

Matej MAČEK

univ.dipl.inž.grad., UL FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Ana PETKOVŠEK

dr., univ.dipl.inž.geol., UL FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

MERJENJE ZEMLJINSKE SUKCIJE V SLOVENSkih GEOTEHNIČNIH LABORATORIJIH

Povzetek: Leta 2004 smo na UL FGG pričeli z uvajanjem meritev zemljinske sukcije za potrebe presoje geotehničnih lastnosti zemljin. Začeli smo z uporabo tlačnega lonca na Biotehnični fakulteti v Ljubljani. Zaradi omejitev tlačnega lonca na sukcije do največ 1500 kPa ter težav pri kontroli gostote, smo sami vpeljali meritve z uporabo potenciometra na principu rosišča ter metode filtrskega papirja. Za terenske meritve smo uvedli postopke z uporabo uporovnih in Watermark senzorjev. V članku smo na kratko predstavili osnove merjenja zemljinske sukcije ter metode, ki jih trenutno uporabljamo v Sloveniji. Na primeru izbrane gline smo prikazali rezultate meritev sukcije, pridobljene z uporabo različnih metod ter interpretacijo meritev in izdelavo retencijskih krivulj z uporabo treh različnih enačb. Posebej so prikazane primerjalne vrednosti naših meritev z meritvami, opravljenimi v specialnem triosnem aparatu na University of Colorado at Boulder.

SOIL SUCTION MEASUREMENTS IN SLOVENIAN GEOTECHNICAL LABORATORIES

Abstract: First soil suction measurements for geotechnical purposes in Slovenia were performed in year 2004 at Faculty of civil and geodetic engineering at University of Ljubljana. At the beginning suction was measured with pressure plate apparatus at the Biotechnical faculty. Due to limitation of pressure plate apparatus (upper range 1500 kPa, difficulties with the saturation and swelling of compacted samples), two new methods were introduced: filter paper method and dew-point potentiometer. Watermark and gypsum-block sensors were later introduced for field measurements on the road embankments, constructed from lime stabilized swelling clays, on the slope of landslide Slano blato and in landfill covers. Short descriptions of used methods and soil water characteristic curve fitting equations are given in the paper. Comparisons between the results acquired with the above mentioned methods and with special triaxial apparatus at University of Colorado at Boulder are also presented.

UVOD

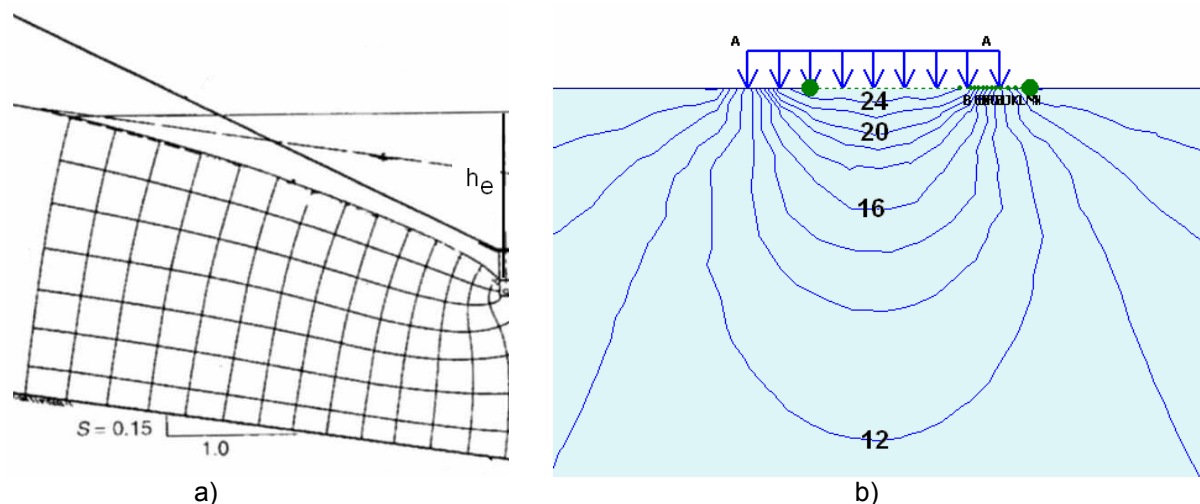
Voda se giblje v zemljini zaradi razlike vodnih potencialov. V mehaniki zasičenih zemljin se srečujemo s tlačnim in gravitacijskim potencialom. Tipičen primer toka vode zaradi gravitacijskega potenciala je tok po pobočju navzdol (slika 1.a), medtem ko razlika tlačnih potencialov povzroči iztiskanje vode iz zemljine pod temeljem (slika 1.b). Seštevek teh dveh potencialov imenujemo tudi hidravlični potencial, tok vode pa opisuje splošna enačba (1).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_w k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_w k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_w k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{\partial W}{\partial t} \quad (1.a)$$

$$h = h_e + h_p + h_c \quad (1.b)$$

kjer so: h – hidravlični potencial, k_i – koeficient propustnosti, W – masa vode shranjena v kocki dV , h_e – gravitacijski potencial, h_p – tlačni potencial in h_c (tudi ψ) – matrični potencial.

Splošno enačbo v mehaniki zasičene zemljine dostikrat rešujemo v poenostavljeni obliki za specifične primere (Darcyev zakon, vertikalna konsolidacija, itd.).



Slika 1. a) Tok vode po pobočju v drenažo (Moulton, 1980 po Reddi, 2003), b) Presežni porni tlaki pod temeljem.

SUKCIJA

V nezasičenih zemljinah imata pomembno vlogo matrični in osmotski potencial. Matrični potencial je lastnost zemljinskega matriksa in je posledica interakcije vode in zemljine. Vključuje kapilarne sile in adsorpcijo vode na površino delcev. Zaradi svoje privlačne narave je vedno negativen (slika 2). Osmotski potencial je posledica snovi, raztopljenih v vodi. Osmotski in matrični potencial skupaj imenujemo sukucija zemljine. V običajnih zemljinah, kjer je koncentracija soli v porni vodi nizka, je osmotski potencial nizek in ga lahko zanemarimo. Enačba (1) opisuje tok vode tudi v nezasičeni zemljini, vendar je njeno reševanje (običajno) mogoče le z numeričnimi izračuni.

V zemljinah z inertnimi zrni je matrični potencial predvsem posledica kapilarnih sil. Zaradi površinske napetosti se voda lahko dviga v zemljini do višine, ki jo določata velikost in razporeditev zemljinskih por po enačbi (2). V zemljinah, ki vsebujejo zrna z električno nabitimi površinami, na primer zrna mineralov glin, se voda zadržuje na površini zrn zaradi adsorpcije. Debelina adsorpcijskega ovoja je odvisna od interakcij med glino in vodo: vodikove vezi, hidratacije izmenljivih kationov, privlačnosti

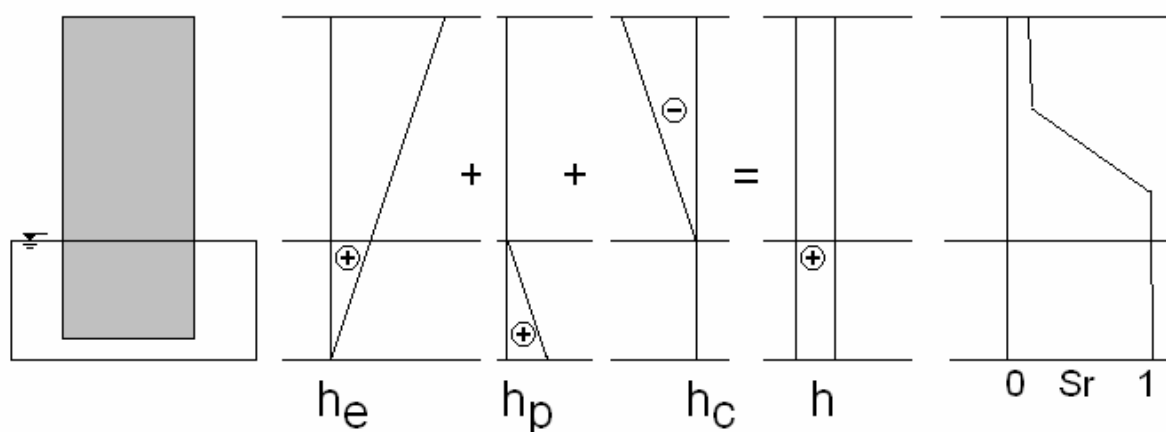
zaradi površinskih disperzijskih sil itd. V aktivnih zemljinah, na primer v bentonitnih glinah, je matrični potencial predvsem posledica adsorpcijskih sil.

$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g R_s} \quad (2)$$

kjer so: h_c - maksimalni dvig vode v kapilari, r - polmer kapilare, g - težnostni pospešek, ρ_w - gostota vode, T_s - površinska napetost in R_s - radij ukrivljenosti meniska ($r/\cos \alpha$).

ZEMLJINSKI SLOP IN RETENCIJSKA KRIVULJA

Temeljna zveza, s katero opišemo razmerja med vlago ali stopnjo zasičenja in sukcijo, je retencijska krivulja. Najenostavnejše merjenje sukcije omogoča zemljinski slop. Zemljinski slop je vzorec zemljine, ki le deloma leži v vodi (slika 2). Stopnja zasičenosti zemljine nad vodo ni enakomerna. Tik nad gladino vode je zasičenost 100 %, nato pa se z višino slopa znižuje, vzporedno pa sukcija narašča (slika 2 desno).



Slika 2. Levo - zemljinski slop, sredina - vodni potenciali v zemljini, desno – retencijska krivulja. oznake: h – hidravlični potencial, h_e – gravitacijski potencial, h_p – tlačni potencial in h_c - matrični potencial, S_r - saturacija.

Na retencijski krivulji so trije značilni odseki in sicer:

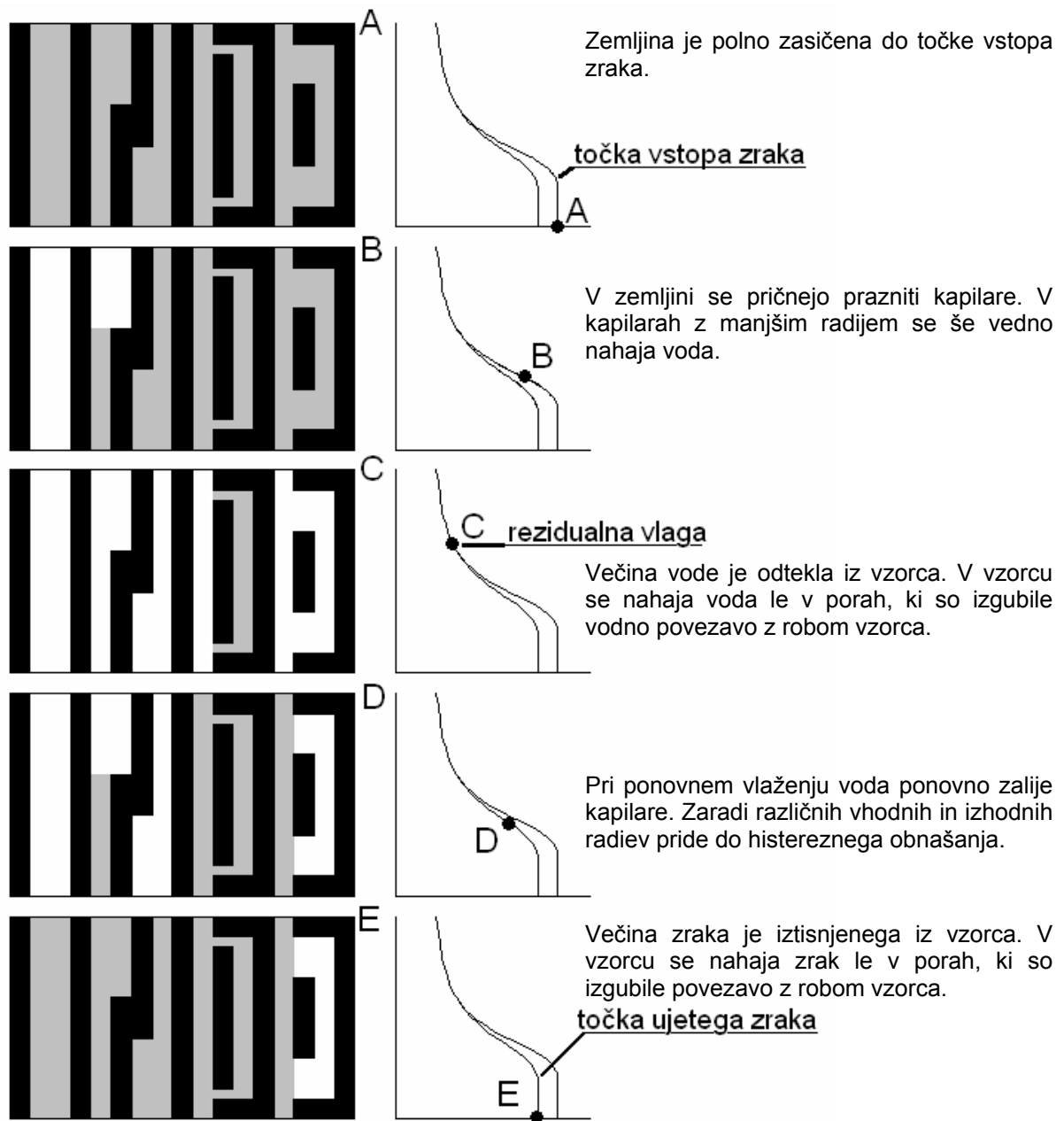
- območje popolne zasičenosti, kjer so kapilare premajhne, da bi se zaradi sukcije izpraznile,
- območje desaturacije, kjer zrak v odvisnosti od sukcije polni različno velike pore in
- območje rezidualne vlage, kjer je transport vode v zemljini možen samo z vodno paro. Do pojava rezidualne vlage pride, ker zemljina ni sestavljena iz enakomernih cevč, temveč iz por, ki se medsebojno prepletajo in imajo neenakomeren premer.

Na sliki 3 so shematsko prikazana stanja vode v zemljini v različnih območjih retencijske krivulje. V času sušenja se zemljina obnaša drugače kot v času vlaženja. Na skicah A, B in C so prikazana različna stanja porne vode v času sušenja. Pri ponovnem vlaženju pa pride zaradi izgubljanja povezav z robovi do pojava ujetih zračnih mehurčkov (slika 3, točka E desna pora) in spremenjene retencijske krivulje zaradi različnih vstopnih in izstopnih odprtih v pore (slika 3, točka D). Potek retencijske krivulje je v času sušenja drugačen kot v času vlaženja.

Na retencijski krivulji so 3 značilne točke:

- točka vstopa zraka, to je točka, ko prične zrak vstopati v zemljinske pore;
- točka rezidualne vlage – voda je v zemljini le v vodnih mehurčkih. Od te točke dalje je gibanje vode v zemljini možno le z vodno paro in

- točka ujetega zraka – zrak je v zemljini le v mehurčkih, ujetih v vodi.



Slika 3. Shema premera por v zemljini levo in retencijska krivulja z značilnimi območji desno; črno – suha snov, sivo - voda in belo – zrak.

Enačbe za opis retencijskih krivulj

Obstaja več enačb oziroma modelov za opis retencijske krivulje. Med najbolj znanimi so: Fredlund&Xingov (1994), van Genuchtenov (1980) in Brooks&Coreyev (1964) model. Fredlund&Xingov model (3) je opisni in omogoča dobro prilagajanje meritvam. Slaba stran modela sta zahtevnost pridobivanja vseh podatkov in nepovezanost z numeričnimi metodami. Van Genuchtenov (4) in Brooks&Coreyev model (5) pa sta uporabna za opisovanje matrične sukcije v območju do rezidualne vlage. Oba modela omogočata računanje splošne enačbe (1). Pogosto se pri tem uporabi Burdineov (1953) ali Mualen (1976) model funkcije prepustnosti.

$$w = w_S \cdot \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_R} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_R} \right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\left(\ln \left(e + \left(\frac{\psi}{a_f} \right)^{n_f} \right) \right)^{m_f}} \right] \quad (3)$$

$$w = w_R - (w_S - w_R) \cdot \left[\frac{1}{\left(1 + (a_{VG} \cdot \psi)^{n_{VG}} \right)^{m_{VG}}} \right] \quad (4)$$

$$w = w_R - (w_S - w_R) \cdot \left[\frac{a_C}{\psi} \right]^{n_C} \quad \text{in } w \leq w_s \quad (5)$$

kjer so: w_S - vlaga pri popolni zasičenosti, w_R - rezidualna vlaga, ψ - sukcija, ψ_R - sukcija pri rezidualni vlagi, $e = \exp(1)$, a_f , n_f , m_f , a_{VG} , n_{VG} , a_C , n_C - oblikovni parametri funkcij.

MERJENJE SUKCIJE

Zemljinsko sukcijo je možno meriti direktno, kot napetost ali tenzijo, s katero zemljina zadržuje vodo ali kot parni tlak vodne pare v zemljinskih porah. Metode za merjenje sukcije delimo na direktne in indirektno.

Direktne meritve

Pri direktnih meritvah sukcije merimo negativni tlak v vodi, ki je v kontaktu s poro vodo v zemljini. Da preprečimo vdor zraka v rezervoar vode, damo med vzorec in rezervoar porozno ploščo ali konico z visoko točko vstopa zraka. Mersko območje omejujeta maksimalna vrednost vstopa zraka v keramično ploščo in kavitacija, ki nastopi, ko se negativni tlak porne vode približa parnemu tlaku vode pri dani temperaturi okolice in pospeši prehajanje vode iz tekoče v plinsko fazo. Maksimalna sukcija, ki jo teoretično lahko merimo je 101,3 kPa, v praksi pa take naprave delujejo do ca 85 kPa (tenziometri, slika 4a).

Osno translacijske metode merjenja sukcije

Merjenju negativnega tlaka porne vode, ki ga omejuje kavitacija, se je možno izogniti na ta način, da povečamo tlak zraka, medtem ko ostaja vodni tlak na pozitivni referenčni vrednosti. Zaradi ravnovesja vodnih potencialov velja, da je sukcija enaka razliki med vodnim in zračnim tlakom.

Obstajata dva principa meritev:

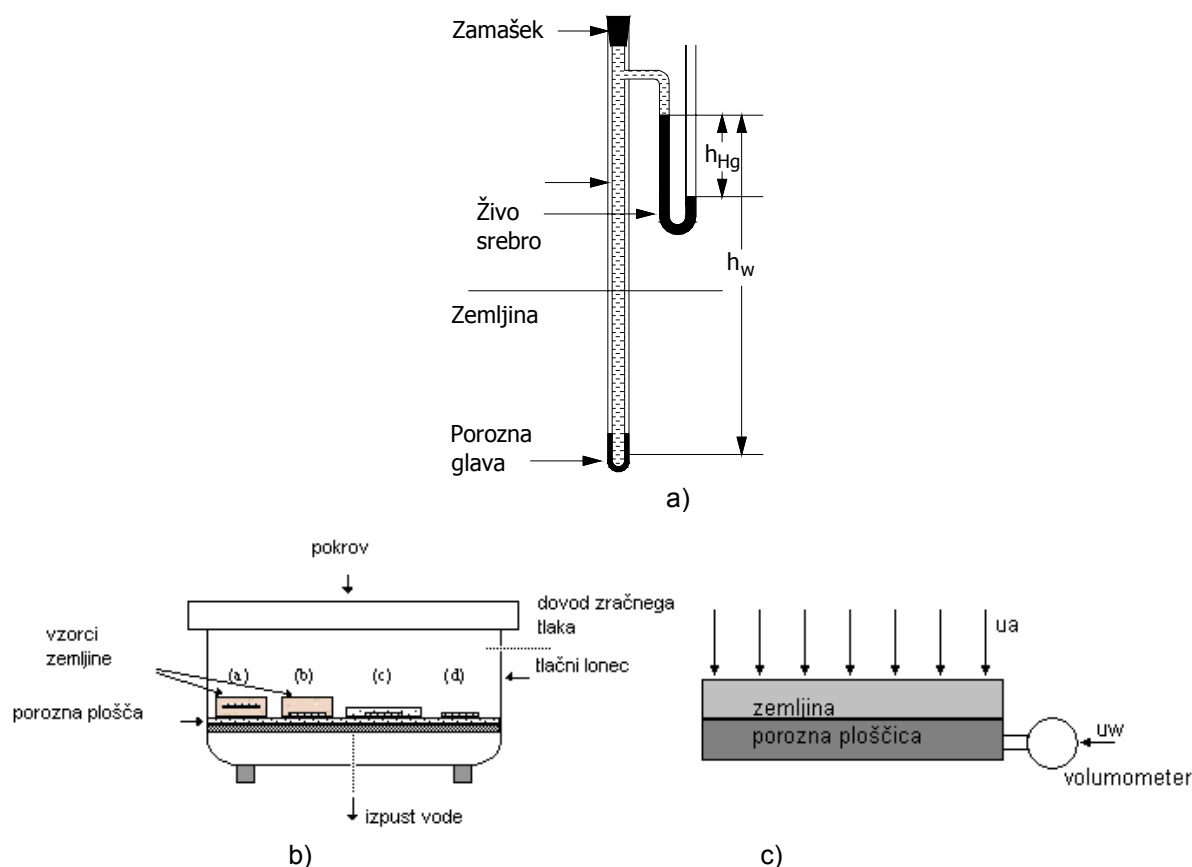
- merimo več različnih vzorcev pri istem zračnem tlaku, vendar test ponavljamo pri različnih zračnih tlakih.
- merimo pri več različnih tlakih, vendar merimo samo na enem vzorcu.

Po prvem principu delujejo tlačni lonci (npr. na Biotehnični fakulteti v Ljubljani), po drugem principu pa poteka merjenje sukcije v triosni celici (npr. na University of Colorado at Boulder- CUB).

Uporaba tlačnega lonca (slika 4b) je razširjena predvsem v agronomiji. V tlačnem loncu lahko merimo hkrati več različnih vzorcev pri isti sukciji, kar omogoča razmeroma hitro pridobivanje podatkov za izdelavo retencijske krivulje. V geotehniko je primeren za izdelavo deviških retencijskih krivulj, manj primeren pa je za meritve realnih zemljin, zlasti tistih z gosto strukturo, predvsem zaradi težav, ki nastanejo pri saturaciji. Zgornje območje merjenja sukcije v tlačnem loncu je omejeno z vrednostjo

vstopa zraka v keramično ploščo in je običajno 700 ali 1500 kPa, kar je za prekonsolidirane gline pre nizko območje.

Triosna celica na CUB deluje tako, da počasi srka vodo iz vzorca in meri tlak, pri katerem lahko izsrka vodo iz vzorca - sukucijo. Ker nima »bremenskih« stopenj, omogoča določitev točke vstopa zraka. Ob namenoma zasnovanem prehitrem srkanju vode in naknadnem čakanju na ravnotežje pri določeni sukuciji lahko s povratno analizo dobimo podatke o prepustnosti v odvisnosti od sukucije. Prednosti naprave so natančnost, možnost merjenja sprememb volumna in višine, slabosti pa visoka cena in zahtevnost uporabe.



Slika 4. a – shema tenziometra, b - shema tlačnega lonca, c – shema delovanje tlakov na vzorec zemljine.

Indirektne meritve

Z indirektnimi meritvami primerjamo vrednost merjenega parametra (vlaga, relativna vlaga, električna prevodnost, toplotna prevodnost...) s sukucijo. Za vrednotenje meritev potrebujemo predhodne umeritvene krivulje. Različne metode omogočajo merjenje v različnih razponih vrednosti in z različno natančnostjo. Med najbolj znanimi metodami so:

- Metoda filter papirja (MFP): merimo vlago filter papirja, ki je bil v kontaktu z zemljino ali pa je ležal tik nad zemljino. Metoda ima veliko območje merjenja, od 50 kPa do preko 30 MPa, vendar je zamudna. Preiskava lahko traja tudi več kot 14 dni.
- Metoda z uporabo senzorjev električne prevodnosti: običajno merimo električni upor standardnega poroznega medija (gips), ki je v kontaktu z zemljino. Zaradi vodnih potencialov imata tako zemljina kot porozni medij enako sukucijo. Metoda z gipsnimi bloki ima razpon merjenja med 50 in 10000 kPa, je enostavna in poceni. Meritev traja od 6 do 50 ur.
- Metoda z uporabo senzorjev toplotne prevodnosti oziroma senzorjev oddane toplote: merimo toplotno prevodnost standardnega poroznega medija, ki je v kontaktu z zemljino. Zaradi

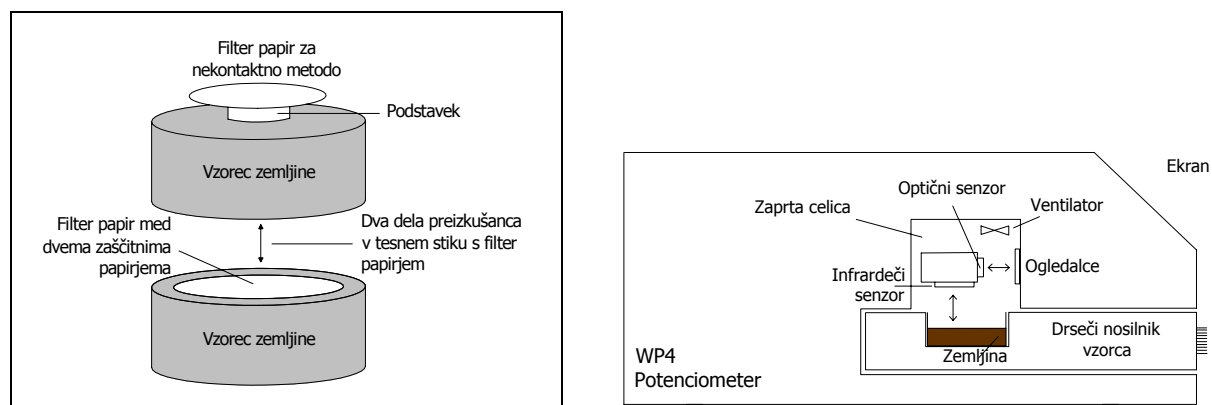
vodnih potencialov imata tako zemljina kot porozni medij enako sukucijo, sama temperaturna prevodnost pa je tudi odvisna od temperature medija. Na tem principu delujejo Watermark senzori, ki omogočajo ob primerni kalibraciji natančno merjene sukucije od 0 do 200 kPa. Senzorji oddane toplote so zasnovani na različnih principih in lahko merijo v območju od 10 – 1500 kPa, čas ekvilibracije pa je podoben kot pri senzorih električne prevodnosti.

- Metode z merjenjem relativne vlage (psihrometri): merimo relativno vlago zraka nad zemljino, ki zaradi zemljinske sukucije ni 100%. Zakonitost opiše Kelvinova enačba (6). Relativno vlago lahko merimo na principu določanja temperature rosišča (potenciomter WP4) ali z merjenjem razlike temperature suhega in mokrega termometra. Psihrometri na principu termopara merijo sukucijo v območju 300 – 7000 kPa, meritev traja eno uro. Psihrometri na principu rosišča merijo sukucijo na območju 300 kPa do 30 MPa, ena meritev pa traja v uravnoteženi klimi približno 10 minut. Slaba stran psihrometra tipa WP 4 je, da zaradi omejitev merjenja nizkih sukucij ne moremo določiti točke vstopa zraka.

$$\psi = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M} \ln \left(\frac{p_{v1}}{p_{v0}} \right) \quad (6)$$

kjer so: ψ - sukucija, ρ_w - gostota vode, M - molska masa enega mola vode $0,018 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$, R - plinska konstanta $8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$, T - temperatura v Kelvinih, p_{v1}/p_{v0} - relativna vlaga zraka.

Princip merjenja relativne vlage zraka izkoriščata tudi sukucijski desikator, ki osuši vzorec do določene sukucije in metoda filter papirja, ki ni v kontaktu z zemljino (slika 5).



Slika 5. Princip delovanja metode filter papirja (levo). Metoda je enostavna, a zamudna in zahteva natančno delo. Omogoča merjenje matrične in totalne sukucije na vseh vrstah zemljin in v velikem razponu. Potenciomter na principu hladjenega ogledalca (desno) je enostaven. Slaba stran je, da ne meri sukucij nižjih od 100 – 300 kPa. Obe metodi uporabljamo na UL FGG.

Laboratorijske in terenske meritve sukucije

Laboratorijske meritve

Za laboratorijske preiskave sukucije so primerni vsi zgoraj naštetih postopki. Vendar moramo pri tem ločevati med postopki, ki omogočajo merjenje sukucije in postopki, ki omogočajo njeno nadzorovanje.

Za nadzorovanje sukucije so primerne osno translacijske metode ali sukucijski desikator (relativna vlaga). Te metode uporabljamo takrat, ko merimo strižno trdnost, nabrekalne deformacije, kolaps ali koeficient vodoprepustnosti pri nadzorovanih pogojih sukucije. Triosna celica na CUB spada v to skupino. Različni proizvajalci laboratorijske opreme že ponujajo komercialne triosne aparate in edometre z možnostmi nadzorovanja sukucije. Teh naprav v Sloveniji še nimamo.

Terenske meritve sukcije

Za terenske meritve sukcije v geotecniki so primerni tenziometri za merjenje na območju nizkih sukcij in zlasti indirektni postopki z uporabo senzorjev električne in toplotne prevodnosti, ki omogočajo meritve tudi na območju visokih sukcij. Vsi postopki so odlično uporabni v rahlih oziroma v normalno konsolidiranih zemljinah, težave pa nastopajo pri vgrajevanju senzorjev v goste in visoko konsolidirane zemljine.

PRIMERJAVA REZULTATOV MERITEV IN IZDELAVA RETENCIJSKIH KRIVULJ

Primerjalne meritve

Tako kot pri vseh vrstah merjenj, se tudi na rezultatih meritev sukcij odražajo vplivi uporabljenih metod in laboratorijskega dela. Le redki postopki merjenja sukcije so opisani s standardi (tlačni lonec, metoda filterskega papirja – ASTM standardi). Pri uvajanju meritev sukcije smo na UL FGJ posebno pozornost namenili preverjanju primerljivosti rezultatov, dobljenih z uporabo različnih metod. Na vzorcu sivice iz predora Ljubno ($w_L=40\%$, $w_P=14\%$) smo opravili veliko število meritev z uporabo različnih postopkov merjenja (slika 6). Iz slike vidimo, da se rezultati meritev, dobljeni z uporabo različnih postopkov, dokaj dobro ujemajo. Večje in opazno odstopanje opazimo le pri rezultatih, dobljenih z uporabo nekontaktne metode filter papirja.

V razpredelnici 1 so prikazane suhe gostote vzorcev sivice po preiskavi sukcije. Suha gostota je pomembna za določitev vlage pri 100% zasičenosti. Preiskave v tlačnem loncu in potenciometru ne omogočajo dovolj natančne kontrole gostote, pri preiskavah z Watermarkovimi senzorji pa kontroli gostote nismo namenili ustrezne pozornosti.

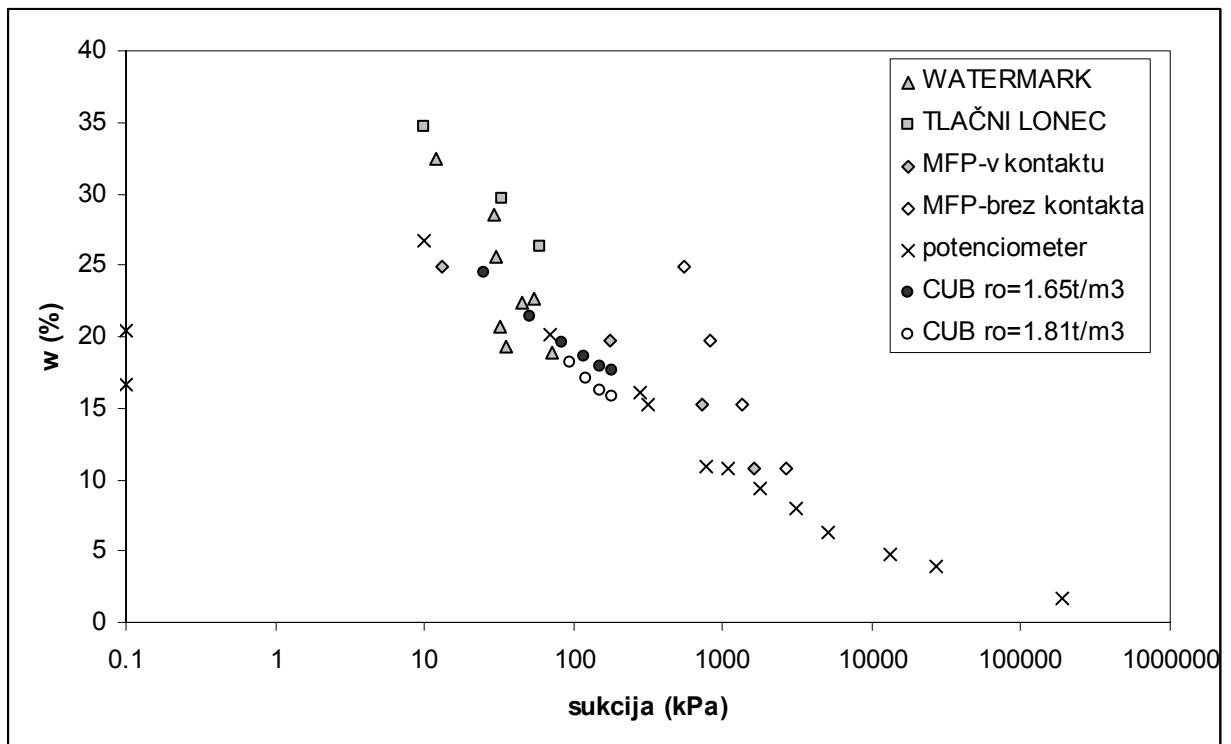
Preglednica 1. Gostote sivice med preiskavo.

metoda	suha gostota t/m ³
Watermark senzorji	/
Tlačni lonec (BF, UL)	/
MFP-v kontaktu	1.6-1.8
MFP-brez kontakta	1.6-1.8
Potenciometer	/
CUB vzorec 8	1.65
vzorec 9	1.81

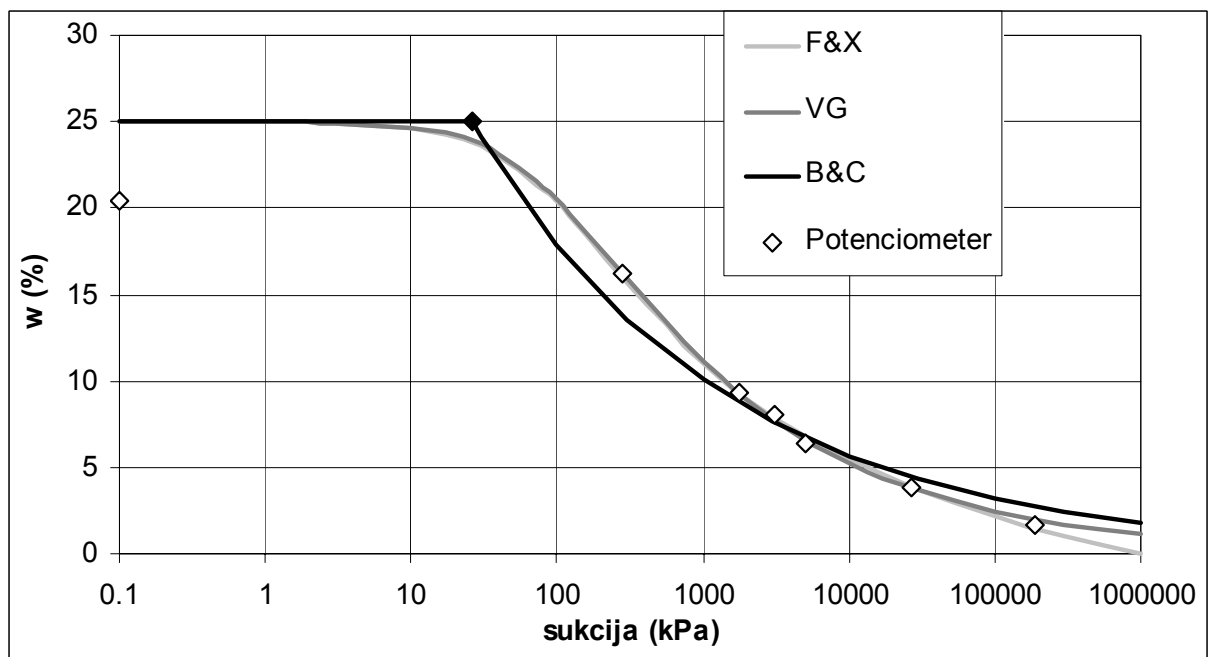
Primerjava retencijskih krivulj, opisanih z različnimi enačbami

Na sliki 7 so prikazane retencijske krivulje sivice, iz vrednotene z uporabo treh različnih modelov. Pri Brooks&Coreyevem modelu smo dodali točko vstopa zraka, ki je bila izmerjena v triosni celici na CUB.

Pomembno je poudariti, da gostota zemljine pomembno vpliva na vrednosti vsebnosti vode pri določeni sukciji. Z naraščajočo sukcijo se vpliv gostote zmanjšuje. Vrednost točke vstopa zraka se pri zgoščeni zemljini premakne v desno, v smeri višje sukcije. Rezultati meritev s tlačnim loncem in Watermark senzorji pri sukcijah med 10 in 300 kPa (slika 6) so bili pridobljeni na židkih vzorcih v fazi sušenja. Pri vrednotenju retencijske krivulje sivice je pomembno tudi to, da leži naravna sivica globoko v območju za točko rezidualne vlage.



Slika 6. Primerjava meritev sukcije na sivici z uporabo različnih postopkov merjenja.



Slika 7. Primerjava retencijskih krivulj z merjenimi podatki. Črna točka je točka vstopa zraka zmerjena z triosno celico na CUB. F&X – Fredlund&Xingov, VG – Van Genuchtenov, B&C – Brooksov&Coreyev model.

ZAKLJUČEK

Merjenje zemljinske sukcije lahko izvajamo na različne načine in z uporabo različnih postopkov. Vsak način merjenja ima svoje prednosti in pomanjkljivosti. Uporabnost in zanesljivost določenega postopka sta odvisna različnih od parametrov zemljine, kot so: suha gostota, zrnavost, plastičnost, velikost sukcije v naravi in od značilnosti oziroma principa, na katerem postopek deluje.

Na UL FGG lahko merimo zemljinsko sukcijo po šestih različnih postopkih opisanih v članku, pri čemer tlačni lonec ni upoštevan. V tem trenutku uvajamo meritve sukcije z uporabo keramičnih plošč z znano vrednostjo točke vstopa zraka v triosnih aparatih. Zelo dobra sledljivost rezultatov, zlasti s tistimi, pridobljenimi na vrhunski opremi na CUB, kaže, da smo na dobri poti. Večino v članku opisanih postopkov merjenja smo že koristno uporabili pri različnih geotehničnih projektih v Sloveniji.

V splošno uveljavljenih zvezah klasične mehanike (Evrokod 7, SIST EN standardi za preizkušanje in vrednotenje zemljin) zemljinska sukcija v Evropi še nima svojega mesta. To ne velja za ameriške standarde (ASTM), kjer so postopki preiskovanja sukcije natančno opisani, sukcija pa je vključena v postopke za presojo volumske stabilnosti zemljin pri gradnji prometnic.

Doslej pridobljeni podatki na UL FGG kažejo, da je možno podatke, ki jih dajejo retencijske krivulje različnih zemljin, zelo dobro povezati z ostalimi parametri kot so strižna trdnost zemljine, nabrekalni tlaki in nabrekalne deformacije ter prepustnost (Petkovšek, 2006). Zelo obetavna se kaže uporabnost sukcije na področju vrednotenja volumske stabilnosti visoko prekonsolidiranih glin ter pri izdelavi receptur za kemično stabiliziranje glin.

ZAHVALA

Meritve v tlačnem loncu in triaksialni celici so bile opravljene na Biotehnični fakulteti, UL, in na University of Colorado at Boulder. Obema ustanovama se avtorja iskreno zahvaljujeta.

LITERATURA

- (1) Brooks, R.H., Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media, Hydrology paper No. 3, Colorado State University, ZDA; zajeto po (11).
- (2) Burdine, N.T. (1953). Relative permeability calculations from pore size distribution data, Petroleum Transactions, AIME, Vol. 198, str: 71-198.
- (3) Fredlund, D.G., Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal 31: 521-532.
- (4) Maček, M. (2006). Sukcija zemljin (diplomska naloga), Univerza v Ljubljani, Ljubljana, str.: 67
- (5) Marshall, T. J., Holmes, J. W. (1988). Soil physics, Cambridge University Press, Velika Britanija, str.: 379.
- (6) Moulton, L.K. (1979). Highway Subdrainage Design, Report FHWA-TS-80-224, Offices of Research and Development, Federal Highway Administration, Washington DC, ZDA. po Reddi L. (2003). Seepage in soils, John Wiley & Sons, ZDA, str.: 88.
- (7) Mualem, Y. (1976). A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res. 12:513-522.; zajeto po (11).
- (8) Petkovšek, A. (2006). Vpliv matrične sukcije na trdnostno deformacijske lastnosti zemljin (doktorska disertacija), Univerza v Ljubljani, Ljubljana, str.: 274.
- (9) Scot, R. F. (1963). Principles of Soil Mechanics, Addison-Wesley Publishing Company, ZDA, str.: 14-89.
- (10) van Genuchten M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.
- (11) ASTM D 3152 Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Fine-Textured Soils by Pressure-Membrane Apparatus: 6 str.
- (12) ASTM D 5298 Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) using Filter paper: 6 str.
- (13) ASTM D 2325 Standard Test Method for Capillary-Moisture Relationships for Coarse- and Medium Textured Soils by Porous-Plate Apparatus: 6str.