2-35)$$

Za časovni razvoj distorzijskega in konsolidacijskega posedka velja, da se prvi, to je distorzijski posedek površja temeljnih tal, izvrši relativno hitro po obremenitvi tal, ponavadi že med samo gradnjo. Konsolidacijski posedek površja temeljnih tal pa se razvija počasi in

narašča od ničnih do končnih vrednosti, glede na časovno razvijanje konsolidacije temeljnih tal (2-36).

$$\rho_0^o(t) = \rho_0^o \cdot U_v \quad (2-36)$$

## 2.7 $p, q$ invarianta napetostnega tenzorja in pripadajoči deformaciji

V poglavju o glavnih napetostih je omenjena tudi možnost izračuna napetostnih invariant. Kot ena od možnosti je prikazan izračun napetosti v oktaederskem prostoru. V geomehaniki se veliko bolj uporablja tako imenovana  $p, q$  invarianta, ki prostorsko napetostno stanje prevede v ravninsko napetostno stanje. Ti dve napetosti sta primerni za predstavitev napetostne poti v pravokotnem koordinatnem sistemu ter lažje razumevanje napetostnega problema. V splošnem predstavlja napetost  $p$  povprečno vrednost glavnih napetosti, medtem ko predstavlja napetost  $q$  razliko glavnih napetosti (2-37) in (2-38).

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2-37)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2-38)$$

Enačbi sta izpeljani za totalne napetosti. V primeru, da potrebujemo efektivne napetosti, pa veljata spodnji zvezi.

$$p' = p - u \quad (2-39)$$

$$q' = q \quad (2-40)$$

Za triosne preiskave je značilno osno-simetrično napetostno stanje, kar pomeni, da se zgornji enačbi nekoliko poenostavita, saj je  $\sigma_2 = \sigma_3$ .

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (2-41)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2-42)$$

Če primerjamo napetostni invarianti v oktaederskem prostoru ter invarianti  $p$  in  $q$ , ugotovimo, da med njimi obstaja navedena zveza.

$$p = \sigma_{oct} \quad (2-43)$$

$$q = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{oct} \quad (2-44)$$

Napetostima  $p$  in  $q$  želimo določiti še pripadajoči deformaciji. Lahko ju izvednotimo preko mehanskih zakonitosti potrebnega dela za spremembo volumna. V splošnem tako velja, da je delo potrebno za spremembo volumna, enako vsoti zmnožkov napetosti in deformacij (2-45).

$$\frac{\delta W}{V} = q' \delta \varepsilon_s + p' \delta \varepsilon_v \quad (2-45)$$

V zgornji enačbi predstavlja  $\varepsilon_s$  spremembo oblike,  $\varepsilon_v$  pa spremembo volumna. Torej lahko za primer triosnih preiskav, kjer velja osno-simetrično napetostno in deformacijsko stanje, predpostavimo enakost horizontalnih glavnih napetosti in deformacij  $\sigma_2 = \sigma_3$  ter  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ . Na podlagi teh predpostavk dobimo enostavni enačbi za deformaciji, ki ustrezata napetostma  $p$  in  $q$  (2-46) in (2-47).

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (2-46)$$

$$\varepsilon_v = (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3) \quad (2-47)$$

Zgornje enačbe veljajo za homogen poln vzorec. Pri preiskovanju zemljin v dinamičnem torzijskem triosnem aparatu pa imamo votle vzorce s tankimi stenami, ki zagotavljajo enakomerno razporeditev napetosti po steni vzorcev. V tem primeru je potrebno zgornje enačbe invariant napetosti  $p$  in  $q$  ter deformacij  $\varepsilon_s$  in  $\varepsilon_v$  nekoliko spremeniti in jim dodati nove parametre. To pa bo natančneje predstavljeno v naslednjem poglavju.

### 3 TORZIJSKA TRIOSNA PREISKAVA VOTLIH VZORCEV ZEMLJIN

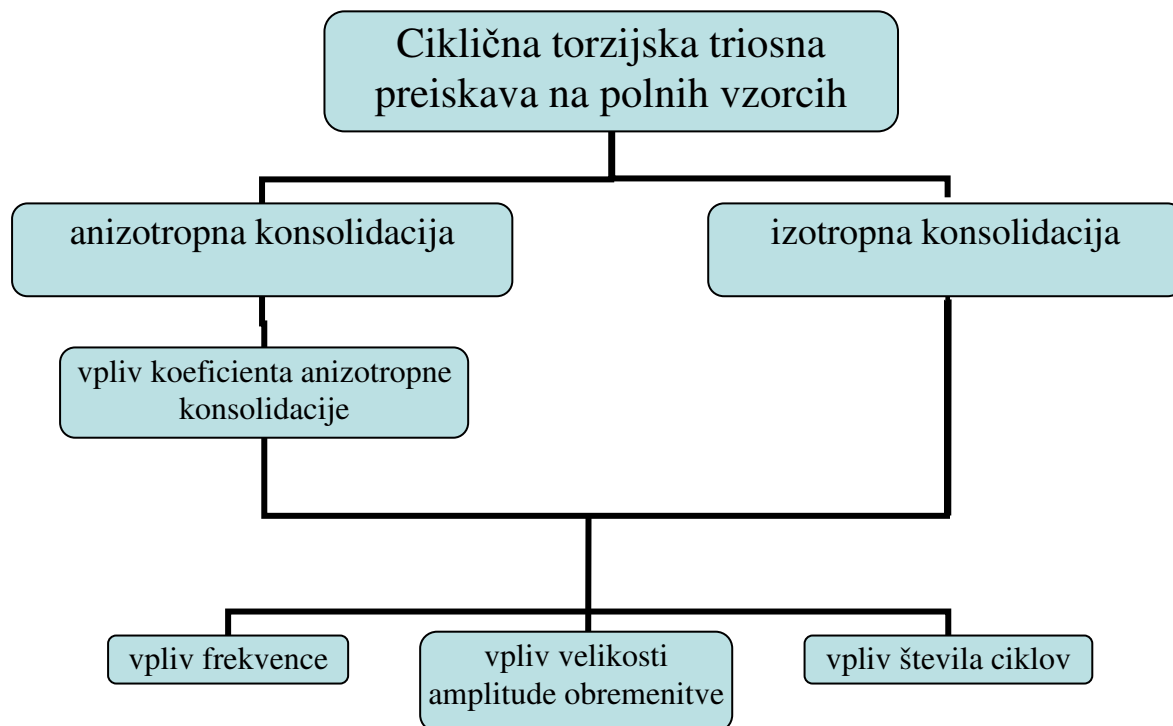
#### 3.1 Razvoj torzijske triosne preiskave votlih vzorcev

Torzijske triosne preiskave votlih vzorcev zemljin so se razvile iz cikličnih triosnih preiskav. Z željo po preiskovanju obnašanja zemljin v dinamičnih pogojih so navadno triosno celico za preiskovanje zemljin preoblikovali do te mere, da so lahko vzorec v osni smeri obremenjevali ciklično.

Prvi ciklični torzijski triosni aparat sta opisala Ishihara in Yamazaki (Ishihara, 1996), ki sta na osnovni aparat za triosne preiskave dodala bate, ki so omogočili tudi ciklično torzijsko obremenjevanje. Preizkusi so bili izvajani na podoben način kot pri navadnih cikličnih triosnih preiskavah. Posebno pozornost sta namenila zagotavljanju pogojev mirnega zemeljskega pritiska v naravi ( $K_0$  pogoji), ki predstavljajo izotropno konsolidacijo. V tem primeru morajo vertikalne napetosti doseči vrednost celičnega tlaka, da je preizkušanec v vseh smereh enako obremenjen, hkrati pa je radialna deformacija med konsolidacijo enaka nič. Že avtorja sama sta ugotovila, da je, kljub enostavni zamisli izvedbe preizkusa, generalno težko izvesti preprost ciklični torzijski triosni preizkus na polnih vzorcih. Glavni problem predstavlja vzpostavitev idealnih napetostnih pogojev v vzorcu ter zagotovitev enakomerne porazdelitve deformacij po celotnem obodu preizkušanca, ki jo je na polnih vzorcih nemogoče doseči. Kljub omenjenim težavam so s pomočjo cikličnega torzijskega triosnega aparata različni znanstveniki prišli do nekaterih zaključkov o obnašanju zemljin v primerih cikličnega obremenjevanja.

Pri prvotnih cikličnih torzijskih triosnih preiskavah so bili vzorci valjaste oblike polni, kar pomeni, da poleg vertikalne sile in torzije v celici deluje še enoten celični tlak. V tem primeru je v sami celici mogoče vzpostaviti izotropno napetostno stanje ali anizotropno napetostno stanje, pri čemer je vertikalni tlak različen od celičnega, torej bočnega pritiska. Pri danih možnostih je mogoče izvajati preiskave in primerjati razlike v rezultatih med anizotropno in izotropno konsolidacijo, v vplivu velikosti koeficienta anizotropne konsolidacije, v vplivu frekvence cikličnega obremenjevanja, v vplivu velikosti amplitude ciklične obremenitve ter

trajanja obremenitve (število ciklov). Za lažjo predstavo so te možnosti prikazane v obliki diagrama (Slika 3.1).

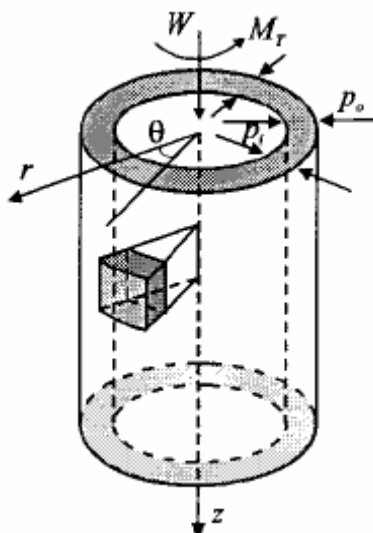


Slika 3.1: Prikaz možnosti izvajanja cikličnih torzijskih triosnih preiskav polnih vzorcev

S pomočjo predstavljenih preiskav je bilo ugotovljenih kar nekaj zakonitosti, ki veljajo za obnašanje peskov med potresi. Že leta 1975 sta Ishihara in Yasuda ugotovila, da do likvifikacije pride hitreje v primeru vibracijskega tipa potresa kot v primeru udarnega (šok) tipa potresa, medtem ko je 11 let za njima Tatsuoka (Buchheister, 2007) izmeril enako odpornost proti likvifikaciji pri frekvencah 0,05 Hz in 0,5 Hz. Istega leta je Jordan (Buchheister, 2007) s pomočjo triosnega aparata z dodatkom za ciklično obremenjevanje ugotovil, da tako prepustnost peska kot tudi frekvenca obremenjevanja vplivata na velikost pornih tlakov.

Le nekaj raziskav se je osredotočilo na vpliv strižne sile pred samo potresno obtežbo, a so bile ugotovitve toliko bolj presenetljive. Prisotnost strižne sile ne povzroča nujno povečanja odpornosti na likvifikacijo ali razvoj strižnih deformacij (Vaid in Chern, 1983, cit. po Buchheister, 2007). Glede na začetno napetostno stanje lahko strižna sila poveča ali zmanjša odpornost zemljine med potresom (Higuchi, 2001 cit. po Buchheister, 2007).

Predvsem že omenjen problem neenakomerne porazdelitve radialnih deformacij v horizontalni ravnini polnih cilindričnih vzorcev je Ishihara spodbudil, da je razvil aparat za preizkušanje votlih vzorcev, ki ga imenujemo torzijski triosni aparat za votle vzorce. Za vzorce (Slika 3.2) preiskovane v omenjenem aparatu je značilno, da so v sredini prazni (oblika cevi), kar omogoči, da so deformacije tudi v radialni smeri porazdeljene enakomerno.



Slika 3.2: Vzorec za torzijske triosne preiskave votlih vzorcev (Buchheister, 2007, str. 5)

Skozi leta so se razvili različni modeli aparatov za izvajanje torzijskega triosnega preizkusa na votlih vzorcih (Ishihara, 1996). Med sabo se razlikujejo predvsem v razmerjih med posameznimi dimenzijami vzorcev (višina, notranji in zunanji premer). Vsem pa je skupno, da omogočajo vzpostavljanje želenega napetostnega stanja v celici v štirih smereh. Tako je preizkušane obremenjen z vertikalnim pritiskom ( $p_v$  izračunanim iz vertikalne sile  $W$ ), torzijsko strižno obremenitvijo ( $\tau$  izračunano iz torzije  $M_T$ ) ter notranjim ( $p_i$ ) in zunanjim celičnim tlakom ( $p_o$ ) (Slika 3.2). To predstavlja tudi glavno prednost v primerjavi s preiskavo na polnih vzorcih, ki omogoča kontroliranje zgolj treh napetosti – celičnega tlaka, vertikalne napetosti ter torzije. S povezavo notranje in zunanje celice lahko dinamični torzijski triosni preizkus na votlih vzorcih opravimo pod enakimi zunanji in notranji bočnimi pritiski, medtem ko njuna ločitev omogoči obremenitev preizkušance z različnimi kombinacijami torzijske strižne, vertikalne normalne napetosti ter bočnih pritiskov. Na ta način dobimo spremembe napetostnih stanj v preizkušancu, ki se v svojem bistvu razlikujejo v spremembah smeri in velikosti glavnih napetosti. Vpliv teh je bilo pred pojavom torzijskega triosnega

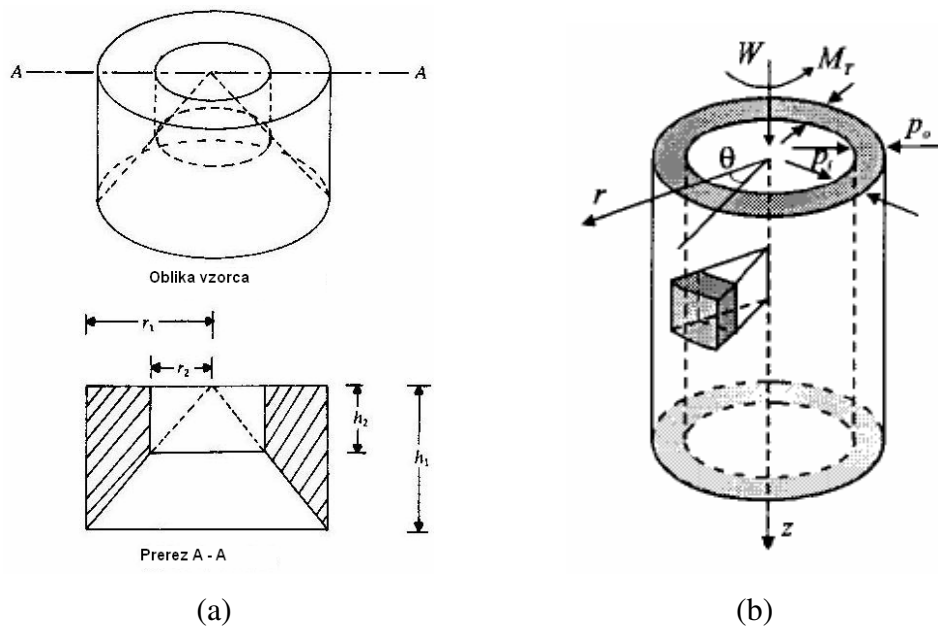


aparata za votle vzorce mogoče s precejšnjimi omejitvami raziskovati zgolj v direktnih strižnih celicah (DSC). Torzijski triosni aparat za votle vzorce je zaradi svoje prilagodljivosti in možnosti kontroliranja številnih parametrov še posebej uporaben za raziskovanje bistvenih vidikov deformacijskega obnašanja zemljin.

## 3.2 Opis torzijske triosne preiskave votlih vzorcev

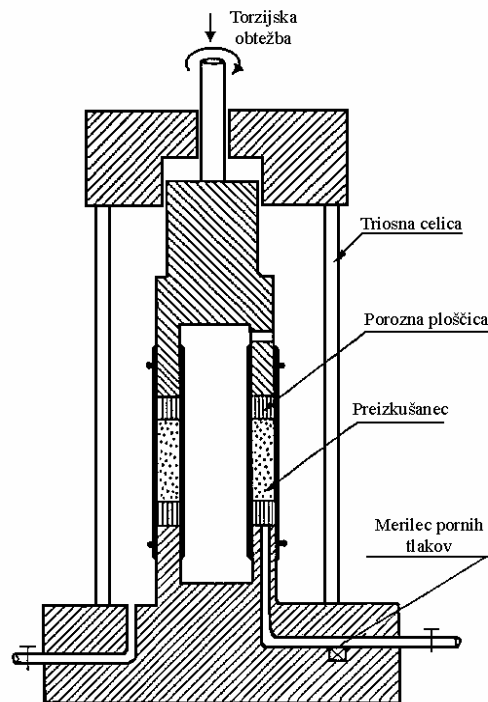
### 3.2.1 OSNOVNE ZNAČILNOSTI

Značilnost vseh vzorcev zemljin za dinamične torzijske triosne preiskave je njihova oblika. Znano je, da so vzorci zemljin za triosne strižne preiskave cilindrične oblike, s čimer se v vzorcu vzpostavi osno-simetrično napetostno in deformacijsko stanje. Pri cikličnih torzijskih triosnih preiskavah lahko dodatno preiskujemo še, kako se zemljina dejansko obnaša pod spreminjajočo se obtežbo in kako na deformacije zemljine oz. temeljnih tal vplivajo smeri glavnih napetosti. Zaradi želenih rezultatov mora biti vzorec zemljine za dinamične torzijske triosne preiskave votel, torej v obliki cevi. S tem je zagotovljena enakomerna razporeditev napetosti po celotni steni vzorca. Votli vzorci dopuščajo tudi spreminjanje bočnih pritiskov na vzorec (spreminjamo razmerje med notranjim in zunanjim pritiskom na vzorec zemljine) in s tem simuliranje različnih smeri glavnih napetosti. Primer vzorca zemljine za prve torzijske triosne preiskave votlih vzorcev je prikazan na sliki (Slika 3.3 (a)). Kot je razvidno, sta v tem primeru notranji ( $r_1 = r_i = r_n$ ) in zunanji polmer ( $r_2 = r_o = r_z$ ) vzorca v razmerju  $r_i : r_o = 1:2$ . Prvotni vzorci za torzijske triosne preiskave votlih vzorcev torej niso bili popolnoma votli (Das, 1993), temveč so imeli votel le zgornji del, kot je prikazano na spodnjem delu slike (Slika 3.3 (a)). V tem primeru sta bili tudi višini notranjega ( $h_1 = h_i = h_n$ ) in zunanjega dela ( $h_2 = h_o = h_z$ ) v razmerju  $h_i : h_o = 1:2$ . Kasneje so zaradi lažje izdelave vzorcev zemljin celoten vzorec naredili votel (Slika 3.3 (b)). Na ta način se še lažje opazuje vpliv spreminjanja smeri glavnih napetosti na deformacije zemljine.



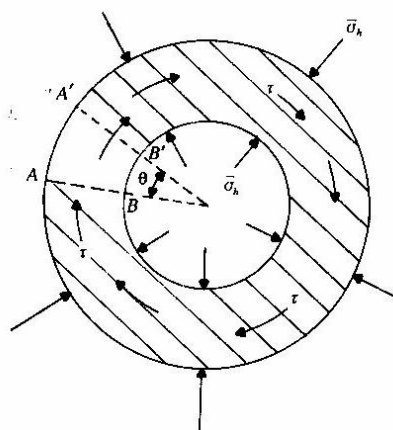
Slika 3.3: Prvi vzorec (a) in popolno votel vzorec (b) za torzijske triosne preiskave votlih vzorcev (Das, 1993, str. 116 in Buchheister, 2007, str. 5)

Preizkušane (vzorec zemljine) je v torzijskem triosnem aparatu za votle vzorce obremenjen s horizontalnim (notranjim in zunanjim) in vertikalnim pritiskom ter s torzijo. Primer enostavnega torzijskega triosnega aparata je prikazan na sliki (Slika 3.4).



Slika 3.4: Enostavni torzijski triosni aparat za votle vzorce (Ishihara, 1996, str. 45)

Ker konsolidacija poteka v dreniranih pogojih, samo obremenjevanje pa v nedreniranih, zgornje obremenitve povzročijo spremembo efektivnih napetosti v samem preizkušancu. V navpični smeri tako delujejo vertikalne efektivne napetosti ( $\sigma_v'$ ), v horizontalni smeri delujejo horizontalne efektivne napetosti ( $\sigma_h'$ ) ter zaradi torzije tudi strižne efektivne napetosti ( $\tau_H'$ ). Te napetosti povzročajo, da se preizkušanec v aparatu deformira v vseh treh smereh. Še vedno je v preizkušancu prisotno osno-simetrično napetostno stanje, zaradi česar so strižne deformacije ( $\gamma_A, \gamma_B$ ) v preizkušancu po obodu enake (Das, 1993). Delovanje napetosti v horizontalni ravnini vzorca je prikazano na spodnji sliki (Slika 3.5).



Slika 3.5: Prikaz napetosti v horizontalni ravnini vzorca (Das, 1993, str. 117)

Pri izpeljavi enačb za napetosti in deformacije pri torzijskih triosnih preiskavah votlih vzorcev se lahko v nasprotju z enostavnimi cikličnimi strižnimi testi zanemarijo stranske fiktivne napetosti na robovih preizkušancev (Das, 1993).

Torzijske triosne preiskave votlih vzorcev se izvajajo za študije likvifikacije (utekočinjenja) zemljin ter za določitev dinamične strižne togosti zemljin. Pri tem moramo paziti, da so zemljine saturirane in da tekom preiskave merimo porne tlake, preko katerih izračunamo efektivne napetosti v preizkušancu.

Rezultat preiskav je za vsak preizkušanec dinamični strižni modul ( $G$ ), ki je definiran kot razmerje med velikostjo strižnih napetosti ter velikostjo strižnih deformacij (3-1).

$$G = \frac{\tau_H}{\gamma_H} \quad (3-1)$$

### 3.2.2 IZRAČUNI NAPETOSTI, DEFORMACIJ TER NJUNIH INVARIANT

V prejšnjem poglavju so bile predstavljene osnovne napetosti, ki nastopajo pri votlih vzorcih za torzijske triosne preiskave, osnovne deformacije ter zveze med njimi. Na tem mestu pa je posvečena pozornost natančnim izračunom tako napetosti kot deformacij ter njihovim invariantam, s katerimi lažje predstavimo obnašanje zemljin. Izpeljane enačbe temeljijo na predpostavki, da je vzorec pravilne cilindrične oblike, ki se pri deformiranju obnaša kot en element. Zato so dobljene vrednosti napetosti in deformacij nekakšne povprečne vrednosti. Enačbe je leta 1983 izpeljal Hight (Rolo, 2003).

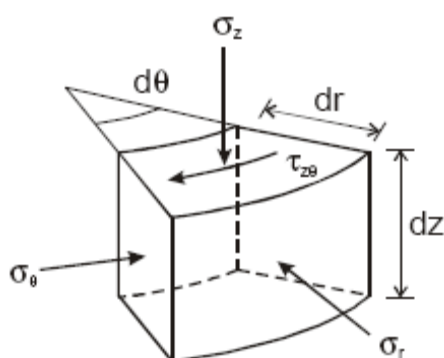
V polarnem koordinatnem sistemu imamo na samem vzorcu vertikalno ( $\sigma_z$ ), obodno ( $\sigma_\theta$ ), radialno ( $\sigma_r$ ) in strižno ( $\tau_{\theta z}$ ) napetost (Slika 3.6), ki jih izračunamo po spodnjih enačbah.

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (3-2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{r_o - r_i} \quad (3-3)$$

$$\sigma_r = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i} \quad (3-4)$$

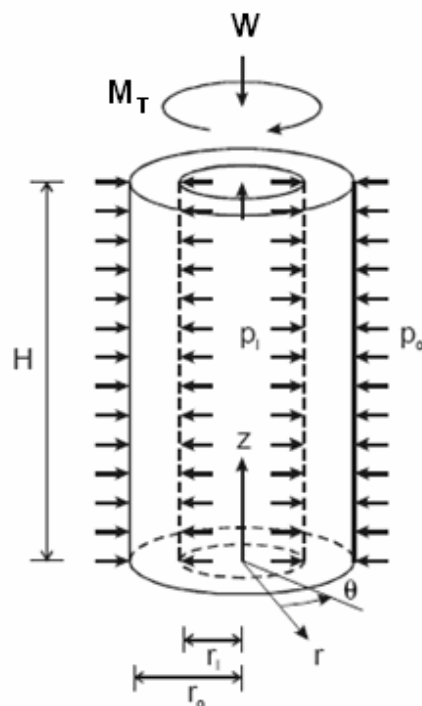
$$\tau_{\theta z} = \frac{3M_T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (3-5)$$



Slika 3.6: Komponente napetosti na elementu votlega vzorca (Buchheister, 2007, str. 5)

V zgornjih enačbah predstavlja  $W$  vertikalno silo,  $M_T$  torzijo,  $p_o$  in  $p_i$  sta zunanji in notranji celični tlak,  $r_o$  in  $r_i$  pa zunanji in notranji polmer vzorca (Slika 3.7). Enačbi za vertikalno in

obodno napetost nista izpeljani na osnovi materialnih konstitutivnih zakonov, temveč sta izpeljani na osnovi ravnotežnih pogojev. Enačbi za radialno in strižno napetost pa sta izpeljani po materialnih konstitutivnih zakonih za elastične oziroma elastično-plastične pogoje. Tako se dobljene vrednosti napetosti oziroma tudi same enačbe lahko med seboj nekoliko razlikujejo (odvisno od privzetih materialnih pogojev), vendar pa je bilo ugotovljeno, da razlika ni večja od 2% (Rolo, 2003).



Slika 3.7: Prikaz delovanja obremenitev na votel vzorec (Nishimura, 2005, str. 90)

Za vertikalno ( $\epsilon_z$ ), obodno ( $\epsilon_\theta$ ), radialno ( $\epsilon_r$ ) in strižno ( $\epsilon_{\theta z}$ ) deformacijo veljajo spodaj zapisane enačbe.

$$\epsilon_z = \frac{w}{l_0} \quad (3-6)$$

$$\epsilon_\theta = -\frac{u_o + u_i}{r_{oz} + r_{iz}} \quad (3-7)$$

$$\epsilon_r = -\frac{u_o - u_i}{r_{oz} - r_{iz}} \quad (3-8)$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{2\theta(r_o^3 - r_i^3)}{2H_0(r_o^2 - r_i^2)} \quad (3-9)$$

Oznaka  $w$  predstavlja vertikalni pomik na referenčni dolžini (višini) vzorca  $l_0$ ,  $H_0$  začetno višino vzorca,  $\theta$  zasuk vzorca v radianih,  $u_0$  in  $u_1$  zunanjo in notranjo radialno deformacijo vzorca (+ pomeni odmik od središča vzorca) ter  $r_{0z}$  in  $r_{1z}$  začetni zunanji in notranji polmer vzorca.

Iz zgornjih enačb lahko po postopku, predstavljenem v poglavju *Glavne napetosti* sedaj izračunamo glavne napetosti in deformacije po enačbah od (3-10) do (3-15).

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\tau_{\theta z}^2 + \left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2} \quad (3-10)$$

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad (3-11)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\tau_{\theta z}^2 + \left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2} \quad (3-12)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} + \sqrt{\gamma_{\theta z}^2 + \left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2} \quad (3-13)$$

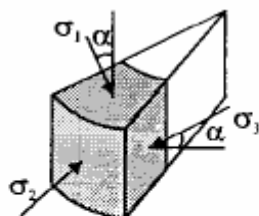
$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r \quad (3-14)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{2} - \sqrt{\gamma_{\theta z}^2 + \left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\theta}{2}\right)^2} \quad (3-15)$$

V zgornjih enačbah je privzeto, da smeri glavnih napetosti in deformacij sovpadajo. Zato je potrebno upoštevati, da so deformacije definirane glede na napetostne pogoje, kar v posameznih napetostnih pogojih (pravi triosni pogoji) zanika uporabljene predpostavke. Tako ni nujno, da je radialna deformacija tista, ki sovpada s srednjo glavno deformacijo (Hight, 1983). Izhajajo pa enačbe za glavne deformacije iz Mohrovih krogov deformacij, ki temeljijo na direktni in strižni deformaciji.

Iz glavnih napetosti lahko izračunamo invariante napetosti in deformacij v poljubnem koordinatnem sistemu. Že v poglavju o invariantah napetosti in deformacij je bilo omenjeno, da v geomehaniki za predstavitev in lažje razumevanje obnašanja zemljin uporabljamo

invariante napetosti  $p$  in  $q$  s pripadajočima deformacijama. Pri votlih cilindričnih vzorcih se poleg napetosti  $p$  in  $q$ , pojavita še parametra  $\alpha$  (kot zasuka največje in najmanjše glavne napetosti od vertikale oziroma horizontale) in  $b$  (Bishopov parameter) (Shen in drugi, 2007). Bishopov parameter  $b$  predstavlja razmerje velikosti glavnih napetosti. Če navedene količine razložimo na nekoliko drugačen način, velja, da se, pri ustvarjanju napetostne poti s predpostavljeno vertikalno silo ( $W$ ) v posebnem odnosu z zunanjim ( $p_o$ ) in notranjim ( $p_i$ ) celičnim tlakom, strižna napetost ( $q$ ) spreminja preko rotacijskega kota ( $\alpha$ ) pod konstantnim Bishopovim parametrom ( $b$ ) ter konstantno glavno napetostjo ( $p$ ) (Shen in drugi, 2007). Taka napetostna pot se lahko doseže s prilagajanjem torzije ( $M_T$ ).



Slika 3.8: Glavne napetosti na elementu votlega vzorca (Buchheister, 2007, str. 5)

Za razložene količine veljajo spodnje enačbe od (3-16) do (3-21), pri čemer moramo biti pozorni pri enačbi za parameter  $\alpha$  na dodatne pogoje, ki omogočajo izračun kotov v intervalu od  $-90^\circ$  do  $90^\circ$ .

Pri pogoju  $\sigma_z \geq \sigma_\theta$  in  $W > \pi \cdot r_o r_i (p_o - p_i)$  izračunamo  $\alpha$  po spodnji enačbi.

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} = \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{3M_T}{\pi(r_o^3 - r_i^3)} \cdot \frac{(r_o^2 - r_i^2)}{\left[ \frac{W}{\pi} + (p_i - p_o)r_o r_i \right]} \right\} \quad (3-16)$$

Pri pogoju  $\sigma_z < \sigma_\theta$  in  $W < \pi \cdot r_o r_i (p_o - p_i)$  pa izračunamo  $\alpha$  po nekoliko spremenjeni enačbi.

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} + (-1)^n \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{3M_T}{\pi(r_o^3 - r_i^3)} \cdot \frac{(r_o^2 - r_i^2)}{\left[ \frac{W}{\pi} + (p_i - p_o)r_o r_i \right]} \right\} + (-1)^n \cdot \frac{\pi}{2} \quad (3-17)$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta + \sigma_r}{3} = \frac{1}{3} \left[ \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{3(p_o r_o^2 - p_i r_i^2)}{(r_o^2 - r_i^2)} \right] \quad (3-18)$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2}{4} + (\tau_{z\theta})^2} = \sqrt{\left[ \frac{W}{\pi} + (p_i - p_o)r_o r_i \right]^2 + \frac{9M_T^2}{4\pi^2(r_o^3 - r_i^3)^2}} \quad (3-19)$$

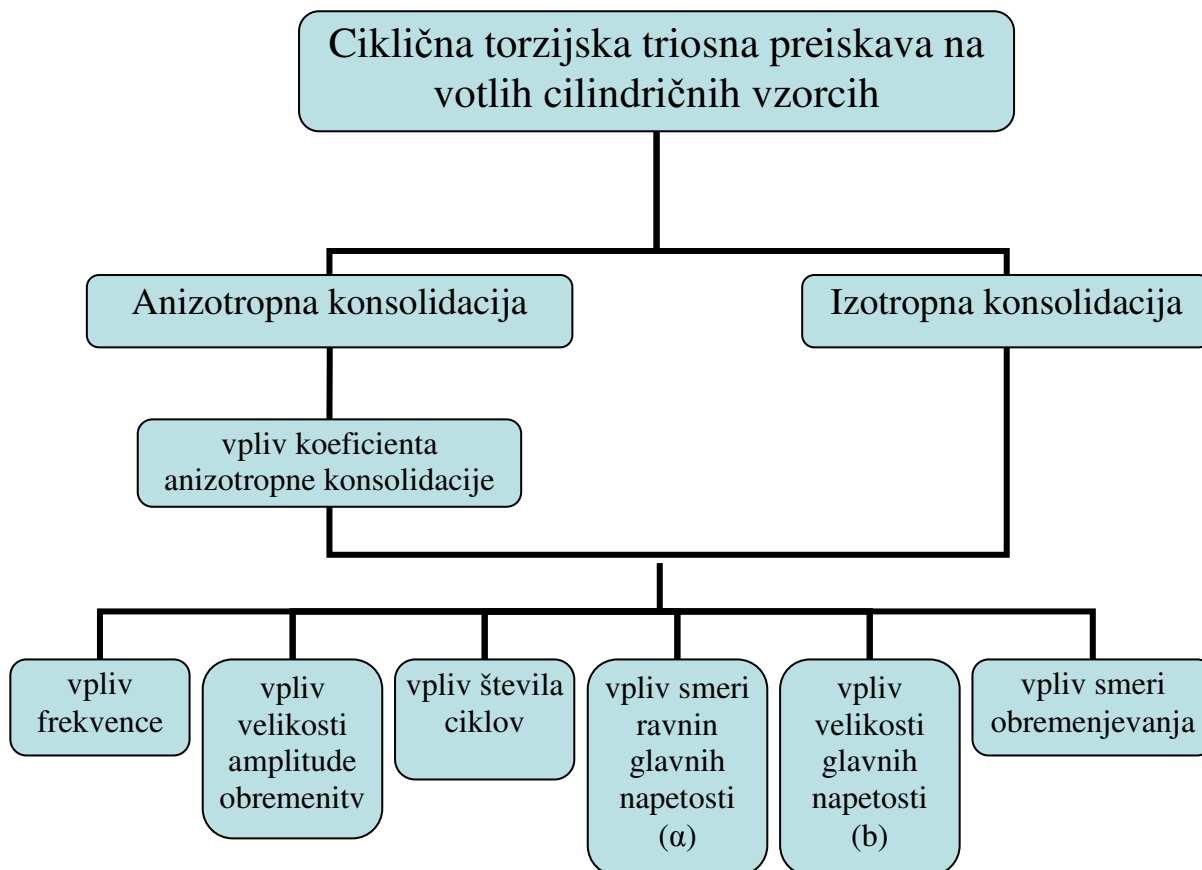
$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{\sigma_r - \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2}{4} + (\tau_{z\theta})^2}}{2\sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2}{4} + (\tau_{z\theta})^2}} \quad (3-20)$$

$$b = \frac{\frac{3r_o r_i (p_i - p_o)}{2(r_o^2 - r_i^2)} - \frac{W}{2\pi(r_o^2 - r_i^2)}}{2\sqrt{\left[ \frac{W}{\pi} + (p_i - p_o)r_o r_i \right]^2 + \frac{9M_T^2}{4\pi^2(r_o^3 - r_i^3)^2}}} + \frac{1}{2} \quad (3-21)$$

Osnovne izpeljane enačbe za izračun glavnih napetosti v vzorcu so izpeljane na predpostavki o konstantnem poteku deformacij in napetosti po vzorcu, saj celoten vzorec predstavlja en element. Postavlja se vprašanje o vplivu predpostavke na dobljene rezultate preiskav. Z opravljenimi preiskavami je Nishimura leta 2006 odkril, da je neenakomeren razpored napetosti in deformacij po višini vzorca posledica delovanja sile teže vzorca, ki narašča proti dnu vzorca. Ta pa je v predpostavki, na kateri temelji izpeljava enačb, zanemarjena. Na podlagi statičnih zakonitosti poteka napetosti in deformacij po vzorcu ter robnih pogojev z upoštevanjem lastne sile teže vzorca so bile izpeljane enačbe za vse štiri smeri napetosti in deformacij, ki se pojavijo pri torzijskih triosnih preiskavah na votlih vzorcih. Rezultati opravljenih preiskav (Nishimura, 2006) so pokazali, da se napetosti v vzorcu, kjer je višina enaka zunanjemu premeru, po višini razlikujejo od -2,6 do 11,1%, medtem ko ta razlika znaša pri vzorcu enake višine in polovico manjšem zunanjem premeru od 0 do 2,4%. Bistvene razlike nastopijo pri vertikalni deformaciji, kjer segajo do 20%, pri radialni deformaciji pa jih sploh ni. Razlike deformacij v obročni smeri se gibljejo v območju razlik napetosti. Preiskave so tudi pokazale, da so razlike tako napetosti kot tudi deformacij na vzorcih z razmerjem višine in zunanjega premera 2:1 približno šestkrat manjše kot pri vzorcih z razmerjem omenjenih količin 1:1. Torej dimenzije vzorca  $H/D_o/D_i/ = 200/100/60$  mm, ki smo jih uporabili v naših preiskavah, spadajo med primernejše.



Iz predstavljenih enačb in zakonitosti je razvidno, da ponuja torzijska triosna preiskava votlih vzorcev številne možnosti za preiskovanje. S spreminjanjem enega ali več parametrov ter merjenjem odziva obnašanja vzorcev lahko izvajamo t.i. parametrične študije (Slika 3.9).



Slika 3.9: Prikaz možnosti izvajanja cikličnih torzijskih triosnih preiskav votlih vzorcev

### 3.2.3 PREDSTAVITEV REZULTATOV NEKATERIH OPRAVLJENIH PREISKAV NA TORZIJSKEM TRIOSNEM APARATU ZA VOTLE VZORCE

Kot je iz samega opisa preiskave ter potrebne aparature razvidno, je izvajanje torzijskih triosnih preiskav na votlih cilindrični vzorcih zahtevno, a s stališča mehanike (napetosti in deformacije) omogoča obravnavanje napetostnega (deformacijskega) problema enako kot pri dolgi cevi. Glavna razlika in tudi prednost torzijskega triosnega aparata za votle vzorce je možnost vzpostavljanja poljubnih začetnih napetostnih stanj enakih tistim, katerim je zemljina

izpostavljena v naravi pod dodatno obtežbo (dodatne normalne vertikalne in horizontalne napetosti ter dodatne strižne napetosti).

Veliko raziskav, predvsem na Japonskem, je bilo izvedenih za potrditev teoretičnih spoznanj odnosov med tipičnimi količinami pri torzijskih triosnih preiskavah na votlih vzorcih. Že omenjena znanstvenika Ishihara in Yasuda sta leta 1983 s pomočjo triosnih testov na peskih ugotovila, da ima tudi sprememba oblike napetostne poti (iz ravne na krožno) vpliv na odpornost peskov med potresom. Kasneje sta še ugotovila, da se ciklična odpornost peskov zmanjša, če so smeri glavnih napetosti v začetnem stanju zasukane (Ishihara in Yasuda, 1983 cit. po Buchheister, 2007); to pomeni, da smeri napetosti oklepajo določen kot s pravokotnicami na ploskve ki jih obremenjujejo.

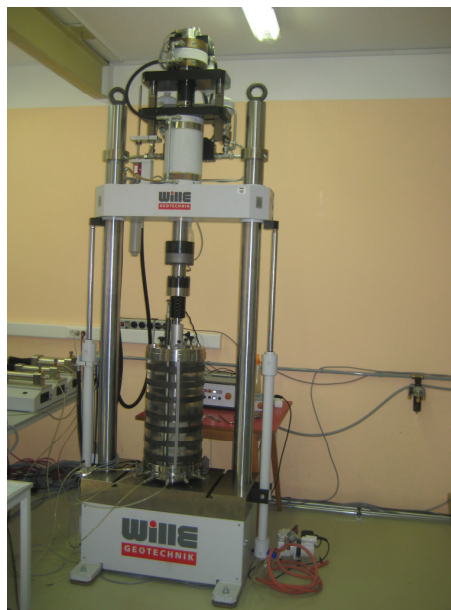
V zadnjem desetletju prejšnjega stoletja ter v prvih letih novega so različni avtorji odkrili in potrdili ugotovitev, da so plastične začetne deformacije odvisne od prirastka smeri napetosti (Pradel, 1990 in Gutierrez, 1991 cit. po Buchheister, 2007). Še nekoliko kasneje je bilo tej tezi dodano, da večji naklon glavnih začetnih napetosti povzroča večji razvoj pornih tlakov (Yoshimine, 1998 cit. po Buchheister, 2007).

Preiskave na triosnem torzijskem aparatu za votle vzorce opravljene na švicarskem inštitutu za geomehansko projektiranje ETH v Zürichu (Buchheister, 2007) pa so ugotovljale vpliv smeri glavnih napetosti na pojav likvifikacije. Vzorci so bili obremenjeni istočasno v vertikalni in strižni smeri z amplitudami napetosti izmerjenimi med potresom. Rezultati so potrdili, da ima na pojav likvifikacije vpliv tudi smer glavnih napetosti (Buchheister in Laue, 2006). Tako se likvifikacija hitreje pojavi pri manjših ter dalj časa trajajočih obtežbah v primeru, kjer začetne strižne napetosti niso prisotne. V primeru, kjer so te prisotne že v začetku, pa do likvifikacije privedejo obtežbe z večjimi amplitudami ter krajšim trajanjem (močnejši potresi).

Predstavljene preiskave so služile kot osnova opravljenim preiskavam, predstavljenim v tem delu. Kot je bilo omenjeno, ima smer glavnih napetosti vpliv na pojav likvifikacije, nas pa je zanimalo, ali ima smer glavnih napetosti vpliv tudi na strižno togost zemljin.

### 3.3 Torzijski triosni aparat na ZAG-u

Dinamični torzijski triosni aparat za votle cilindrične vzorce, ki je v lasti Zavoda za gradbeništvo Slovenije v Ljubljani, je izdelalo nemško podjetje Wille Geotechnik (Slika 3.10). Preko računalniškega programa GEOsys se vodi celotna preiskava od faze preplavljanja vzorca do obremenjevanja. Sam aparat je upravljan preko servo-hidravličnega sistema, ki zagotavlja tako vertikalno obremenitev kot tudi torzijsko.

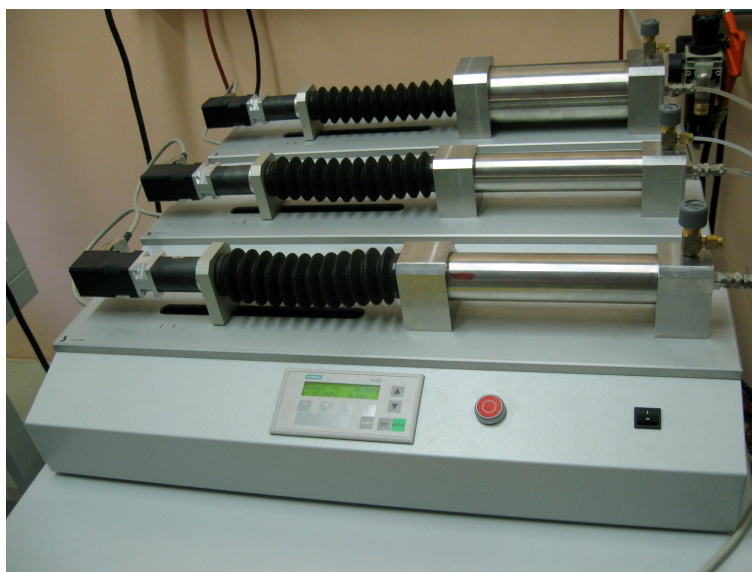


Slika 3.10: Torzijski triosni aparat za votle vzorce na ZAG-u

Aparat je sestavljen iz togega ogrodja togosti 900 kNmm, višine 3,05 m in teže 1300 kg, ki zagotavlja stabilno lego celice pri dinamičnem obremenjevanju z visokimi frekvencami. Na ogrodje postavimo triosno celico, v kateri vzpostavimo začetno napetostno stanje, preko ventilov na dnu celice ustvarjamo in merimo pritiske v sami celici (zunanje in notranje) ter porne tlake v vzorcu; na zgornji plošči celice so ventili, preko katerih celico polnimo z vodo, jo odzračujemo ter izničujemo zunanji celični pritisk. Skozi spodnje ventile samo celico tudi izpraznimo. Celica je z aparatom povezana preko bata, s katerim vertikalno in torzijsko obremenjujemo vzorec.

Pritiske v celici se vzpostavlja preko elektromehaničnih volumskih kontrolnikov pritiska (VPC – volume pressure controller), ki so tekom preiskave vodeni računalniško, po končani

preiskavi pa se lahko upravljajo tudi ročno. Notranji in celični pritisk ustvarjata VPC-ja s kapaciteto 250 ml, medtem ko zunanji pritisk ustvarja VPC s 1000 ml kapacitete. VPC-ji ustvarjajo v celici pritisk natančnosti 0,1 kPa na osnovi tlačilke; sama celica, kjer se pritisk ustvarja, je iz nerjavečega jekla. Zmogljivost VPC-jev znaša 1 MPa, njihovo prednost pa predstavlja sposobnost kontroliranja pritiska in merjenja volumskih sprememb, ki so potrebne za doseg želenega pritiska v celici. Vse volumske spremembe in pritiski se preko pretvornikov shranjujejo v računalniškem programu.



Slika 3.11: Volumski kontrolniki pritiska (VPC-ji)

Pomembno je, da so VPC-ji polnjeni z odzračeno vodo, saj le na tak način zagotavljajo enakomerno razporejanje pritiskov. Navadno vodo preko cevi razpršujemo v komoro z vakuumom in jo na ta način odzračimo.

Vzorci se sestavljajo v kalupu direktno na spodnjem podstavku celice, ki je opremljen s spodnjo porozno ploščico. Ko je vzorec zgrajen, ga pokrijemo z zgornjo porozno ploščico ter zapremo z zunanjo in notranjo membrano s pomočjo obročkov (O-ringov). Zgornjo porozno ploščico privijamo na notranji kontrolnik in zapremo z zunanjo celico. Celoten sistem je prilagojen na dimenzije votlega cilindričnega vzorca ( $H = 200$  mm,  $D_o = 100$  mm,  $D_i = 60$  mm), vendar pa se z zamenjavo nastavkov (podstavek, zgornja kapa, porozne ploščice...) lahko preiskuje tudi polne vzorce.



Slika 3.12: Primer sestavljenega vzorca

V celici je nameščen inkrementni merilec in kontrolnik majhnih rotacij natančnosti pod  $10^{-5}$  strižne deformacije v območju zasukov  $\pm 2,5^\circ$ , preko katerega je možno voditi deformacijske preiskave. Merilec sestavlja oddajnik in sprejemnik, ki omogočata digitalni zajem podatkov in posledično preko računalniškega programa njihovo shranjevanje. Preko spreminjanja magnetnega polja sprejemnik zazna spremembo pozicije oddajnika in to kot signal posreduje računalniku.



Slika 3.13: Notranji inkrementni merilnik zasukov

Znotraj celice se nahaja tudi notranji kontrolnik vertikalnih sil in torzije. Namenjen je natančnejšemu kontroliranju in merjenju vrednosti teh dveh količin.

Zunaj celice je nameščen merilec ter kontrolnik vertikalnih pomikov natančnosti  $10^{-5}$  vertikalne deformacije v območju  $\pm 5$  mm. Celotni interval merjenja vertikalnih pomikov pa znaša 70 mm. Istočasno merilec preko pretvornika omogoča zajem podatkov, posledično njihovo shranjevanje v računalniškem programu ter deformacijsko vodenje preiskave.

Prav tako je na zgornjem delu ogrodja aparata nameščen zunanji merilec rotacije manjše natančnosti in večjega območja rotacij  $\pm 30^\circ$ . Preko pretvornika je omogočen zajem podatkov in njihovo shranjevanje v računalniškem programu.

Na delu bata, pritrjenem na ogrodje aparata, preko katerega se s pomočjo hidravlike prenašata vertikalna sila in torzija, sta nameščena merilca in kontrolnika vertikalne sile ter torzije. Zmogljivost sistema za ustvarjanje vertikalne sile znaša 25 kN, torzije pa 250 Nm z natančnostjo 0,1% celotnega območja. S pomočjo pretvornika se zajemajo podatki merilcev, ki se v računalniškem programu shranjujejo.

Dinamične karakteristike, ki jih aparat omogoča znašajo do 50Hz frekvence pri amplitudi vertikalne oziroma torzijske obremenitve 0,5-80% statičnega razpona. Pri zelo majhnih deformacijah pa aparat omogoča še višje frekvence obremenjevanja. Oblika valov obtežbe je lahko sinusna, trikotna, pravokotna oziroma prosta – nepravilna po izbiri uporabnika. Aparat omogoča statično in dinamično obremenjevanje v vertikalni smeri ter v strižni smeri istočasno ali ločeno z enakimi ali različnimi frekvencami.

Že uvodoma je bilo omenjeno, da je celotna preiskava vodena preko računalniškega programa GEOsys. Sam program je zasnovan na različnih nivojih od definiranja merilcev, volumskih kontrolnikov pritiska, pretvornikov ter njihovih povezav do definiranja merjenih količin. Poseben nivo je namenjen programiranju preiskave, kjer so definirane vse potrebne količine v preiskavi od merjenih do izračunanih, njihove omejitve ter v računalniškem jeziku zapisan celoten potek preiskav (preplavljanje vzorcev, zasičevanje, B-parameter, konsolidacija in deformacijsko ali napetostno vodenje obremenjevanja). Za uporabnika najpomembnejša

nivoja sta vodenje preiskave ter shranjevanje pridobljenih podatkov med preiskavo. Pri samem vodenju preiskave imamo možnost izbiranja faz preiskave, nastavljanja želenih pritiskov, izbiro vodenja preiskave ter velikosti in vrst obremenitev. Na nivoju shranjevanja podatkov pa definiramo mesto, kamor se podatki shranjujejo, ter v kakšnem časovnem intervalu naj bodo zajeti.

V zaključku opisovanja zmogljivosti same aparature bi rada poudarila, da je spoznavanje z vsemi komponentami tako aparata kot samega računalniškega programa dolgotrajen proces. Osnovno razumevanje delovanja celotnega sistema je potrebno neprestano nadgrajevati ob nastopu takih in drugačnih težav pri sami opremi ali računalniškem programu. Kljub vsemu je bistvo raziskovalnega dela, da si poleg zastavljenega cilja, dobljenih rezultatov odzivanja zemljine na obremenjevanje, pripravljeno širiti svoje znanje z odkrivanjem delovanja ter namembnosti posameznih komponent.

## **4 PRIPRAVA VZORCEV**

Eden izmed najzahtevnejših postopkov pri celotnem procesu preiskovanja zemljin je priprava vzorca. Ta mora imeti osnovne fizikalne lastnosti enake kot v naravi. Pri glinah in meljih tako pripravljamo vzorce za preizkušanje iz intaktne zemljine, t.j. iz kosa zemljine, ki je bil odvzet na terenu in shranjen po določenem protokolu, ki ga predpisuje standard. Pri peskih pa je priprava vzorca še zahtevnejša, saj iz materiala odvzetega na terenu ne moremo direktno narediti vzorca primerne za preiskovanje ne na klasičnem triosnem aparatu, kot tudi ne na dinamičnem torzijskem triosnem aparatu za votle vzorce. Tako potrebuje priprava primerne peščenega vzorca za preiskavo v dinamičnem torzijskem triosnem aparatu za votle vzorce posebno pozornost. V literaturi je zaslediti, da se je s tem problemom ukvarjalo kar nekaj strokovnjakov, ki pa so se reševanja problema lotili na več načinov. Iz tega so se razvile tri osnovne metode izdelave peščenih vzorcev za triosne preiskave, ki so v nadaljevanju podrobneje predstavljene, na tem mestu pa le naštetje. To so: metoda suhega nasipavanja in zbivanja peska, metoda vlažnega nasipavanja in zbivanja peska ter sedimentacijska metoda. Te metode se pojavljajo tako v ameriških ASTM standardih za dinamične triosne preizkuse, kot tudi v japonskih standardih za dinamične triosne preiskave v torzijskem triosnem aparatu za votle vzorce, vendar pod različnimi imeni. Imena so namreč odvisna tudi od prevodov. Razlike se pojavljajo le v ameriških standardih, ki dovoljujejo zgoščanje vzorcev z vibriranjem. Vsem metodam je skupno, da je pesek prvotno posušen in presejan ter da sta izpolnjeni glavni zahtevi za izdelavo primerne vzorca. Vzorec mora biti homogen z enakomerno poroznostjo po celotnem volumnu ter mora biti po celotni prostornini enako zgoščen na želeno stopnjo zgoščenosti, ki jo določimo glede na naravno gostoto materiala ter na vrsto preiskave. Izbira metode izdelave peščenih vzorcev je tako odvisna od oblike vzorca (poln valjast vzorec ali votel valjast vzorec (cevast)), od osnovnih fizikalnih karakteristik materiala ter od želene zgoščenosti materiala.

### **4.1 Metoda vlažnega nasipavanja in zbivanja peska**

Izbrano količino peska, ki jo preračunamo glede na želeno gostoto vzorca, razdelimo na pet do šest enakih delov. Vsak del posebej zmešamo z odzračeno vodo, da dobimo želeno

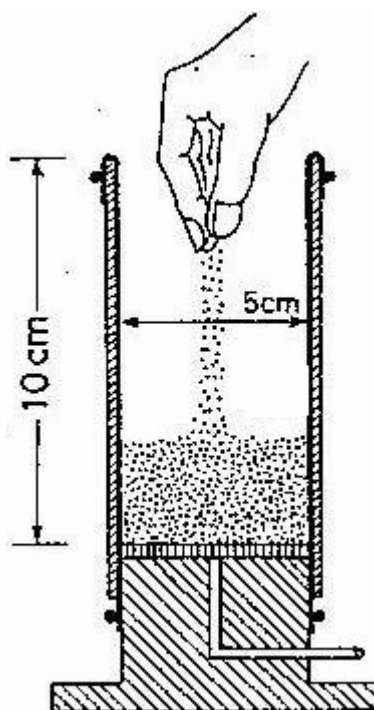


vlačnost peska. Načeloma je idealna vlažnost vgradnje peska okrog 5%. Nato v pripravljen kalup vzorca, na katerem je že napeta membrana, nasipavamo vlažen pesek. Vsako plast peska posebej potresemo s prsti v kalup s prej določene višine v 5–6 dvigih (Slika 4.1). Pesek nato nežno zbijemo do višine, ki ustreza plasti (v primeru, da je vzorec visok 20 cm in imamo 5 plasti, pomeni, da prva plast sega 4 cm nad dnom kalupa). Zaradi kapilarnega pojava med zrni moramo biti pazljivi, da vgradimo vlažen pesek zelo narahlo in se tako izognemo presežkom največjega količnika por suhega materiala. Kako rahla mora biti struktura vzorca, je odvisno od vrste peska in v splošnem ni določljivo, zato je ta odločitev prepuščena posameznikovim izkušnjam. V primeru, da je energija zbijanja premajhna, dobimo zelo rahel vzorec, katerega volumen se ob saturaciji nepredstavljivo zmanjša, posledično se zmanjša tudi premer vzorca, kar povzroči vertikalne gube na zunanji membrani vzorca. Na palec pa je priporočljiva ocena, da mora biti energija zbijanja za najrahljše vzorce tolikšna, da zmanjšanje volumna pri saturaciji ni večje od 5%. Za izgradnjo gostejših vzorcev po tej metodi pa je potrebno povečati energijo zbijanja posameznih plasti.

Po končanem nasipanju in zbijanju vzorec pokrijemo z zgornjim pokrovom ter zapremo z membrano. Na zgornji pokrov namestimo vakuum 2–5 kPa ter odstranimo kalup. Saturacijo vzorca z odzračeno vodo pospešimo, če prej pod enakim tlakom, kot smo nanesli vakuum, skozi vzorec za približno pol ure vpihavamo ogljikov dioksid (CO<sub>2</sub>). Po opravljenem postopku saturacije izmerimo količnik por, ki predstavlja začetni (initial) količnik por.

Bistvena prednost te metode izdelave vzorcev je v dejstvu, da je omogočena priprava vzorcev znotraj širokega obsega količnika por. Na ta način lahko dobimo od zelo rahlih vzorcev, pri katerih je pričakovati krčenje, do rahlih raztegljivih vzorcev, katerih naknadno obremenjevanje je odvisno od začetnega količnika por.

Ta metoda je uporabljena v ameriških standardih ASTM za ciklične triosne preizkuse ter v japonskih (JGS) standardih.



Slika 4.1: Metoda vlažnega nasipavanja peska (Ishihara, 1996, str. 338)

#### 4.2 Metoda suhega nasipavanja in zbijanja peska

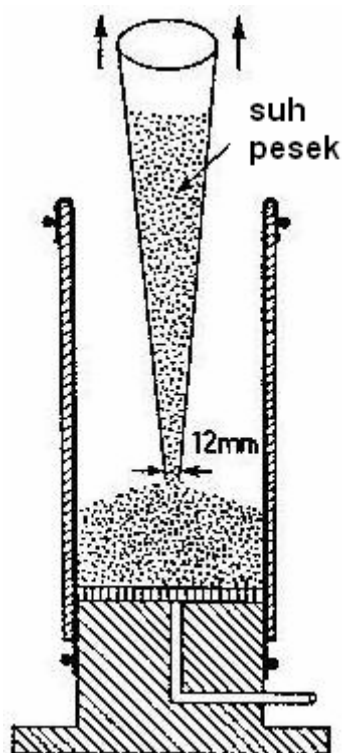
Ta metoda je nekoliko lažje izvedljiva in manj odvisna od izkušenosti posameznika. Skozi lijak (enak je potreben tudi za določanje maksimalnega količnika por po standardih JGS), ki ima na spodnji strani premer odprtine 12 mm, nasipamo v peči posušen pesek v pripravljen kalup z napeto membrano. Potrebno količino peska, določeno glede na želeno gostoto vzorca, razdelimo na 4 do 5 enakih delov, ki jih nasipamo kontinuirano s stalno hitrostjo in brez padca. Lijak se mora torej konstantno dotikati zgornjega roba že izdelanega vzorca. Posamezen del celotne potrebne mase peska predstavlja zaključeno fazo. Za doseg želene zgoščenosti pesek zgoščujemo po slojih s paličico ali s tresenjem celotnega kalupa.

Tudi pri tej metodi, po končanem nasipanju in zbijanju, vzorec pokrijemo z zgornjim pokrovom, zapremo z membrano ter na zgornji pokrov namestimo vakuum v velikosti 20–50 kPa. Nato vzorec saturiramo najprej z ogljikovim dioksidom ( $\text{CO}_2$ ), katerega tlak vnosa ne sme presegati velikosti vakuuma. Po dobre pol ure trajajoči saturaciji z ogljikovim dioksidom vzorec preplavimo z odzračeno vodo. S postopkom določevanja B-parametra ugotovimo, kdaj

je saturacija resnično končana. B-parameter mora doseči vrednost vsaj 0,95, da lahko trdimo, da je vzorec zasičen z vodo. Natančnejši opis določevanja B-parametra je predstavljen v poglavju *Preplavljanje vzorca, B-parameter ter postopek zasičevanja*.

S to metodo lahko dobimo vzorce najrazličnejših gostot s prilagajanjem velikosti zgoščevalne energije, vendar pa velja, da so ti vzorci gostejših od vzorcev, pripravljenih po metodi vlažnega nasipavanja in zbijanja peska. Čeprav pripravimo vzorce brez dodatne zgoščevalne energije, se bo vzorec le nekoliko skrčil v primeru nadaljnjega strižnega obremenjevanja. Tako ta metoda ni primerna za pripravo zelo rahlih vzorcev.

Znano je, da se ta metoda nekoliko razlikuje od generalno znane metode zračnega nasipavanja (air pluviation method), pri kateri se suh pesek nasipava skozi enak lijak v kalup z njegovega zgornjega roba. Po tej metodi dobimo vzorce, ki se ob nadaljnjem obremenjevanju vedno rahljajo. Kljub temu je metoda suhega nasipavanja in zbijanja peska uporabljena v japonskih ter ameriških ASTM standardih.



Slika 4.2: Metoda suhega nasipavanja peska (Ishihara, 1996, str. 338)

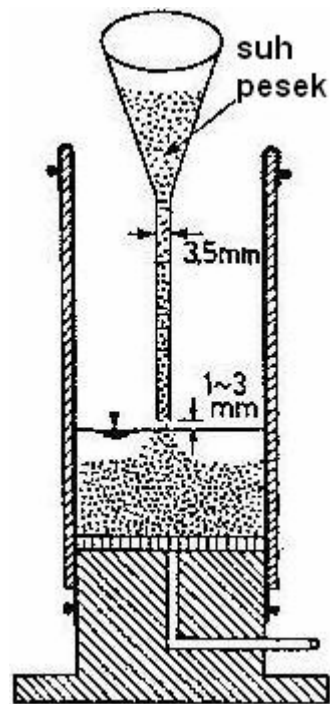
### 4.3 Sedimentacijska metoda

Ta metoda ima dve različni možnosti vgradnje. Prva možnost je, da v peči posušen pesek zmešamo z odzračeno vodo, da dobimo želeno vlažnost peska (idealna vlažnost naj bi znašala okrog 5%). Vlažen pesek razdelimo na 4 enake dele, ki jih skozi plastični lijak vgrajujemo v predhodno pripravljen kalup z napeto membrano. Pomembno je, da je vgradnja vlažnega peska v posamezni plasti brez padca ter s konstantno hitrostjo. Na ta način je zagotovljeno, da ne pride do kapilarnega dviga.

Pri drugi možnosti vsipamo suh pesek v vodo skozi lijak enakih dimenzij kot pri metodi suhega nasipavanja. Najprej v pripravljen kalup vlijemo vsaj 3 cm vode, saj moramo zagotoviti, da pesek pada skozi vodo 2–3 cm. Pomembno je, da se dno lijaka ne stika z gladino vode, saj se nam v tem primeru na spodnji strani lij zamaši in ni več možno zagotoviti kontinuiranosti nasipavanja. Pri tej metodi ni potrebno izdelovati vzorca po plasteh, vendar iz izkušenj, pridobljenih pri izdelavi vzorcev za potrebe te naloge, priporočam vgradnjo v 5 plasteh s preverjanjem višine, saj je na ta način zagotovljena enakomernejša zgoščenost vzorca. Večje zgoščenosti dosežemo s stresanjem celotnega kalupa.

Po končanem vnosu peska vzorec pokrijemo z zgornjim pokrovom ter zapremo z membrano. Na zgornji pokrov namestimo vakuum v velikosti 20–50 kPa ter odstranimo kalup. Po tej metodi lahko pripravimo vzorce z različnimi vrednostmi količnika por. Metoda omogoča izdelavo vzorcev večjih gostot in ni nikakor primerna za pripravo zelo rahlih vzorcev, pri katerih je pričakovati krčenje.

Tudi ta metoda je ena od možnih metod priprave vzorcev tako po ameriških ASTM standardih, kot tudi po japonskih standardih.



Slika 4.3: Sedimentacijska metoda (Ishihara, 1996, str. 338)

#### 4.4 Izdelovanje votlih vzorcev in pridobljene izkušnje

Pri izdelavi vzorcev za potrebe te naloge se je pojavil problem nasipanja vzorca, saj je vzorec za triosni torzijski test za votle vzorce v sredini votel. Vse zgoraj opisane metode pa predpostavljajo, da so vzorci polni, torej so namenjene pripravi vzorcev za navadni triosni aparat. Tako je bil s pomočjo iznajdljivosti in s prilagoditvami na omejitve votlega vzorca izdelan poseben pripomoček – lijak, skozi katerega je bilo mogoče nasipavanje vzorcev. Pripomoček je prikazan na spodnji sliki (Slika 4.4).

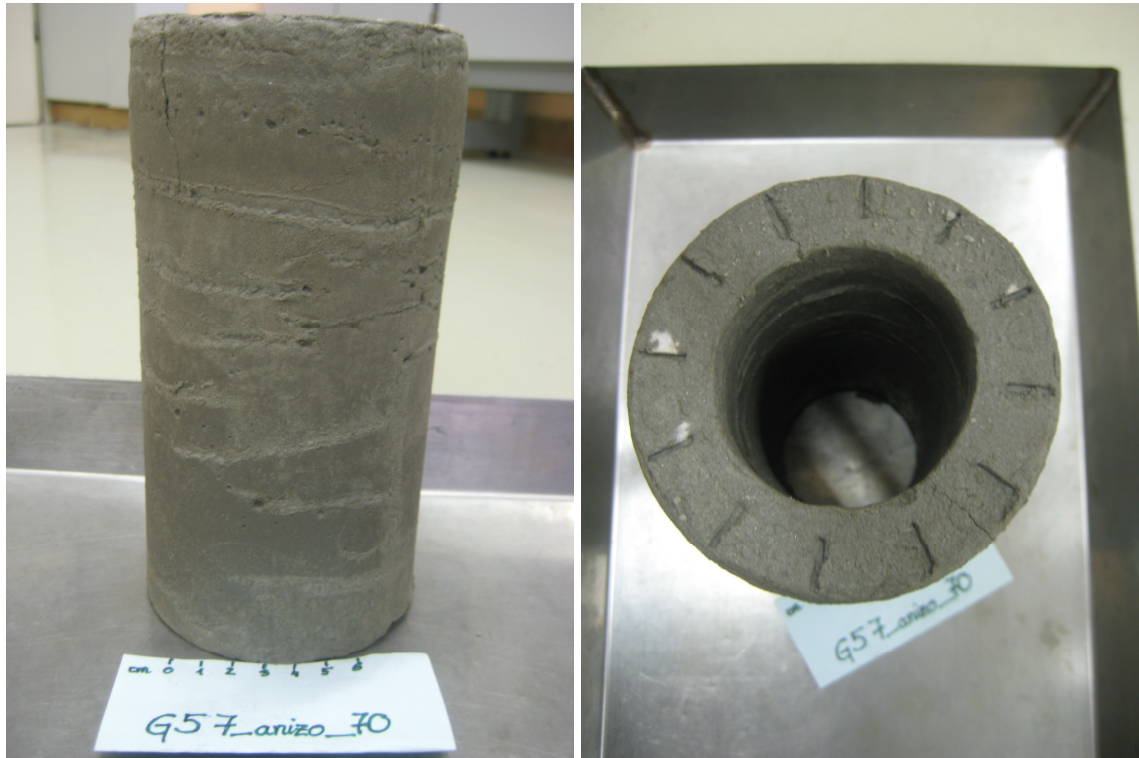


Slika 4.4: Sestavljanje peščenega votlega vzorca po metodi suhega nasipavanja

Kljub temu se je izkazalo, da je mogoče izdelovati vzorce le s pomočjo sedimentacijske metode ter metode suhega nasipavanja in zbivanja peska. Pri metodi vlažnega nasipavanja in zbivanja peska je zaradi ozke stene vzorca nemogoče vlažen pesek dvigovati ter spuščati med prsti, saj z roko ne moremo doseči spodnjega dela kalupa. Prav tako ni bilo mogoče uporabiti prve od možnosti sedimentacijske metode, saj je zaradi majhnega premera spodnje odprtine lijaka prišlo do zamašitve, tako vlažen pesek ni mogel zdrsniti skozi odprtino, kar je onemogočilo konstantno hitrost nasipavanja.

Ugotovljeno je bilo, da je naravno gostoto materialov iz zgornjih zemeljskih plasti mogoče doseči po obeh uporabljenih metodah dokaj enostavno, ker pa je metoda suhega nasipavanja in zbivanja nekoliko lažje izvedljiva, so bili taki vzorci narejeni po tej metodi (vzorci iz peska). Pri vzorcih, odvzetih v večjih globinah (nekje od globine 15m dalje), kjer so naravne gostote višje, oziroma pri vzorcih, kjer želimo preiskovati zelo goste vzorce, pa smo uporabili drugo možnost sedimentacijske metode, ki se je izkazala za primernejšo. Razlago lahko iščemo v dejstvu, da voda v tem primeru nastopa kot vezno sredstvo, ki zrna peska med seboj privlači, zato se ne morejo razpršiti in na ta način lahko enak volumen zapolnimo z večjo

maso. Pri metodi suhega nasipavanja in zbivanja pa se v porah nahaja zrak, ki zrn peska med seboj ne poveže, in tudi pri močnem zbivanju ter veliko vložene energije ne moremo doseči visokih gostot, saj se zrna peska med seboj le prerazporejajo, ne pa povežejo.



Slika 4.5: Primer votlega vzorca po preiskavi

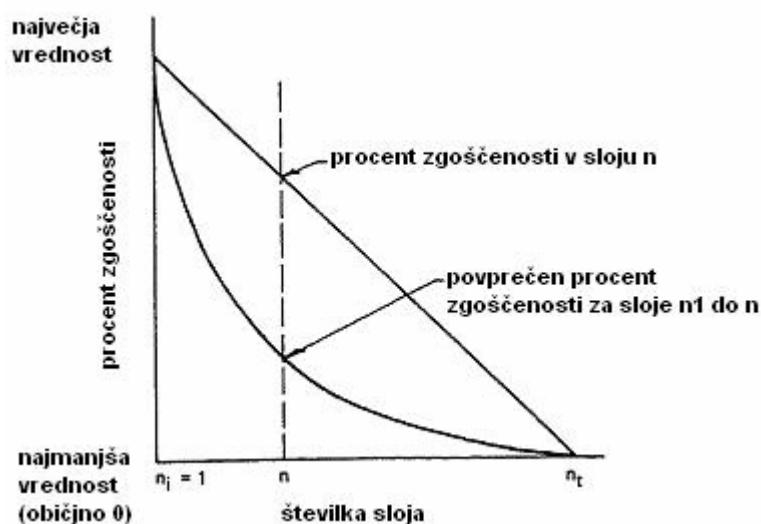
#### 4.5 Doseganje enakomerne zgoščenosti vzorcev

Kljub metodam, ki natančno predpisujejo postopke priprave vzorcev, se pri metodi suhega nasipavanja in zbivanja pojavlja vprašanje enakomerne zgoščenosti vzorca. Jasno je namreč, da, kljub enakim masam posameznih plasti in potencialno enaki vloženi energiji zbivanja v vsaki plasti, vzorec ni enakomerno zgoščen. Ob zbivanju zgornjih plasti se posredno dodatno zgoščujejo spodnje plasti, kar privede do nehomogenosti vzorca. V literaturi je tako zaslediti članke in priporočila, kako ta problem rešiti pri rahlih vzorcih. Za goste vzorce pa je predpostavljeno, da se posamezna plast ne more bolj zgostiti. V nadaljevanju bodo

predstavljeni izsledki raziskave, kako doseči enakomerno zgoščenost rahlih vzorcev, katere avtor je R. S. Ladd in je bila objavljena leta 1978.

Predstavljena metoda zagotavlja zgoščevanje vzorcev iz različnih peskov s širokim izborom gostot ter omogoča določitev optimalne ciklične trdnosti za izbran pesek. Postopek temelji na metodi zbivanja iz ameriških standardov ASTM. Vsako plast je potrebno skompaktirati na izbran procent zahtevane suhe teže vzorca, kar predstavlja nekakšno modifikacijo oz. dopolnitev ameriškega standarda ASTM Test for Moisture-Density Relation of Soils. Postopek se je začel izpopolnjevati v trenutku, ko je bilo ugotovljeno, da zgoščevanje rahlih vzorcev po plasteh privede do dodatnega zgoščevanja spodnjih plasti vzorca. Koncept celotnega postopka temelji na dejstvu, da spodnje sloje zgostimo manj, kot je načrtovana končna zgoščenost. Vsak višji sloj se bolj približuje končni načrtovani zgoščenosti, spodnji sloji pa se dodatno zgoščujejo ob zgoščanju višjih slojev. Nižjo zgoščenost postopek definira s procentom zgoščenosti (undercompaction)  $U_n$ . Ta se po višini linearno spreminja in je največji spodaj ter najmanjši oziroma ničen v zgornji plasti (Slika 4.6). Za prvo plast se procent zgoščenosti določi glede na to, koliko zgoščen vzorec hočemo imeti, za nadaljnje plasti pa se izračuna po sledeči formuli (4-1).

$$U_n = U_{n_i} - \left[ \frac{(U_{n_i} - U_{n_t})}{n_t - 1} \times (n - 1) \right] \quad (4-1)$$



Slika 4.6: Diagram spreminjanja procenta zgoščenosti po slojih (Ladd, 1978, str. 17)



V zgornji enačbi predstavlja  $U_n$  procent zgoščenosti izbranega sloja,  $U_{ni}$  izbran procent zgoščenosti prvega sloja,  $U_{nt}$  želen procent zgoščenosti zadnjega sloja,  $n$  število zgoščenih slojev ter  $n_t$  celotno število slojev vzorca. Na ta način je zagotovljena enakomerna zgoščenost vzorca po celotni višini. Zaradi različnih zgoščenosti slojev se spreminja tudi višina posameznih slojev. Ta se za posamezen sloj izračuna po spodnji enačbi.

$$h_n = \frac{h_t}{n_t} \left[ (n-1) + \left( 1 + \frac{U_n}{100} \right) \right] \quad (4-2)$$

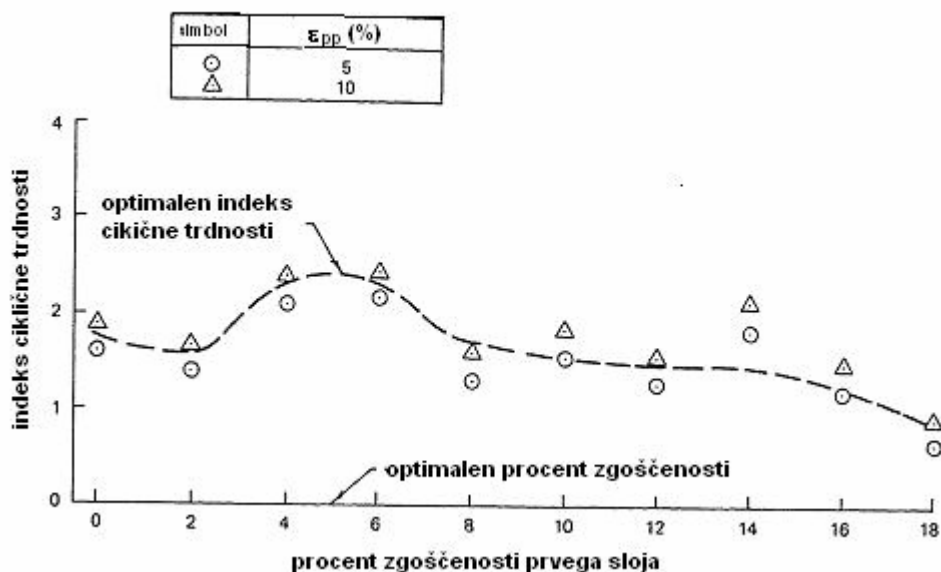
Simbol  $U_n$  predstavlja izračunan oz. za prvi sloj izbran procent zgoščenosti izbranega sloja,  $h_n$  je višina vzorca do vrha izbranega sloja,  $h_t$  višina celotnega vzorca,  $n$  število zgoščenih slojev ter  $n_t$  celotno število slojev vzorca.

Pojavi se vprašanje, kako izbrati pravo vrednost procenta zgoščenosti prvega (spodnjega) sloja. Sam avtor je izvedel serijo dinamičnih triosnih testov, na podlagi katerih je prikazal, kakšen vpliv ima izbira začetnega procenta zgoščenosti na obnašanje vzorcev pri cikličnem obremenjevanju ter posledično določitev mehanskih karakteristik materiala. Testi so bili opravljeni na pesku iz Montereyja z različnimi procenti zgoščenosti prvega sloja. Načeloma se te gibljejo med 0% za goste vzorce do 15% za že zelo rahle vzorce. Za pripravo zelo gostih vzorcev je priporočeno izbrati negativno vrednost procenta zgoščenosti prvega sloja, a se pojavlja vprašanje, kako bi bilo to mogoče doseči; priporočilo je zgolj teoretično. Avtor se je odločil za serijo 10 testov, pri katerih je spreminjal procent zgoščenosti prvega sloja za 2%, pri čemer je začel z 0% ter končal pri 18%. Večje zanimanje namenimo zaključkom dobljenim na podlagi opravljenih preiskav, ki so za lažjo predstavbo prikazani grafično.

Na diagramu indeksa ciklične trdnosti materiala v odvisnosti od izbranega procenta zgoščenosti prvega sloja (Slika 4.7) vidimo, da je za izbrani material optimalni izbrani procent zgoščenosti prvega sloja 5%, saj je pri tej vrednosti dosežen največji indeks ciklične trdnosti materiala. Za lažje razumevanje razjasnimo, kaj je indeks ciklične trdnosti materiala, ki ga označimo kot  $I_C$ . To je količnik med največjo vertikalno deformacijo (Peak to Peak Axial Strain;  $\epsilon_{pp}$ ) ter zmnožkom relativne gostote ( $Dr$ ) in napetostnega količnika (4-3). Največja vertikalna deformacija ( $\epsilon_{pp} = 10\%$ ) pomeni količnik med največjo vertikalno deformacijo v

vseh ciklih ( $N$ ) ter največjo vertikalno deformacijo v izbranih 10% vseh ciklov (izbrani kriterij napake).

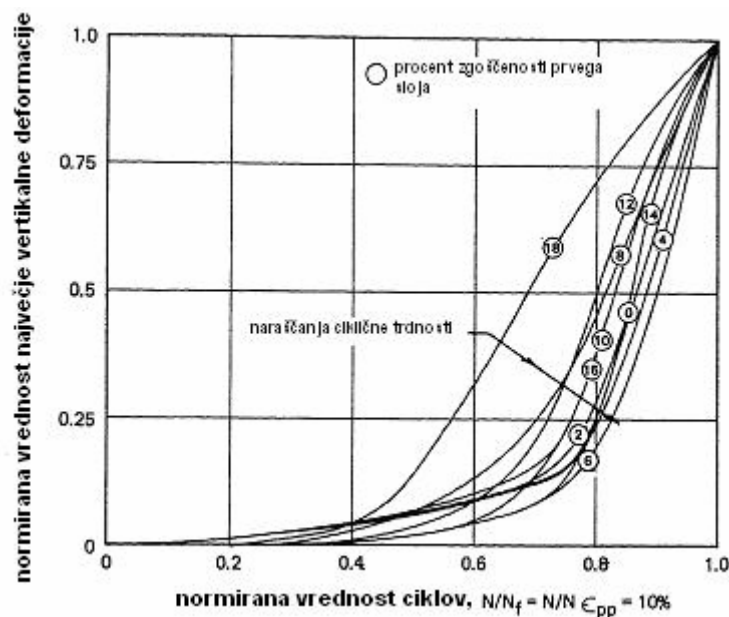
$$I_c = \frac{\varepsilon_{pp}}{D_r \times \left( \frac{\pm \sigma_d}{2\bar{\sigma}_{3c}} \right)} \quad (4-3)$$



Slika 4.7: Diagram indeksa ciklične trdnosti v odvisnosti od procenta zgoščenosti prvega sloja (Ladd, 1978, str. 19)

V nadaljevanju so ugotovili, da je izbrani procent zgoščenosti prvega sloja odvisen tudi od vrste materiala. Materiale so razdelili na tiste, ki so občutljivi na procent zgoščenosti, ter na tiste, ki so le deloma občutljivi na ta parameter. Pri slednjih ima izbira začetnega procenta zgoščenosti manjšo težo. Za obe vrsti materialov pa velja, da je vrednost optimalnega procenta zgoščenosti prvega sloja odvisna od indeksa ciklične trdnosti in jo odčitamo pri maksimalni vrednosti le-tega.

Obstaja pa tudi odvisnost med normiranim številom ciklov ter normirano največjo vertikalno deformacijo. Iz diagrama (Slika 4.8) je razvidno, da lahko v splošnem predpostavimo naraščanje ciklične trdnosti z večanjem procenta zgoščenosti prvega sloja. Iz grafov pa je moč razbrati tudi dejstvo, da postaja krivulja bolj in bolj konkavna, ko se izbrani procent zgoščenosti prvega sloja približuje optimalni vrednosti.



Slika 4.8: Diagram normirane deformacije v odvisnosti od normiranega števila ciklov (Ladd, 1978, str. 21)

Rezultati preiskav so uresničili željo po izdelavi vzorcev z želenimi lastnostmi minimalizirane segregacije delcev, zgoščevanja vzorcev iz različnih peskov s širokim izborom gostot ter omogočanjem določitve optimalne ciklične trdnosti za izbran pesek. Raziskava pa je podala tudi 5 možnosti izbire procenta zgoščenosti prvega sloja:

- a) s serijo testov določimo optimalno vrednost zgoščenosti prvega sloja vzorca na podlagi maksimalnega indeksa ciklične trdnosti;
- b) opazujemo obnašanje vzorca tekom dinamičnega obremenjevanja, pri čemer prekomerno vbočenje ali izbočenje na vrhu ali dnu vzorca pomeni neprimerno izbiro procenta zgoščenosti prvega sloja;
- c) opazujemo obnašanje vzorca med nekosolidiranim-nedreniranim testom, pri čemer neenakomerna vertikalna deformacija pomeni neprimerno izbiro procenta zgoščenosti prvega sloja;
- d) opazujemo strukturo vzorca, pri čemer pojav sataste strukture na vrhu ali dnu vzorca pomeni nepravilno izbiro procenta zgoščenosti prvega sloja;
- e) merimo suho težo potrebnega materiala za vzorec kot funkcijo njegove višine, pri čemer neenotnost suhe teže peska z njegovo višino pomeni nepravilno izbiro procenta zgoščenosti prvega sloja.

Pri pripravi vzorcev za potrebe te diplomske naloge smo se odločili, da želimo preizkušati goste vzorce, torej take, pri katerih je zgoščenost prvega sloja enaka zgoščenosti ostalih slojev. V tem primeru ni bilo potrebno izbirati procenta zgoščenosti na podlagi zgoraj navedenih kriterijev. Kljub vsemu smo tekom dinamičnih preiskav opazovali obnašanje vzorcev, da ni prišlo do prekomernega vbočenja ali izbočenja na vrhu ali dnu vzorca.

## 5 EKSPERIMENTALNO DELO

### 5.1 Vrste preiskav

Samo preiskovanje zemljin se začne že pri pripravi vzorca. Ta del je opisan v prejšnjem poglavju, zato mu na tem mestu ne bom posvečala večje pozornosti. Celotne preiskave so bile vodene po postopku, ki ga predpisuje japonski standard za izvajanje cikličnih torzijskih triosnih preiskav na votlih cilindričnih vzorcih. V splošnem lahko preiskave vodimo deformacijsko ali napetostno. Pri obeh vrstah vodenja preiskav se merijo zasuki oziroma pomiki, ki posledično pomenijo deformacije ter sile (vertikalne, torzijske), preko katerih se izračunajo napetosti. Pri deformacijsko vodenih preiskavah določamo pomike (največkrat so to vertikalni pomiki) oziroma zasuke, ki jih preko merilcev in ogrodja aparata prenašamo na vzorec in so skozi celoten potek preiskave konstantni. Na ta način dobimo deformacijske lastnosti zemljin, kot so elastični modul zemljin ( $E$ ), strižni modul ( $G$ ), vertikalne ali strižne deformacije ( $\varepsilon$ ,  $\gamma$ ), pri cikličnih preiskavah pa tudi procent dušenja ( $h$ ) ter različne energije ( $W$ ). Na nasprotni strani pa imamo napetostno vodene preiskave, za katere velja, da določimo napetost – vertikalno ali strižno (torzijsko), ki se preko merilcev in ogrodja aparata prenaša na vzorec in je skozi celotno preiskavo konstantna. Iz napetostno vodenih preiskav z merjenjem količin ter izračuni dobimo napetostne lastnosti zemljin, kot so vertikalne (osne) napetosti ( $\sigma_a$ ), glavne napetosti ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ), strižno napetost ( $\tau$ ), strižno deformacijo ( $\gamma$ ) ter različne energije ( $W$ ). Večinoma se ciklične deformacijske preiskave uporabljajo za določevanje deformacijskih lastnosti zemljin, medtem ko se ciklične napetostne preiskave uporabljajo za študij likvifikacije.

Poleg načina vodenja preiskav se pri zemljinah preiskave ločijo še glede na način konsolidacije vzorcev ter glede na stanje drenaž med samim obremenjevanjem vzorcev. Možna je izotropna ali anizotropna konsolidacija. Razlika je v načinu vzpostavljenega napetostnega stanja v celici med celotnim procesom konsolidacije, kjer se nahaja vzorec. Pri izotropni konsolidaciji je napetostno stanje v celici v vseh treh glavnih smereh enako, torej je vzorec enakomerno obremenjen tako v bočni kot tudi v vertikalni (osni) smeri. V primeru anizotropne konsolidacije je v celici vzpostavljeno anizotropno napetostno stanje, kar pomeni,

da se bočna napetost razlikuje od vertikalne napetosti. V splošnem to razliko podajamo z izbranim koeficientom anizotropne konsolidacije, ki ga izračunamo po enačbi (5-1), kjer pomeni  $K$  koeficient anizotropne konsolidacije,  $\sigma_{ac}$  vertikalno napetost ter  $\sigma_{rc}$  radialno napetost. Torej po začetnem izotropnem stanju, v katerem je bil vzorec saturiran, povečamo vertikalno napetost, da doseže želeno vrednost določenega koeficienta anizotropne konsolidacije. Nadalje po korakih povečujemo sočasno bočno in vertikalno napetost do predpisane končne vrednosti napetosti in pričnemo s konsolidacijskim postopkom.

$$K = \frac{\sigma_{ac}}{\sigma_{rc}} \quad (5-1)$$

Postopek obremenjevanja vzorca se lahko izvaja na dva načina, glede na stanje drenaž. Tako ločimo med dreniranimi in nedreniranimi preiskavami. Pri dreniranih preiskavah med celotnim obremenjevanjem vzorca pustimo drenaže odprte, da lahko voda iz vzorca prosto odteka in se posledično spreminja volumen vzorca. Za nedrenirane preiskave pa velja, da se drenaže med procesom obremenjevanja zaprejo, na ta način preprečimo izcejanje vode iz vzorca in se posledično v samem vzorcu porni tlak spremeni zaradi nespremenjenega volumna vzorca. Načeloma pri navadnih triosnih preiskavah velja, da iz rezultatov nedreniranih preiskav lahko izvednotimo trdnostne parametre zemljin, kot so nedrenirana strižna trdnost ( $c_u$ ), nedrenirani strižni modul ( $G_u$ ), strižno trdnost ( $c'$ ) in strižni kot zemljine ( $\varphi'$ ). Iz rezultatov dreniranih preiskav pa dobimo deformacijske parametre – kompresijski modul ( $K$ ) ter strižni modul zemljin ( $G$ ) iz katerih je mogoče preko enačb izvednotiti elastični modul ( $E$ ) ter Poissonovo število ( $\nu$ ). Pri preiskavah na votlih cilindričnih vzorcih pa tudi iz nedreniranih preiskav lahko preko znanih enačb izvednotimo deformacijske parametre v primeru , da preiskavo vodimo deformacijsko.

Pri izvajanju preiskav za potrebe te naloge so bile izbrane nedrenirane deformacijsko vodene preiskave na izotropno in anizotropno konsolidiranih vzorcih, ki jih predpisuje japonski standard (JGS 0543-2000) za ciklične torzijske triosne preiskave na votlih vzorcih. Čeprav v standardu za izvajanje cikličnih torzijskih triosnih preiskav na votlih vzorcih ni predvidene možnosti napetostno vodenih preiskav, je bilo nekaj le-teh izvedenih s pomočjo postopka, ki ga predpisuje japonski standard za izvajanje triosnih testov na votlih vzorcih, ter na podlagi

ameriškega standarda za napetostno vodene preiskave na polnih vzorcih v triosnih celicah z vertikalnim obremenjevanjem (ASTM D 5311 – 92 (2004)).

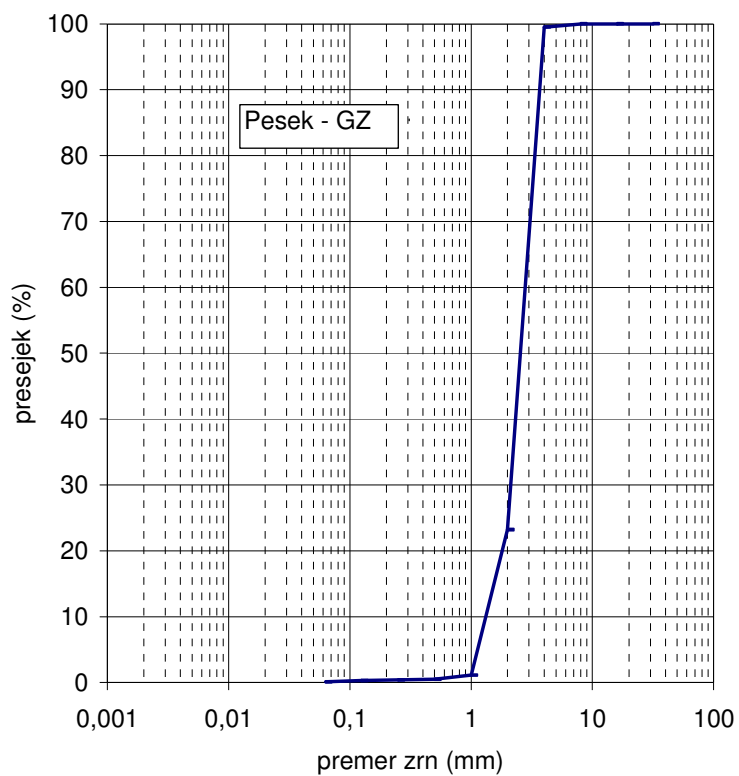
## 5.2 Osnovne lastnosti preiskovanega materiala

### 5.2.1 ENOZRAT PESEK

Za prvi, vzorčni, material, na katerem so bili izvedeni trije testi, je bil izbran enozrat pesek. V nadaljevanju je za ta material pri označevanju vzorcev uporabljena oznaka pesek. Poleg preiskovanja v torzijskem triosnem aparatu za votle vzorce sta bili izvedeni tudi osnovni preiskavi, sejalna analiza ter specifična masa. Iz sejalne krivulje (Slika 5.1) je razvidno, da gre za slabo granuliran material, z velikostjo zrn od 0,063 do 8 mm. Večina zrn je velikosti med 2 in 4 mm, zato lahko material klasificiramo kot enozrat pesek. Njegova specifična masa zrn znaša  $2,637 \text{ g/cm}^3$ . Ker je to testni material in ni bil odvzet v naravi, zanj ni moč določiti naravne vlažnosti. Iz mikroskopske slike (Slika 5.2) je razvidno, da so zrna zaobljena z nekaterimi delno ostrorobimi robovi. Dobljene osnovne lastnosti materiala so razvidne v preglednici (Preglednica 5.1).

Preglednica 5.1: Lastnosti enozrnatega peska

Enozrat pesek	
$d_{10}$	1,3mm
$d_{30}$	2,1mm
$d_{50}$	2,2mm
$d_{60}$	2,7mm
$C_u$	2,1
$C_k$	1,2
$\rho_s$	$2,637 \text{ g/cm}^3$



Slika 5.1: Sejalna krivulja enozrnatega peska



Slika 5.2: Mikroskopska slika zrn enozrnatega peska

### 5.2.2 PEŠČEN MELJ

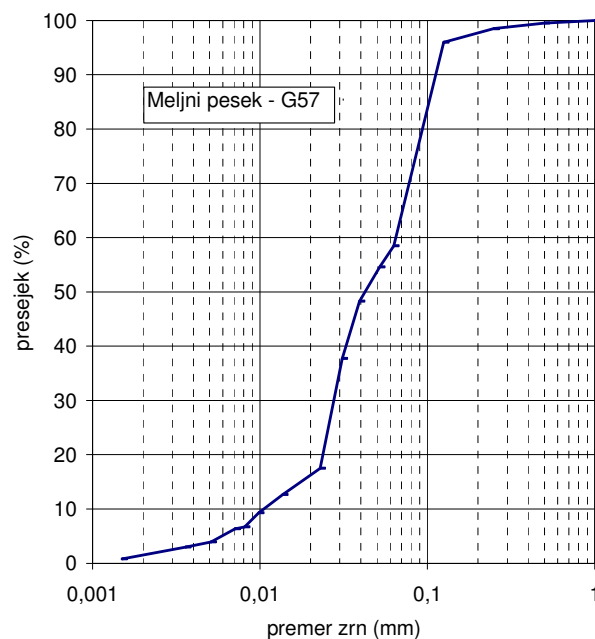
Drugi material, na katerem so bili izvedeni trije testi in s katerim je bilo mogoče dokončno potrditi resničnost predpostavljene trditve, je bil peščen melj odvzet v vrtini na globini 15,4–



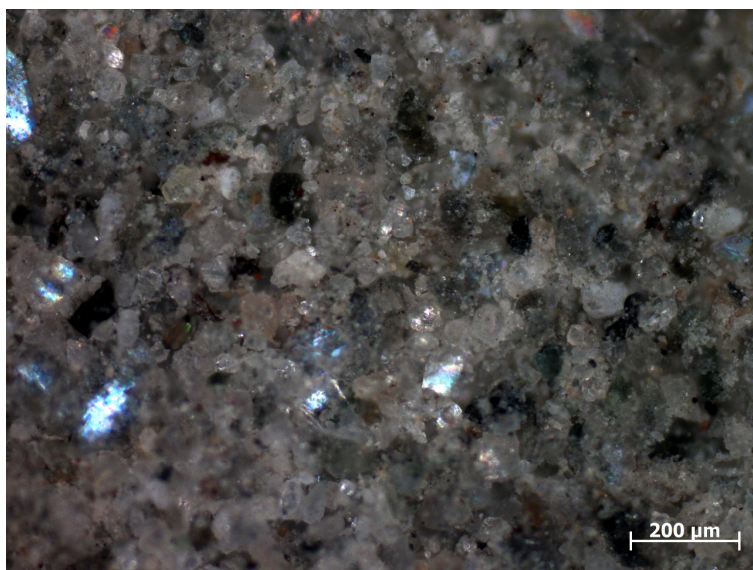
15,65 m. Material je bil vzet v naravi, zato je bilo mogoče izvesti tudi osnovne preiskave, kot so naravna vlažnost, suha in mokra prostorninska masa ter specifična masa. Kasneje je bila opravljena še preiskava za določitev sejalne krivulje materiala (Slika 5.3). Velikost zrn se giblje od 0,001 do 1,00 mm, večina pa se jih nahaja med 0,01 in 0,1 mm. Iz krivulje je razvidno, da je material dobro granuliran, torej ne vsebuje zrn pretežno ene dimenzije. Glede na sejalno krivuljo lahko material klasificiramo kot peščen melj. Osnovni podatki o preiskovanem materialu so zbrani v preglednici (Preglednica 5.2). Ob pregledu zrn pod mikroskopom (Slika 3.5) je bilo opaziti, da so ostroroba.

Preglednica 5.2: Lastnosti peščenega melja

Peščen melj	
$d_{10}$	0,010mm
$d_{30}$	0,027mm
$d_{50}$	0,041mm
$d_{60}$	0,062mm
$C_u$	6,2
$C_k$	1,1
$\rho$	1,914 g/cm <sup>3</sup>
$\rho_d$	1,545 g/cm <sup>3</sup>
$\rho_s$	2,762 g/cm <sup>3</sup>
$w$	23,6 %



Slika 5.3: Sejalna krivulja peščenega melja



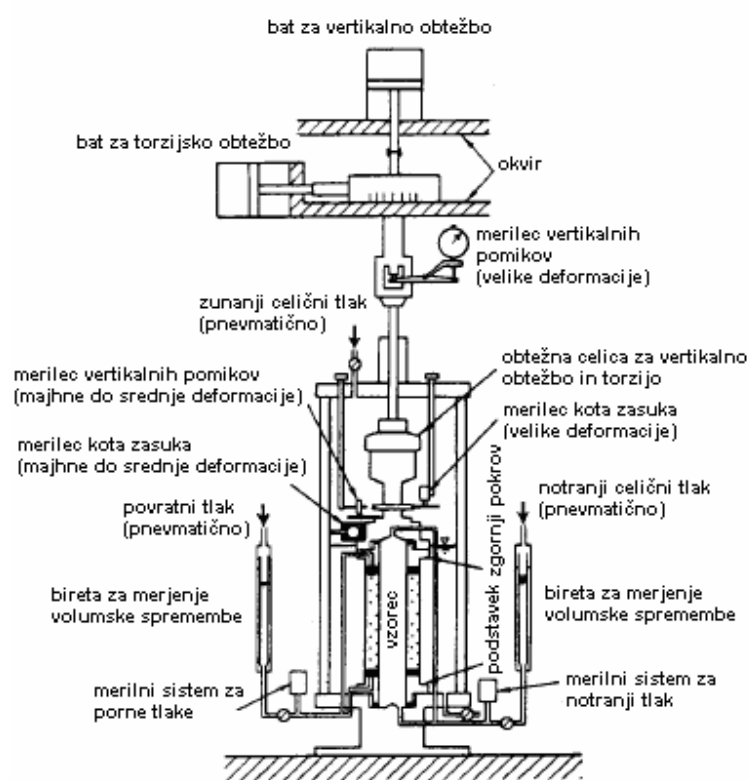
Slika 5.4: Mikroskopska slika zrn peščenega melja

### 5.3 Opis metode za deformacijsko in napetostno vodene torzijske triosne preiskave zasičenih votlih vzorcev

#### 5.3.1 ZAHTEVANE LASTNOSTI APARATA

V standardu je poleg natančno predpisanega postopka predpisana tudi potrebna oprema aparata, ki mora biti dovolj natančna ter ustrezno umerjena. Ker je aparat, na katerem so bile izvedene preiskave, natančneje opisan v poglavju *Torzijska triosna preiskava votlih vzorcev zemljin*, so na tem mestu navedene le glavne zahteve standarda. Ciklični torzijski triosni aparat je sestavljen iz triosne celice, opreme za merjenje in ustvarjanje notranjega, zunanjega in pornega tlaka ter sistema za zajem in shranjevanje podatkov o zunanjem in notranjem celičnem tlaku, pornem tlaku, torziji, vertikalni obremenitvi, zasuku, vertikalnem (osnem) pomiku ter volumski spremembi vzorca. Sam vzorec mora biti zaprt med zgornji pokrov in spodnji podstavek, na katerih sta spodnja ter zgornja drenaža, s strani pa ga oklepata notranja in zunanja membrana. Skozi celoten proces konsolidacije in obremenjevanja mora sistem za merjenje in kontroliranje celičnih tlakov ter pornega tlaka zagotavljati natančnost  $\pm 2 \text{ kN/m}^2$  za pritiske manjše od  $200 \text{ kN/m}^2$  ter  $\pm 1\%$  za pritiske enake ali večje od  $200 \text{ kN/m}^2$ . Prav tako mora biti zagotovljena  $\pm 0,02\%$  natančnost za merjenje vertikalnih pomikov vzorca ter  $\pm 0,05\%$  natančnost merjenja spremembe volumna vzorca. Pri deformacijsko vodenih preiskavah mora

biti zagotovljen interval strižnih deformacij med 0,001% in 0,1% za frekvence obremenjevanja med 0,05 in 1,0 Hz. Oblika obtežbene funkcije je lahko sinusna ali žagasta. Med obremenjevanjem vzorca mora biti zagotovljeno merjenje torzije z natančnostjo  $\pm 1\%$  dvojne amplitude ciklične torzije pri enojni amplitudi strižne deformacije večje od 0,01%. Za iste vrednosti enojne amplitude strižne deformacije mora biti zagotovljena natančnost merjenja kota rotacije oziroma zasuka  $\pm 1\%$  od magnitude dvojne amplitude strižne deformacije. Skozi celotno preiskavo mora biti zagotovljeno kontinuirano shranjevanje merjenih parametrov (predvsem torzije, kota zasuka in pomega pritiska).



Slika 5.5: Tipični torzijski triosni aparat za votle vzorce (JGS 0543-2000, str. 74)

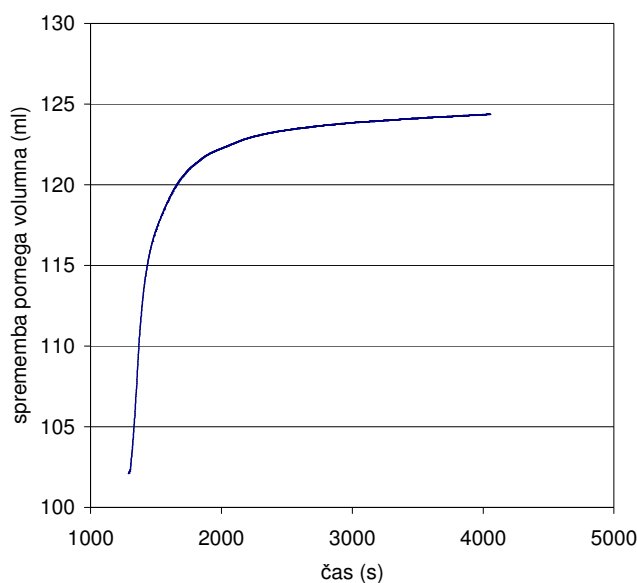
### 5.3.2 PREPLAVLJANJE VZORCA, B-PARAMETER TER POSTOPEK ZASIČEVANJA

Uspešno zgrajen vzorec želene gostote je zaprt v celici, ki jo zapolnimo z vodo. Nato sledi preplavljanje vzorca. Za hitrejšo zasičevanje vzorca z vodo vzorec najprej preplavimo z ogljikovim dioksidom ( $\text{CO}_2$ ). V celici vzpostavimo izotropno napetostno stanje pri 10–20 kPa ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ) ter na spodnjo stran vzorca priključimo  $\text{CO}_2$  pod pritiskom manjšim od 10 kPa za

približno 30 min. Pomembno je, da odpremo tudi zgornjo drenažo, da lahko odvečni CO<sub>2</sub> izpuhti iz vzorca in tako v njem ne povzroči pornega pritiska. Nato spodnjo drenažo priklopimo na odzračeno vodo, s katero bomo preplavili vzorec. Tudi pri tem koraku je pomembno, da je zgornja drenaža odprta. Na ta način se v vzorcu ne pojavijo porni pritiski, voda počasi preplavlja vzorec in ko priteče skozi zgornjo drenažo, je vzorec popolnoma preplavljen. Sledi določevanje stopnje saturacije ali t.i. določevanje B-parametra. Sam standard predpisuje merjenje B-parametra pred samo konsolidacijo vzorca ter po njej, če je to potrebno, pri čemer mora biti zadoščeno pogoju  $B \geq 0,96$ . Iz izkušenj je znano, da ni dovolj le eno merjenje B-parametra, saj le redkokdaj dosežemo predpisano vrednost že v prvem koraku. Zato je potrebno sočasno z določevanjem B-parametra izvajati še postopek zasičevanja oziroma postopek dviganja pornega pritiska. Torej za določanje B-parametra najprej povečamo notranji in zunanji tlak (v nadaljevanju je zanj uporabljen izraz celična tlaka) ter vertikalni pritisk za izbrano vrednost. Navadno znaša ta vrednost med 50 in 100 kPa, odvisno od zasičenosti vzorca. Pri slabo zasičenih vzorcih povečujemo za 50 kPa, pri že dobro zasičenih pa za 100 kPa. Celične tlake in vertikalni pritisk povečujemo ob zaprtih drenažah. Ko celična tlaka in vertikalni pritisk dosežejo želeno vrednost, počakamo, da se porni tlak umiri in izmerimo vrednost. Nato izračunamo B-parameter, ki je definiran kot količnik med spremembo pornega tlaka ( $\Delta u$  v kN/m<sup>2</sup>) in spremembo celične napetosti ( $\Delta \sigma$  v kN/m<sup>2</sup>) (5-2).

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (5-2)$$

Če je izračunana vrednost večja ali enaka 0,96, lahko nadaljujemo s konsolidacijo, v nasprotnem primeru pa izpeljemo postopek zasičevanja. To pomeni, da obdržimo celična tlaka in vertikalni pritisk, pri katerih smo določili B-parameter, porni tlak pa povečamo na vrednost, ki je za 10 kPa nižja od celičnih tlakov oziroma vertikalnega pritiska. Torej je vrednost efektivne napetosti v vzorcu 10 kPa. Tako napetostno stanje pustimo toliko časa, da se volumska sprememba v vzorcu umiri (Slika 5.6). Potem zopet ponovimo postopek določevanja B-parametra. Kot je že bilo omenjeno, postopka ponavljamo toliko časa, da B-parameter doseže predpisano vrednost. Po zadnjem postopku določanja B-parametra, ko je dosežena predpisana vrednost, pričnemo s konsolidacijo.

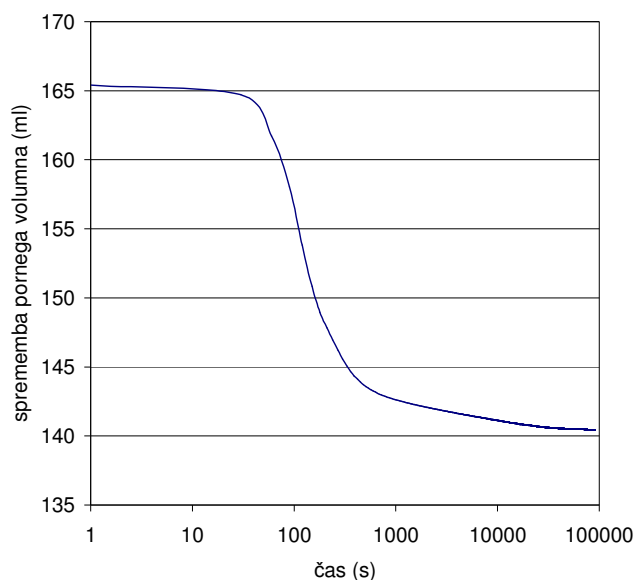


Slika 5.6: Diagram ene od stopenj zasičevanja

### 5.3.3 KONSOLIDACIJA

Pri tej fazi preiskovanja najprej dvignemo celična tlaka ter vertikalni pritisk za vrednost, ki bo omogočila vzpostavitev želenega efektivnega napetostnega stanja. Nato odpremo drenažo za povratni porni tlak in čakamo toliko časa, da se volumska sprememba vzorca umiri oziroma se krivulja spremembe volumna ( $\Delta V$ ) v odvisnosti od časa ( $t$ ) v logaritemski skali zravna (Slika 5.7). V tem primeru je končana primarna konsolidacija, sekundarna pa še poteka. Ker na same rezultate preiskave končana sekundarna konsolidacija nima tolikšnega vpliva kot primarna, lahko konsolidacijo zaključimo med sekundarno konsolidacijo. Konsolidacija poteka v dreniranih pogojih, torej se pod doseženimi obremenitvami voda izceja iz vzorca. Zgornji opisani pogoji veljajo za izotropno konsolidacijo. Pri anizotropni konsolidaciji so vsi pogoji in postopek enaki, le da vertikalni pritisk dvignemo za večjo razliko kot celična pritiska in tako dosežemo predpisano vrednost koeficienta anizotropne konsolidacije. Anizotropno konsolidacijo lahko vzpostavimo tudi z različnima vrednostma notranjega in zunanega celičnega tlaka ter vrednostjo vertikalnega pritiska, ki je enaka zunanemu ali notranjemu celičnemu tlaku. Tak način anizotropne konsolidacije je bil uporabljen pri preiskavah za potrebe te naloge. Po končani konsolidaciji je potrebno izmeriti spremembo višine ( $\Delta H_c$ ) ter volumna ( $\Delta V_c$ ) vzorca, saj je s temi podatki mogoče izračunati doseženo suho

gostoto vzorca ( $\rho_{dc}$ ). Na tej točki je končano pripravljjanje vzorca ter vzpostavljanje napetostnih pogojev.



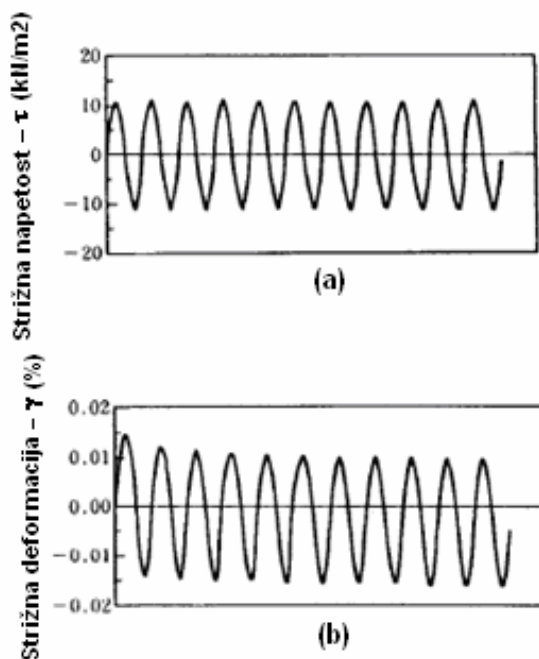
Slika 5.7: Diagram konsolidacije

## 5.4 Deformacijsko vodene torzijske triosne preiskave zasičenih vzorcev

### 5.4.1 POSTOPEK OBREMENJEVANJA

Napetostno in deformacijsko vodene preiskave se ločijo v stopnji obremenjevanja, ki po več korakih privede do presežene nosilnosti preiskovane zemljine ter posledično do prestriga vzorca. Za nedrenirano preiskavo najprej zapremo drenaže. Nato obremenimo vzorec z 11 cikli obtežbe sinusne ali žagaste oblike s konstantno amplitudo, ki jo predstavlja rotacija (Slika 5.8). Ta v prvi stopnji znaša 0,001% ali manj enojne amplitude strižne deformacije ( $\gamma_{SA}$ ). Preko strižne deformacije ter velikosti vzorca izračunamo po enačbi podani v standardu zasuk, ki predstavlja obtežbo (5-3). Frekvenca obteževanja se lahko giblje med 0,05 in 1,0 Hz. Med obteževanjem je potrebno meriti in shranjevati podatke o zasuku ( $\theta$ ), torziji ( $M_T$ ) ter pornem tlaku ( $u$ ) pri nedreniranih preiskavah. Po končanem obremenjevanju izmerimo spremembo v višini ( $\Delta H_i$ ) in volumnu ( $\Delta V_i$ ) vzorca ter odpremo drenaže pri nedreniranih preiskavah. Počakamo, da se vzorec ponovno skonsolidira, in še enkrat izmerimo spremembo

v višini in volumnu vzorca. Celoten postopek obremenjevanja ponovimo, torej zapremo drenaže za nedrenirano preiskavo ter vzorec obremenimo preko zasuka. Vrednost tega se v drugi stopnji poveča in znaša dvakratnik zasuka prve stopnje, torej  $\theta_2 = 2 * \theta_1$ . Ponovno shranimo potrebne podatke, skonsolidiramo vzorec ter po že poznanem sistemu ponovno obremenimo vzorec. Preiskavo vodimo, dokler je še mogoče povečevati zasuk za dvakratnik prejšnjega zasuka (nekje do 0,1% enojne amplitude strižne deformacije) oziroma dokler ni presežena nosilnost preiskovane zemljine. V razpredelnici so prikazani potrebni zasuki (obremenitve) izračunani ob idealni velikosti vzorca ( $H = 200$  mm,  $D_o = 100$  mm,  $D_i = 60$  mm) po končani konsolidaciji za 10 stopenj. Po končanem preiskovanju vzorec posušimo in izmerimo njegovo suho maso ( $m_s$ ).



Slika 5.8: Sinusna funkcija obremenjevanja preko strižne deformacije (a) in sinusni odziv izmerjene strižne napetosti (b) (JGS 0543-2000, str. 77)

$$\Delta\theta = \frac{4 * H_i * \gamma_{SA}}{100 * (r_{on} + r_{in})} \quad (5-3)$$

V zgornji enačbi (5-3) in sledeči preglednici (Preglednica 5.3) predstavlja  $\Delta\theta$  dvojno amplitudo zasuka vzorca, medtem ko  $\theta$  predstavlja enojno amplitudo tega zasuka.

Preglednica 5.3: Potrebni zasuki za izbrane strižne deformacije

Stopnja	$\gamma_{SA}$ (%)	$\Delta\theta$ (rad)	$\theta$ (°)
1	0,001	0,0001	0,0029
2	0,002	0,0002	0,0057
3	0,004	0,0004	0,0115
4	0,008	0,0008	0,0229
5	0,016	0,0016	0,0458
6	0,032	0,0032	0,0917
7	0,064	0,0064	0,1834
8	0,128	0,0128	0,3668
9	0,256	0,0256	0,7336
10	0,512	0,0512	1,4672

#### 5.4.2 OBDELAVA REZULTATOV IN POROČILO PREISKAVE

Kljub končanemu postopku preiskovanja se inženirsko delo na tej točki še začne z obdelavo podatkov, računanjem potrebnih količin, komentiranjem in argumentiranjem dobljenih rezultatov, njihovo predstavitvijo v grafični obliki ter izdelovanjem poročila preiskave. Nekatero navedene dejavnosti so podane v standardu in tako upoštevane tudi v tej nalogi. Prvotno moramo poznati maso suhega vzorca ( $m_s$ ), torej suho maso zemljine, ki smo jo vgradili. Pred pričetkom konsolidacije izračunamo novi volumen ( $V$  v  $\text{cm}^3$ ), višino ( $H$  v cm), zunanji in notranji premer vzorca ( $D_o$ ,  $D_i$  v cm) ter njegovo volumsko in vertikalno deformacijo ( $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_a$ ) po enačbah od (5-4) do (5-9).

$$V_0 = V_i - \Delta V_i \quad (5-4)$$

$$H_0 = H_i - \Delta H_i \quad (5-5)$$

$$D_{o0} = D_{oi} \times \sqrt{(1 - \varepsilon_{vi}) / (1 - \varepsilon_{ai})} \quad (5-6)$$

$$D_{i0} = D_{ii} \times \sqrt{(1 - \varepsilon_{vi}) / (1 - \varepsilon_{ai})} \quad (5-7)$$

$$\varepsilon_{vi} = \frac{\Delta V_i}{V_i} \quad (5-8)$$

$$\varepsilon_{ai} = \frac{\Delta H_i}{H_i} \quad (5-9)$$

V zgornjih enačbah so z indeksom  $i$  označene začetne vrednosti, z indeksom  $0$  vrednosti pred konsolidacijo, simbol  $\Delta$  pa predstavlja spremembo med začetnimi vrednostmi ter vrednostmi



pred konsolidacijo. Po fazi konsolidacije ponovno izračunamo novi volumen, višino, ploščino preseka, zunanji in notranji premer vzorca ter njegovo suho gostoto po konsolidaciji. Vse količine, razen suhe gostote ( $\rho_{dc}$  v  $\text{g/cm}^3$ ) ter preseka vzorca ( $A_c$  v  $\text{cm}^2$ ), izračunamo s pomočjo znanih enačb. Enačbi za neznan količini sta sledeči.

$$A_c = \frac{V_c}{H_c} \quad (5-10)$$

$$\rho_{dc} = \frac{m_s}{V_c} \quad (5-11)$$

Med samim obremenjevanjem po vsaki stopnji izračunamo vrednosti istih količin, kot smo jih izračunali po konsolidaciji razen suhe gostote. Zaradi pravilnega izračunavanja vrednostih količin, pa so na tem mestu ponovno zapisane enačbe od (5-12) do (5-18) s pravimi oznakami, pri čemer pomeni indeks  $n$  vrednost na začetku posamezne stopnje obremenjevanja, sprememba pa je merjena med koncem konsolidacije ter začetkom posamezne stopnje obremenjevanja.

$$V_n = V_c - \Delta V_n \quad (5-12)$$

$$H_n = H_c - \Delta H_n \quad (5-13)$$

$$D_{on} = D_{oc} \times \sqrt{(1 - \varepsilon_{vn}) / (1 - \varepsilon_{an})} \quad (5-14)$$

$$D_{in} = D_{ic} \times \sqrt{(1 - \varepsilon_{vn}) / (1 - \varepsilon_{an})} \quad (5-15)$$

$$\varepsilon_{vn} = \frac{\Delta V_n}{V_c} \quad (5-16)$$

$$\varepsilon_{an} = \frac{\Delta H_n}{H_c} \quad (5-17)$$

$$A_n = \frac{V_n}{H_n} \quad (5-18)$$

Poleg količin, ki se nanašajo na obliko in deformacijo vzorca, pa po končanem obremenjevanju izračunamo tudi deformacijske količine – enojno amplitudo ciklične strižne trdnosti ( $\tau_d$  v  $\text{kN/m}^2$ ) in strižno deformacijo ( $\gamma_{SA}$  v %), strižni modul ( $G_{eq}$  v  $\text{MN/m}^2$ ) ter elastično energijo ( $W$  v  $\text{Ncm}$ ) za vsak cikel posebej in procent dušenja ( $h$  v %) v petem ter desetem ciklu po enačbah od (5-19) do (5-23).

$$\tau_d = \frac{T_R + T_L}{2\pi(r_{on}^2 + r_{in}^2)(r_{on} - r_{in})} \times 10 \quad (5-19)$$

$$\gamma_{SA} = \frac{\Delta\theta(r_{on} + r_{in})}{4H_n} \times 100 \quad (5-20)$$

$$G_{eq} = \frac{\tau_d}{\gamma_{SA}} \times \frac{1}{10} \quad (5-21)$$

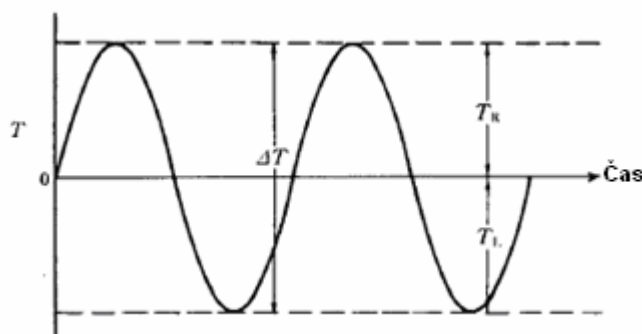
$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \times 100 \quad (5-22)$$

$$W = \frac{(T_R + T_L)\Delta\theta}{4} \quad (5-23)$$

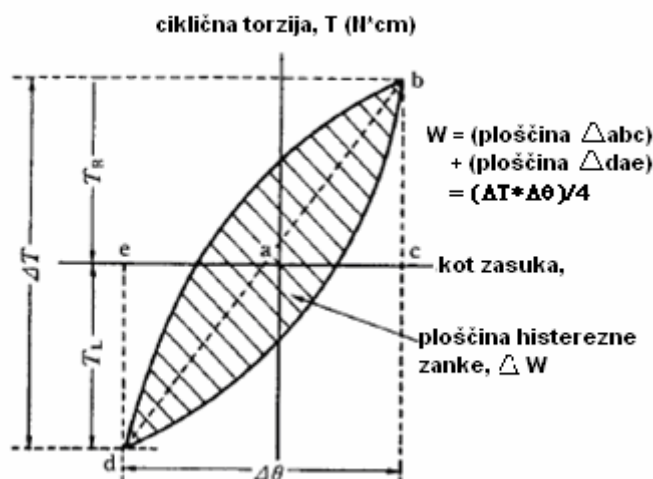
V zgornjih enačbah predstavljata  $T_R$  in  $T_L$  enojne amplitude torzije (v Ncm) v smeri urinega kazalca in v nasprotni smeri, pri čemer v enačbi uporabljamo pozitivni vrednosti (Slika 5.9);  $r_{on}$  in  $r_{oi}$  sta radija vzorca (v cm) pred stopnjo obremenjevanja in ju izračunamo po spodnjih enačbah (5-24) in (5-25);  $\Delta W$  pomeni energijo dušenja (v Ncm) v enem ciklu in je definirana kot ploščina histerezne zanke diagrama torzije v odvisnosti od kota zasuka  $T(\Delta\theta)$  (Slika 5.10).

$$r_{on} = \frac{D_{on}}{2} \quad (5-24)$$

$$r_{in} = \frac{D_{in}}{2} \quad (5-25)$$



Slika 5.9: Prikaz pozitivne in negativna amplitude torzije (JGS 0543-2000, str. 75)



Slika 5.10: Histerezna zanka enega cikla obremenitve (JGS 0543-2000, str. 79)

Po potrebi izračunamo še količnik por ( $e_c$ ), relativno gostoto vzorca ( $D_{rc}$  v %) po konsolidaciji ter količnik por vzorca ( $e_n$ ) pred začetkom vsake stopnje obremenjevanja (5-26), (5-27) in (5-28). V splošnem bi morala biti količnika por po konsolidaciji ter pred začetkom vsake stopnje obremenjevanja enaki oziroma zelo podobni vrednosti, saj predstavlja sprememba volumna majhno vrednost v primerjavi s količnikom gostote ter uporabljene mase zemljine.

$$e_c = \frac{V_c \rho_s}{m_s} - 1 \quad (5-26)$$

$$D_{rc} = \frac{e_{\max} - e_c}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad (5-27)$$

$$e_n = \frac{V_n \rho_s}{m_s} - 1 \quad (5-28)$$

V zgornjih enačbah pomeni  $\rho_s$  (v  $\text{g/cm}^3$ ) specifično težo zrn zemljine pri pripravi vzorca,  $e_{\max}$  količnik por vzorca ocenjen z maksimalno gostoto vzorca ter  $e_{\min}$  količnik por vzorca ocenjen z minimalno gostoto vzorca.

Poročilo o preiskavi po standardu vsebuje:

- metodo, po kateri je bil vzorec pripravljen,
- velikost vzorca pred konsolidacijo,
- vrednost končnega B-parametra z metodo njegovega določanja,
- spremembo višine in volumna vzorca med konsolidacijo,
- suho maso ter suho gostoto vzorca po konsolidaciji,

- vrednosti porednega, vertikalnega in celičnih tlakov po končani konsolidaciji,
- efektivne vertikalne napetosti ter efektivne bočne napetosti po končani konsolidaciji z njunim količnikom,
- frekvenco obremenjevanja, obliko valov obremenitve in položaj drenaž med obremenjevanjem,
- način merjenja torzije in kota zasuka med obremenjevanjem,
- velikost vzorca pred vsako stopnjo obremenjevanja,
- grafični prikaz spreminjanja kota zasuka in torzije s časom med vsako stopnjo obremenjevanja,
- grafični prikaz histerezne zanke petega in desetega cikla vsake stopnje obremenjevanja,
- vrednosti strižnega modula in procenta dušenja v odnosu z enojno amplitudo ciklične strižne deformacije za peti in deseti cikel vsake stopnje obremenjevanja,
- grafični prikaz strižnega modula in procenta dušenja v odnosu z logaritmom vrednosti enojne amplitude strižne trdnosti za peti in deseti cikel vsake stopnje obremenjevanja,
- zapis kakršnih koli sprememb ali drugače izvedenih postopkov, ki niso predpisani v standardu, ter
- zapis kakršnih koli nenavadnih pogojev.

Primer izpolnjenega poročila o preiskavi je prikazan v nadaljevanju (Slika 5.11), vsa poročila pa so priložena tej nalogi kot priloge (Priloga A).

## POROČILO DINAMIČNE TORZIJSKE TRIOSNE PREISKAVE

**Vzorec - G-57\_izo**  
**Material: meljni pesek**

**datum: 27.1.2010**

Priprava: sedimentacijska metoda

Vzorec pred konsolidacijo:

$H_0 = 191,74$  mm  
 $V_0 = 980177$  mm<sup>3</sup>  
 $A_0 = 5112,01$  mm<sup>2</sup>  
 $D_{o0} = 100,85$  mm  
 $D_{i0} = 60,51$  mm

B-parameter in metoda določevanja:

$B = 0,974$

Določen po standardu JGS 0543-2000.

Spremembe med konsolidacijo:

$\Delta H_c = 3,48$  mm  
 $\Delta V_c = 24973$  mm<sup>3</sup>

Suha masa in gostota vzorca po konsolidaciji:

$m_s = 1353,0$  g  
 $\rho_{dc} = 1,416$  g/cm<sup>3</sup>  
 $\rho_{zrn} = 2,762$  g/cm<sup>3</sup>

Napetosti po končani konsolidaciji:

$\sigma_{ac} = 509,04$  kPa  
 $\sigma_{oc} = 510,03$  kPa  
 $\sigma_{ic} = 510,06$  kPa  
 $u_c = 409,8$  kPa

Efektivne napetosti po končani konsolidaciji:

$\sigma'_{ac} = 99,24$  kPa  
 $\sigma'_{oc} = 100,23$  kPa  
 $\sigma'_{ic} = 100,26$  kPa  
 $K = 0,99$  koeficient anizotropne konsolidacije

Oblika valov, frekvenca obremenjevanja in drenaže:

val: sinusna oblika  
drenaže: nedrenirana preiskava  
 $v = 1,0$  Hz

Metoda merjenja torzije in kota zasuka:

torzija: merjena na zunanjem delu bata  
kot zasuka: merjen z notranjim merilcem

Velikost vzorca pred vsako stopnjo obremenjevanja:

stopnja	H (mm)	V (mm <sup>3</sup> )	A (mm <sup>2</sup> )	D <sub>o</sub> (mm)	D <sub>i</sub> (mm)	$\rho_{dc}$ (g/cm <sup>3</sup> )	e
1	188,26	955204	5073,85	100,47	60,28	1,416	0,9499
2	188,25	955121	5073,68	100,47	60,28	1,417	0,9498
3	188,25	955066	5073,39	100,46	60,28	1,417	0,9497
4	188,25	955003	5073,06	100,46	60,28	1,417	0,9495
5	188,24	954891	5072,73	100,46	60,28	1,417	0,9493
6	188,24	954606	5071,22	100,44	60,27	1,417	0,9487
7	188,24	954050	5068,26	100,41	60,25	1,418	0,9476
8	188,20	953654	5067,24	100,40	60,24	1,419	0,9468
9	188,00	951651	5061,97	100,35	60,21	1,422	0,9427
10							

Strižni modul in procent dušenja v 5 in 10 ciklu:

stopnja	$\gamma_{sa}$ (%)	$G_{eq,5}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_5$ (%)	$G_{eq,10}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_{10}$ (%)
1	0,005254	158,15	19,74	156,38	20,75
2	0,005644	146,55	20,94	146,35	22,62
3	0,006227	137,37	18,81	136,30	19,46
4	0,009341	107,68	16,20	106,97	15,80
5	0,022282	67,44	12,61	67,44	12,04
6	0,043196	47,72	11,43	47,40	10,84
7	0,085199	32,39	11,34	31,74	10,83
8	0,168861	19,01	15,62	18,05	14,93
9	0,335473	10,43	15,49	9,64	14,99
10					

Slika 5.11: Poročilo o dinamični torzijski triosni preiskavi votlega vzorca

### 5.4.3 REZULTATI

Po predstavljenem postopku deformacijsko vodenih preiskav je bilo opravljenih šest preiskav na vzorcih iz enozrnatega peska in peščenega melja. Iz vsakega materiala so bili pripravljene po trije vzorci skonsolidirani na različne začetne efektivne napetosti v obročni smeri, dobljene s spreminjanjem notranjega tlaka (parametrična študija). Na ta način se je preverjala resničnost začetne hipoteze.

Vzorci iz enozrnatega peska so označeni z oznako *Pesek – GZ* ter zaporednimi števkami od 1 do 3. Prvi vzorec je bil skonsolidiran na začetno efektivno napetost 100 kPa v obročni smeri, pri drugem je vrednost znašala 160 kPa ter pri tretjem 40 kPa. Vsi trije vzorci so bili narejeni po metodi suhega nasipavanja z zbijanjem, ki je najprimernejša metoda za tako velikost zrn. Res je, da s to metodo ne dobimo zelo gostih vzorcev, vendar pri slabo zrnatem materialu težko dosežemo velike zgoščenosti že zaradi same strukture materiala, ki nima manjših zrn, da bi zapolnila praznine nastale med večjimi zrn. Pri izbranem materialu pa dodatno oviro predstavljajo še velika zrna. Gostota suhega vzorca takoj po nasutju je znašala  $1,650 \text{ g/cm}^3$  pri vseh treh vzorcih.

Vzorci pripravljene iz peščenega melja nosijo oznako *Peščen melj G57* ter zaporedno številko od 1 do 3. Prvi vzorec je bil skonsolidirana na izotropno napetostno stanje pri efektivni napetosti v obročni smeri 100 kPa, drugi vzorec je bil anizotropno skonsolidiran na vrednost efektivne napetosti v obročni smeri 70 kPa, pri tretjem vzorcu pa je ta znašala 40 kPa. Vsi trije vzorci so bili pripravljene po sedimentacijski metodi, saj je na tak način moč doseči visoke zgoščenosti materiala. Vzrok za izbiro te metode je tudi v sami sestavi materiala, ki ima zelo majhna zrna. Ta bi se pri metodi suhega nasipavanja prašila in jih ne bi bilo mogoče zbiti skupaj. Pri nasipavanju v vodo pa se zrna počasi usedajo in povežejo skupaj. Kljub vsemu ni bila dosežena naravna prostorninska masa materiala, saj se material v naravi nahaja na globini pod 15 m, kar pomeni, da je močno zgoščen. Tako je suha gostota vzorcev takoj po nasutju znašala med  $1,380$  in  $1,415 \text{ g/cm}^3$ .

V preglednici (Preglednica 5.4) so zbrane začetne osnovne lastnosti vzorcev ter konsolidacijske napetosti za vse vzorce. Celotno poročilo preiskav se nahaja v prilogah

(Priloga A), kjer je mogoče razbrati tudi spreminjanje geometrijskih lastnosti vzorcev med preiskavami.

Preglednica 5.4: Lastnosti vzorcev pred preiskovanjem

Vzorec	Pesek – GZ1	Pesek – GZ2	Pesek – GZ3	Peščen melj G57-1	Peščen melj G57-2	Peščen melj G57-3
$H_i$ (mm)	203	200	201	195	196	199
$D_{ii}$ (mm)	60	60	60	60	60	60
$D_{oi}$ (mm)	100	100	100	100	100	100
$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,677	1,677	1,740	1,416	1,457	1,472
$e_c$ (-)	0,5724	0,5722	0,5156	0,9499	0,8952	0,8761
$\sigma_{ac}$ (kPa)	350	450	450	510	515	545
$\sigma_{oc}$ (kPa)	350	450	450	510	510	540
$\sigma_{ic}$ (kPa)	350	410	490	510	530	580
$\sigma'_{\theta c}$ (kPa)	100	160	40	100	70	40
$u_c$ (kPa)	250	350	350	410	410	440

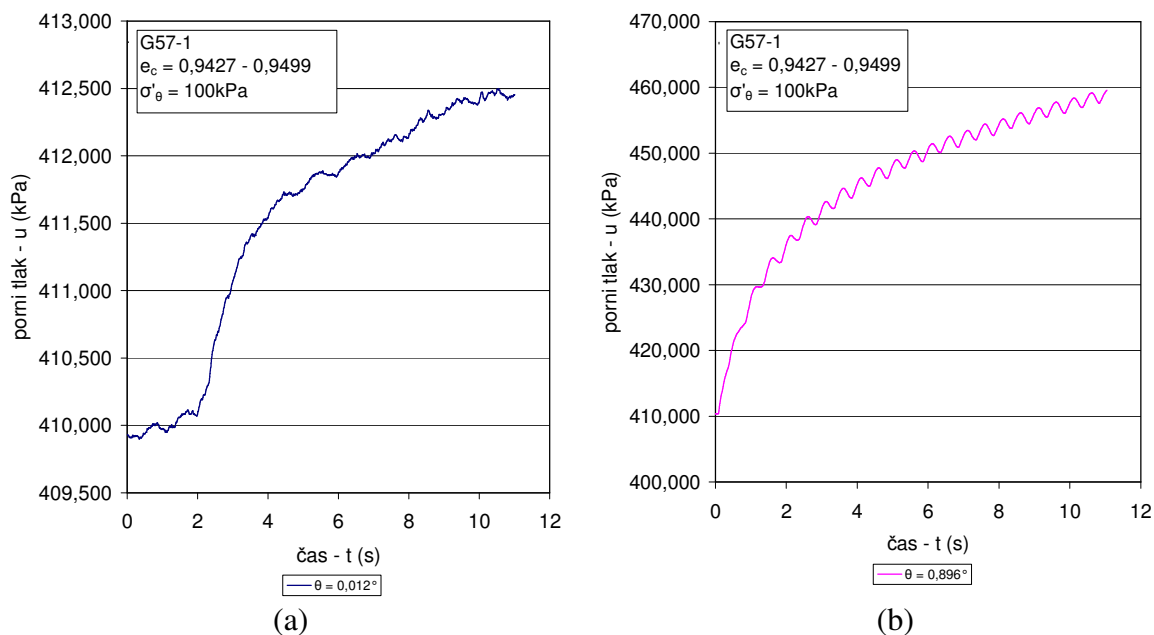
V zgornji preglednici imajo oznake naslednji pomen:  $H_i$  predstavlja začetno višino vzorca,  $D_{ii}$  začetni notranji premer vzorca,  $D_{oi}$  začetni zunanji premer,  $\rho_c$  predstavlja gostoto vzorca po končani prvi konsolidaciji,  $e_c$  začetni količnik por po končani prvi konsolidaciji,  $\sigma_{ac}$  vertikalno totalno napetost,  $\sigma_{oc}$  zunanji bočni pritisk,  $\sigma_{ic}$  notranji bočni pritisk,  $\sigma'_{\theta c}$  efektivno napetost v obročni smeri,  $u_c$  konsolidacijski porni tlak.

Način odzivanja vzorcev med vsemi stopnjami deformacijsko vodenih preiskav so si med seboj podobni, zato so v nadaljevanju podrobneje predstavljeni le rezultati dobljeni na vzorcu *Peščen melj G57-1*, tipični diagrami ostalih preiskav pa se nahajajo v prilogi (Priloga B). Kot je bilo že omenjeno je bil vzorec narejen po sedimentacijski metodi, s pomočjo katere je bila dosežena končna suha gostota pred konsolidacijo 1,380 g/cm<sup>3</sup>. Iz preglednice (Preglednica 5.4) je razvidno, da je bil vzorec izotropno skonsolidiran na 100 kPa efektivne obročne

napetosti, katero smo dosegli z enakim notranjim in zunanjim (celičnim) tlakom. Efektivne napetosti so torej v vseh smereh (obročna, vertikalna in radialna) znašale 100 kPa.

Tekom preiskave količnik por nekoliko pada, medtem ko se gostota vzorca nekoliko večja (Priloga A4). To je posledica konsolidacij, ki sledijo posameznim stopnjam cikličnega obremenjevanja. Med konsolidacijo namreč odvečna voda iz vzorca izteka, kar pomeni, da se zmanjšuje delež por v vzorcu, sam vzorec pa se tudi nekoliko poseda in posledično zgošča.

Diagrama pornih tlakov v odvisnosti od časa za kota zasukov  $0,012^\circ$  in  $0,896^\circ$  (Slika 5.12) prikazujeta spreminjanje tako povratne kot nepovratne spremembe pornih tlakov. Pri kotu zasuka  $0,012^\circ$  je to spreminjanja le nakazano. S povečevanjem kota zasuka se povečuje tudi nepovratna sprememba pornega tlaka, medtem ko je večanje povratne spremembe nekoliko manjše. Z večanjem kota zasuka se jasneje izraža tudi sinusna oblika spreminjanja pornega tlaka, ki znotraj posameznega cikla doseže dve maksimalni in dve minimalni vrednosti.

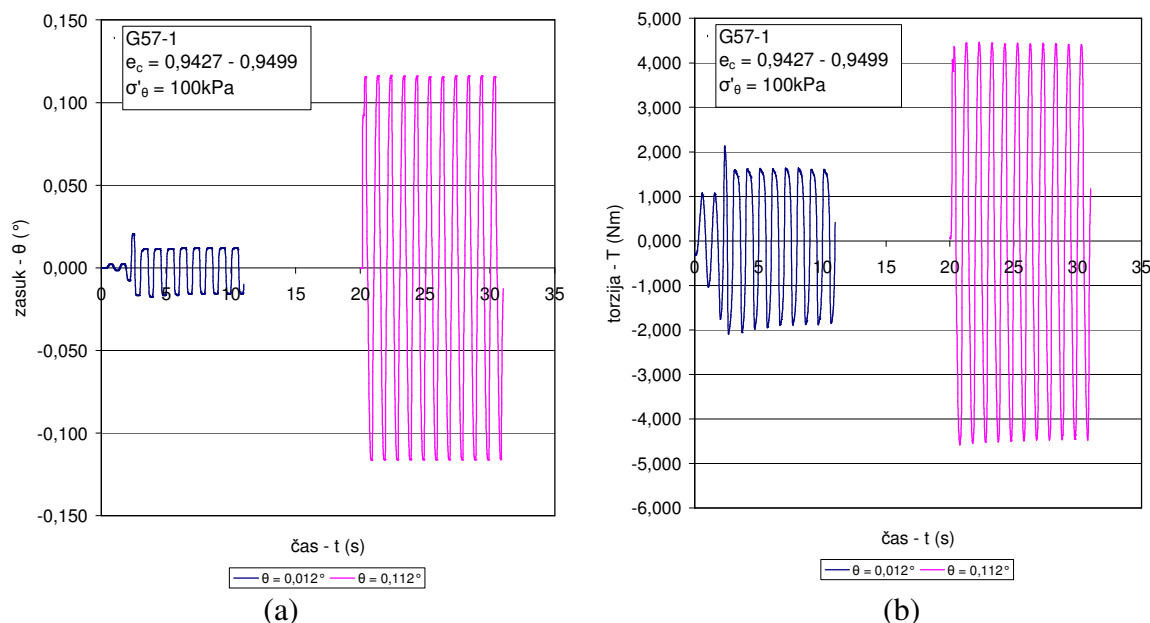


Slika 5.12: Spreminjanje pornega tlaka med obremenjevanjem s kotom zasuka  $0,012^\circ$  (a) in  $0,896^\circ$  (b)

Iz diagrama spreminjanja rotacije tekom posameznih stopenj obremenjevanj (Slika 5.13 (a)) ugotovimo, da ima funkcija obremenjevanja lepo sinusno obliko s konstantno velikostjo amplitude rotacije skozi celotno stopnjo obremenitve. Pri manjših zasukih je opaziti, da imajo prvi cikli znotraj posamezne stopnje nekoliko večji ali manjši zasuk, ki potem doseže



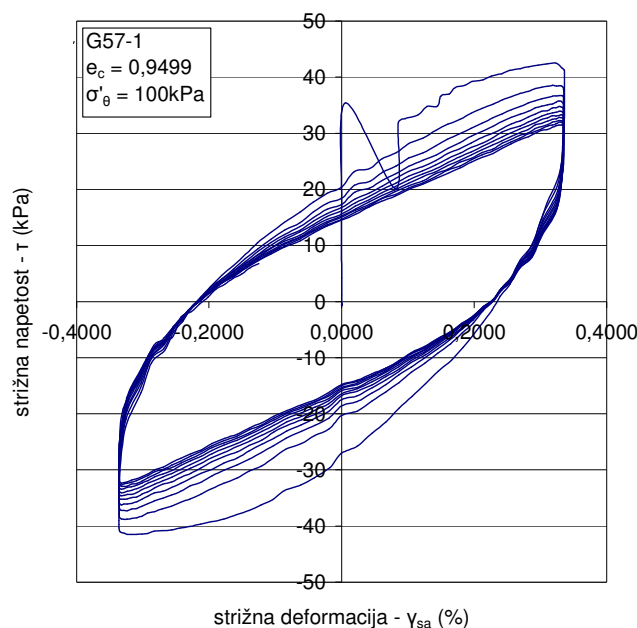
predpisano vrednost. To je posledica aparata, ki v prvih ciklih še išče pravo obremenitev. Iz meritev v predhodnem ciklu nato določi velikost obremenitve v naslednjem ciklu. Z večanjem amplitude zasuka se vpliv začetne nepravilnosti amplitude zasuka manjša in se pri večjih enojnih amplitudah zasukov izgubi.



Slika 5.13: Diagram spreminjanja kota zasuka (a) in torzije (b) pri dveh različnih stopnjah

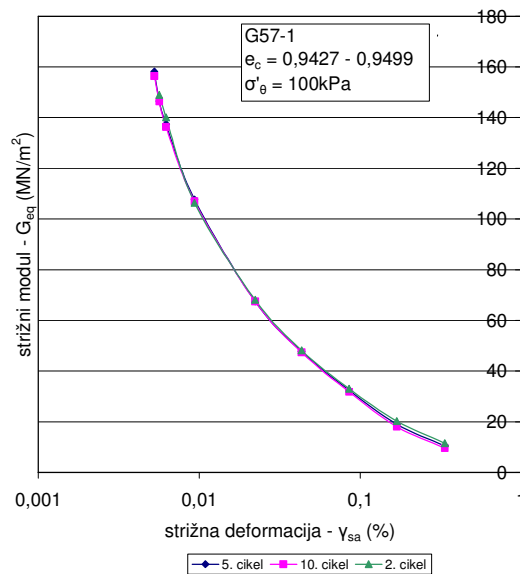
Pri spreminjanju torzije med preiskavo (Slika 5.13 (b)) vidimo, da se vzorec odziva na funkcijo obremenitve. Tako je potek torzije sinusen, pri čemer opazimo, da se pri velikih zasukih torzija iz cikla v cikel manjša, kar je posledica upadanja togosti vzorca. Težava aparata pri iskanju prave obremenitve, omenjena pri spreminjanju kota zasuka, se pri spreminjanju torzije odraža kot dosežena nekoliko višja oz. nižja vrednost v prvih ciklih.

Pri vsaki stopnji obremenjevanja iz diagrama histereznih zank (Slika 5.14) izračunamo vrednost strižnega modula, ki predstavlja eno točko na krivulji strižnega modula v odvisnosti od strižne deformacije. Izračunana vrednost strižnega modula predstavlja na diagramu histereznih zank naklon navidezne premice, ki povezuje skrajni točki histerezne zanke (najmanjša strižna deformacija, najmanjša strižna napetost in največja strižna deformacija, največja strižna napetost).



Slika 5.14: Histerezne zanke zadnje stopnje obremenjevanja

Potek striznega modula v odvisnosti od strizne deformacije (Slika 5.15) predstavlja krivulja, ki pri velikih striznih deformacijah ( $10^{-3}$ ) že jasno nakazuje asimptotično približevanje končni vrednosti striznega modula. Začetni plato elastičnega območja obnašanja materiala pri tej preiskavi ni bil dosežen, saj zaradi preslabega stika med ogrođjem aparata in vzorcem le-tega ni bilo mogoče preiskati pri malih striznih deformacijah (manjših od  $10^{-5}$ ). Iz krivulje vidimo manjšanje strizne togosti peščenega melja z večanjem strizne deformacije. Končni plato, t.j. območje približevanja maksimalni možni obremenitvi je lepo izražen. Pri primerjavi krivulj striznega modula dobljenega v drugem, petem in desetem ciklu opazimo, da v splošnem bistvenih razhajanj ni. Manjše razhajanje krivulj striznega modula je opaziti pri velikih striznih deformacijah (večjih od  $10^{-3}$ ), kjer je vrednost striznega modula v drugem ciklu večja od tiste v petem oziroma desetem ciklu. Iz tega lahko sklepamo, da se je pričela degradacija vzorca. Togost materiala se pri enaki strizni deformaciji iz cikla v cikel manjša, kar je opaziti tudi kot manjšanje vrednosti torzije znotraj posamezne stopnje obremenjevanja. Pri nadaljnjih stopnjah obremenjevanja bi vzorec izgubljal strizno togost in se nazadnje popolnoma porušil.



Slika 5.15: Primerjava dinamičnega strižnega modula v drugem, petem in desetem ciklu obremenitve

#### 5.4.4 VPLIV ANIZOTROPNE KONSOLIDACIJE NA STRIŽNO TOGOST ZEMLJIN

Na osnovi študija torzijskih triosnih preiskav na votlih vzorcih in možnosti aparata se je porajala želja po ugotavljanju vpliva izotropne oz. anizotropne konsolidacije na lastnosti materiala. Uvodna predpostavka je bila, da se strižna togost zemljin manjša pri manjšanju efektivnih napetosti. Razlika med izotropno in anizotropno konsolidacijo je bila pri opravljenih preiskavah dosežena s spreminjanjem notranjega pritiska gleda na zunanji (celični) pritisk in vertikalni pritisk. Preko izbire različnih efektivnih obročnih napetosti, ki v dvodimenzionalnem prostoru predstavljajo horizontalne napetosti ( $\sigma_x$ ), so bili izračunani notranji tlaki za anizotropne konsolidacije. Pri izotropni konsolidaciji pa so efektivne napetosti v vseh smereh enake in so odvisne od velikosti pornih tlakov.

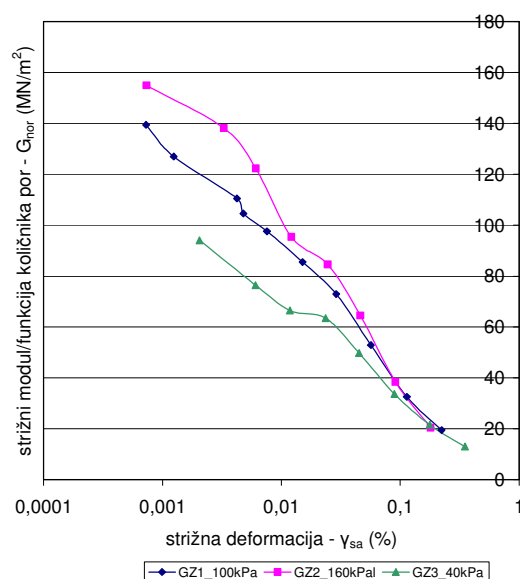
Rezultati, dobljeni na enozrnatem pesku, so delno potrdili resničnost uvodne predpostavke, kljub vsemu pa je bilo pričakovati vidnejše razlike. Efektivne napetosti v obročni smeri so znašale 100 kPa pri izotropni konsolidaciji ter 160 kPa in 40 kPa pri anizotropnih konsolidacijah. Pri vseh vzorcih so se strižne deformacije gibale v območju od  $7 \cdot 10^{-6}$  do  $4 \cdot 10^{-3}$ . Začetnega elastičnega platoja pri nobenem vzorcu ni bilo mogoče doseči. Preiskave

prav tako niso zajele velikih deformacij, pri katerih se krivulje pričnejo obnašati asimptotično. Kljub vsemu so zajete deformacije v območju, ki ga predpisuje japonski standard, torej v območju od  $10^{-5}$  do  $10^{-3}$  reda velikosti strižne deformacije.

Na spodnji sliki (Slika 5.16) je predstavljena primerjava dobljenih rezultatov opravljenih preiskav na enozrnatem pesku. Omeniti velja, da je dobljena vrednost strižnega modula deljena s funkcijo količnika por (5-29) (Ishihara, 1996), kar omogoča primerjavo rezultatov dobljenih na različno gostih vzorcih po končani konsolidaciji.

$$F(e) = \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} \quad (5-29)$$

Iz primerjave ugotovimo, da najnižja krivulja ustreza najmanjši efektivni obročni napetosti, sredinska ustreza izotropni konsolidaciji, najvišja pa največji efektivni obročni napetosti. Razlike v strižni togosti pri različnih efektivnih obročnih napetostih so največje pri manjših strižnih deformacijah ter se z večanjem strižne deformacije manjšajo. V območju velikih strižnih deformacij so strižne togosti enake ne glede na velikost efektivnih obročnih napetosti.



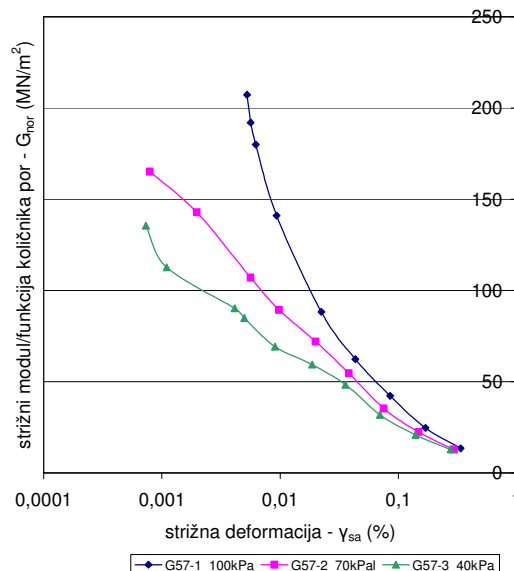
Slika 5.16: Primerjava strižnih modulov normiranih s funkcijo količnika por pri enozrnatem pesku

Ugotovljen vpliv velikosti efektivnih obročnih napetosti na strižno togost zemljin se je s preiskavami na vzorcih iz peščenega melja samo še potrdil. Tudi pri teh preiskavah ni bilo doseženo območje elastičnega obnašanja materiala, je pa jasneje vidna razlika strižne togosti

pri deformacijah manjših od  $10^{-4}$  ter manjšanje razlike z večanjem deformacij. Žal preiskave niso bile vodene do zelo velikih deformacij (večjih od  $10^{-2}$ ). Pri teh preiskavah so se sicer vrednosti efektivnih obročnih napetosti manj razlikovale, in sicer so znašale 100 kPa pri izotropni konsolidaciji ter 70 kPa in 40 kPa pri anizotropno skonsolidiranih vzorcih.

Na podlagi dobljenih rezultatov lahko z gotovostjo potrdimo, da ima anizotropna konsolidacija vpliv na strižno togost zemljin na način, da večanje efektivne obročne napetosti pomeni tudi večanje strižne togosti zemljin. Razlog takega obnašanja izhaja iz vpliva napetosti na odziv materiala pri obremenjevanju. Večje efektivne napetosti v vzorcu povzročijo višje kontaktne tlake med zrnji, kar poveča odpornost materiala na obremenjevanje pri malih deformacijah, medtem ko se pri velikih deformacijah material že toliko omehča, da velikost efektivnih napetosti nanj nima več vpliva.

Na spodnji sliki (Slika 5.17) je predstavljena primerjava dobljenih strižnih togosti zemljine. Omeniti velja, da je dobljena vrednost strižnega modula deljena z že omenjeno funkcijo količnika por (5-29), ki omogoča primerjavo rezultatov dobljenih na različno gostih vzorcih.

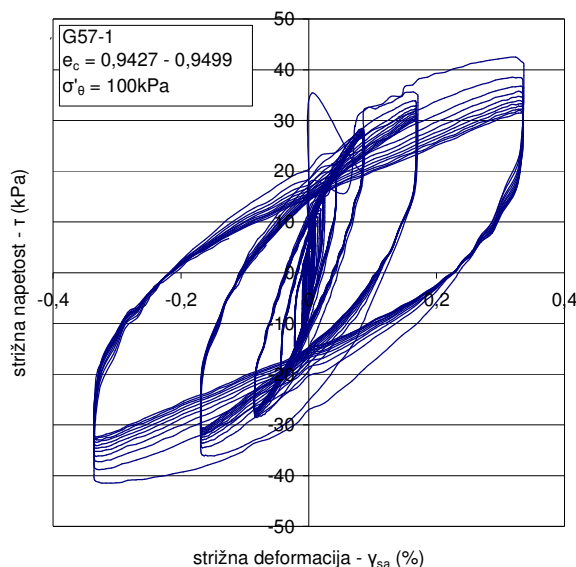


Slika 5.17: Primerjava strižnih modulov normiranih s funkcijo količnika por pri peščenem melju

Na diagramu vidimo, da je pri zelo majhnih deformacijah strižni modul odvisen od velikosti napetosti v obročni smeri in je pri nižji vrednosti le-te manjši. Pri deformacijah ranga velikosti

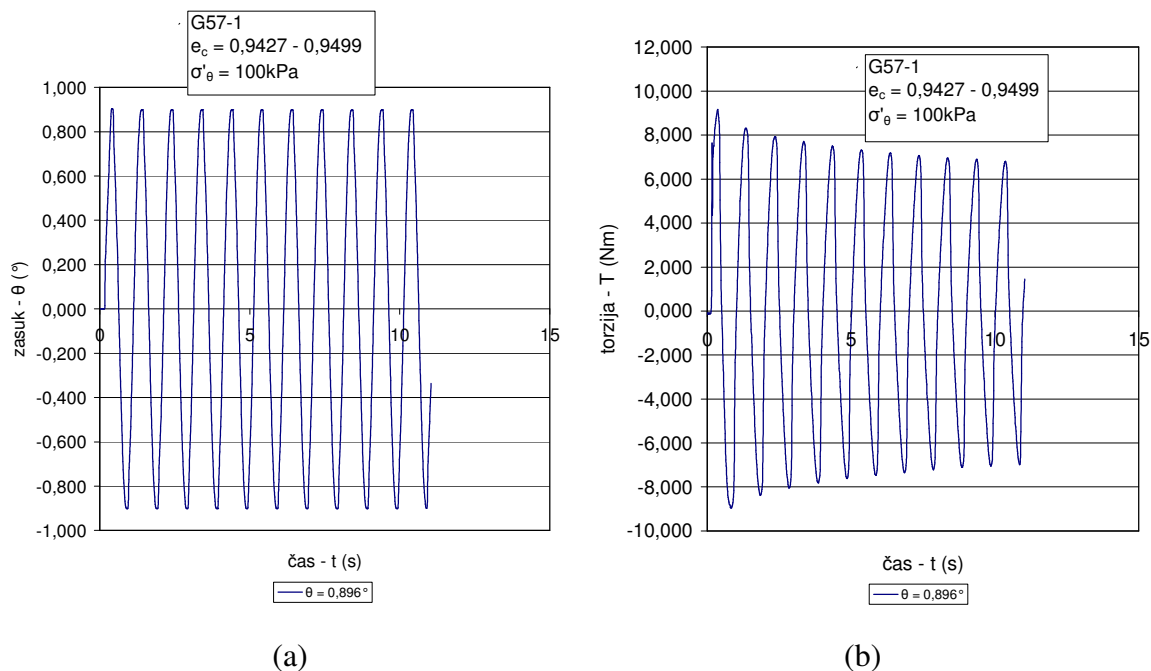
$10^{-4}$  pa se krivulje približujejo in se pri velikih deformacijah  $10^{-2}$  srečajo. Testi niso bili vodeni do deformacij, pri katerih pride do porušitve vzorcev, saj so bile na istih vzorcih opravljene tudi napetostne preiskave. Se pa pri zadnjih stopnjah obremenjevanja že kažejo znaki mehčanja materiala, saj se histerezne zanke iz cikla v cikel ožijo.

Če primerjamo histerezne zanke iz vseh stopenj obremenjevanja (Slika 5.19), ugotovimo, da se njihova oblika plošči ter iz skoraj vertikalnega položaja prehaja v vodoraven položaj. Prevedeno v napetosti in deformacije to pomeni, da se material mehča, saj se razmerje med strižnimi napetostmi in strižnimi deformacijami manjša. Na tem diagramu je tudi razvidno, da so bile začetne deformacije blizu elastičnega območja.



Slika 5.18: Histerezne zanke tekom celotne preiskave

Mehčanje materiala v isti stopnji obremenjevanja je opazno že v osnovnih diagramih deformacijsko vodenih preiskav. Pri večjih zasukih vrednost strižne napetosti v vzorcu iz cikla v cikel pada (Slika 5.20), kar pomeni manjšanje strižnega modula med posameznimi cikli iste stopnje obremenjevanja. Ta ista lastnost je bila ugotovljena že zgoraj, kjer se je odražala v oženju histereznih zank znotraj posamezne stopnje obremenjevanja.



Slika 5.19: Spreminjanja zasuka (a) in torzije (b) v zadnji stopnji obremenjevanja

Iz predstavljenih ugotovitev in dobljenih rezultatov lahko zaključim, da začetna predpostavka drži. Torej anizotropna konsolidacija vpliva na strižno togost peskov v smislu večjih vrednosti strižnega modula peska pri večjih napetostih.

## 5.5 Napetostno vodene torzijske triosne preiskave zasičenih vzorcev

### 5.5.1 OPIS METODE

Za napetostno vodene torzijske triosne preiskave na votlih vzorcih nisem našla ustreznega standarda, zato sem preiskave vodila s pomočjo japonskega standarda za napetostno vodene triosne preiskave (JGS 0551-1998) ter ameriškega standarda za napetostno vodene preiskave na polnih vzorcih v triosnih celicah z vertikalnim obremenjevanjem (ASTM D 5311 – 92 (2004)). S pomočjo teh dveh standardov ter že opisanega postopka za deformacijsko vodene torzijske triosne preiskave sem se odločila za naslednji postopek poteka preiskave. Začetne stopnje, od priprave vzorca, preko zasičevanja, določevanja B-parametra ter konsolidacije, ostajajo enake kot pri deformacijsko vodenih torzijskih triosnih preiskavah. Sprememba je

zgoj v stopnjah obremenjevanja. Ameriški standard določa, da vzorec obremenjujemo z izbrano amplitudo vertikalne napetosti toliko časa, da doseže dvojna amplituda vertikalne deformacije vrednost 20%, ali enojna amplituda deformacije v tlaku ali nategu 20%, ali pa je vzorec obremenjen s 500 cikli izbrane amplitude vertikalne napetosti. Japonski standard za napetostno vodene triosne torzijske preiskave pa zahteva, da preiskava poteka, dokler ni doseženo 5% strižne deformacije pri maksimalni možni amplitudi strižne napetosti oziroma ko strižna deformacija doseže vrednost 22,5%.

Trenutne zmožnosti aparata, na katerem so bile izvajane preiskave, omogočajo napetostno vodenje preiskav pri izbrani amplitudi vertikalne ali strižne napetosti za določeno število ciklov. Na podlagi kombinacije zahtev standardov ter zmogljivosti aparata sem se odločila za sledeči sistem napetostno vodenih preiskav. Vsak vzorec sem po končanem deformacijsko vodenem delu preiskav skonsolidirala ter ga napetostno obremenjevala najprej v strižni smeri, nato v vertikalni ter nazadnje v obeh omenjenih smereh skupaj. Med posameznimi stopnjami napetostnega obremenjevanja je bil vzorec skonsolidiran. Vsaka stopnja napetostnega obremenjevanja je vsebovala enajst ciklov pri izbrani amplitudi napetosti. Izbrano število ciklov sicer ne ustreza zahtevam iz zgoraj omenjenih standardov, ker pa sem se osredotočila na primerjavo vpliva vertikalne in strižne napetosti na obnašanje materiala, nisem želela, da preiskava traja do porušitve vzorca.

Največjo težavo pri izvajanju napetostno vodenih preiskav je predstavljala izbira amplitude napetosti tako v strižni kot vertikalni smeri. Želja je bila, da je vzorec obremenjen toliko, da je že zaznati začetek njegove degradacije, vendar ne sme priti do popolne porušitve vzorca. Prvo stopnjo napetostno vodene preiskave je predstavljalo obremenjevanje v strižni smeri preko določitve vrednosti amplitude torzije. Velikost amplitude torzije je bila izbrana glede na vrednost, ki se je pojavila pri deformacijsko vodeni preiskavi v eni od zadnjih stopenj; nekje od vrednosti strižne deformacije  $10^{-4}$  dalje.

Po strižnem napetostnem obremenjevanju je sledila konsolidacija ter naslednja stopnja napetostnega obremenjevanja v vertikalni smeri. Želja je bila izbrati tako amplitudo vertikalne napetosti, da bo imela približno enak učinek na obnašanje vzorca, kot ga je imela izbrana strižna napetost. V literaturi (Das, 1993) je podana želena zveza med strižnimi in vertikalnimi



napetostmi za polne vzorce pri triosnih cikličnih preiskavah. Za enak učinek cikličnega obremenjevanja v strižni ter vertikalni smeri velja, da mora biti amplituda vertikalne napetosti dvakrat večja od amplitude strižne napetosti. Ker omenjena zveza velja za polne vzorce, preiskovani vzorci pa so v sredini votli, sem razmerje med amplitudami strižne in vertikalne napetosti določala glede na obnašanje vzorca pri strižnem napetostnem obremenjevanju.

Zadnjo stopnjo napetostnega obremenjevanja pa je predstavljalo istočasno obremenjevanje v vertikalni ter strižni smeri. Velikost amplitud napetosti je bila enaka izbranim amplitudam napetosti iz napetostnega obremenjevanja zgolj v eni smeri. Pri dvosmernem obremenjevanju lahko spreminjamo tudi fazni kot zamika med vertikalno in strižno smerjo obremenjevanja in ugotavljamo njegov vpliv na spreminjanje lastnosti materiala.

Pri vseh napetostnih preiskavah je bila izbrana frekvenca obremenjevanja 1 Hz, saj namen teh preiskav ni bil ugotavljanje vpliva frekvence obremenjevanja na lastnosti materiala. Vseeno ima lahko ta parameter pomemben vpliv na lastnost materiala in tako odpira možnosti za preiskave v prihodnje.

Prav tako kot deformacijsko vodene preiskave so lahko tudi napetostno vodene preiskave drenirane ali nedrenirane. Preiskave opravljene na vzorcih predstavljenih v tem delu so vse nedrenirane, torej pri zaprtih drenažah ter spremljanju spreminjanja pornega tlaka v vzorcih.

Standarda še določata enačbe, po katerih se iz dobljenih rezultatov preiskave izračuna želene parametre. Enačbe so enake tistim, ki jih podaja standard za deformacijsko vodene torzijske triosne preiskave na votlih vzorcih, zato na tem mestu niso ponovno predstavljene.

### 5.5.2 OBREMENJEVANJE V STRIŽNI SMERI

Napetostno obremenjevanje v strižni smeri je vodeno preko spreminjanja velikosti torzije. Izbrana amplituda sinusnega obremenjevanja je bila določena glede na obnašanje vzorca pri deformacijskem obremenjevanju. Začetne lastnosti vzorcev ter konsolidacijske napetosti so bile podane že v prejšnjem poglavju in veljajo tudi za napetostno vodene preiskave. Na tem

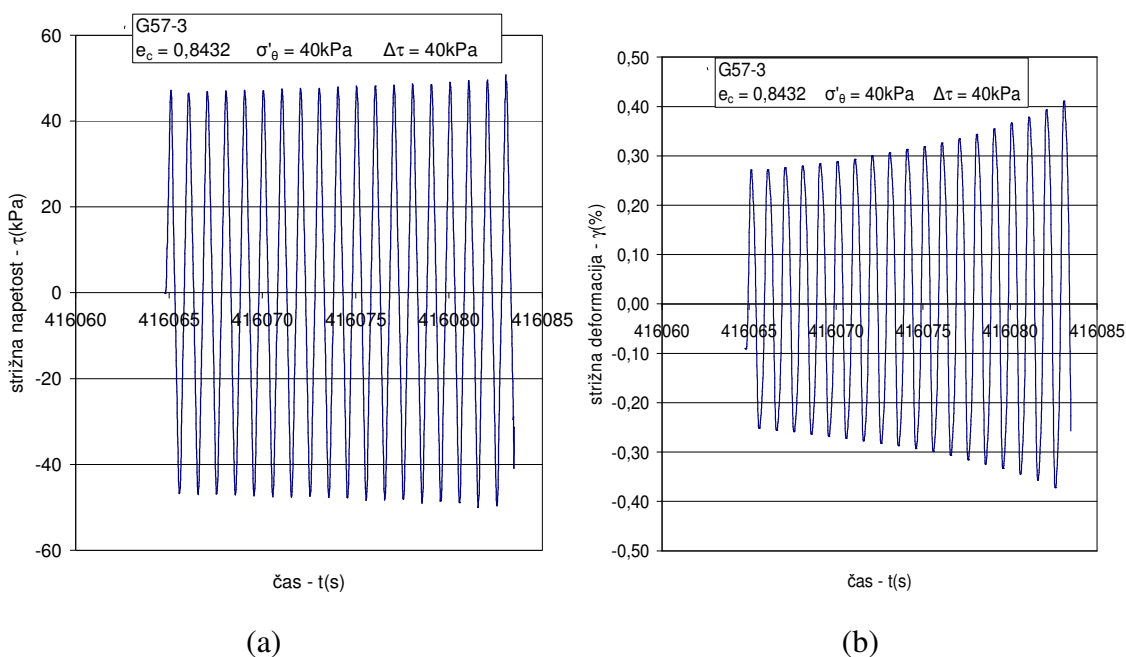
mestu so v preglednici zbrane lastnosti vzorcev pred napetostnim obremenjevanjem ter amplituda torzije, s katero je bil vzorec obremenjen v enajstih ciklih.

Preglednica 5.5: Lastnosti vzorcev pred napetostnim obremenjevanjem v strižni smeri

Ime vzorca	Pesek – GZ1	Pesek – GZ2	Pesek – GZ3	Peščen melj G57-1	Peščen melj G57-2	Peščen melj G57-3
$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,683	1,699	1,742	1,427	1,470	1,498
$e_c$ (-)	0,5670	0,5522	0,5139	0,9350	0,8787	0,8432
$\Delta\tau$ (kPa)	40	40	80	40	25	40

Pri vseh opravljenih napetostno vodenih preiskavah z obremenjevanjem v strižni smeri dobljeni rezultati kažejo podobne zaključke. Na tem mestu so podrobneje predstavljeni rezultati dobljeni pri vzorcu *Peščen melj G57-3*, tipični diagrami ostalih vzorcev pa se nahajajo v prilogi (Priloga C).

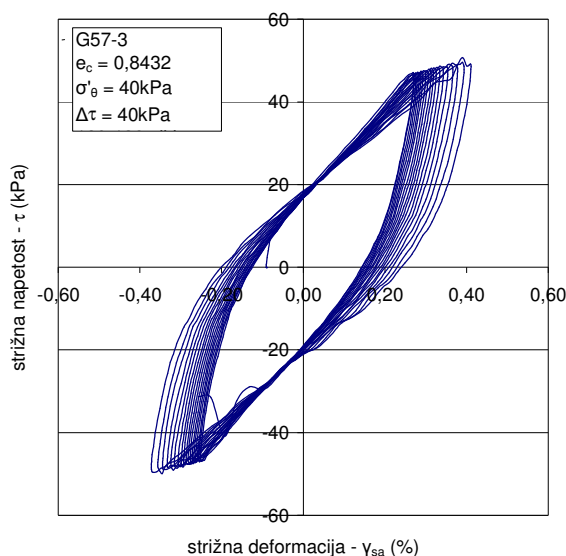
Iz grafa spreminjanja strižne napetosti tekom preiskave (Slika 5.20 (a)) vidimo, da se je ta spreminjala sinusno, njeni ekstremni vrednosti pa sta skozi celotno preiskavo konstantni, kar je zahteva pri napetostno vodenih preiskavah.



Slika 5.20: Spreminjanje strižne napetosti (a) in strižne deformacije (b)

Na osnovi pridobljenega znanja o deformacijsko vodenih preiskavah je pričakovati, da se bo velikost strižne deformacije skozi cikle večala zaradi mehčanja materiala. To je vidno na diagramu spreminjanja strižne deformacije skozi preiskavo (Slika 5.20 (b)). Tudi strižna deformacija odgovarja sinusni funkciji.

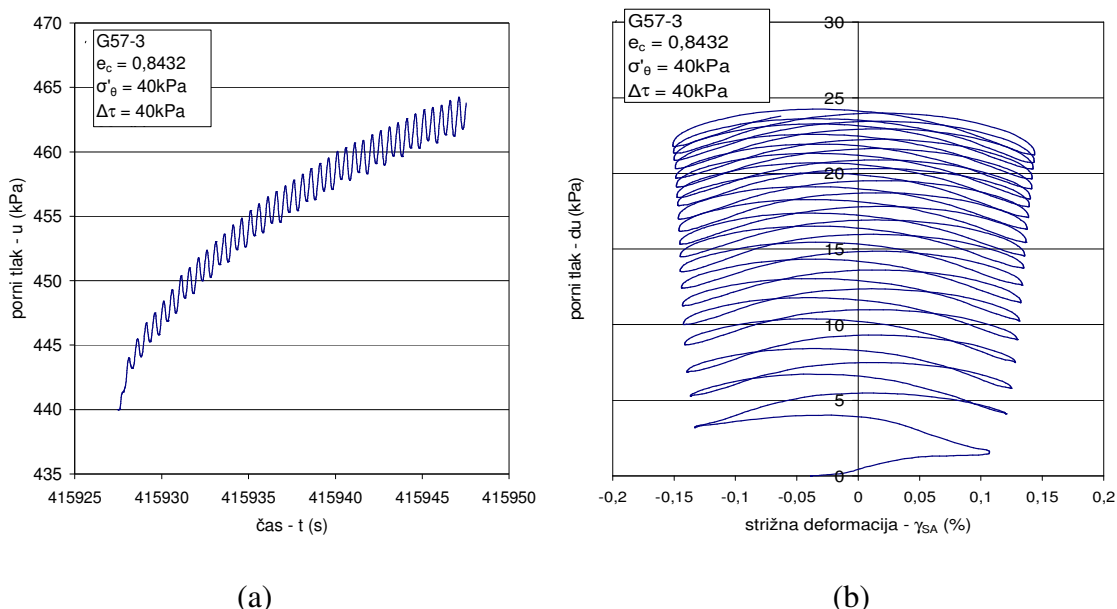
Iz izmerjenih osnovnih količin preiskav (torzije in kota zasuka) smo izračunali spreminjanje strižne napetosti in deformacije ter izrisali tipične diagrame odvisnosti strižne napetosti od strižne deformacije. Histerezne zanke se širijo in sploščujejo (Slika 5.22) kar je bilo pričakovati, vendar pa do popolne porušitve še ni prišlo. Pri izbrani amplitudi torzije se torej nahajamo v plastičnem območju, kar pomeni, da se pri enaki vrednosti torzije oziroma strižne napetosti, strižna deformacija večja iz cikla v cikel. Zaznati je, da se histerezna zanka pred doseženimi ekstremnimi deformacijami ostri, kar pomeni, da prihaja v območju ekstremnih strižnih deformacij do utrjevanja materiala – pri majhni spremembi strižne deformacije strižna napetost močno naraste, v območju manjših strižnih deformacij pa je potrebna velika sprememba le-teh za majhno povečanje strižnih napetosti.



Slika 5.21: Histerezne zanke pri strižnem napetostnem obremenjevanju

Značilnosti obnašanja materiala je mogoče ugotavljati tudi iz diagrama spreminjanja pornega tlaka s časom oz. strižno deformacijo (Slika 5.23). Povratna in nepovratna sprememba pornega tlaka v plastičnem območju rasteta in se asimptotično približujeta maksimalni vrednosti. Znotraj posameznega cikla porni tlak doseže dve maksimalni in minimalni

vrednosti, ki sta na diagramu pornega tlaka v odvisnosti od strižne deformacije vidni kot izbočenje krivulje. Pri majhnih strižnih deformacijah je porni tlak večji in se manjša z večanjem strižnih deformacij. To pomeni prehajanje materiala iz zgoščevanja v rahljanje pri velikih strižnih deformacijah.



Slika 5.22: Spreminjanje pornega tlaka s časom (a) in strižno deformacijo (b) pri strižnem obremenjevanju

### 5.5.3 OBREMENJEVANJE V VERTIKALNI SMERI

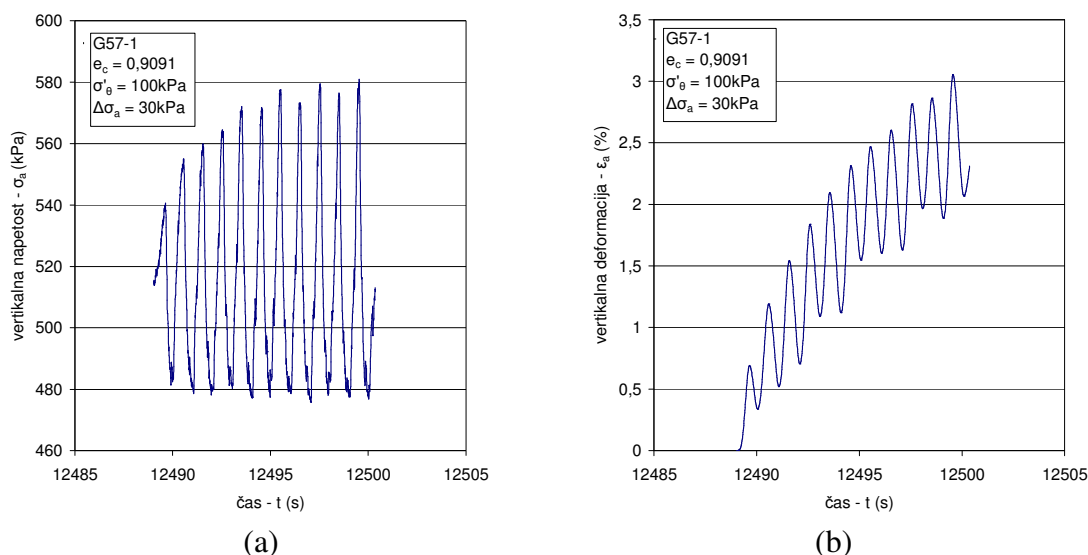
Napetostno obremenjevanje v vertikalni smeri je vodeno preko sinusnega spreminjanja vertikalne napetosti. Vsaka stopnja obremenjevanja vsebuje enajst ciklov. Vrednost amplitude vertikalne napetosti je izračunana iz strižne napetosti. V spodnji preglednici so zbrane lastnosti vzorcev pred napetostnim obremenjevanjem ter amplitude vertikalnih napetosti.

Preglednica 5.6: Lastnosti vzorcev pred napetostnim obremenjevanjem v vertikalni smeri

Ime vzorca	Pesek – GZ1	Pesek – GZ2	Pesek – GZ3	Peščen melj G57-1	Peščen melj G57-2
$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,685	1,699	1,743	1,447	1,432
$e_c$ (-)	0,5654	0,5518	0,5129	0,9091	0,8755
$\Delta\sigma_a$ (kPa)	80	80	150	30	22,5

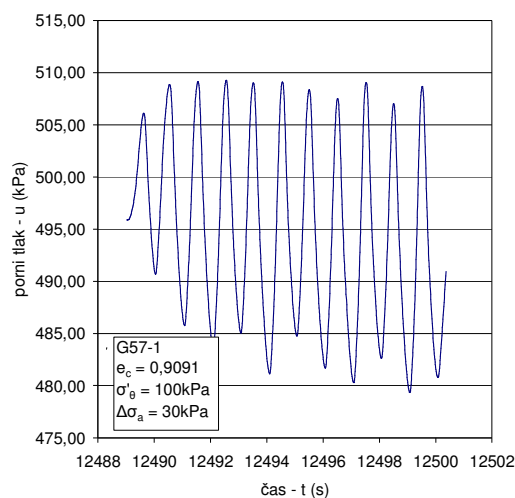
V nadaljevanju bodo podrobneje predstavljeni rezultati dobljeni pri napetostno vodenem obremenjevanju v vertikalni smeri za vzorec *Peščen melj G57-1*, ki najlepše prikazuje ugotovitve dobljene pri vseh vzorcih. Tipični diagrami ostalih vzorcev se nahajajo v prilogah (Priloga D).

Iz grafa spreminjanja vertikalne napetosti tekom preiskave (Slika 5.24 (a)) vidimo, da se je napetost spreminjala sinusno. Ker je bila preiskava vodena napetostno, bi morala napetost iz cikla v cikel ohranjati tako velikost amplitude kot absolutno vrednost, a je vidno manjše naraščanje napetosti tekom ciklov, ki se posledično odraža v večanju nepovratne vertikalne deformacije (Slika 5.24 (b)). Amplituda vertikalne deformacije pa se skozi cikle ohranja.



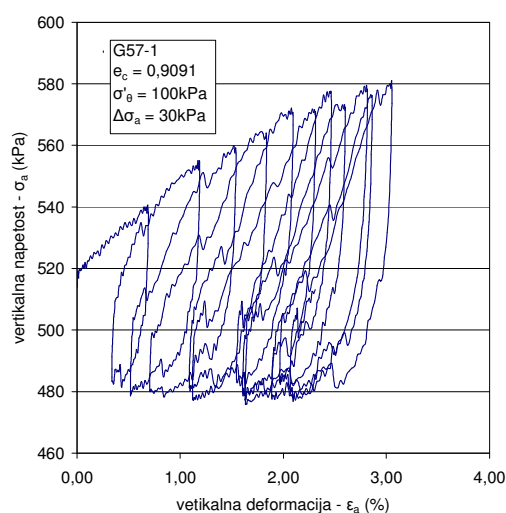
Slika 5.23: Spreminjanje vertikalne napetosti (a) in vertikalne deformacije (b)

Pri spreminjanju poregga tlaka (Slika 5.24) opazimo spreminjanje zgolj povratne spremembe poregga tlaka. Nepovratna sprememba se tekom preiskave ne spreminja.



Slika 5.24: Spreminjanje pornega tlaka pri vertikalnem napetostnem obremenjevanju

Histerezne zanke so skozi vse cikle po obliki enake (Slika 5.25), torej material še ni prišel v območje tečenja. Se pa v horizontalni smeri zamikajo v desno, kar potrjuje večanje nepovratna sprememba vertikalne deformacije. Vidno je tudi, da se zanke po ploščini večajo, kar je pripisati spreminjanju vertikalne napetosti, katere amplituda je naraščala skozi cikle. Oblika zank ni več elipsa, temveč se zanka na natezni strani ostri, na tlačni strani pa širi, kar pomeni, da se kljub večanju tlačne vertikalne napetosti material ne more več deformirati.



Slika 5.25: Histerezne zanke pri vertikalnem napetostnem obremenjevanju

## 5.5.4 OBREMENJEVANJE V STRIŽNI IN VERTIKALNI SMERI

### 5.5.4.1 Fazno obremenjevanje

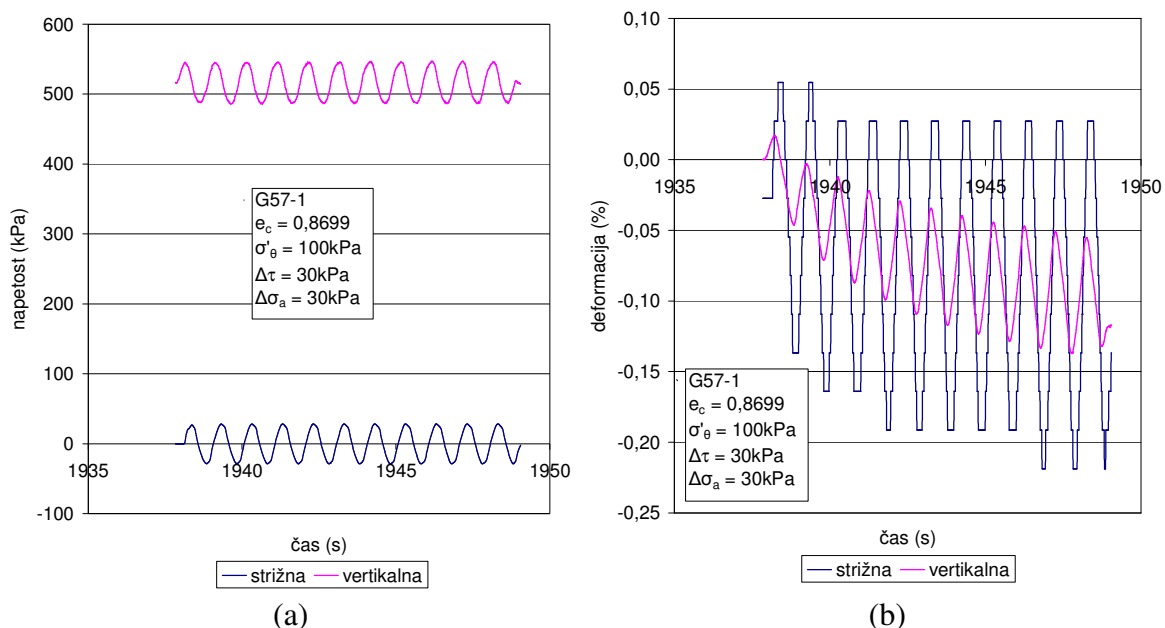
Za napetostno vodene preiskave, kjer je vzorec obremenjen v dveh smereh – strižni in vertikalni, so bile izbrane amplitude napetosti enake tistim, s katerimi je bil vzorec obremenjen v eni smeri. Napetostna funkcija obremenjevanja je sinusne oblike z določeno amplitudo ter enajstimi cikli. Pri vseh vzorcih sta bili obremenitvi v fazi, kar pomeni, da je maksimum strižne napetosti nastopil istočasno z maksimumom vertikalne napetosti. Glavne lastnosti vzorcev ter amplitude obremenitve so podane v spodnji preglednici.

Preglednica 5.7: Lastnosti vzorcev pred napetostnim obremenjevanjem v dveh smereh

Ime vzorca	Pesek – GZ1	Pesek – GZ2	Peščen melj G57-1
$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,685	1,701	1,477
$e_c$ (-)	0,5647	0,5505	0,8699
$\Delta\tau$ (kPa)	40	40	30
$\Delta\sigma_a$ (kPa)	80	80	30

V nadaljevanju so prikazani rezultati dobljeni na vzorcu *Peščen melj G57-1*, tipični diagrami ostalih preiskav pa se nahajajo v prilogi (Priloga E).

Iz grafa spreminjanja strižne in vertikalne napetosti tekom preiskave (Slika 5.27 (a)) vidimo, da se je napetost spreminjala sinusno, njeni ekstremni vrednosti pa sta skozi celotno preiskavo konstantni, kar je zahteva pri napetostno vodenih preiskavah.



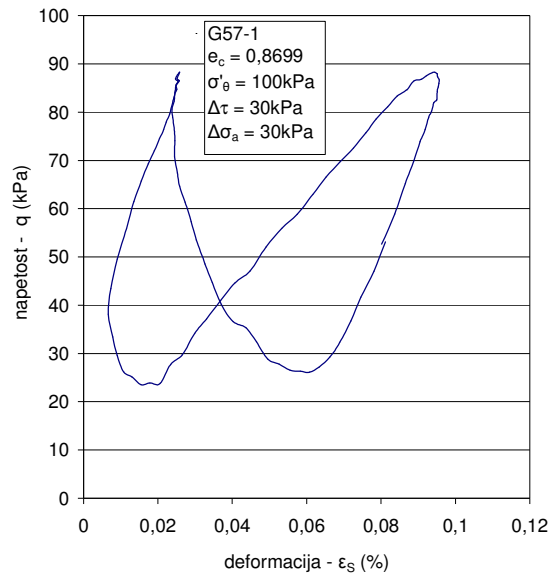
Slika 5.26: Spreminjanje napetosti (a) in deformacije (b) pri obremenjevanju v strižni in vertikalni smeri

Pričakovati je enako velikost deformacij v vertikalni in strižni smeri (Slika 5.27 (b)), a se je izkazalo, da so strižne deformacije večje od vertikalnih. Spreminjanje deformacij ustreza spreminjanju napetosti, saj je vidno sinusno spreminjanje tako vertikalnih kot strižnih deformacij.

Pri obremenjevanju v dveh smereh je pomembno, da pri predstavljanju dobljenih rezultatov napetosti in deformacije transformiramo v napetostni prostor  $p$ - $q$  s pripadajočimi deformacijami. Natančna predstavitev transformacijske poti z mehanski zakonitostmi je predstavljena v poglavju *p, q invarianta napetostnega tenzorja in pripadajoči deformaciji*, na tem mestu pa sledi zgolj kratek povzetek z bistvenimi podatki. Na osnovi izmerjenih količin, pridobljenih med napetostno vodenimi preiskavami (vertikalni pomik, vertikalna sila, zasuk, torzija), ter poznanih geometrijskih lastnosti vzorca najprej izračunamo napetosti (strižna, vertikalna, radialna, obročna) in deformacije (strižna, vertikalna, radialna, obročna). Preko poznanih zvez izračunamo glavne napetosti in deformacije, ki so se pojavile v vzorcu med obremenjevanjem, preko njih pa napetosti  $p$  in  $q$  ter pripadajoči deformaciji. Zanima nas predvsem zveza med napetostjo  $q$ , ki predstavlja razliko največje ter najmanjše glavne napetosti ter pripadajočo deformacijo  $\varepsilon_s$ .

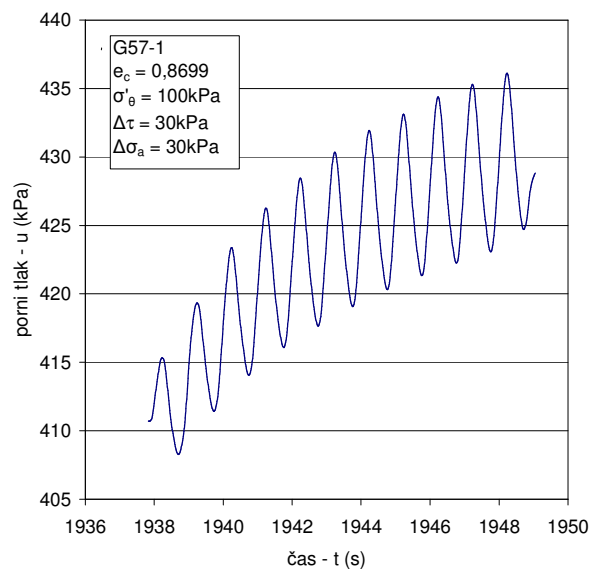


Zaznati je pentljasto obliko histerezne zanke (Slika 5.27) in ne elipsaste, ki je značilna za obremenitve v eni smeri. Izvor take oblike je iskati v spreminjanju napetosti  $q$  in deformacije  $\varepsilon_s$  tekom obremenjevanja.



Slika 5.27: Oblika histerezne zanke pri obremenjevanju v strižni in vertikalni smeri

Pri diagramu pornih tlakov (Slika 5.28) ustrezajo njihove povratne spremembe ter oblika krivulje pornim tlakom, razvitim pri vertikalnem obremenjevanju, medtem ko je zaznati rastočo nepovratno spremembo pornih tlakov značilno za strižno obremenjevanje.



Slika 5.28: Spreminjanje pornega tlaka pri obremenjevanju v strižni in vertikalni smeri

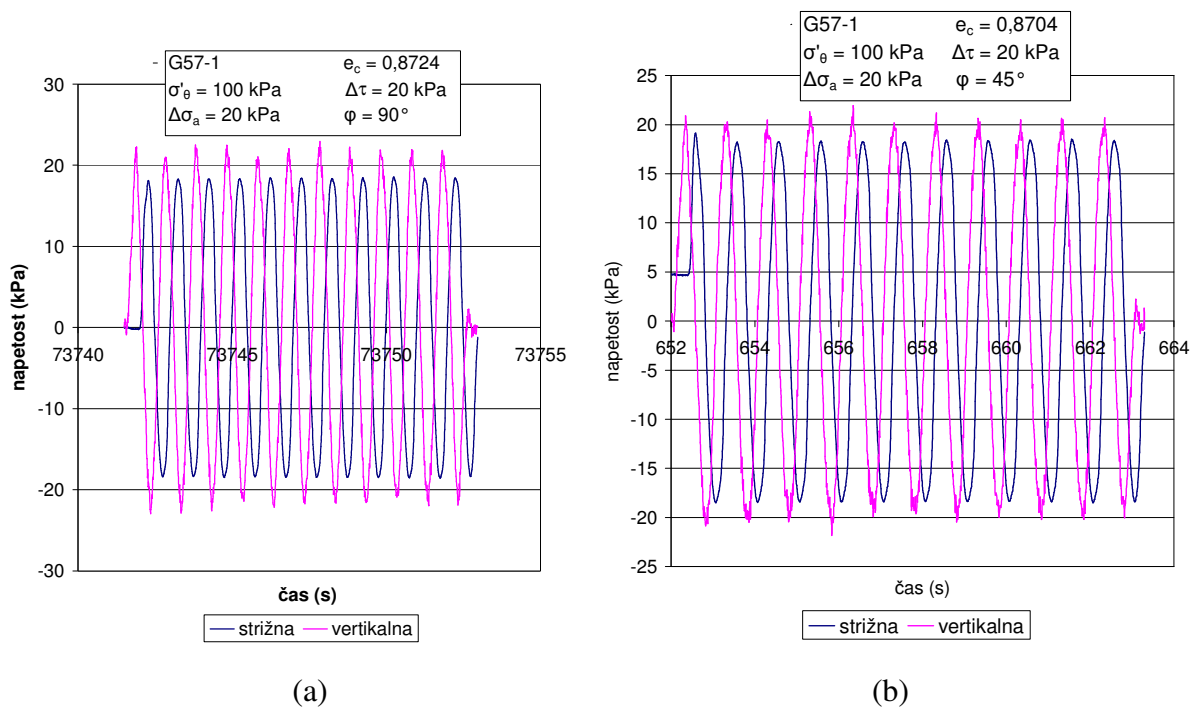
#### 5.5.4.2 Izvenfazno obremenjevanje

Za ugotavljanje vpliva faznega kota zamika ( $\varphi$ ) na obliko histerezne zanke sta bili preiskavi vodeni napetostno. Vzorec je bil obremenjen v dveh smereh – strižni in vertikalni, z izbranimi amplitudama napetosti nekoliko manjšima od tistih, s katerimi je bil vzorec obremenjen v eni smeri. Napetostna funkcija obremenjevanja je sinusne oblike z določeno amplitudo ter enajstimi cikli. Glavne lastnosti vzorca ter amplitude obremenitve so podane v spodnji preglednici.

Preglednica 5.8: Lastnosti vzorcev pred napetostnim obremenjevanjem v dveh smereh pri spreminjanju faznega kota

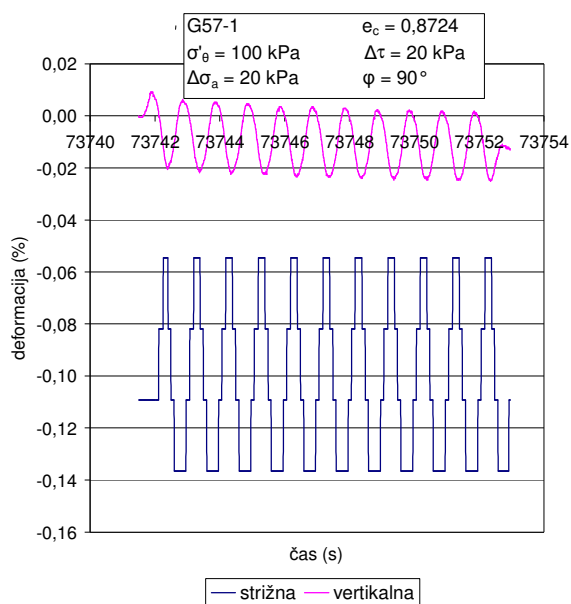
Ime vzorca	Peščen melj G57-1	Peščen melj G57-1
$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,475	1,477
$e_c$ (-)	0,8724	0,8704
$\Delta \tau$ (kPa)	20	20
$\Delta \sigma_a$ (kPa)	20	20
$\varphi$ (°)	90	45

Iz grafov spreminjanja strižne in vertikalne napetosti tekom preiskave (Slika 5.30) vidimo, da se je pri obeh obremenitvah napetost spreminjala sinusno, njeni ekstremni vrednosti pa sta skozi celotno preiskavo konstantni. Obe napetosti imata tudi enako velikost amplitud, razlikuje pa se čas, ko sta doseženi ekstremni vrednosti napetosti. Tako sta ekstremni vrednosti vertikalne in strižne napetosti pri faznem kotu 90° v nasprotni fazi, torej istočasno nastopi maksimalna vrednost v vertikalni smeri ter minimalna vrednost v strižni smeri oziroma obratno, fazni kot 45° pa pomeni, da je vzorec istočasno obremenjen z ekstremno vrednostjo v eni smeri ter začetno (nično) vrednostjo napetosti v drugi smeri.

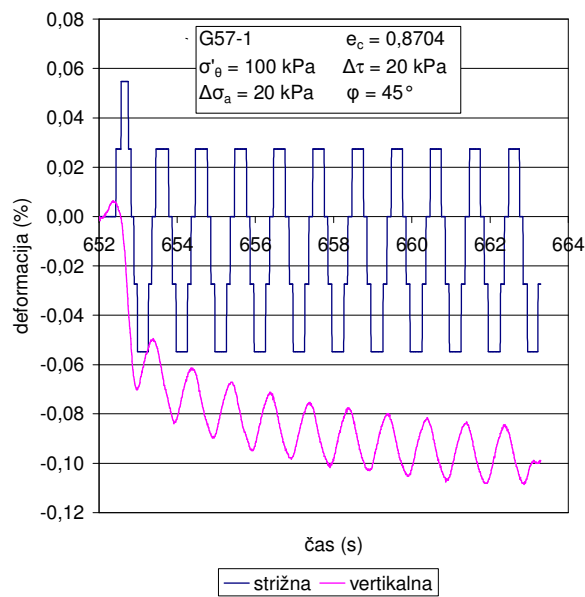


Slika 5.29: Primerjava spreminjanja vertikalne in strižne napetosti:  $\varphi=90^\circ$  (a) in  $\varphi=45^\circ$  (b)

Pri različnih faznih kotih zamika je pričakovati zamik med vertikalno in strižno deformacijo (Slika 5.31). Izkazalo se je, da spreminjanje deformacij ustreza spreminjanju napetosti, tako v smislu spreminjanja faznega kota, kot tudi po obliki funkcije, ki jasno sledi sinusoidi. Strižne deformacije so skozi celotno stopnjo obremenjevanja konstantne, medtem ko je pri vertikalnih deformacijah opaziti povečevanje nepovratne deformacije skozi cikle iste stopnje obremenjevanja. Zmanjševanje vertikalnih deformacij nakazuje dejstvo, da se je vzorec v vertikalni smeri že močno utrdil in se posledično manj odziva na enako amplitudo vertikalne napetosti. Po vsaki stopnji obremenjevanja je sledila konsolidacija.



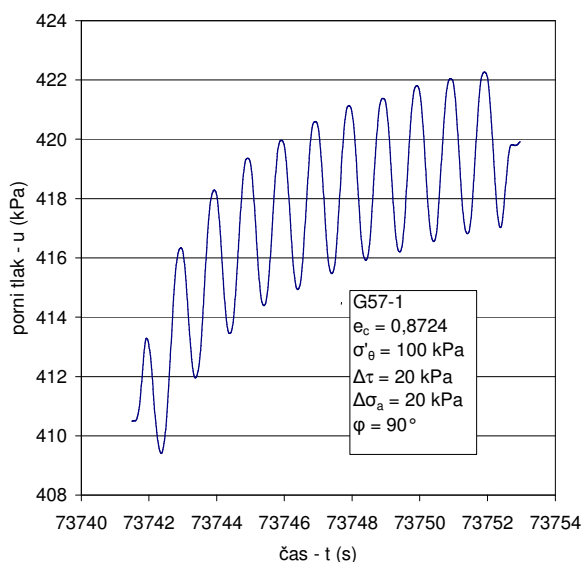
(a)



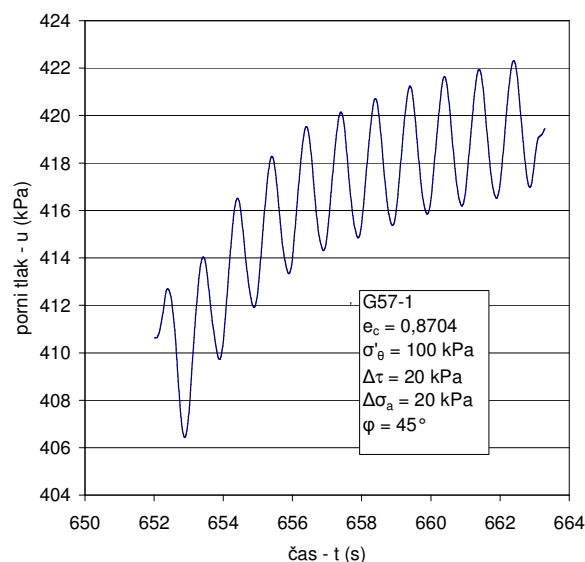
(b)

Slika 5.30: Primerjava spreminjanja vertikalne in strižne deformacije:  $\varphi=90^\circ$  (a) in  $\varphi=45^\circ$  (b)

Pri spremljanju spreminjanja pornega tlaka tekom preiskave opazimo, da ima na krivuljo vpliv tako vertikalno kot strižno obremenjevanje (Slika 5.32). Opaziti je spreminjanje tako povratne kot nepovratne spremembe pornega tlaka. Izkazalo pa se je, da spreminjanje faznega kota zamika nima posebnega vpliva na potek pornega tlaka.



(a)

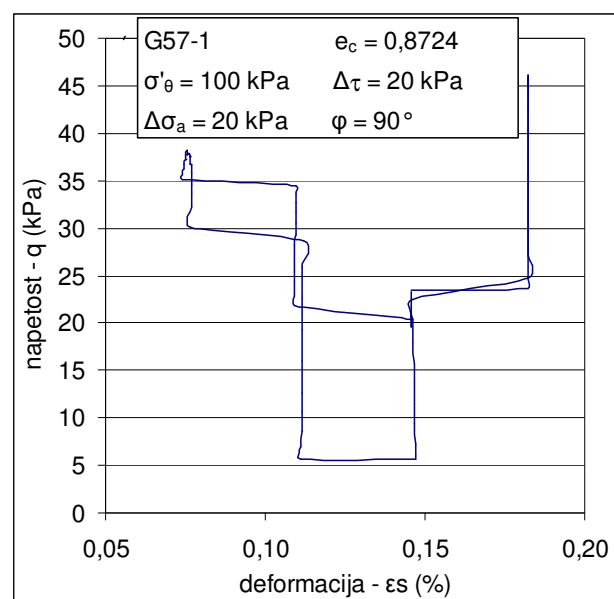


(b)

Slika 5.31: Spreminjanje pornega tlaka pri različnih pornih tlakah:  $\varphi=90^\circ$  (a) in  $\varphi=45^\circ$  (b)

Največjo razliko v spreminjanju faznega kota zamika opazimo pri obliki histereznih zank v  $p$ - $q$  prostoru. Značilnosti oblike histereznih zank pri faznem kotu zamika  $0^\circ$  so bile predstavljene že v prejšnjem poglavju.

Pričakovati je, da se bo oblika histereznih zank pri izvenfaznem obremenjevanju ( $\varphi=90^\circ$ ) nekoliko razlikovala od tistih pri faznem obremenjevanju, zaradi drugačnega spreminjanja napetosti in deformacij. Histerezne zanke imajo štiri križanja in po obliki spominjajo na sedlo (Slika 5.32).

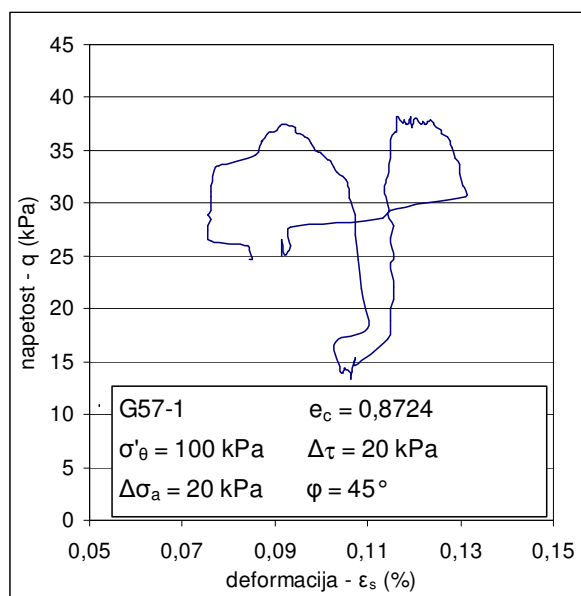


Slika 5.32: Histerezna zanka pri dvosmernem obremenjevanju in  $\varphi=90^\circ$

Podrobnejša analiza pokaže, da sta maksimuma napetosti dosežena pri minimalni in maksimalni vrednosti deformacije, minimum napetosti je dosežen v srednjem območju deformacije, medtem ko sekundarni minimum napetosti nastopi v območju od srednje do maksimalne deformacije. V območju največjih deformacij napetosti zavzamejo območje od sekundarnega minimuma do maksimuma, kar je možno razložiti kot utrjevanje materiala. V nasprotju pa se v območju minimalnih deformacij napetosti gibljejo v manjšem razponu, kar pomeni, da se zanke na tem območju nekoliko razširijo.

Zadnje obremenjevanje, kjer je znašal fazni kot zamika  $45^\circ$ , kar predstavlja zamik med smerema obremenitev za četrtno cikla, je prineslo presenetljive rezultate. Pričakovati je bilo

obliko histereznih zank, ki ne bo podobna nobenim od prej predstavljenih, a temu ni tako. Oblika močno spominja na obliko histereznih zank pri izvenfaznem obremenjevanju ( $\varphi=90^\circ$ ), le da imajo te histerezne zanke zgolj eno križanje ter še eno bližnje srečanje krivulje, ki pri začetnih ciklih zglada kot križanje. Histerezne zanke tako bolj spominjajo na gobasto obliko (Slika 5.33).



Slika 5.33: Histerezna zanka pri dvosmernem obremenjevanju in  $\varphi=45^\circ$

Območji, kjer sta doseženi največji vrednosti napetosti, sta široki, vendar ima tisto pri večjih deformacijah manjšo ploščino od tistega pri najmanjših deformacijah. V območju srednjih deformacij (območje začetnega stanja) je opaziti, da pri mali spremembi deformacije napetost bistveno bolj naraste kot pri skrajnih vrednostih deformacij. Relativna razlika napetosti je v obeh območjih enaka, je pa dosežena pri različnih razlikah deformacij. Iz omenjenega lahko sklepamo, da ima na obnašanje materiala večji vpliv faznost oziroma izvenfaznost obremenjevanja, kot pa velikost zamika.

Pri dobljenih rezultatih primerjave vpliva faznega kota zamika velja omeniti, da so krivulje nekoliko stopničaste in ne tako gladke kot pri deformacijsko vodenih preiskavah. Razlog izhaja iz aparata in merilcev rotacij. Na aparatu sta nameščena dva merilca deformacij, notranji – lokalni ima boljšo ločljivost in ima oddajnik nameščen na zgornjem pokrovu vzorca, sprejemnik pa na ogrodju aparata. V primeru prevelikih vertikalnih deformacij, se

oddajnik in sprejemnik oddaljita ter signal med njima se izgubi. V tem primeru rotacije meri zunanji – globalni merilec, nameščen na zgornjem delu bata, katerega ločljivost je slabša (natančnost  $0,05^\circ$ ). Pri teh preiskavah je prišlo do izgube signala notranjega merilca zasukov, zato so krivulje bolj stopničaste.

Kljub dejstvu, da pri napetostno vodenih preiskavah največji problem predstavljala izbira velikosti amplitude napetosti, je vseeno mogoče oblikovati nekaj zaključkov. Izkazalo se je, da vertikalno napetostno obremenjevanje na vzorcu pusti nepovratne vertikalne deformacije, medtem ko tega ni zaznati v strižni smeri.

Pri primerjavi vpliva faznega kota zamika obremenjevanja je bilo ugotovljeno, da ima ta največji vpliv na obliko histereznih zank predvsem na potek napetosti in ne toliko na potek deformacij, medtem ko pri razvoju pornih tlakov ni bilo vidnih razlik. Iz dobljenih rezultatov je mogoče zaključiti, da velika razlika nastopi med faznim in izvenfaznim obremenjevanjem, medtem ko razlika ni toliko opazna pri različnih kotih izvenfaznega obremenjevanja.

Dobljeni rezultati odpirajo nova vprašanja o obnašanju zemljin pri dvosmernem napetostnem obremenjevanju in željo po opravljanju preiskav z namenom potrjevanja zgoraj omenjenih zaključkov.

## 6 ZAKLJUČEK

Na podlagi opravljenih preiskav na torzijskem triosnem aparatu za votle vzorce lahko zaključim, da so take preiskave primerne za ugotavljanje vpliva dinamičnega obremenjevanja na lastnosti zemljin. Bistveno prednost torzijskih triosnih preiskav votlih vzorcev pred ostalimi dinamičnimi preiskavami predstavlja oblika vzorcev. S pripravo vzorcev, ki so v sredini votli, lahko te konsolidiramo izotropno ali anizotropno, kar posledično pomeni, da lahko v vzorcu vzpostavimo napetostno stanje enako tistemu v naravi. Rezultat deformacijsko vodenih preiskav je dinamični strižni modul zemljin, uporaben pri projektiranju temeljev potresno odpornih objektov. Preiskave so pokazale, da ima anizotropna konsolidacija vpliv na dinamični strižni modul zemljin v smislu višje vrednosti slednjega pri višji efektivni obročni napetosti. S pomočjo napetostno vodenih preiskav ugotavljamo utekočinjenje zemljin. Dobljeni rezultati kažejo na vpliv smeri obremenjevanja ter faznega kota zamika pri dvosmernem obremenjevanju na obliko histereznih zank.

Naj zaključim z mislijo, da navedene ugotovitve odpirajo nova vprašanja o izvajanju napetostno vodenih torzijskih triosnih preiskav votlih vzorcev v smislu študija vpliva smeri obremenjevanja.



## VIRI

Atkinson, J. H., Bransby, P. L. 1995. The Mechanics of Soils – An Introduction to Critical State Soil Mechanics. V: Stress and Strain Paths and Invariants. Maidenhead, McGRAW-Hill.

Buchheister, J., Laue J. 2006. Two Directional Cyclic Loading Experiments in a Hollow Cylinder Apparatus. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva, 3. – 8. september 2006. Paper No. 1006.

Buchheister, J., Laue J. 2007. The Influence of Different Stress States on Soil Liquefaction under a Building. V: 4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Thessaloniki, 25. – 28. junij 2007. Paper No. 1311.

Das. M. B. 1993. Principles of Soil Dynamics. V: Cyclic Torsional Simple Shear Test. Boston, PWS-Kent Publishing Company: str. 116-118.

GDS Instruments. 2009. Hollow Cylinder Apparatus (GDS SS-HCA). Issue 28/01/2009. <http://www.gdsinstruments.com> (30.9.2009).

Ishihara, K. 1996. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. V: Apparatus and procedures for laboratory tests. Oxford, Clarendon Press: str. 43-46.

Ladd, R. S. 1978. Preparing Test Specimens Using Undercompaction. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ 1, 1: 16-23.

Majes, B. 2003a. Fizikalne lastnosti zemljin.  
<http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/GR-UNI/MT/Mehanika%20tal%20UNI%20GR.htm>  
(21.1.2009).

Majes, B. 2003b. Napetosti v temeljnih tleh.  
<http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/GR-UNI/MT/Mehanika%20tal%20UNI%20GR.htm>  
(21.1.2009).

Majes, B. 2003c. Osnovne enačbe teorije elastičnosti.  
<http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/GR-UNI/MT/Mehanika%20tal%20UNI%20GR.htm>  
(21.1.2009).

Majes, B. 2003d. Premiki v polprostoru.  
<http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/GR-UNI/MT/Mehanika%20tal%20UNI%20GR.htm>  
(21.1.2009).

Majes, B. 2008. Triosne preiskave.  
<http://www.fgg.uni-lj.si/kmtal-gradiva/GR-UNI/MT/Mehanika%20tal%20UNI%20GR.htm>  
(21.1.2009).

Navodila za uporabo torzijskega triosnega aparata proizvajalca Wille.

Nishimura, S. 2005. Laboratory Study on Anisotropy of Natural London Clay. Doktorska disertacija. London, Imperial College of Science London, Department of Civil and Environmental Engineering: 417 f.

Rolo, R. 2003. The anisotropic stress-strain-strength behaviour of brittle sediments. Doktorska disertacija. London, Imperial College of Science London, Department of Civil and Environmental Engineering: 531 f.

Shen, Y., Zhou, J., Gong, X. N. 2007. Possible Stress Path of HCA for Cyclic Principal Stress Rotation under Constant Confining Pressure. International Journal of Geomechanics 7, 6: 423-430.

Wykeham Farrance. 2007. Dynamic hollow cylinder apparatus. Issue 21/11/2007. [http://www.wfi.co.uk/soil\\_products.php?code=230&page=Dynamic\\_Hollow\\_Cylinder&product=224&prod\\_name=Dynamic\\_Hollow\\_Cylinder\\_Apparatus](http://www.wfi.co.uk/soil_products.php?code=230&page=Dynamic_Hollow_Cylinder&product=224&prod_name=Dynamic_Hollow_Cylinder_Apparatus) (30.9.2009).

Zdravkovič, L., Potts, D. M. 1999. Advances in modelling soil anisotropy, Constitutive modeling of granular materials. Berlin, Springer.

Standardi:

ASTM D 3999 – 91 (Reapproved 2003) Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus

ASTM D 5311 – 92 (Reapproved 2004) Standard Test Methods for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil

JGS 0551-1998 Method for Torsional Shear Test on Hollow Cylindrical Soil Specimens

JGS 0543-2000 Method for Cyclic Torsional Shear Test on Hollow Cylindrical Specimens to Determine Deformation Properties of Soil

JGS 0550-2000 Preparation of Hollow Cylindrical Soil Specimens for Torsional Shear Test



## **KAZALO PRILOG**

**PRILOGA A: Poročilo o dinamični torzijski triosni preiskavi votlega vzorca**

**PRILOGA B: Diagrami deformacijsko vodenih preiskav**

**PRILOGA C: Diagrami napetostno vodenih strižnih preiskav**

**PRILOGA D: Diagrami napetostno vodenih vertikalnih preiskav**

**PRILOGA E: Diagrami napetostno vodenih strižnih in vertikalnih preiskav**

**PRILOGA A: POROČILO O DINAMIČNI TORZIJSKI TRIOSNI PREISKAVI  
VOTLEGA VZORCA**

## PESEK – GZ1

### POROČILO DINAMIČNE TORZIJSKE TRIOSNE PREISKAVE

Vzorec - GZ1\_deformacijsko  
 Material: testni grobozrnat pesek

datum: 14.12.2009

Priprava: suha vgradnja z zbijanjem

Vzorec pred konsolidacijo:

$H_0 = 201,48$  mm  
 $V_0 = 1020389$  mm<sup>3</sup>  
 $A_0 = 5064,47$  mm<sup>2</sup>  
 $D_{00} = 100,38$  mm  
 $D_{10} = 60,23$  mm

B-parameter in metoda določevanja:

$B = 0,997$

Določen po standardu JGS 0543-2000.

Spremembe med konsolidacijo:

$\Delta H_c = 0,53$  mm  
 $\Delta V_c = 21601$  mm<sup>3</sup>

Suha masa in gostota vzorca po konsolidaciji:

$m_s = 1675,0$  g  
 $\rho_{dc} = 1,677$  g/cm<sup>3</sup>  
 $\rho_{s,zm} = 2,637$  g/cm<sup>3</sup>

Napetosti po končani konsolidaciji:

$\sigma_{ac} = 250,2$  kPa  
 $\sigma_{oc} = 250,04$  kPa  
 $\sigma_{ic} = 249,95$  kPa  
 $u_c = 149,96$  kPa

Efektivne napetosti po končani konsolidaciji:

$\sigma'_{ac} = 100,24$  kPa  
 $\sigma'_{oc} = 100,08$  kPa  
 $\sigma'_{ic} = 99,99$  kPa  
 $K = 1,00$  koeficient anizotropne konsolidacije

Oblika valov, frekvenca obremenjevanja in drenaže:

val: sinusna oblika  
 drenaže: nedrenirana preiskava  
 $v = 1,0$  Hz

Metoda merjenja torzije in kota zasuka:

torzija: merjena na zunanjem delu bata  
 kot zasuka: merjen z notranjim merilcem

Velikost vzorca pred vsako stopnjo obremenjevanja:

stopnja	H (mm)	V (mm <sup>3</sup> )	A (mm <sup>2</sup> )	D <sub>0</sub> (mm)	D <sub>1</sub> (mm)	$\rho_{dc}$ (g/cm <sup>3</sup> )	e
1	200,95	998788	4970,33	99,44	59,66	1,677	0,5724
2	200,95	998730	4970,04	99,44	59,66	1,677	0,5723
3	200,95	998459	4968,70	99,42	59,65	1,678	0,5719
4	200,95	998412	4968,46	99,42	59,65	1,678	0,5718
5	200,95	998378	4968,29	99,42	59,65	1,678	0,5718
6	200,95	998293	4967,87	99,41	59,65	1,678	0,5716
7	200,95	998097	4966,89	99,40	59,64	1,678	0,5713
8	200,93	997812	4965,97	99,40	59,64	1,679	0,5709
9	200,88	997308	4964,70	99,38	59,63	1,680	0,5701
10	200,75	996198	4962,38	99,36	59,62	1,681	0,5683

Strižni modul in procent dušenja v 5 in 10 ciklu:

stopnja	$\gamma_{sa}$ (%)	$G_{eq,5}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_5$ (%)	$G_{eq,10}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_{10}$ (%)
1	0,001244	206,13	4,12	201,54	4,37
2	0,004781	169,76	3,17	170,06	3,35
3	0,000725	226,54	4,21	229,82	4,43
4	0,004231	179,56	2,30	176,75	2,15
5	0,007564	158,70	3,45	157,12	3,41
6	0,015076	139,05	4,40	141,62	4,07
7	0,028940	118,65	6,13	119,97	5,52
8	0,056551	86,11	9,39	84,89	9,31
9	0,113755	53,07	13,39	53,57	13,10
10	0,223250	31,90	15,99	30,74	15,58

## PESEK – GZ2

### POROČILO DINAMIČNE TORZIJSKE TRIOSNE PREISKAVE

Vzorec - GZ2 deformacijsko  
 Material: testni grobozrnat pesek

datum: 8.1.2010

*Priprava:* suha vgradnja z zbijanjem

*Vzorec pred konsolidacijo:*

$H_0 = 199,82 \text{ mm}$   
 $V_0 = 1005310 \text{ mm}^3$   
 $A_0 = 5031,08 \text{ mm}^2$   
 $D_{o0} = 100,05 \text{ mm}$   
 $D_{i0} = 60,03 \text{ mm}$

*B-parameter in metoda določevanja:*

$B = 1,067$

Določen po standardu JGS 0543-2000.

*Spremembe med konsolidacijo:*

$\Delta H_c = 0,24 \text{ mm}$   
 $\Delta V_c = 6669 \text{ mm}^3$

*Suha masa in gostota vzorca po konsolidaciji:*

$m_s = 1675,0 \text{ g}$   
 $\rho_{ds} = 1,677 \text{ g/cm}^3$   
 $\rho_{s,zm} = 2,637 \text{ g/cm}^3$

*Napetosti po končani konsolidaciji:*

$\sigma_{ac} = 450,11 \text{ kPa}$   
 $\sigma_{oc} = 450,03 \text{ kPa}$   
 $\sigma_{ic} = 369,95 \text{ kPa}$   
 $u_c = 350,05 \text{ kPa}$

*Efektivne napetosti po končani konsolidaciji:*

$\sigma'_{ac} = 100,06 \text{ kPa}$   
 $\sigma'_{oc} = 99,98 \text{ kPa}$   
 $\sigma'_{ic} = 19,9 \text{ kPa}$

$K = 1,00$  koeficient anizotropne konsolidacije

*Oblika valov, frekvenca obremenjevanja in drenaže:*

val: sinusna oblika

drenaže: nedrenirana preiskava

$v = 1,0 \text{ Hz}$

*Metoda merjenja torzije in kota zasuka:*

torzija: merjena na zunanjem delu bata

kot zasuka: merjen z notranjim merilcem

*Velikost vzorca pred vsako stopnjo obremenjevanja:*

stopnja	H (mm)	V (mm <sup>3</sup> )	A (mm <sup>2</sup> )	D <sub>o</sub> (mm)	D <sub>i</sub> (mm)	$\rho_{ds}$ (g/cm <sup>3</sup> )	e
1	199,58	998641	5003,71	99,77	59,86	1,677	0,5722
2	199,58	998571	5003,36	99,77	59,86	1,677	0,5721
3	199,58	998421	5002,61	99,76	59,86	1,678	0,5718
4	199,58	998201	5001,51	99,75	59,85	1,678	0,5715
5	199,57	997881	5000,15	99,74	59,84	1,679	0,5710
6	199,56	996921	4995,59	99,69	59,81	1,680	0,5695
7	199,54	995601	4989,48	99,63	59,78	1,682	0,5674
8	199,42	993961	4984,26	99,58	59,75	1,685	0,5648
9							
10							

*Strižni modul in procent dušenja v 5 in 10 ciklu:*

stopnja	$\gamma_{sa}$ (%)	$G_{eq,5}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_5$ (%)	$G_{eq,10}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_{10}$ (%)
1	0,000733	170,41	5,57	178,13	5,79
2	0,003281	152,99	2,35	149,52	2,20
3	0,006107	145,05	2,30	142,52	2,04
4	0,012125	135,58	4,34	135,91	3,48
5	0,024510	137,70	4,81	139,23	4,23
6	0,046088	105,31	8,20	106,14	7,69
7	0,091136	63,00	13,01	61,43	12,58
8	0,180177	33,63	15,76	29,82	15,46
9					
10					

## PESEK – GZ3

### POROČILO DINAMIČNE TORZIJSKE TRIOSNE PREISKAVE

Vzorec - GZ3\_deformacijsko  
 Material: testni grobozrnat pesek

datum: 18.1.2010

*Priprava:* suha vgradnja z zbijanjem

*Vzorec pred konsolidacijo:*

$H_0 = 199,3$  mm  
 $V_0 = 1015363$  mm<sup>3</sup>  
 $A_0 = 5094,64$  mm<sup>2</sup>  
 $D_{s0} = 100,68$  mm  
 $D_{i0} = 60,41$  mm

*B-parameter in metoda določevanja:*

$B = 1,007$

Določen po standardu JGS 0543-2000.

*Spremembe med konsolidacijo:*

$\Delta H_c = 0,24$  mm  
 $\Delta V_c = 37330$  mm<sup>3</sup>

*Suha masa in gostota vzorca po konsolidaciji:*

$m_s = 1675,0$  g  
 $\rho_{dc} = 1,713$  g/cm<sup>3</sup>  
 $\rho_{s,zm} = 2,637$  g/cm<sup>3</sup>

*Napetosti po končani konsolidaciji:*

$\sigma_{ac} = 449,86$  kPa  
 $\sigma_{oc} = 450,02$  kPa  
 $\sigma_{ic} = 409,94$  kPa  
 $u_c = 350,06$  kPa

*Efektivne napetosti po končani konsolidaciji:*

$\sigma'_{ac} = 99,8$  kPa  
 $\sigma'_{oc} = 99,96$  kPa  
 $\sigma'_{ic} = 59,88$  kPa

$K = 1,00$  koeficient anizotropne konsolidacije

*Oblika valov, frekvenca obremenjevanja in drenaže:*

val: sinusna oblika

drenaže: nedrenirana preiskava

$v = 1,0$  Hz

*Metoda merjenja torzije in kota zasuka:*

torzija: merjena na zunanem delu bata

kot zasuka: merjen z notranjim merilcem

*Velikost vzorca pred vsako stopnjo obremenjevanja:*

stopnja	H (mm)	V (mm <sup>3</sup> )	A (mm <sup>2</sup> )	D <sub>o</sub> (mm)	D <sub>i</sub> (mm)	$\rho_{dc}$ (g/cm <sup>3</sup> )	e
1	199,06	978033	4913,26	98,87	59,32	1,713	0,5397
2	199,06	977963	4912,90	98,86	59,32	1,713	0,5396
3	199,06	977813	4912,15	98,86	59,31	1,713	0,5394
4	199,06	977593	4911,05	98,84	59,31	1,713	0,5391
5	199,06	977273	4909,44	98,83	59,30	1,714	0,5385
6	199,05	976313	4904,86	98,78	59,27	1,716	0,5370
7	199,04	974993	4898,48	98,72	59,23	1,718	0,5350
8	199,01	973353	4890,97	98,64	59,19	1,721	0,5324
9							
10							

*Strižni modul in procent dušenja v 5 in 10 ciklu:*

stopnja	$\gamma_{sa}$ (%)	$G_{eq,5}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_5$ (%)	$G_{eq,10}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_{10}$ (%)
1	0,003079	284,09	13,29	284,51	13,09
2	0,004075	356,32	19,45	357,97	19,11
3	0,006248	279,07	16,61	277,39	15,77
4	0,012403	208,12	10,47	210,46	9,89
5	0,023535	158,04	9,22	160,55	8,41
6	0,045603	111,18	10,86	112,58	9,97
7	0,090247	67,36	14,54	67,01	13,85
8	0,178938	39,16	16,81	37,71	16,37
9					
10					



## PEŠČEN MELJ G57-1

### POROČILO DINAMIČNE TORZIJSKE TRIOSNE PREISKAVE

Vzorec - G-57 izo  
 Material: meljni pesek

datum: 27.1.2010

Priprava: sedimentacijska metoda

Vzorec pred konsolidacijo:

$H_0 = 191,74$  mm  
 $V_0 = 980177$  mm<sup>3</sup>  
 $A_0 = 5112,01$  mm<sup>2</sup>  
 $D_{e0} = 100,85$  mm  
 $D_{i0} = 60,51$  mm

B-parameter in metoda določevanja:

$B = 0,974$

Določen po standardu JGS 0543-2000.

Spremembe med konsolidacijo:

$\Delta H_c = 3,48$  mm  
 $\Delta V_c = 24973$  mm<sup>3</sup>

Suha masa in gostota vzorca po konsolidaciji:

$m_s = 1353,0$  g  
 $\rho_{dc} = 1,416$  g/cm<sup>3</sup>  
 $\rho_{s,zm} = 2,762$  g/cm<sup>3</sup>

Napetosti po končani konsolidaciji:

$\sigma_{ac} = 509,04$  kPa  
 $\sigma_{oc} = 510,03$  kPa  
 $\sigma_{ic} = 510,06$  kPa  
 $u_c = 409,8$  kPa

Efektivne napetosti po končani konsolidaciji:

$\sigma'_{ac} = 99,24$  kPa  
 $\sigma'_{oc} = 100,23$  kPa  
 $\sigma'_{ic} = 100,26$  kPa

$K = 0,99$  koeficient anizotropne konsolidacije

Oblika valov, frekvenca obremenjevanja in drenaže:

val: sinusna oblika  
 drenaže: nedrenirana preiskava  
 $v = 1,0$  Hz

Metoda merjenja torzije in kota zasuka:

torzija: merjena na zunanjem delu bata  
 kot zasuka: merjen z notranjim merilcem

Velikost vzorca pred vsako stopnjo obremenjevanja:

stopnja	H (mm)	V (mm <sup>3</sup> )	A (mm <sup>2</sup> )	D <sub>o</sub> (mm)	D <sub>i</sub> (mm)	$\rho_{dc}$ (g/cm <sup>3</sup> )	e
1	188,26	955204	5073,85	100,47	60,28	1,416	0,9499
2	188,25	955121	5073,68	100,47	60,28	1,417	0,9498
3	188,25	955066	5073,39	100,46	60,28	1,417	0,9497
4	188,25	955003	5073,06	100,46	60,28	1,417	0,9495
5	188,24	954891	5072,73	100,46	60,28	1,417	0,9493
6	188,24	954606	5071,22	100,44	60,27	1,417	0,9487
7	188,24	954050	5068,26	100,41	60,25	1,418	0,9476
8	188,20	953654	5067,24	100,40	60,24	1,419	0,9468
9	188,00	951651	5061,97	100,35	60,21	1,422	0,9427
10							

Strižni modul in procent dušenja v 5 in 10 ciklu:

stopnja	$\gamma_{sa}$ (%)	$G_{eq,5}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_5$ (%)	$G_{eq,10}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_{10}$ (%)
1	0,005254	158,15	19,74	156,38	20,75
2	0,005644	146,55	20,94	146,35	22,62
3	0,006227	137,37	18,81	136,30	19,46
4	0,009341	107,68	16,20	106,97	15,80
5	0,022282	67,44	12,61	67,44	12,04
6	0,043196	47,72	11,43	47,40	10,84
7	0,085199	32,39	11,34	31,74	10,83
8	0,168861	19,01	15,62	18,05	14,93
9	0,335473	10,43	15,49	9,64	14,99
10					

## PEŠČEN MELJ G57-2

### POROČILO DINAMIČNE TORZIJSKE TRIOSNE PREISKAVE

Vzorec - G-57\_anizotropna\_70  
 Material: meljni pesek

datum: 9.2.2010

Priprava: sedimentacijska metoda

Vzorec pred konsolidacijo:

$H_0 = 192,26$  mm  
 $V_0 = 985203$  mm<sup>3</sup>  
 $A_0 = 5124,33$  mm<sup>2</sup>  
 $D_{s0} = 100,97$  mm  
 $D_{j0} = 60,58$  mm

B-parameter in metoda določevanja:

B = 0,950

Določen po standardu JGS 0543-2000.

Spremembe med konsolidacijo:

$\Delta H_c = 5,82$  mm  
 $\Delta V_c = 30399$  mm<sup>3</sup>

Suha masa in gostota vzorca po konsolidaciji:

$m_s = 1391,5$  g  
 $\rho_{dc} = 1,457$  g/cm<sup>3</sup>  
 $\rho_{s,zm} = 2,762$  g/cm<sup>3</sup>

Napetosti po končani konsolidaciji:

$\sigma_{ac} = 515,26$  kPa  
 $\sigma_{oc} = 510,02$  kPa  
 $\sigma_{ic} = 529,94$  kPa  
 $u_c = 411,79$  kPa

Efektivne napetosti po končani konsolidaciji:

$\sigma'_{ac} = 103,47$  kPa  
 $\sigma'_{oc} = 98,23$  kPa  
 $\sigma'_{ic} = 118,15$  kPa

K = 1,05 koeficient anizotropne konsolidacije

Oblika valov, frekvenca obremenjevanja in drenaže:

val: sinusna oblika

drenaže: nedrenirana preiskava

v = 1,0 Hz

Metoda merjenja torzije in kota zasuka:

torzija: merjena na zunanjem delu bata

kot zasuka: merjen z notranjim merilcem

Velikost vzorca pred vsako stopnjo obremenjevanja:

stopnja	H (mm)	V (mm <sup>3</sup> )	A (mm <sup>2</sup> )	D <sub>o</sub> (mm)	D <sub>i</sub> (mm)	$\rho_{dc}$ (g/cm <sup>3</sup> )	e
1	186,44	954804	5121,24	100,94	60,56	1,457	0,8952
2	186,44	954791	5121,17	100,94	60,56	1,457	0,8952
3	186,43	954763	5121,30	100,94	60,56	1,457	0,8951
4	186,42	954654	5120,99	100,94	60,56	1,458	0,8949
5	186,40	954567	5121,07	100,94	60,56	1,458	0,8947
6	186,37	954300	5120,46	100,93	60,56	1,458	0,8942
7	186,30	953826	5119,84	100,92	60,55	1,459	0,8933
8	186,18	952962	5118,50	100,91	60,55	1,460	0,8915
9	185,78	950246	5114,90	100,88	60,53	1,464	0,8862
10	185,28	948123	5117,25	100,90	60,54	1,468	0,8819

Strižni modul in procent dušenja v 5 in 10 ciklu:

stopnja	$\gamma_{sa}$ (%)	$G_{eq,5}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_5$ (%)	$G_{eq,10}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_{10}$ (%)
1	0,000197	255,80	8,92	258,68	8,92
2	0,000790	141,60	6,85	146,51	6,65
3	0,001974	122,48	5,01	116,18	5,21
4	0,005627	91,82	5,96	92,16	5,85
5	0,009774	76,65	6,95	76,58	6,81
6	0,019945	61,94	8,01	61,98	7,66
7	0,038027	47,08	9,02	46,65	8,62
8	0,075104	30,49	11,83	30,00	11,34
9	0,148103	19,61	13,26	18,81	12,67
10	0,294691	11,35	14,47	10,56	13,85

## PEŠČEN MELJ G57-3

### POROČILO DINAMIČNE TORZIJSKE TRIOSNE PREISKAVE

Vzorec - G57\_anizo\_40  
 Material: meljni pesek

datum: 2.3.2010

Priprava: sedimentacijska metoda

Vzorec pred konsolidacijo:

$H_0 = 197,26$  mm  
 $V_0 = 1000283$  mm<sup>3</sup>  
 $A_0 = 5070,89$  mm<sup>2</sup>  
 $D_{00} = 100,44$  mm  
 $D_{10} = 60,26$  mm

B-parameter in metoda določevanja:

B = 0,953

Določen po standardu JGS 0543-2000.

Spremembe med konsolidacijo:

$\Delta H_c = 0,82$  mm  
 $\Delta V_c = 39119$  mm<sup>3</sup>

Suha masa in gostota vzorca po konsolidaciji:

$m_s = 1415,0$  g  
 $\rho_{dc} = 1,472$  g/cm<sup>3</sup>  
 $\rho_{s,zm} = 2,762$  g/cm<sup>3</sup>

Napetosti po končani konsolidaciji:

$\sigma_{ac} = 585,13$  kPa  
 $\sigma_{oc} = 579,98$  kPa  
 $\sigma_{ic} = 539,94$  kPa  
 $u_c = 439,94$  kPa

Efektivne napetosti po končani konsolidaciji:

$\sigma'_{ac} = 145,19$  kPa  
 $\sigma'_{oc} = 140,04$  kPa  
 $\sigma'_{ic} = 100$  kPa  
 K = 1,04 koeficient anizotropne konsolidacije

Oblika valov, frekvenca obremenjevanja in drenaže:

val: sinusna oblika  
 drenaže: nedrenirana preiskava  
 $v = 1,0$  Hz

Metoda merjenja torzije in kota zasuka:

torzija: merjena na zunanjem delu bata  
 kot zasuka: merjen z notranjim merilcem

Velikost vzorca pred vsako stopnjo obremenjevanja:

stopnja	H (mm)	V (mm <sup>3</sup> )	A (mm <sup>2</sup> )	D <sub>o</sub> (mm)	D <sub>i</sub> (mm)	$\rho_{dc}$ (g/cm <sup>3</sup> )	e
1	196,44	961164	4892,91	98,66	59,20	1,472	0,8761
2	196,42	961192	4893,56	98,67	59,20	1,472	0,8762
3	196,36	961186	4895,02	98,68	59,21	1,472	0,8762
4	196,17	960966	4898,64	98,72	59,23	1,472	0,8758
5	195,75	960118	4904,82	98,78	59,27	1,474	0,8741
6	195,08	959020	4916,03	98,89	59,34	1,475	0,8720
7	194,04	957435	4934,22	99,08	59,45	1,478	0,8689
8	193,58	951188	4913,67	98,87	59,32	1,488	0,8567
9	193,48	950557	4912,95	98,86	59,32	1,489	0,8554
10	193,21	947755	4905,31	98,79	59,27	1,493	0,8500
11	192,79	945569	4904,66	98,78	59,27	1,496	0,8457

Strižni modul in procent dušenja v 5 in 10 ciklu:

stopnja	$\gamma_{sa}$ (%)	$G_{eq,5}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_5$ (%)	$G_{eq,10}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$h_{10}$ (%)
1	0,000183	371,82	11,42	208,38	11,34
2	0,000733	177,85	9,70	193,15	9,51
3	0,001099	157,55	9,06	150,32	8,55
4	0,004129	106,51	9,14	108,50	8,37
5	0,004968	96,08	9,76	97,41	8,99
6	0,009058	72,21	10,14	73,47	9,20
7	0,018684	53,71	10,30	54,25	9,50
8	0,035686	56,88	8,01	57,20	7,48
9	0,069970	40,71	10,71	40,42	10,29
10	0,138820	26,65	12,34	25,96	12,01
11	0,276332	16,25	13,57	15,27	13,25

## PRILOGA B: DIAGRAMI DEFORMACIJSKO VODENIH PREISKAV

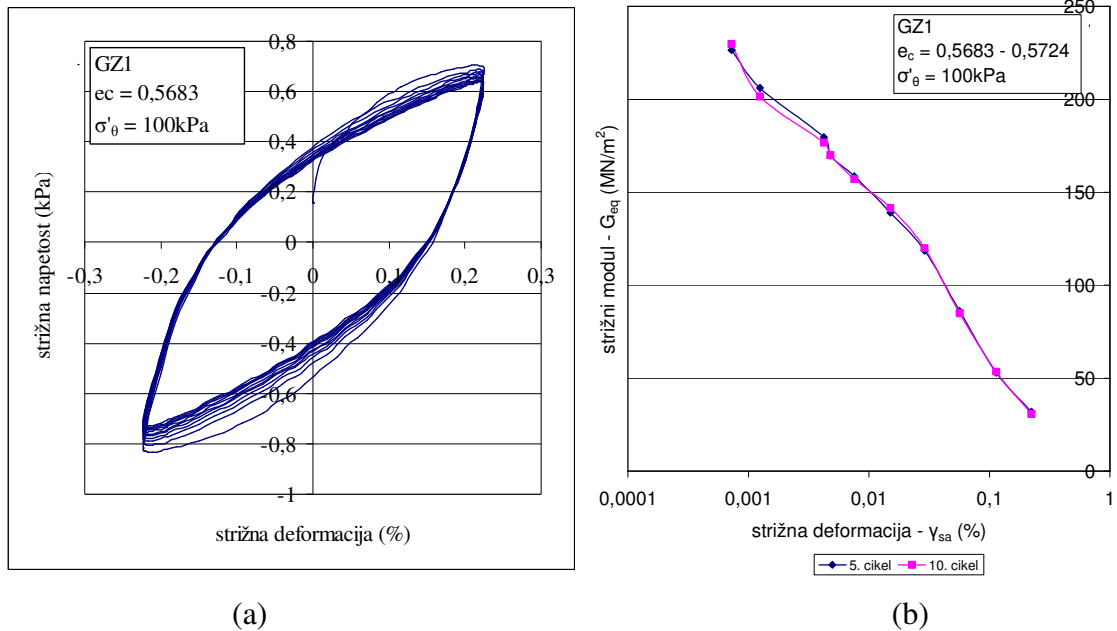


Diagram B. 1: Histerezne zanke zadnje stopnje obremenjevanja (a) in primerjava strižnega modula v 5. in 10. ciklu (b) za vzorec *Pesek – GZ1*

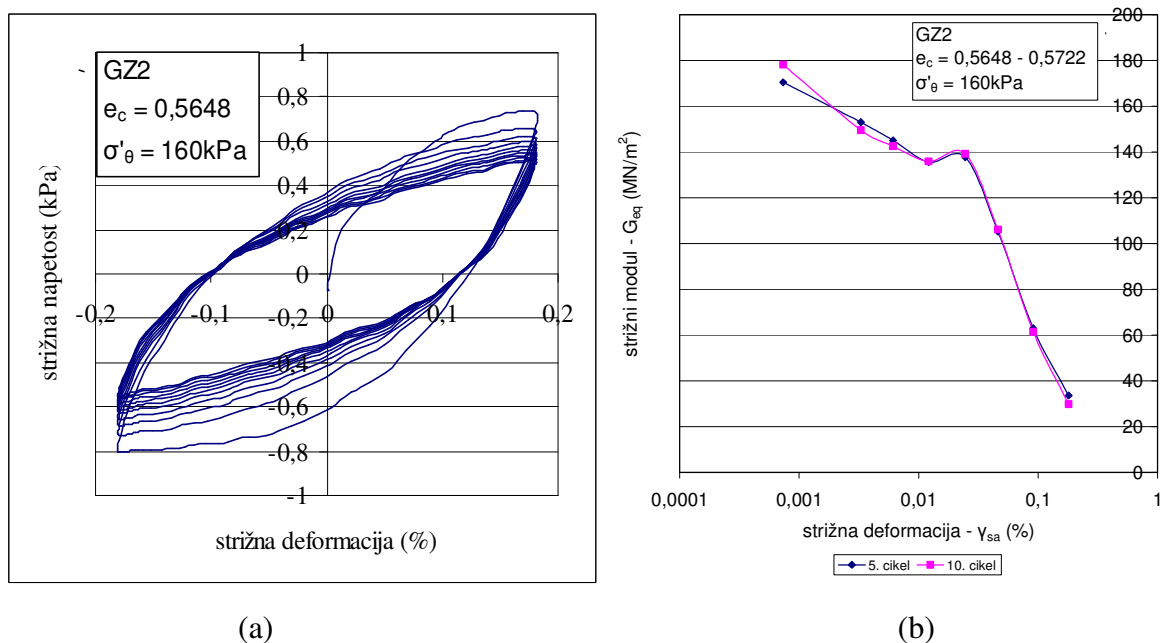
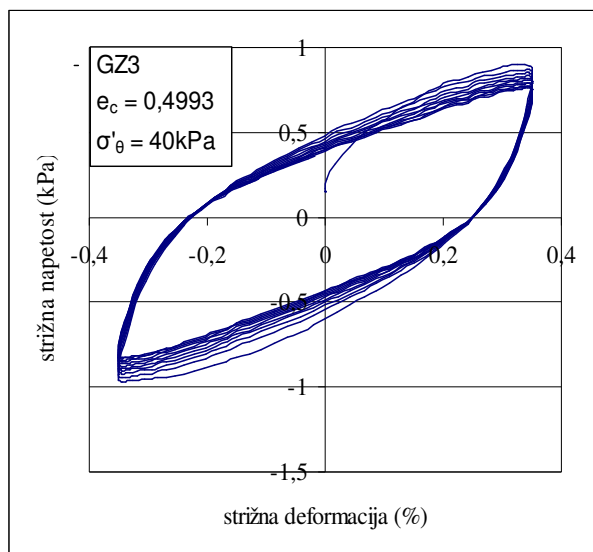
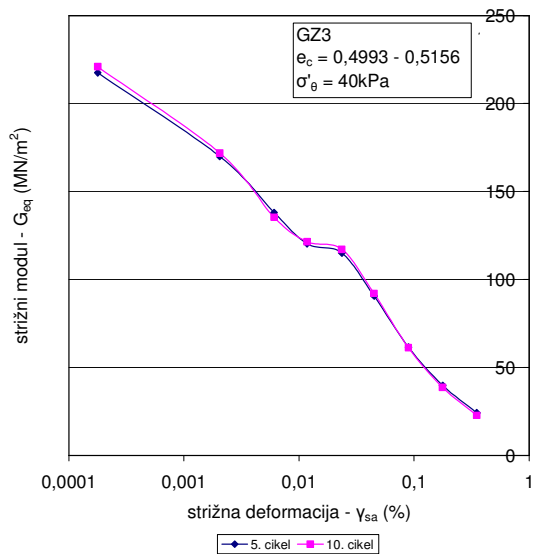


Diagram B. 2: Histerezne zanke zadnje stopnje obremenjevanja (a) in primerjava strižnega modula v 5. in 10. ciklu (b) za vzorec *Pesek – GZ2*

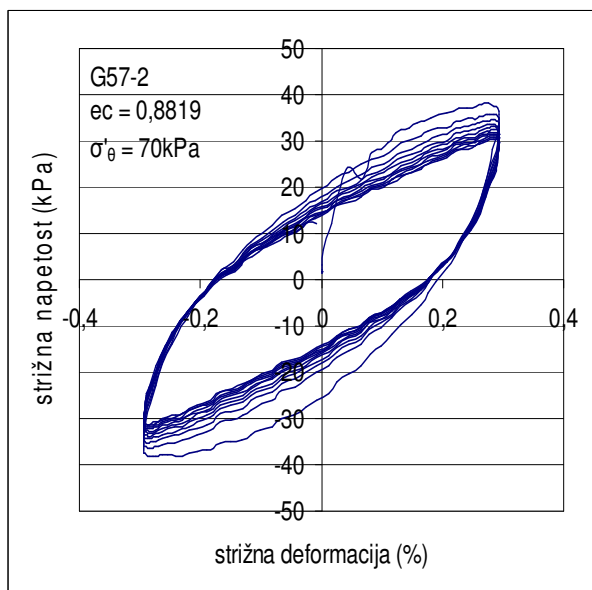


(a)

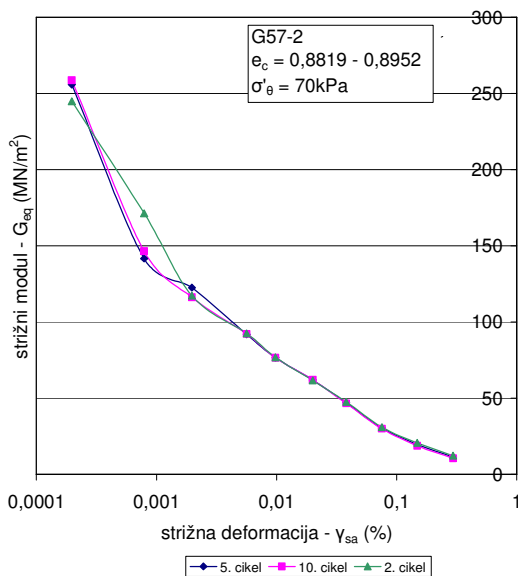


(b)

Diagram B. 3: Histerezne zanke zadnje stopnje obremenjevanja (a) in primerjava strižnega modula v 5. in 10. ciklu (b) za vzorec *Pesek – GZ3*

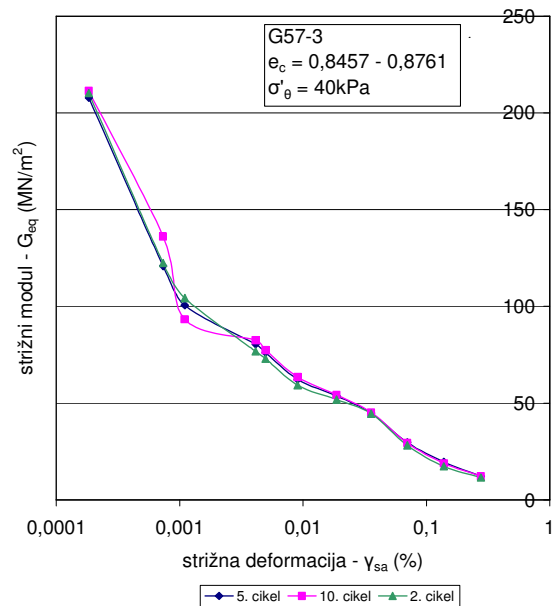
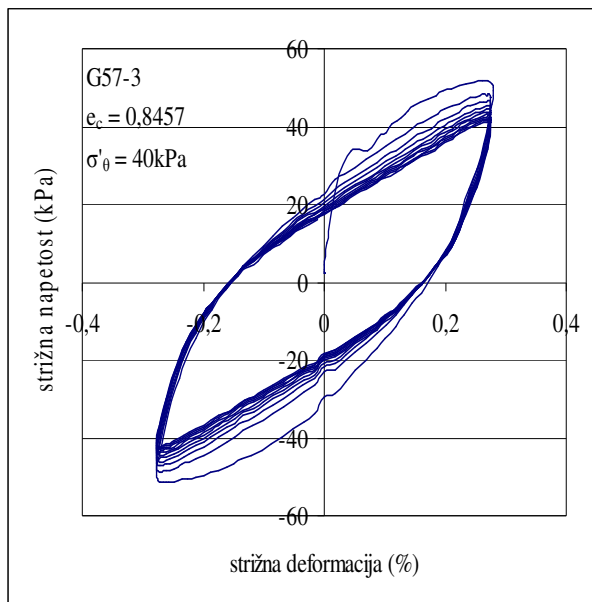


(a)



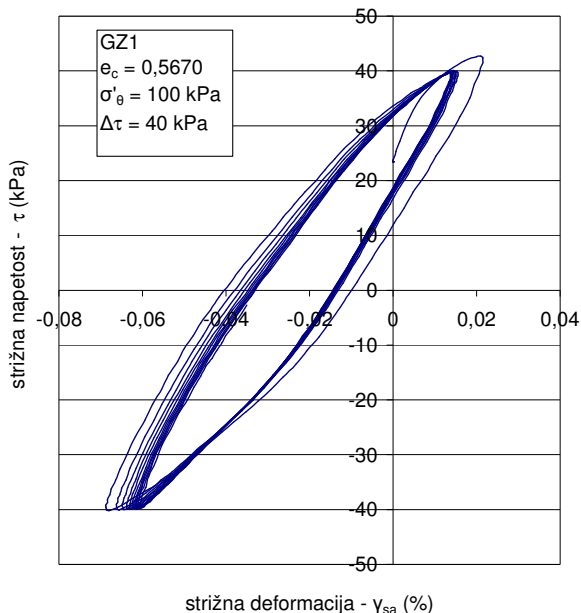
(b)

Diagram B. 4: Histerezne zanke zadnje stopnje obremenjevanja (a) in primerjava strižnega modula v 2., 5. in 10. ciklu (b) za vzorec *Peščen melj G57-2*

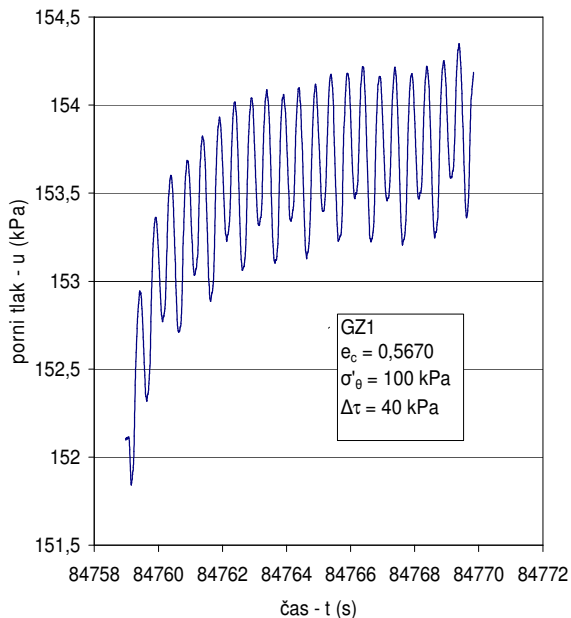


(a) (b)  
Diagram B. 5: Histerezne zanke zadnje stopnje obremenjevanja (a) in primerjava strižnega modula v 2., 5. in 10. ciklu (b) za vzorec *Peščen melj G57-3*

### PRILOGA C: DIAGRAMI NAPETOSTNO VODENIH STRIŽNIH PREISKAV

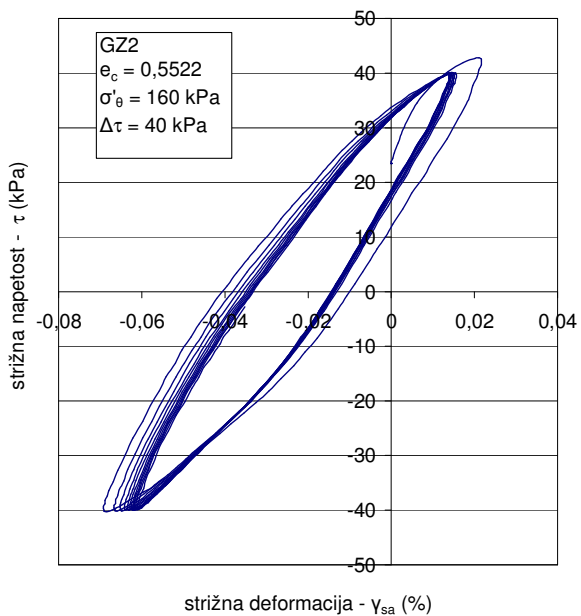


(a)

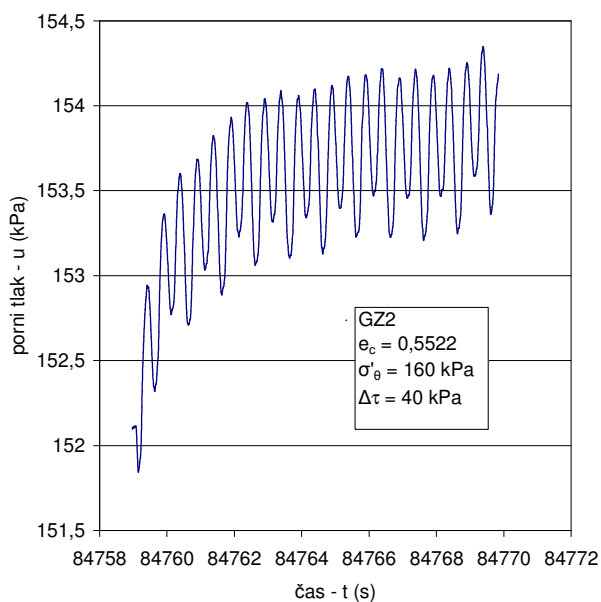


(b)

Diagram C. 1: Histerezne zanke pri strižni obremenitvi (a) in spreminjanje pornega tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Pesek – GZ1*



(a)



(b)

Diagram C. 2: Histerezne zanke pri strižni obremenitvi (a) in spreminjanje pornega tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Pesek – GZ2*

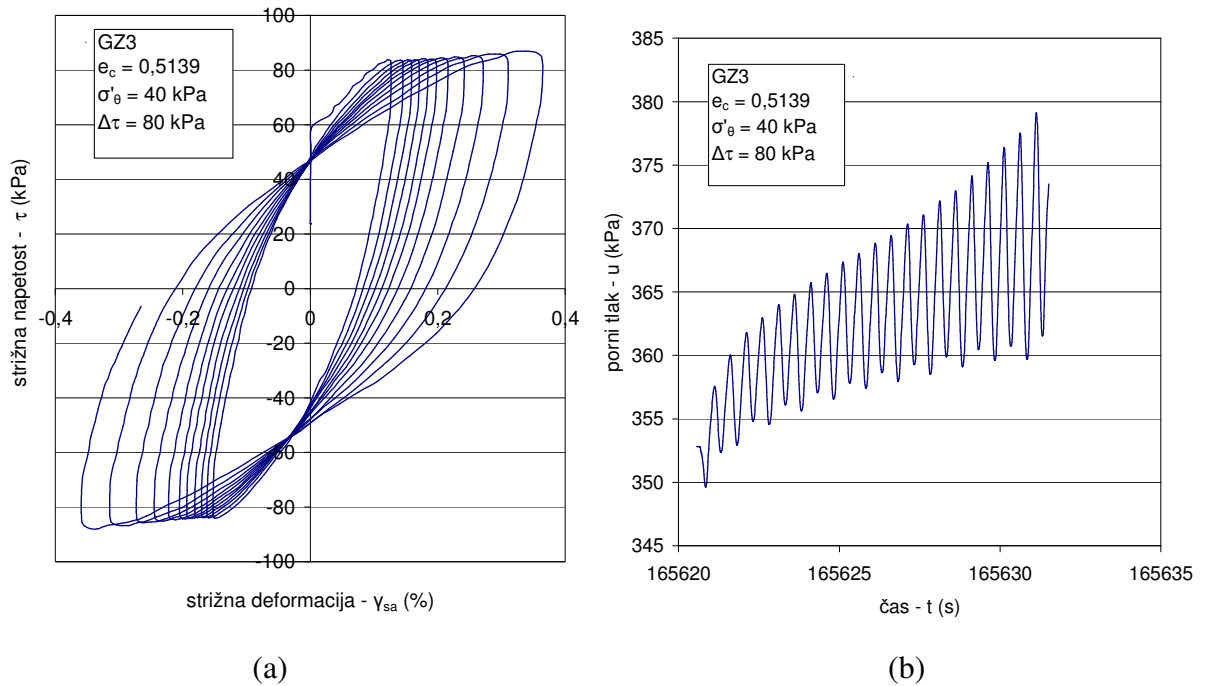


Diagram C. 3: Histerezne zanke pri strižni obremenitvi (a) in spreminjanje pornega tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Pešek – GZ3*

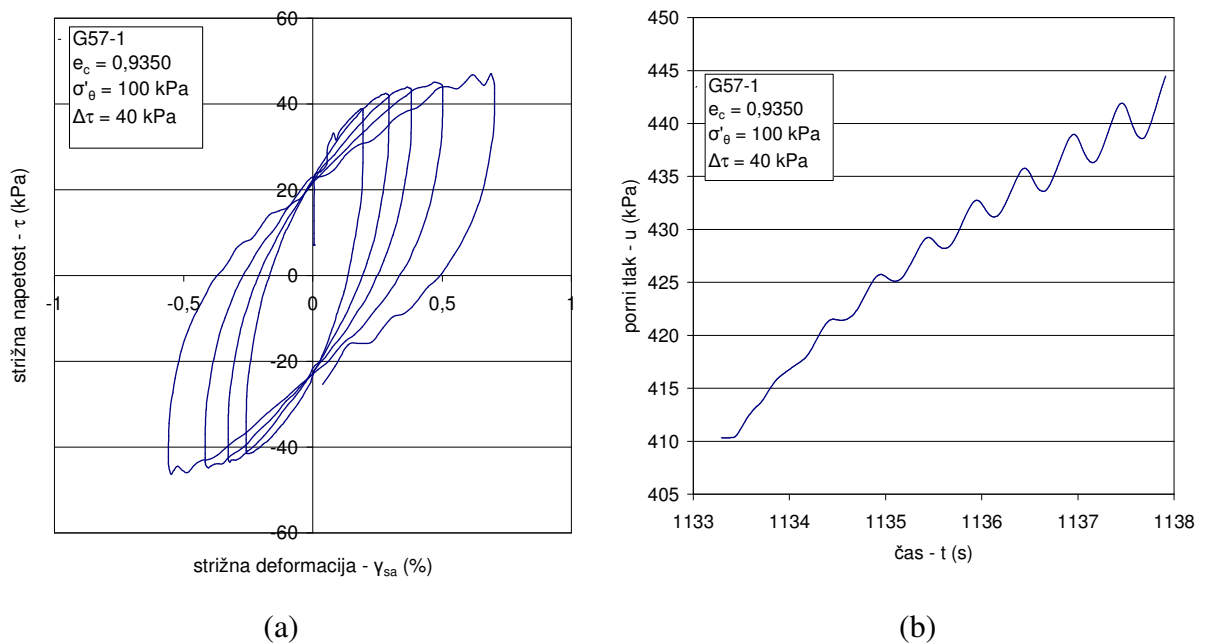


Diagram C. 4: Histerezne zanke pri strižni obremenitvi (a) in spreminjanje pornega tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Peščen melj G57-1*



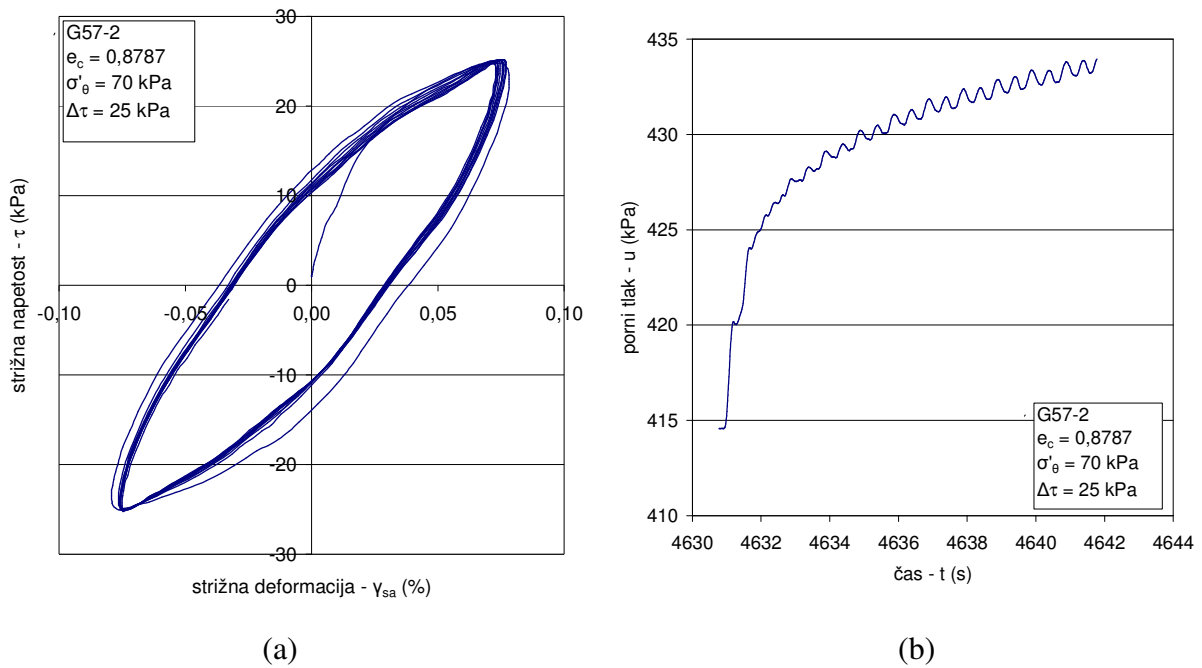


Diagram C. 5: Histerezne zanke pri strižni obremenitvi (a) in spreminjanje pornega tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Peščen melj G57-2*

## PRILOGA D: DIAGRAMI NAPETOSTNO VODENIH VERTIKALNIH PREISKAV

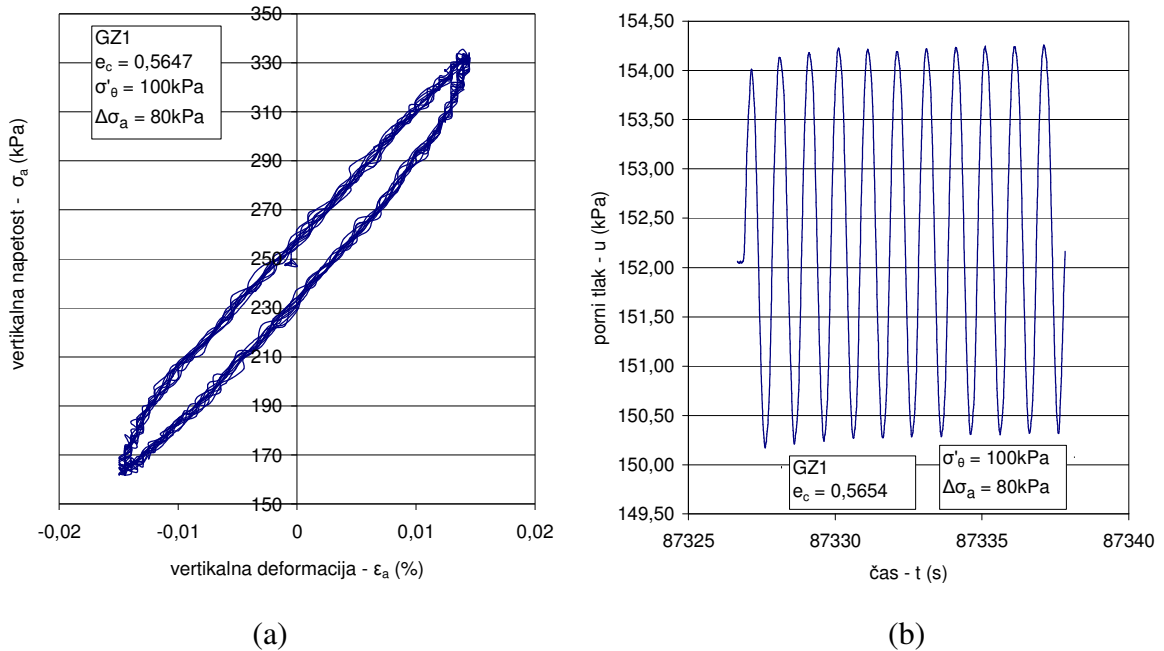


Diagram D. 1: Histerezne zanke pri vertikalni obremenitvi (a) in spreminjanje pornega tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Pesek – GZ1*

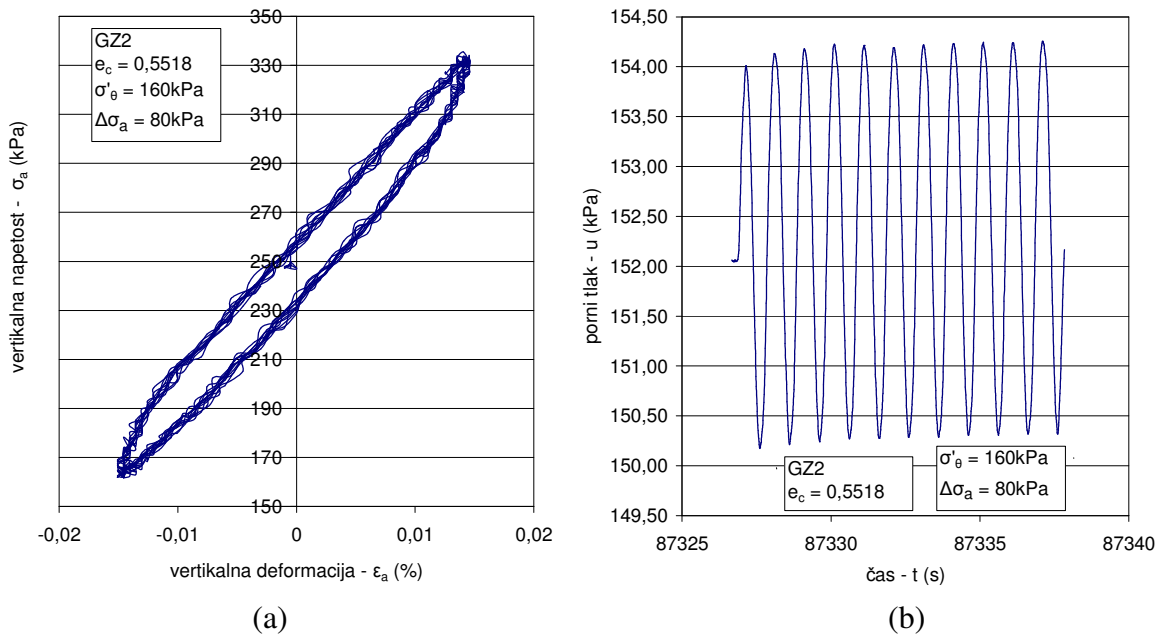


Diagram D. 2: Histerezne zanke pri vertikalni obremenitvi (a) in spreminjanje pornega tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Pesek – GZ2*

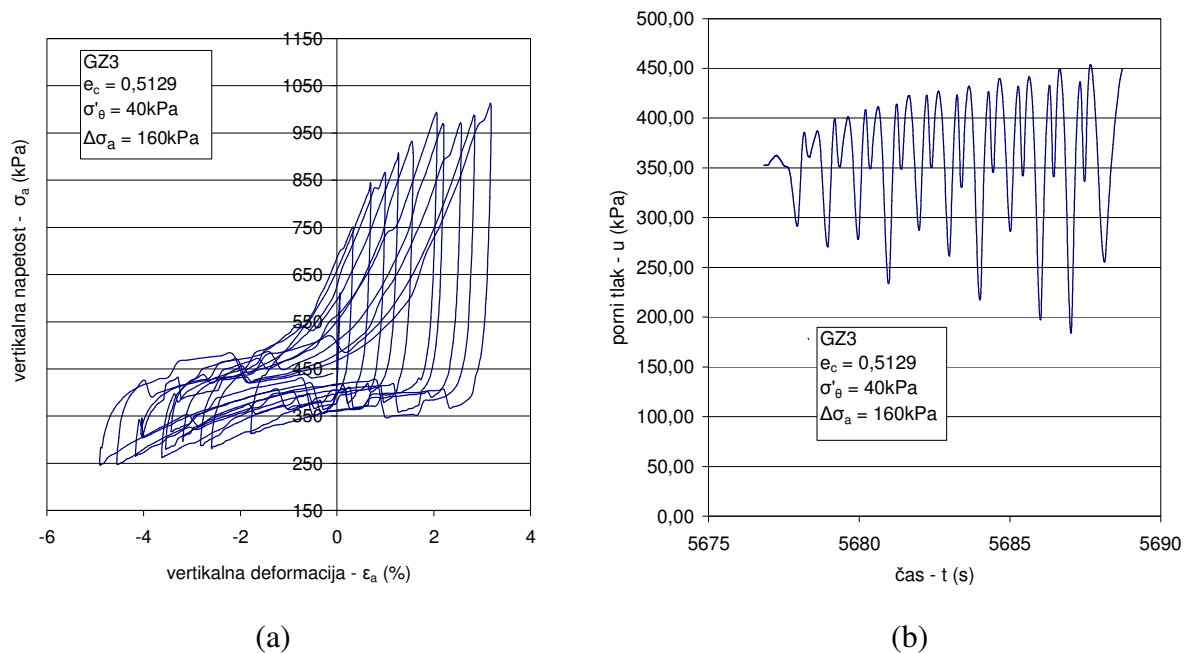


Diagram D. 3: Histerezne zanke pri vertikalni obremenitvi (a) in spreminjanje pornega tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Pesek – GZ3*

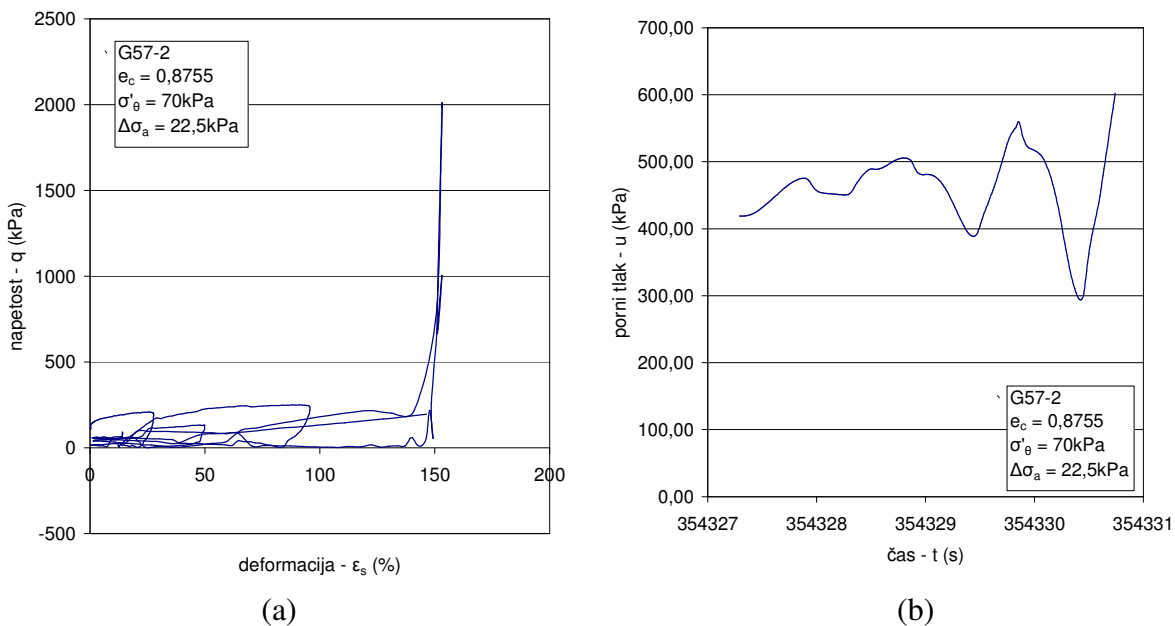


Diagram D. 4: Histerezne zanke pri vertikalni obremenitvi (a) in spreminjanje pornega tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Peščen melj G57-2*

## PRILOGA E: DIAGRAMI NAPETOSTNO VODENIH STRIŽNIH IN VERTIKALNIH PREISKAV

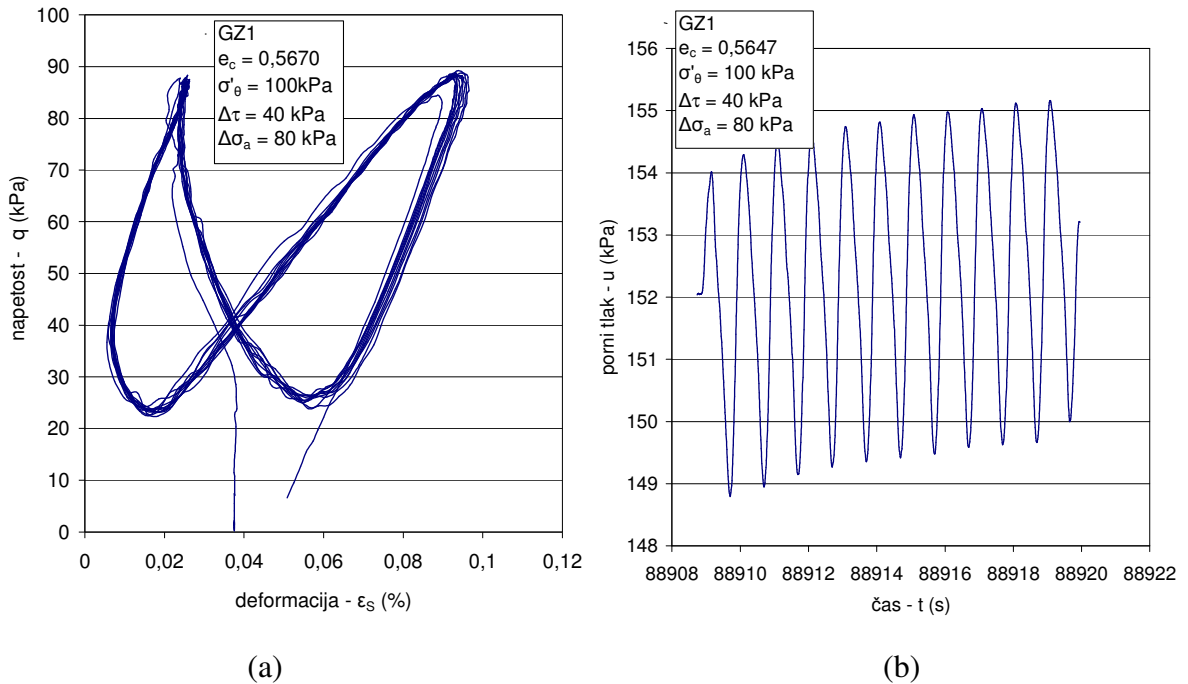


Diagram E. 1: Histerezne zanke pri dvosmernem obremenjevanju (a) in spreminjanje poregga tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Pesek – GZ1*

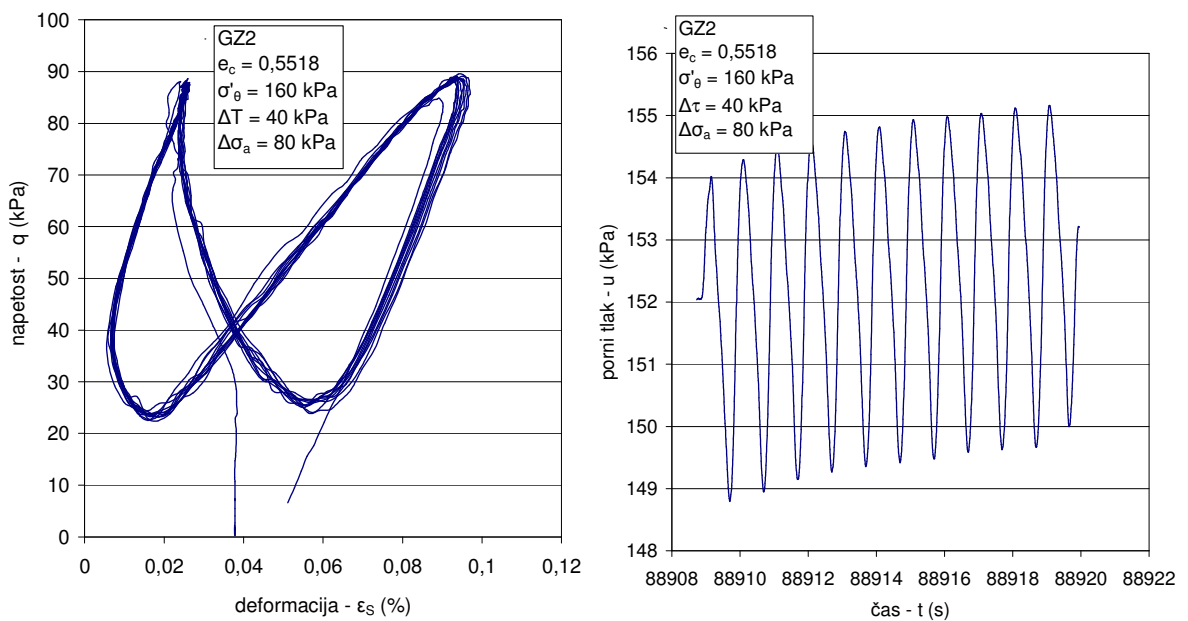


Diagram E. 2: Histerezne zanke pri dvosmernem obremenjevanju (a) in spreminjanje poregga tlaka med preiskavo (b) za vzorec *Pesek – GZ2*