

Barbara LIKAR

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, Ljubljana
e-naslov: barbara.likar@zag.si

Karmen FIFER BIZJAK

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, Ljubljana
e-naslov: karmen.fifer@zag.si

MERITVE DEFORMACIJSKO TRDNOSTNIH PARAMETROV ZEMLJIN ZA ODLAGALIŠČE RADIOAKTIVNIH ODPADKOV

POVZETEK: V povezavi z izgradnjo odlagališča za nizko in srednje radioaktivne odpadke v Sloveniji so bile izvedene že različne preliminarne geomehanske terenske in laboratorijske preiskave temeljnih tal. Med slednje sodijo tudi meritve sukcije in hitrosti prehoda strižnih valov za določitev začetnega strižnega modula zemljine G_0 v dvostenski triosni celici, katerih rezultati so predstavljeni v tem članku. V preiskavah uporabljena dvostenska triosna celica je sestavljena iz dveh med seboj ločenih celic, od katerih predstavlja zunanja celica togo steno notranji celici in zato omogoča natančnejše direktne meritve volumskih sprememb porne vode. Na intaktnem vzorcu peščeno meljne zemljine s predvidene globine temeljenja so bile izvedene meritve sukcije in hitrosti prehoda strižnih valov v kontroliranem napetostnem stanju za vrednosti sukcije med 10 in 400 kPa. Z meritvami je bilo ugotovljeno, da je začetni strižni modul G_0 preiskovane goste neplastične zemljine višji in njegova vrednost bolj narašča z naraščanjem vrednosti sukcije od začetnega strižnega modula plastičnih zemljin.

MEASUREMENTS OF DEFORMATION STRENGTH PARAMETERS OF SOIL FOR RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY

ABSTRACT: In connection with the construction of low and intermediate level radioactive waste repository in Slovenia, various geomechanical laboratory and field tests were performed. The results of measurements of suction and of the small-strain shear modulus by means of a hydraulic (bellofram) triaxial cell, with a double cell, are presented. This double-cell has two independent chambers or cells, and the test conditions in the inner cell can be accurately controlled. In comparison with other types of triaxial cells, highly accurate results can be obtained. A comprehensive series of suction-controlled triaxial tests, together with bender element tests, were performed on a sample of sandy silt for a range of constant suction states between 10 kPa and 400 kPa. It was found that G_0 for the stiff and no plastic material increase in larger rates in comparison with the other results of triaxial test of suction and small-strain shear modulus made on a plastic material.

UVOD

Za izgradnjo odlagališča za nizko in srednje radioaktivne odpadke so bile v južnem delu Slovenije izvedene številne geotehnične raziskave z namenom izbire najboljše lokacije. Ena od možnih lokacij se nahaja v bližini danes že približno 30 let stare jedrske elektrarne Krško, ki je po dosedanjih raziskavah tudi najbolj mogoča. V ta namen so bile izvedene številne terenske in laboratorijske geotehnične preiskave, med njimi tudi preiskave sukcije na peščeno meljni zemljini s kombinacijo preiskav za določitev trdnosti zemljine. Objekti bodo grajeni na potresnem območju, kjer so pomembne tudi dinamične lastnosti zemljine.

V nadaljevanju bodo predstavljeni rezultati preiskav sukcije v dvostenski triosni celici z določitvijo začetnih trdnostnih parametrov zemljine s pomočjo upogibnih elementov (ang. bender elements).

V zadnjih desetletjih so opazne velike spremembe na področju poznavanja mehanike zemljin. Nekatero spremembo se nanašajo na mehaniko nezasičenih zemljin, torej območja temeljnih tal nad nivojem talne vode (Fredlund in Rahardjo, 1993). Zvezo med vlažnostjo zemljine ter sukcijo lahko prikažemo na grafu odvisnosti volumske vlažnosti zemljine od matrične sukcije, ki jo imenujemo retencijska krivulja (ang. soil-water characteristic curve ali s kratico SWCC). Volumska vlažnost zemljine je definirana kot volumen vode, ki se nahaja med zrni zemljine. Osnova enačbe retencijske krivulje predstavlja združitev teorije mikromehaničnih medzrni sil ter klasične mehanike efektivnih napetosti (Lu in Likos, 2006).

V literaturi je zaslediti raziskave vpliva sukcije na mehansko obnašanje bentonitno-peščenih mešanic za odlagališča visoko radioaktivnih odpadkov, ki so bile izvedene v triosnih celicah (Umedera et al., 1996). Ugotovljeno je bilo, da togost mešanic narašča z naraščanjem sukcije. Za nasipni material so bile izvedene številne preiskave sukcije v triosnih celicah z uravnavanjem vertikalne sile. S tovrstnimi preiskavami so ugotavljali vpliv sukcije na strižne lastnosti materiala (Grainne et al., 2011).

V zadnjih treh desetletjih so bile izvedene številne raziskave z namenom ugotavljanja spreminjanja dinamičnih lastnosti zemljin. Preko različnih tipov preiskav so bile merjene spremembe strižnih modulov in dušenja pri malih deformacijah pri različnih stopnjah zasičenja zemljin. Začetni strižni modul zemljin G_0 je pomemben trdnostni parameter za napovedovanje obnašanja zemljin izpostavljenih statičnim in dinamičnim obremenitvam (Lenart, 2006).

Strižna togost zemljin hitro in nelinearno pada z naraščanjem strižne deformacije. Strižni modul pri zelo malih deformacijah (0,001 % ali manj) lahko privzamemo za največjo strižno togost zemljin in je v omenjenem območju konstanten (Simpson et al., 1992). Pri izotropnih materialih velja, da je strižni modul zemljine pri zelo malih deformacijah enak začetnemu strižnemu modulu in ga označimo z G_{max} ali G_0 . Večinoma začetni strižni modul G_0 ustreza začetnemu elastičnemu modulu (ang. Young's modulus) E_0 , ki je definiran kot začetni naklon krivulje deviatorične napetosti v odvisnosti od vertikalne deformacije.

Začetni strižni modul zemljine G_0 lahko določimo z laboratorijskimi preiskavami s pomočjo resonančnega aparata ali z meritvami z upogibnimi elementi (Dyvik in Madshus, 1985; Qian et al., 1993). Meritve z upogibnimi elementi sta razvila Shirley in Hampton (1977) in predstavljajo vodilno laboratorijsko metodo določevanja strižnega modula zemljin pri zelo malih deformacijah. Strižni modul zemljin je določen posredno preko merjenja hitrosti strižnih valov (v_s) v vzorcu zemljine. Merimo lahko prehod strižnih valov v različnih smereh in posledično iz vrednotimo strižne module zemljin v različnih ravninah (Pennington et al., 1997; Pennington et al., 2001). Za meritve z upogibnimi elementi velja, da vrednost strižnega modula zemljine ustreza strižnemu modulu zemljin pri strižni deformaciji manjši od 0,001 %.

Na vrednost začetnega strižnega modula zemljin G_0 vpliva več dejavnikov, kot so: lastnosti zemljine, trenutno napetostno stanje zemljine ter napetostno stanje v katerem se je zemljina že nahajala. Pri nezasičenih zemljinah dodatno vpliva na vrednost začetnega strižnega modula G_0 tudi vrednost sukcije. Številne raziskave so ugotovljale vpliv sukcije na vrednost začetnega strižnega modula zemljine G_0 preko različnih metod in aparatov. Qian et al. (1993) je preiskoval

nezasičene zemljine v resonančnem aparatu in ugotovil, da je strižni modul zemljine močno odvisen od začetne stopnje zasičenosti. Z naraščanjem stopnje zasičenosti zemljine od začetnega povsem suhega stanja ($S_r = 0$) strižni modul zemljine hitro narašča do vrhunske vrednosti. V območju, kjer stopnja zasičenosti zemljine narašča proti optimalni zasičenosti, strižni modul zemljine pada. Pri nadaljnjem naraščanju zasičenosti se krivulja prične postopoma ravnati. Marinho et al. (1995) je meril začetni strižni modul zemljin G_0 s pomočjo upogibnih elementov v kompaktni nezasičeni londonski glini pri ničnem napetostnem stanju. Ugotovil je hiter začetni dvig strižnega modula zemljine z naraščanjem suksije, kateremu sledi umiritev ali celo rahlo padanje vrednosti začetnega strižnega modula zemljine. Picornell in Nazarian (1998) sta tudi raziskovala vpliv suksije na strižno togost zemljin z uporabo upogibnih elementov na pripravljenih vzorcih gline ter melja. Ugotovila sta, da je začetni strižni modul zemljin konstanten, ko se vlažnost zemljine približuje rezidualni vlažnosti zemljine.

Cabarkapa et al. (1999) je meril začetni strižni modul G_0 na vlažno zgoščenih meljnih vzorcih v dopolnjeni računalniško vodeni hidravlični triosni celici z uporabo upogibnih elementov. Izmerjene vrednosti začetnih strižnih modulov G_0 naraščajo z naraščanjem suksije. Do podobnih zaključkov so privedle tudi raziskave Mancuso et al. (2002) na meljastem pesku. Z uporabo resonančnega aparata z modulom za kontroliranje suksije sta Mendoza in Colmenares (2006) ugotovila, da suksija močno poveča togost nezasičenih zgoščenih glin.

Florez (2010) in Vasallo et al. (2007) so izvedli raziskave na pripravljenih meljnih vzorcih v resonančnem aparatu z modulom za kontroliranje suksije (torzijski strižni test pri kontroliranih pogojih suksije). Rezultati potrjujejo dvigovanje vrednosti začetnega strižnega modula melja z naraščanjem suksije.

V dosednjih raziskavah še ni zaslediti uporabe dvostenske triosne celice pri meritvah suksije in začetnih strižnih trdnosti zemljin. Prav tako je večina rezultatov objavljenih preiskav izvedenih na pripravljenih vzorcih. V tem članku so predstavljeni rezultati meritev suksije za določitev retencijske krivulje in začetnih strižnih trdnosti zemljine z uporabo upogibnih elementov na intaktnem vzorcu z območja potencialne lokacije izgradnje odlagališča za nizko in srednje radioaktivne odpadke.

ODLAGALIŠČE NIZKO IN SREDNJE RADIOAKTIVNIH ODPADKOV

Na območju predvidene gradnje odlagališča za nizko in srednje radioaktivne odpadke je bilo odvzetih večje število vzorcev temeljnih tal. Zgradbe na desni strani slike 1 predstavljajo že obstoječo jedrsko elektrarno v Krškem, medtem ko je območje na levi strani slike območje predvidene lokacije gradnje odlagališča za nizko in srednje radioaktivne odpadke.

V času idejne zasnove projekta so bile predstavljene tri možne izvedbe konstrukcije odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov: površinska konstrukcija, silos globine 33 m ali tunel. Površinsko konstrukcijo bi sestavljale celice tlorisnih dimenzij 20 x 20 m in višine 6,4 m v katere bi shranjevali odpadke. Celice bi napolnili do vrha in zaprli z armiranobetonskimi pokrovi. V primeru podzemnega skladiščnega tunela bi znašal prerez tunela 11 x 8,5 m in bi bil grajen na globini 85 m. Trenutno najverjetnejša izvedba konstrukcije odlagališča predstavlja gradnjo podzemnih silosov višine 33 m in notranjega premera 25,6 m. Glede na končno pričakovano količino nizko in srednje radioaktivnih odpadkov se bo določilo končno število takih silosov (dva ali trije).

Predvsem v primeru izgradnje silosov se pričakuje globoke izkope, ki bodo vplivali na spremembo napetostno - deformacijskih stanj v temeljnih tleh. Med pomembne lastnosti temeljnih tal, ki bodo vplivale na odločitev o tehnologiji izkopavanja ter izboru skladiščne konstrukcije spadata tudi suksija ter strižne lastnosti temeljnih tal. Zaradi tega razloga je za nadaljnjo projektiranje odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov pomembno poznavanje vpliva suksije in vsebnosti vode na trdnostne lastnosti temeljnih tal.



Slika 1. Obravnavano območje predvidene gradnje odlagališča radioaktivnih odpadkov.

PREISKOVAN VZOREC TEMELJNIH TAL

Krško dolino gradijo najmanj 300 m debeli nanosi gostega peščenega melja. V času vrtnanja raziskovalnih vrtin se je izkazalo, da je peščen melj zelo občutljiv na prisotnost vode. Na območju, kjer naj bi bilo zgrajeno odlagališče nizko in srednje radioaktivnih odpadkov znaša projektni pospešek temeljnih tal 0,2g za povratno dobo 1000 let. Dinamične lastnosti temeljnih tal so zato bistvenega pomena pri projektiranju objektov odlagališča radioaktivnih odpadkov. Glavni geomehanski parametri peščenega melja s predvidenega območja izgradnje odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov so predstavljeni v preglednici 1.

Preglednica 1. Geomehanske lastnosti peščenega melja.

Lastnost	Enota	Vrednost
Delež peska	(%)	36,2
Delež melja	(%)	61,3
Delež gline	(%)	2,5
Koeficient porazdeljenosti, D_{60}/D_{10}		8,0
Koeficient ukrivljenosti, $(D_{30})^2/D_{60}D_{10}$		1,7
Specifična gostota zrn	Mg/m ³	2,797
Modul stisljivosti (obremenitev 400 kPa)	MPa	17,74
Strižni kot	°	30
Kohezija	kN/m ²	18
Prepustnost	m/s	$2,87 \cdot 10^{-8}$

Preiskave sukcije z merjenjem hitrosti strižnih valov v dvostenski triosni celici so bile izvedene na intaktnem vzorcu premera 48,6 mm in višine 89,4 mm.

Na izbranem vzorcu so bile opravljene tudi dopolnilne preiskave za klasifikacijo zemljine. Zemljina je sive barve, gosta in neplastična. Glede na rezultate sejalne analize zemljino uvrščamo med peščene melje. Modul stisljivosti znaša 17,7 MPa pri obremenitvi 400 kPa. Dobljene strižne lastnosti zemljine s pomočjo direktne strižne preiskave so dokaj visoke, saj znaša strižni kot 30° pri koheziji 18 kN/m^2 .

UPORABLJENA MERILNA OPREMA

Bistvo merilnega sistema predstavlja dvostenska triosna celica s hidravličnim sistemom vzpostavljanja vertikalne obremenitve (Slika 2). Prednost triosne celice pred ostalimi triosnimi celicami je v dvostenski celici. Celica je razdeljena v dva prostora, ki sta med seboj ločena. Na ta način so v notranjem prostoru, kjer se nahaja vzorec, vzpostavljeni kontrolirani pogoji, ki omogočajo direktne meritve volumskih sprememb vzorcev brez vpliva zunanjih dejavnikov (temperature, vpliva volumske spremembe celične vode, ...).



Slika 2. Dvostenska triosna celica v Geomehanskem laboratoriju ZAG.

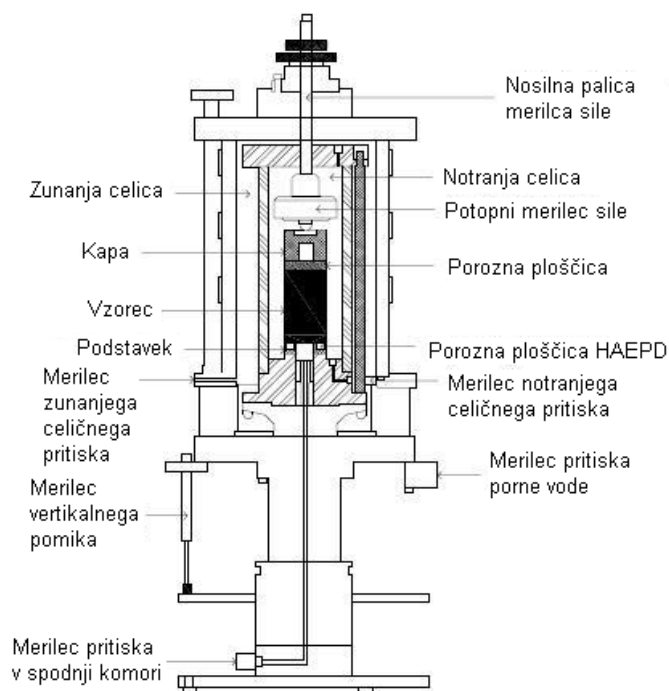
V preteklosti so poznani poskusi izvedbe triosnih celic s togimi stenami (npr. stene iz nerjavečega jekla), ki se niso izkazali za najboljše. Take celice so namreč težke ter neprosojne – skozi stene celic ni možno opazovati obnašanja vzorcev. Dvostenske triosne celice predstavljajo prednost pred tovrstnimi jeklenimi triosnimi celicami, saj zunanja celica predstavlja togo prosojno steno notranji celici, kar omogoča natančne meritve volumskih sprememb v vzorcu, ki so bistvenega pomena pri meritvah sukcije.

Predstavljena dvostenska triosna celica je večinoma vodena preko računalniške programske opreme, ki tudi beleži in shranjuje izbrane merjene količine. Računalniško vodene količine so: zunanji in notranji celični pritisk, porni vodni pritisk, porni zračni pritisk, vertikalna sila, vertikalni pomik ter pritisk v spodnji komori, preko katere se vzpostavlja vertikalno obremenjevanje. Vse omenjene količine lahko tudi zgolj merimo. Poleg triosne celice sestavljajo celoten merilni sistem še merilci malih deformacij na vzorcu v vertikalni ter radialni smeri (t.i. LVDT-ji) ter pet črpalk za vzpostavljanje željenih pritiskov in merjenje volumskih sprememb porne vode, pornega zraka, vode v notranji in zunanji celici ter komuri za vzpostavljanje vertikalne obremenitve. Črpalke napolnjene z vodo so natančnosti 1 mm^3 in prostornine 250 ml. Črpalčka za zrak pa je natančnosti 1 mm^3 ter prostornine 1000 ml.

Meritve sukcije v triosnih celicah se izvajajo z vzpostavljanjem izbranih pornih pritiskov vode na dnu vzorca ter pornega pritiska zraka na vrhu vzorca. Na ta način v vzorcu vzpostavimo kontrolirane pogoje sukcije pri čemer merimo volumske spremembe porne vode. Polno zasičene vzorce pričnemo razsičevati oz. sušiti na način, da vzorec pri konstantnem vertikalnem in celičnem pritisku ter izbranem pritisku porne vode dodatno obremenimo s pritiskom pornega zraka, ki mora biti nekoliko višji od pritiska porne vode. Razlika pritiskov porne vode in pornega zraka predstavlja matrično sukcijo. V tako vzpostavljenem napetostnem stanju lahko porna voda prosto teče iz

vzorca skozi spodnjo porozno ploščico v črpalko za vzpostavljanje pritiska porne vode ter merjenje volumske spremembe porne vode.

Na intaktnem vzorcu peščenega melja s predvidenega območja izgradnje odlagališča za nizko in srednje radioaktivne odpadke je bila izvedena serija meritev sukcije vključno z meritvami hitrosti prehoda strižnih valov s pomočjo upogibnih elementov v dvostenski triosni celici. Meritve sukcije so bile izvedene v območju sukcije med 10 in 400 kPa.

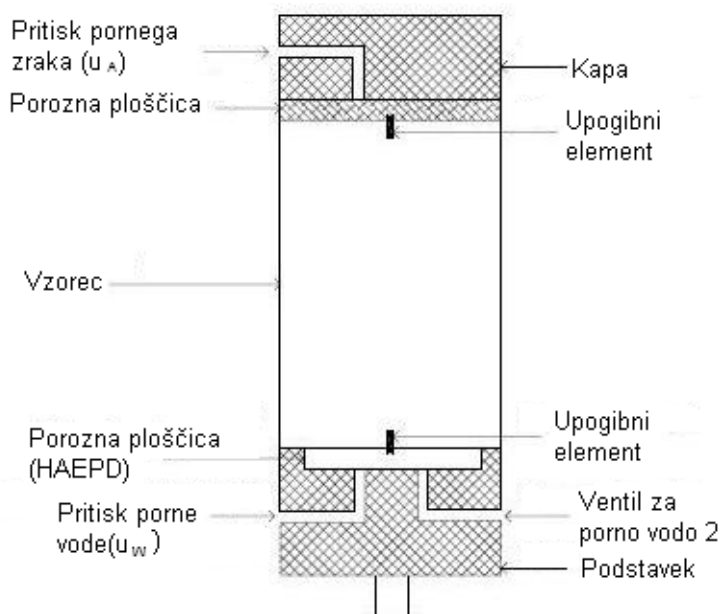


Slika 3. Skica dvostenske triosne celice.

Slika 3 prikazuje dvostensko triosno celico za izvajanje triosnih preiskav, merjenje sukcije in meritve z upogibnimi elementi, ki je bila uporabljena v predstavljenih raziskavah. Njeni sestavni deli in njihovi opisi sledijo v nadaljevanju:

- (1) Vertikalna sila, celični pritisk (notranji in zunanji), porni pritisk (vodni in zračni) ter vertikalni pomik so vodeni avtomatsko preko računalniške programske opreme.
- (2) Vertikalna sila se vzpostavlja preko hidravličnega pritiska, ki se ustvarja v komori pod podstavkom vzorca in dviguje tako podstavek kot vzorec na njem. Z uravnavanjem pritiska v spodnji komori se posledično kontrolira vertikalna sila ter vertikalni pomik.
- (3) Merilec vertikalnega pomika je potenciometer, ki je vgrajen zunaj triosne celice. Njegov premični konec je v kontaktu z ročico bata med spodnjo komoro in podstavkom.
- (4) Črpalka za pritisk porne vode je povezana na gornjo kapo vzorca. Kot že omenjeno znaša prostornina črpalke 1000 ml natančnosti 1 mm^3 in omogoča merjenje pritiska zraka v območju 0 – 2 MPa z natančnostjo 1 kPa.
- (5) "Navadna" porozna ploščica (Slika 4) se nahaja med vzorcem in gornjo kapo ter dovoljuje prehod tako zraka kot vode. Posebna keramična porozna ploščica z oznako HAEPD (ang. high air entry porous disc), ki dovoljuje prehod vode, ne pa zraka, je nameščena med podstavkom in vzorcem. S pomočjo keramične porozne ploščice lahko izvajamo meritve sukcije, saj merimo zgolj volumske spremembe porne vode, porni zrak pa ostaja v vzorcu.
- (6) Uporabljena HAEPD keramična porozna ploščica ima nazivno vrednost 500 kPa. To pomeni, da med meritvami sukcije porne pritiska vode in zraka ne smeta preseči vrednosti 500 kPa. Nazivne vrednosti HAEPD keramičnih poroznih ploščic so različne in segajo do 1500 kPa.

- (7) Pritisk porne vode je merjen preko keramične porozne ploščice s pomočjo črpalke ter dodatnega merilnika pornih pritiskov. Pritisk pornega zraka pa je merjen preko "navadne" porozne ploščice na vrhu vzorca s pomočjo črpalke za zračni pritisk.
- (8) Spremembo volumna vzorca lahko merimo na dva različna načina. Prva in ne najbolj zanesljiva metoda je metoda določitve volumske spremembe vzorca preko merjenja spremembe volumna celične vode v notranji celici.
- (9) Druga metoda merjenja volumske spremembe vzorca izhaja iz razvoja dvostenske triosne celice. V notranji celici je zaradi stene, ki jo predstavlja zunanja celica, zmanjšana volumska sprememba celične vode, kar posledično pomeni, da izmerjena sprememba porne vode predstavlja spremembo volumna vzorca. Merjenje spremembe porne vode preko črpalke za porno vodo poteka pri konstantnem celičnem pritisku, vertikalni sili ter sukaciji.
- (10) Črpalke, ki istočasno omogočajo vzpostavljanje pritiska in merjenje volumske spremembe vode ali zraka, gradi koračni motor. Volumska sprememba je določena preko spremembe pozicije motorja.
- (11) Komplet upogibnih elementov je vgrajen na sredini podstavka in kape, ki sta v stiku z vzorcem. Upogibni element, ki je vgrajen na sredino podstavka v keramični porozni ploščici, imenujemo izvir, saj z vibracijami oddaja valove, ki se širijo v smeri višine vzorca. Na kapi je vgrajen upogibni element imenovan sprejemnik, ki oddane valove sprejme kot vsiljene vibracije. Oddane in sprejete vibracije upogibni elementi spremenijo v napetost, ki se preko računalniške programske opreme pretvori v hitrost strižnih valov. Začetni strižni modul zemljine v vertikalni ravnini vzorca G_0 iz vrednotimo iz hitrosti strižnih valov preko poznanih enačb iz literature.

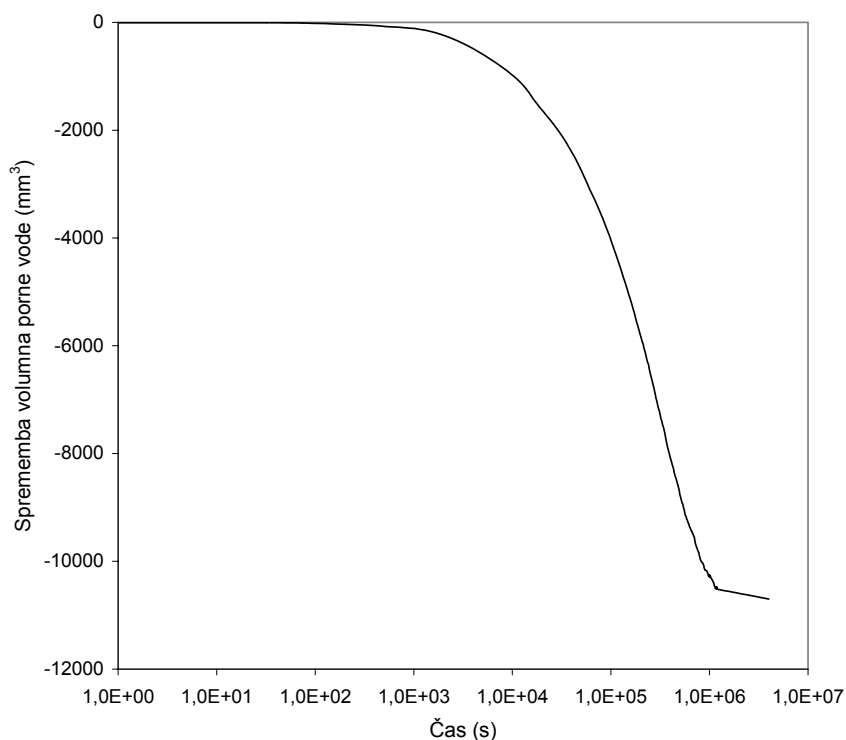


Slika 4. Skica vzorca s podstavkom, kapo ter poroznimi ploščicami.

POTEK IZVAJANJA PREISKAV

Za preiskovanja vpliva sukacije na mehanske lastnosti peščenih meljev je bila izvedena serija sledečih meritev. Pripravi vzorca sledi zaporedje stopenj zasičevanja, konsolidacije, merjenj sukacije ter hitrosti strižnih valov. Tako kot konsolidacija, se tudi meritve sukacije izvajajo v dreniranih pogojih, pri čemer smo nižali pritisk porne vode v vzorcu. V predstavljenih preiskavah smo pritisk porne vode nižali od 400 kPa do 0 kPa, torej je vrednost sukacije naraščala od 0 kPa do 400 kPa. Nezasičene triosne preiskave pri katerih vrednost sukacije narašča preko posameznih stopenj merjenja imenujemo "izsušitvene" nezasičene preiskave (ang. desorption unsaturated test), saj iz vzorca zemljine iztiskamo porno vodo. S tovrstnimi preiskavami posnemamo dogajanje v temeljnih tleh pri izkopavanju gradbenih jam, ipd.

- (1) Intakten vzorec zemljine smo najprej obrezali in oblikovali na ustrezne dimenzije. Višina preizkušanca mora biti dvokratnik premera. Triosna celica, ki je bila uporabljena v preiskavah omogoča meritve na valjastih preizkušancih višine 100 mm ter premera 50 mm.
- (2) Preizkušanec smo nato vgradili v triosno celico, jo zapolnili z odzračeno vodo ter pričeli s koraki zasičevanja preizkušanca do končne B-vrednosti 0,98. Začetna B-vrednost preizkušanca je znašala 0,25. V vsaki stopnji saturacije smo povišali celični pritisk za 50 kPa.
- (3) Po končanem zasičevanju je sledila izotropna konsolidacija na izbrano vrednost efektivne napetosti 350 kPa. Izbrano napetostno stanje odgovarja napetostnemu stanju kateremu je bil izpostavljen preizkušanec v naravi. Stopnja konsolidacije je zaključena, ko je volumska sprememba porne vode dovolj majhna oz. ko se prične krivulja volumske spremembe porne vode v odvisnosti od logaritma časa ravnati.
- (4) Po končani konsolidaciji smo na kapo vzorca priključili črpalko za vzpostavljanje pritiska pornega zraka. V prvi stopnji merjenja sukcije mora biti pritisk pornega zraka za 10 kPa višji od pritiska porne vode. V nasprotnem primeru lahko porna voda vstopi v črpalko za porni zrak in posledično izvedemo napačne meritve sprememb volumna porne vode. Na podstavek s keramično porozno ploščico je poleg dodatnega merilnika pornih pritiskov priključena še črpalka za merjenje spremembe volumna porne vode.
- (5) Posamezna meritve sukcije je končana, ko je sprememba volumna porne vode manjša od 70 mm^3 v 24 urah oz. ko postane krivulja spremembe volumna porne vode v odvisnosti od logaritma časa linearna (Slika 5). Torej je na omenjeni krivulji jasno viden drugi prevoj.
- (6) Po končani meritvi posamezne stopnje sukcije je bila izvedena meritve hitrosti strižnih valov z uporabo upogibnih elementov za določitev začetnega strižnega modula zemljine G_0 .
- (7) Meritve sukcije in hitrosti prehoda strižnih valov so bile izvedene zaporedoma v šestih korakih za sledeče vrednosti sukcije: 10, 60, 110, 200, 300 in 400 kPa. Vse stopnje meritev sukcije so bile v vertikalni smeri deformacijsko vodene, kar pomeni, da je bila vertikalna deformacija vzorca skozi celotno preiskavo enaka 0.
- (8) Po zadnji meritvi hitrosti prehoda strižnih valov pri vrednosti sukcije 400 kPa je bila preiskava zaključena in na preizkušancu so bile izvedene še končne meritve vlažnosti in gostote.

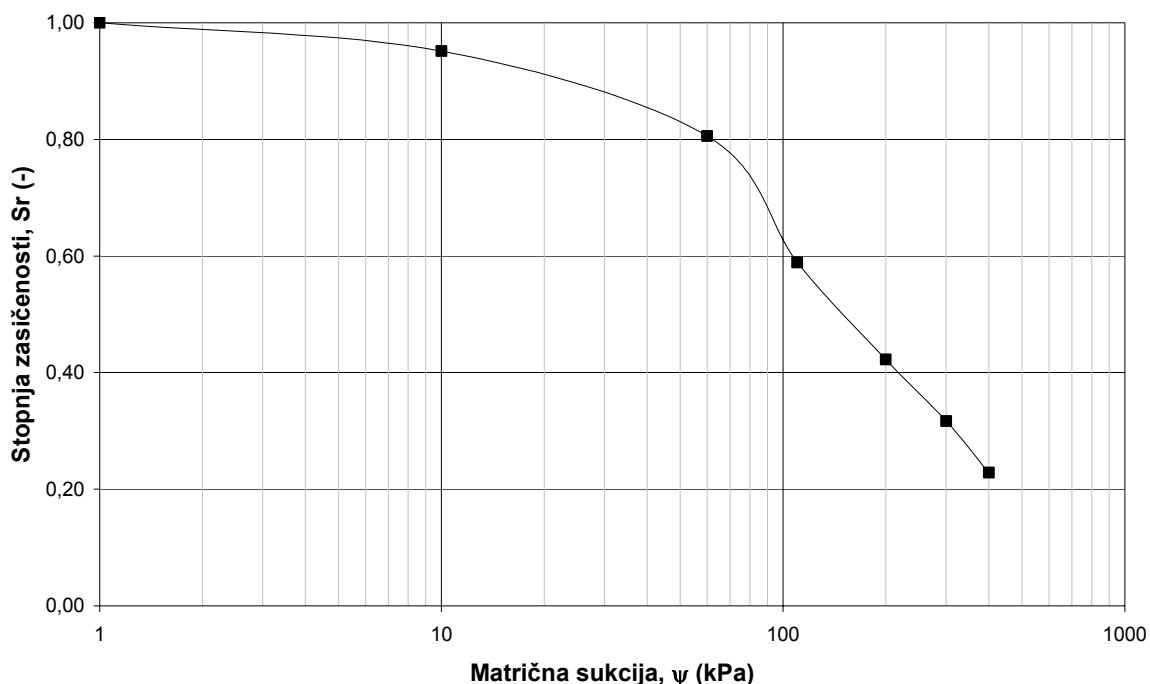


Slika 5. Krivulja volumske spremembe porne vode v odvisnosti od logaritma časa med stopnjo sukcije.

REZULTATI IN DISKUSIJA

Glavni namen predstavljenih preiskav je bila študija začetnih strižnih lastnosti zemljine v odvisnosti od sukcije z uporabo dvostenske triosne celice ter upogibnih elementov. Raziskovalno delo predstavlja uporabo triosne celice z možnostjo vzpostavljanja kontroliranih napetostnih pogojev ter neodvisno kontrolo sukcije v vzorcu zemljine. Dvostenska triosna celica zagotavlja visoko natančnost meritev, predvsem volumskih sprememb porne vode, ki so bistvene pri meritvah sukcije. V predstavljeni triosni celici so dodatno vgrajeni še upogibni elementi, ki istočasno z meritvami sukcije omogočajo tudi merjenje hitrosti prehoda strižnih valov in posledično določitev začetnega strižnega modula zemljine.

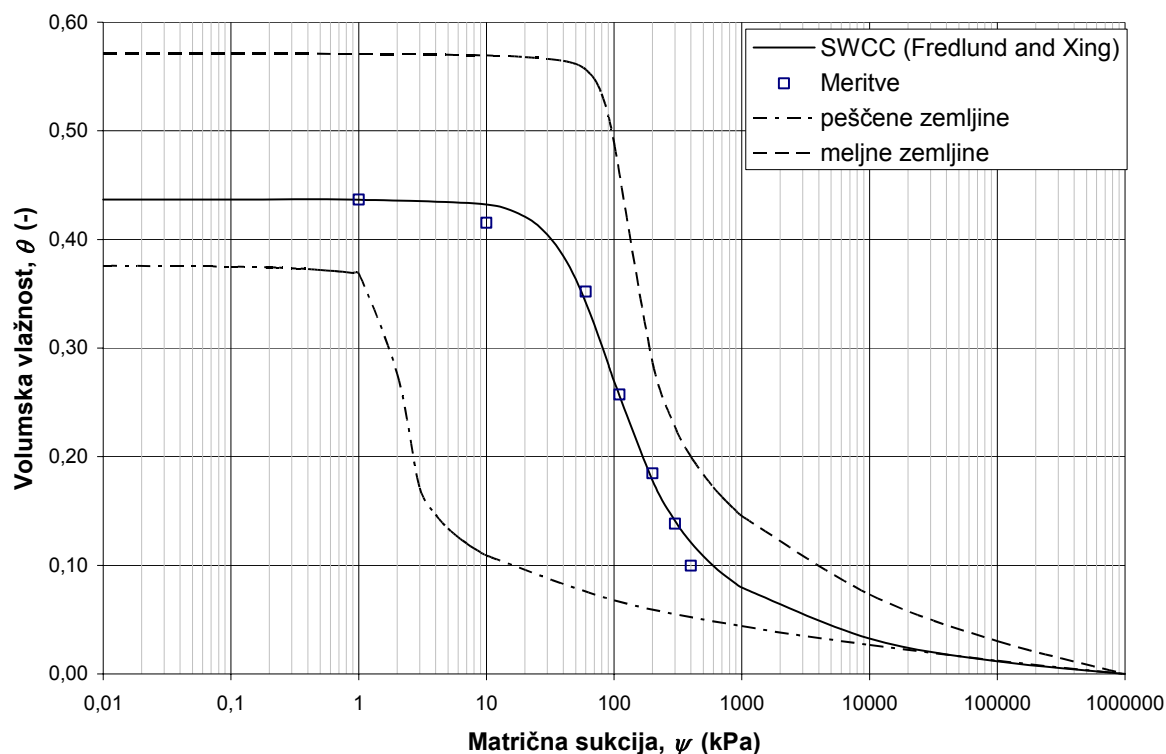
Rezultati meritev sukcije v izotropnem napetostnem stanju za vrednosti sukcije 10, 60, 110, 200, 300 in 400 kPa so predstavljeni na sliki 6. Dobljeni rezultati izkazujejo tipično spreminjanje volumske vlažnosti v odvisnosti od sukcije.



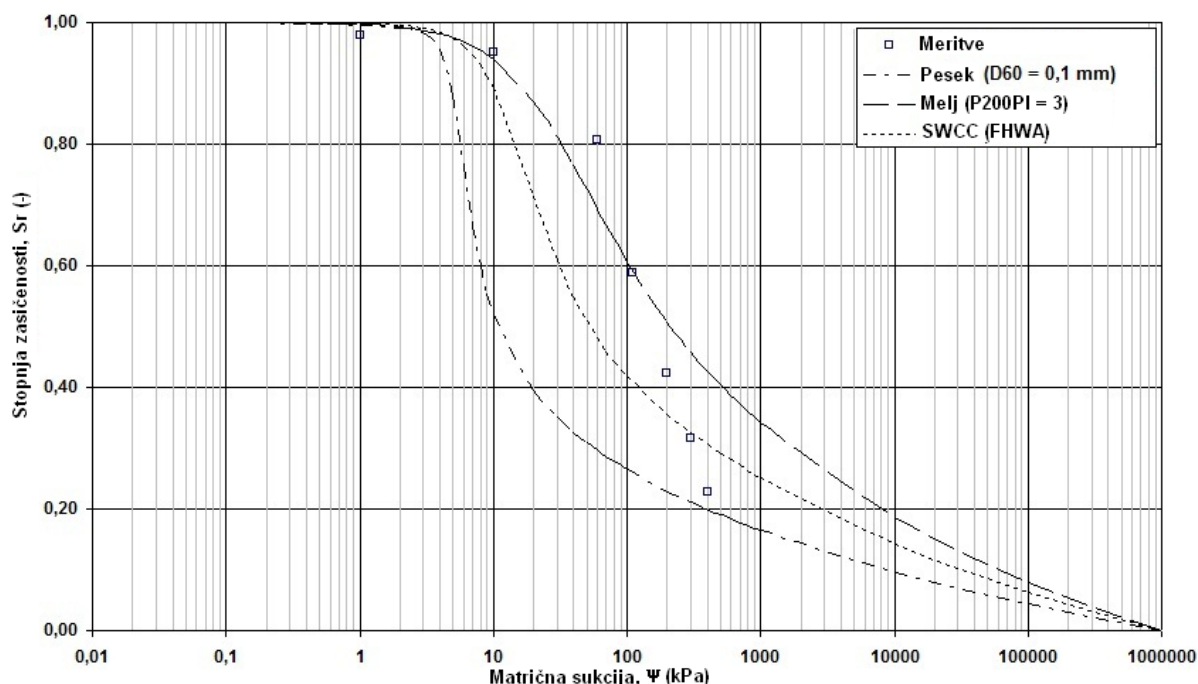
Slika 6. Izmerjene vrednosti zasičenosti zemljine v odvisnosti od sukcije.

Za določitev retencijske krivulje na podlagi rezultatov meritev sukcije so v literaturi poznani različni modeli. Bistveno razliko med posameznimi modeli predstavlja določitev karakterističnih oblikovnih parametrov krivulje. Eden prvih in dokaj uveljavljenih modelov določitve retencijske krivulje sta razvila Fredlund in Xing (1994). Njun model določitve retencijske krivulje glede na meritve sukcije uporablja štiri karakteristične parametre. Trije izmed njih opisujejo obliko retencijske krivulje, četrti pa predstavlja korekcijsko funkcijo krivulje. Korekcijska funkcija retencijske krivulje je potrebna, da se dobljena retencijska krivulja zaključi pri vrednosti sukcije 10^6 kPa. Namreč ugotovljeno je bilo, da znaša za večino zemljin pri omenjeni vrednosti sukcije, volumska vlažnost 0. Za določitev retencijske krivulje smo za izmerjene vrednosti sukcije uporabili predstavljen model Fredlund in Xing (1994). Na sliki 7 lahko vidimo, da se retencijska krivulja lepo prilega izmerjenim vrednostim volumske vlažnosti zemljine v odvisnosti od sukcije. Izvrednotena retencijska krivulja po modelu Fredlund in Xing (1994) za peščeni melj se nahaja med tipičnima krivuljama za peščene oziroma meljne zemljine.

Glede na dejstvo, da so tovrstne direktne laboratorijske meritve matrične sukcije dolgotrajne ter zahtevne, so v Združenih državah Amerike (the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration – FHWA) razvili poenostavljene postopke določanja retencijskih krivulj.



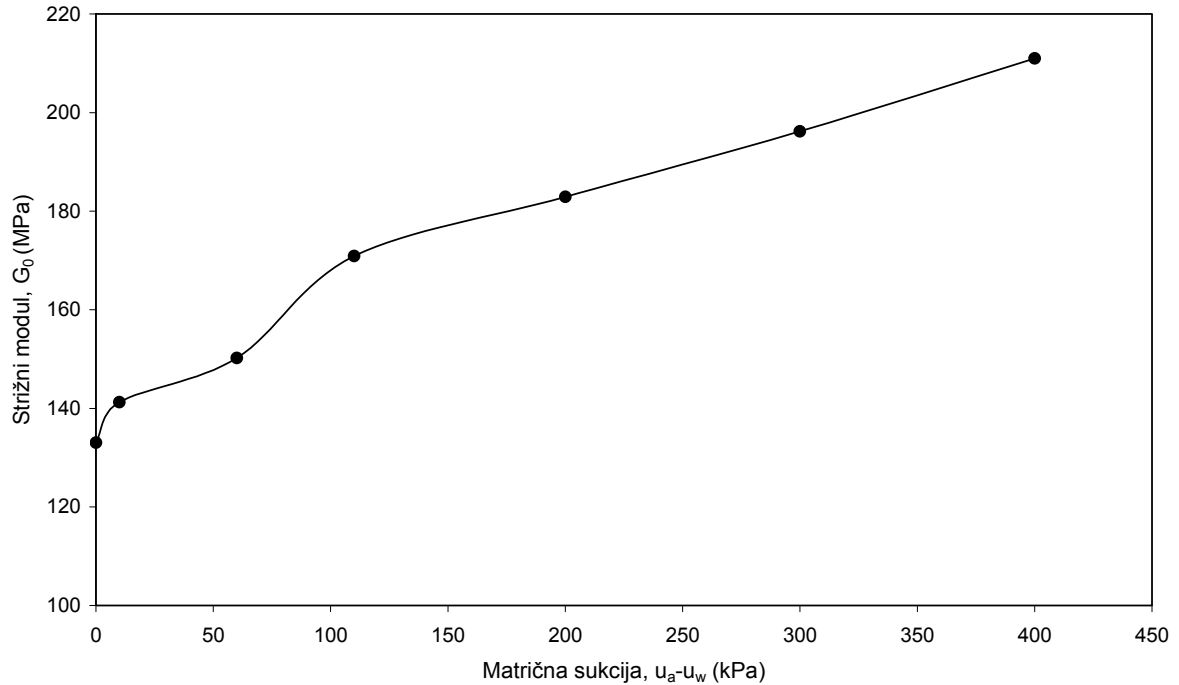
Slika 7. Retencijske krivulje po modelu Fredlund in Xing (1994).



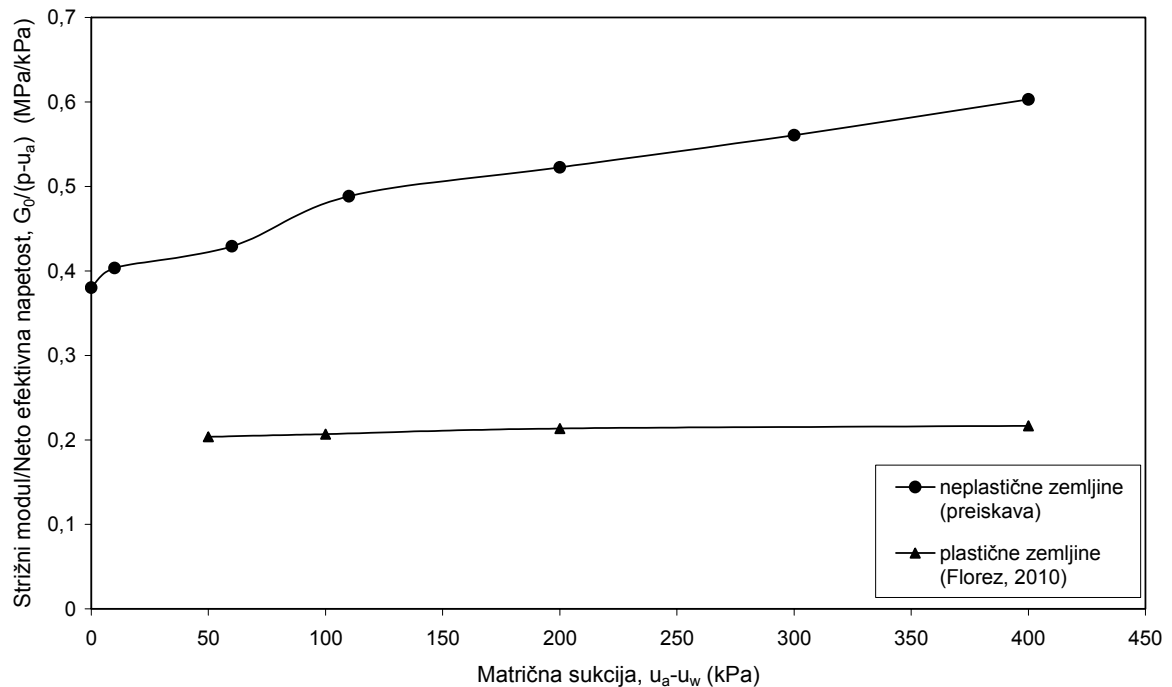
Slika 8. Retencijske krivulje po modelu FHWA.

Enačbe temeljijo na modelu določitve retencijske krivulje po Fredlund in Xing (1994) z uporabo enostavnejše določljivih in merljivih parametrov. Modelne parametre se določijo na podlagi sejalne analize, optimalne vlažnosti zemljine, največje suhe gostote in specifične gostote zrn. Retencijska krivulja vrednotena po tovrstnem modelu se slabše ujema z izmerjenimi vrednostmi kot retencijska krivulja dobljena po modelu Fredlund in Xing. V območju velike sukcije (več kot 100 kPa) so iz vrednotene volumske vlažnosti nižje od izmerjenih (Slika 8). Razlog za slabše ujemanje je tudi

djestvo, da je predstavljeni ameriški model določitve retencijske krivulje razvit predvsem za nevezane zemljine, npr. peske. Vseeno pa se iz vrednotena krivulja na podlagi opravljenih meritev nahaja med tipičnima krivuljama za peščene zemljine z $D_{60} = 0,1$ mm in meljne zemljine s parametrom $P200 \cdot PI = 3$ %. Preiskovana zemljina je neplastična, torej je vrednost parametra PI enaka 0, vrednost parametra D_{60} (premer zrna pri presejku 60 %) pa znaša 0,05 mm.



Slika 9. Začetni strižni modul v odvisnosti od matrične sukcije.



Slika 10. Primerjava normiranih začetnih strižnih modulov za plastične in neplastične zemljine.

Istočasno z meritvami sukcije so bile na preizkušancu peščenega melja izvedene tudi meritve hitrosti prehoda strižnih valov z uporabo upogibnih elementov. Meritve so bile izvedene po

zaključenih stopnjah meritev sukcije pri vrednostih sukcije med 10 in 400 kPa. Rezultati spreminjanja začetnega strižnega modula zemljine G_0 v odvisnosti od sukcije so prikazani na sliki 9. Iz grafa je razvidno pričakovano obnašanje začetnega strižnega modula zemljine, katerega vrednost narašča z naraščanjem vrednosti sukcije. Sukcija torej pripomore k večanju togosti preiskovane zemljine. Res je, da povečanje togosti ni zelo veliko, vendar je opazen trend naraščanja togosti ter pozitivnega vpliva sukcije na začetno strižno togost preiskovane zemljine.

ZAKLJUČEK

Za potrebe izgradnje odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov za jedrsko elektrarno v Krškem so bile izvedene preiskave sukcije in strižnega modula temeljnih tal. Predstavljene laboratorijske preiskave so bile izvedene v dvostenski triosni celici. Dobljeni rezultati, predvsem retencijska krivulja, so primerljivi z že objavljenimi rezultati dobljenimi s podobnimi preiskavami na peščenih in meljnih zemljinah.

Pričakovano vrednost začetnega strižnega modula G_0 peščeno meljne zemljine narašča z naraščanjem vrednosti sukcije. Pri opravljenih raziskavah je bilo tudi ugotovljeno, da je naraščanje vrednosti začetnega strižnega modula večje v primeru gostih neplastičnih zemljin kot v primeru plastičnih zemljin.

Tekom opravljenih preiskav je bilo ugotovljeno tudi, da so tovrstne meritve sukcije v dvostenski triosni celice zelo uporabne, saj omogočajo zelo natančne direktne meritve sprememb volumna porne vode, ki zagotavljajo veliko natančnost dobljenih rezultatov.

Dejstvo je, da so tovrstne meritve sukcije dolgotrajne (posamezna meritev lahko traja do dva tedna), vendar je njihova prednost v dejstvu, da se meritve sukcije do vrednosti 1500 kPa za retencijsko krivuljo izvedejo na istem vzorcu pri kontroliranem napetostnem stanju. Na ta način se izognemo vplivu priprave vzorcev na rezultate meritev sukcije.

Iz empiričnih modelov določitve retencijske krivulje zemljine predstavljenih v tem članku je razvidno, da je za splošno uporabo vpliva sukcije pri projektiranju geotehničnih objektov ali za prvo oceno sukcije zemljine uporaben ameriški model razvit na FHWA. Njegovo splošno uporabnost omogočajo lahko določljivi parametri retencijske krivulje iz običajanih laboratorijskih preiskav zemljin. Za natančnejše preiskovanje sukcije in njenega vpliva na trdnostne lastnosti zemljin pa je potrebna uporaba izpopolnjenih modelov za določevanje retencijskih krivulj, npr. Fredlund in Xing. Njegova pomankljivost je v dejstvu, da se vrednosti oblikovnih parametrov krivulje določijo na podlagi izmerjenih vrednosti in zapletenih algoritmov rešljivih po metodah nelinearnega programiranja, predvsem kvazi Newton-ovi metodi.

Rezultati pridobljeni s predstavljenimi preiskavami so pomembni za nadaljne izračune stabilnosti izkopov za gradnjo odlagališč nizko in srednje radioaktivnih odpadkov.

LITERATURA

- Cabarkapa, Z., Cuccovillo, T., and Gunn, M. 1999. Some aspects of the pre-failure behaviour of unsaturated soil. In Proceedings of the Second International Conference on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Torino, Italy, September 27-29. A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, Vol. 1, 159-165.
- Dyvik, R. and Madshus, C. 1985. Laboratory measurement of G_{max} using bender elements. In Proceedings of the ASCE Annual Convention: Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions, Detroit, Mich., October 24, 1985. V. Khosla, American Society of Civil Engineers, New York, 186-196.
- Florez, E.A.S. 2010. Development of a suction – controlled resonant column apparatus with self-contained bender elements. Master of Science in civil engineering. The University of Texas at Arlington, p. 128.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H., 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley and Sons, New York.

- Grainne, E.M., Sanchez, M., and Romero, E. and Soemitro, R.A.A. 2011. Behaviour of compacted silt used to construct flood embankment. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, Vol. 164, No. 3, 195-210.
- Lenart, S. 2006. Deformation characteristics of lacustrine carbonate silt in Julian Alps, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 1, No. 2/4, 131-142.
- Lu, N. and Likos, W.J. 2006. Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 132, No. 2, 131-142.
- Mancuso, C., Vassallo, R. and d'Onofrio, A. 2002. Small strain behavior of a silty sand in controlled-suction resonant column, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, No. 1, 22-31.
- Marinho, E.A.M., Chandler, R.J. and Crilly, M.S. 1995. Stiffness measurements on an unsaturated high plasticity clay using bender elements. In *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT '95*, Paris, France, September 6-8, 1995. A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, Vol. 2, 535-539.
- Mendoza, C.E. and Colmenares, J.E. 2006. Influence of the suction on the stiffness at very small strains. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*, Carefree, Arizona, April 2-6, 2006. G.A. Miller, C.E. Zapata, S.L. Houston, and D.G. Fredlund, American Society of Civil Engineers, Reston, Va, 529-540.
- Pennington, D.S., Nash, D.F.T. and Lings, M.L. 1997. Anisotropy of Go shear stiffness in Gault clay, *Geotechnique*, Vol. 47, No. 3, 391-398.
- Pennington, D.S., Nash, D.F.T. and Lings, M.L. 2001. Horizontally mounted bender elements for measuring anisotropic shear moduli in triaxial clay specimens, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, No. 2, 133-144.
- Picornell, M. and Nazarian, S. 1998. Effects of soil suction on low-strain shear modulus of soils. *Proceedings 2nd International Conference on Unsaturated Soils*, Beijing, Vol. 2, 102-107.
- Qian, X., Gray, D.H. and Woods, R.D. 1993. Voids and granulometry: effects on shear modulus of unsaturated sands, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, No. 2, 295-314.
- Shirley, D.J. and Hampton, L.D. 1977. Shear wave measurements in laboratory sediments, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 63, No. 2, 607-613.
- Simpson, B. 1992. Thirty-second Rankine lecture: Retaining structures: Displacement and design, *Geotechnique*, Vol. 42, No. 4, 541-576.
- Umedera, M., Hyodo, M., Murata, H., Fujiwara, A. and Yusufuku, N. 1996. Effect of suction on the mechanical behaviour of bentonite-sand mixture. *Environmental Geotechnics Balkema*, Rotterdam, 169-172.
- Vassallo, R., Mancuso, C. and Vinale, F. 2007. Effects of net stress and suction history on the small strain stiffness of a compacted clayey silt, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44, No. 4, 447-462.

Barbara Likar, Karmen Fifer Bizjak:

Meritve deformacijsko trdnostnih parametrov zemljin za odlagališče radioaktivnih odpadkov
