

Ana PETKOVŠEK

dr., univ.dipl.inž.geol., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

ZEMLJINSKA SUKCIJA: NEKAJ PRIMEROV UPORABE V GEOTEHNIKI

POVZETEK: Vrednotenje zemljin z uporabo retencijskih krivulj in podatkov o sukaciji dobiva v geotehniiki čedalje večji pomen. Včasih so menili, da je za geotehnično rabo, zemljinska sukacija pomembna le v aridnih klimatskih pasovih. Šele v zadnjem desetletju spoznavamo, da sukacija pomembno vpliva na številne procese v zemljinah in mehkih kamninah tudi v zmernih klimatskih pasovih. Raziskovanje in nadzorovanje zemljinske sukacije omogoča boljšo rabo zemljin za konstrukcijske nasipe in tesnilne pregrade, pomaga pri ocenjevanju volumske stabilnosti visoko prekonsolidiranih zemljin in mehkih kamnin, omogoča boljši nadzor nad dogajanjem na velikih plazovih, v spornih primerih pomaga pri identifikaciji izvora finih zrn v kamenem agregatu in podobno. V članku je prikazanih nekaj primerov koristne rabe sukacije pri reševanju najzahtevnejših geotehničnih problemov v Sloveniji.

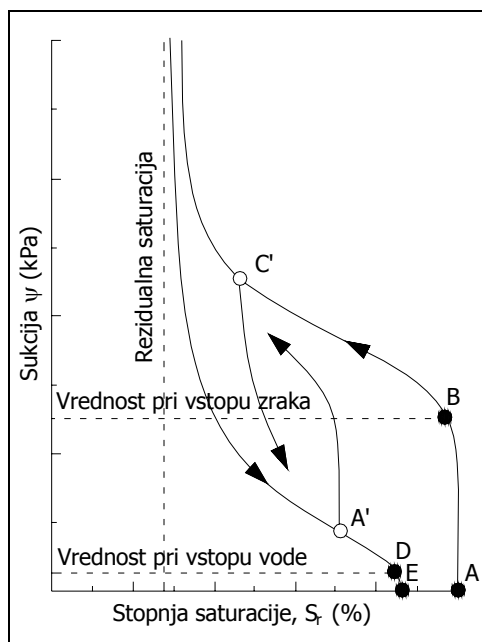
SOIL SUCTION: SOME EXAMPLES OF ITS APPLICATION IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

SUMMARY: Soil suction and soil water characteristic curves have been gaining an increasing importance in geotechnical engineering. In the past it was considered that soil suction is confined only to arid and semi arid regions. Now we know, that soils with suction are frequently encountered in a numerous of geotechnical problems also in temperate climates. Measurements of soil suction enable better use of soils for structural embankments and mineral sealing layers. Suction helps to asses the volume stability of stiff clays and to asses the stability in natural and engineered slopes. In special cases it helps to identify the origin of fines in unbound granular aggregates. This paper describes some typical Slovenian geotechnical structures where soil suction helped to improve the understanding of the problems and to solve them.

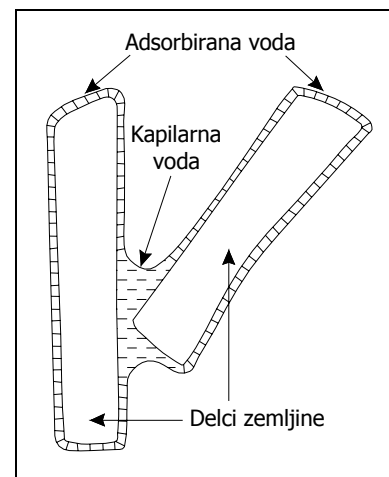
UVOD

Totalna, matrična in osmotska sukcija

Zemljina je porozen medij, ki privlači in zadržuje vodo. Jakost sil, s katerimi zemljina zadržuje vodo je odvisna od zemljinske strukture (matriksa), v kateri imajo pore in narava zrn pomembno vlogo. Matrična sukcija je mera za energijo, ki je potrebna, da iz zemljinskega matriksa odstranimo molekulo vode, ne da bi voda spremenila svoje agregatno stanje. Označujemo jo kot (u_a-u_w). Osmotska sukcija je mera za dodatno energijo, ki je potrebna, da zaradi soli, raztopljenih v porni vodi, iz zemljinskega matriksa odstranimo molekulo vode. Označujemo jo s π . Totalna ali celokupna sukcija je vsota matrične in osmotske sukcije in jo označujemo s ψ . Sukcija je torej posledica kapilarnih pojavov, adsorpcije vode na mineralna zrna in osmotskih vplivov soli v porni vodi. Temeljno zvezo med stopnjo zasičenosti (ali volumsko ali gravimetrično vlago) zemljine in sukcijo opiše retencijska krivulja (slika 1).



Slika 1: Retencijska krivulja v diagramu stopnja zasičenosti S_r (%) – sukcija (kPa).



Slika 2: Voda v nezasičeni zemljini in vodni most (Hillel, 1998).

Sukcija in trdnost

Ker je v nezasičeni zemljini voda v tenziji in je porni tlak negativen ($-u$), se z naraščanjem sukcije večajo tudi efektivne normalne napetosti. Skladno s Terzaghijevim načelom efektivnih tlakov bi teoretično pričakovali, da bo zaradi sušenja, vzporedno z naraščajočo sukcijo, naraščala tudi strižna trdnost zemljine. Vemo pa, da temu ni tako. Že igre v peskovniku so nas naučile, da lahko peščeni grad zgradimo le, če je pesek ravno prav vlažen – ne presuh in ne premoker. Pojav povečanja trdnosti v nezasičeni zemljini je povezan s kapilarnim učinkom med zrn in z elektrokemičnimi vezmi na površini zrn. V peskih se voda zadržuje med zrn in tvori meniske, ki preko površinske napetosti povezujejo zrna med seboj in s tem povečajo efektivne napetosti (slika 2). Vendar pa se pri vstopu zraka v zemljino spreminjajo razmerja med površinami v porah, na katerih vodni most deluje in »potiska« zrna skupaj, zato sukcije ni možno direktno povezati s strižno trdnostjo zemljine preko efektivne normalne napetosti. V coni rezidualne zasičenosti je porna voda v zemljini adsorbirana v zemljinskem matriksu in z mehurčki zraka popolnoma izolirana. Transport vode je možen le z vodno paro. V tem območju kapilarnost izgubi svoj fizikalni pomen – peščeni grad se poruši.

Nasprotno se obroč adsorbirane vode ustvari na elektrokemično aktivnih zrnih in je tem debelejši, čim bolj aktivna so zrna. Zelo aktivne so gline, zlasti smektitne. Zemljina z aktivnimi zrn bo prehod v cono rezidualne vlage zaznamovala prvenstveno z volumskimi spremembami. Ker so zemljine kompoziti,

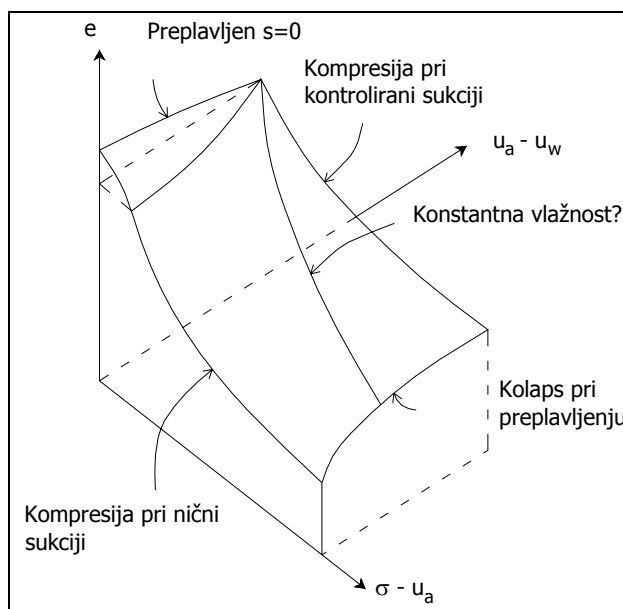
sestavljani iz aktivnih in inertnih zrn in iz por različnih velikosti (so več porni material), ima vsaka zemljina svojo značilno retencijsko krivuljo in svoje lastno specifično obnašanje v fazi sušenja in v fazi vlaženja.

Sukcijo v povezavi z inženirskimi lastnostmi zemljin so najprej raziskovali na Road Research Laboratory v Londonu. Bishop (1959) je modificiral klasično Terzaghijevo zvezo med totalnimi in efektivnimi tlaki v zasičeni zemljini in jo zapisal kot (1):

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

kjer je: σ' - efektivna napetost, u_a - tlak pornega zraka, χ - eksperimentalno določena vrednost pri triosnem kompresijskem preizkusu in je $\chi = 1$ v zasičenem in $\chi = 0$ v suhem stanju in $(u_a - u_w)$ –matrična sukucija.

Strukturni kolaps je pojav, ki nastopi ob nenadnem pojavu zasičenosti zemljine, torej v stanju, ko sukucija $(u_a - u_w)$ upade na nič. Pri kolapsu bi se potemtakem moral po Bishopu volumen zemljine povečati, v resnici pa se hipoma zmanjša. Iz tega sledi, da enačba (1) ni splošno veljavna. Namesto nje se je zato začel uvajati koncept dveh napetostnih spremenljivk, neto normalne napetosti $(\sigma - u_a)$ in sukucije $(u_a - u_w)$ (slika 3).



Slika 3: Koncept deformacijskega obnašanja zemljin s sukucijo (Matyas in Radhakrishma, 1968).

Za določitev strižne trdnosti nezasičenih zemljin v tem trenutku še ni splošno veljavnega izraza. Različni avtorji (Lamborn, 1986; Peterson, 1988; Toll, 1990 in drugi, cit. po Petkovšek, 2006) so izpeljali različne rešitve, ki pa so bolj ali manj veljavne le za tiste skupine zemljin, ki so bile vključene v eksperiment in jih lahko poenostavljeno zapišemo z enačbo (2). Člen, ki smo ga v enačbi (2) imenovali prispevek sukucije ne predstavlja absolutne vrednosti sukucije. Različni avtorji v tem členu povežejo sukucijo z dodatnim parametrom, kot je na primer volumetrična vlaga, stopnja zasičenja, dodatna vrednost strižnega kota (φ^b) itd. Nekateri avtorji prispevek sukucije enačijo kar z navidezno kohezijo zaradi sukucije (Peterson, 1988, cit. po Petkovšek, 2006).

$$\tau' = c' + (\sigma - u_a) \tan\varphi' + \text{prispevek sukucije} \quad (2)$$

Podobno velja tudi za vrednotenje občutljivosti zemljin na volumske spremembe. Vendar pa se zdi, da je povezava med sukcijsko oziroma retencijsko krivuljo in volumskimi spremembami bolj dorečena. V zadnjih letih se sukcijska pospešeno vključuje v mehanistično empirične modele za dimenzioniranje cest (Zapata et al, 2005).

Sukcija v rahlih in zgoščenih zemljinah

Tudi v Sloveniji vse več geologov in geoteknikov pri svojem delu uporablja podatke o zemljinski sukaciji in retencijski krivulji. Pri uporabi literaturnih podatkov o sukaciji in prispevku sukacije k trdnosti in volumski nestabilnosti zemljin pa moramo biti previdni. Ne le, da ima vsak tip zemljine svojo značilno retencijsko krivuljo. Pomembno je razlikovati med tako imenovano »deviško« retencijsko krivuljo in retencijskimi krivuljami zemljin pri različnih stopnjah zgoščenosti. Deviška retencijska krivulja se nanaša na zemljino v najbolj rahlem stanju oziroma v stanju, ki ga označimo kot $e = e_{max}$. Potek retencijske krivulje za enako, a zelo zgoščene zemljino, to je za zemljino v stanju $e = e_{min}$ bo popolnoma drugačen. Točka vstopa zraka se pri zgoščeni zemljini premakne v smeri višje sukacije, vlaga pri stopnji popolnega zasičenja pa se pomembno zniža.

ZEMLJINSKA SUKCIJA PRI GRADNJI NASIPOV IN NASUTIH ZEMELJSKIH PREGRAD

Uvod

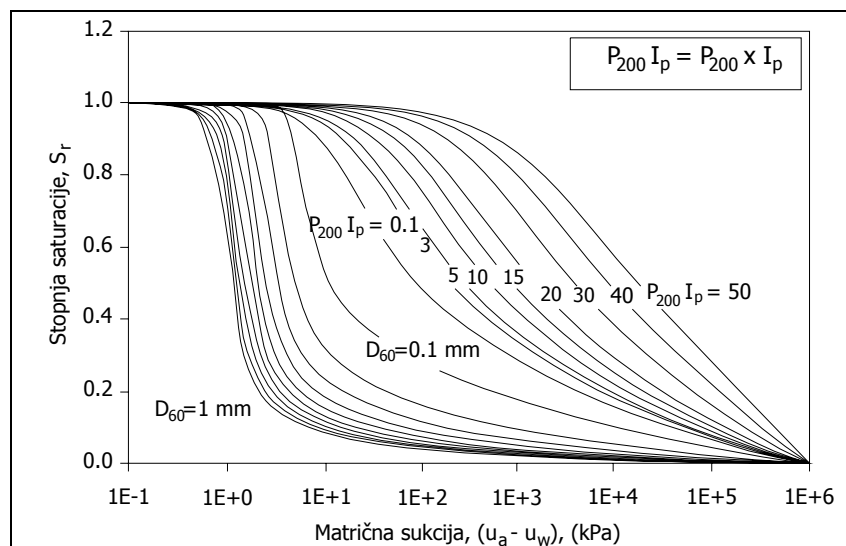
Pri načrtovanju prometnic in nasutih zemeljskih pregrad je treba njihovo konstrukcijsko zasnovano in tehnologijo gradnje prilagajati lastnostim lokalno razpoložljivih materialov. Pomanjkanje prostora in omejevanje rabe kakovostnih surovin nas silijo, da v nasipe vgrajujemo praktično vse, kar izkopljemo v trasi ali v njeni neposredni bližini. Čeprav je trdnostno deformacijsko obnašanje različnih vrst zemljin zelo različno, so zahteve glede stanja ceste, ravnosti vozne površine in trajnosti objekta vselej enako stroge, ne glede na to, ali gradimo v okoljih z dobrim ali slabim surovinskim zaledjem.

Po merilih, ki trenutno veljajo v Sloveniji, je v nasipe dopustno vgrajevati vse vrste zemljin in zdrobljenih kamnin, ne glede na njihovo plastičnost, nagnjenost k strukturnemu kolapsu ali nabrekanju. Pomembno je le, da naravna vlaga nasipnega materiala omogoča zgoščanje in da v vgrajenih plasteh dokažemo zahtevano zgoščenost in togost plasti. Po drugi strani pa poročila o predčasnih poškodbah na zemeljskih objektih kažejo, da obstoječi postopki in tehnični pogoji ne omogočajo pravočasne identifikacije nevarnih stanj. Preveč ohlapna pravila veljavnih pogojev za zemeljska dela nalagajo geotehničnemu inženirju, ne glede na to, ali je v vlogi projektanta, izvajalca, inženirja ali zunanje kontrole, veliko odgovornost, ko se odloča za gradnjo nasipov iz materialov, kot so visoko plastične ali visoko prekonsolidirane gline, laporji, slabo graduirani peski ipd. Poznavanje in razumevanje retencijske krivulje in zemljinske sukacije je pri tem v odlično pomoč.

Materiali za nasipe, zemljinska sukacija in gradient sukacije

Vsaka zemljina ali zdrobljena kamnina ima določeno vrojeno sukacijo. V zemljinah za gradnjo nasipov je sukacija različna in se giblje od nekaj deset do nekaj tisoč ali celo deset tisoč kilopaskalov. Na sliki 4 so prikazane retencijske krivulje značilnih skupin zemljin. Peščeni materiali ($D_{60} = 0,1\text{mm} - 1\text{mm}$) imajo pri 85 % zasičenosti sukacijo, ki se giblje od 1 do 10 kPa, visoko plastične gline pa imajo pri enaki stopnji zasičenosti sukacijo od 1MPa do 10 MPa. V praksi to pomeni, da so prvi v stanju židkosti in neuporabni za gradnjo, drugi pa poltrdni do trdni in z vidika togosti plasti v odličnem stanju. Vendar je to le trenutno stanje. Zaradi vplivov okolja bo v obeh primerih prišlo do ekvilibracije vlage v vgrajeni plasti.

V prvem primeru bo sukacija zaradi dreniranja in izhlapevanja v nasipu naraščala, vzporedno bosta naraščali trdnost in togost plasti. V drugem primeru bo sukacija padala, plast se bo mehčala in deformirala. Od retencijske krivulje in velikosti začetne sukacije bo odvisno, ali bodo nasipi po izgradnji obdržali začetno togost in volumen ali pa bo s časom prišlo do trajnih ali ponavljajočih se, sezonsko pogojenih sprememb. V primeru peščenih materialov bo gradient sukacije v območju med nizko in visoko stopnjo zasičenja, na primer med 25 % in 85 % zelo nizek, recimo med 10 – 100 kPa in na volumska dogajanja ne bo vplival. V primeru visoko plastičnih glin pa bo v enakem območju zasičenosti gradient sukacije nekajkrat večji, zato se bo zemljina na spremembe odzvala z volumsko deformacijo.



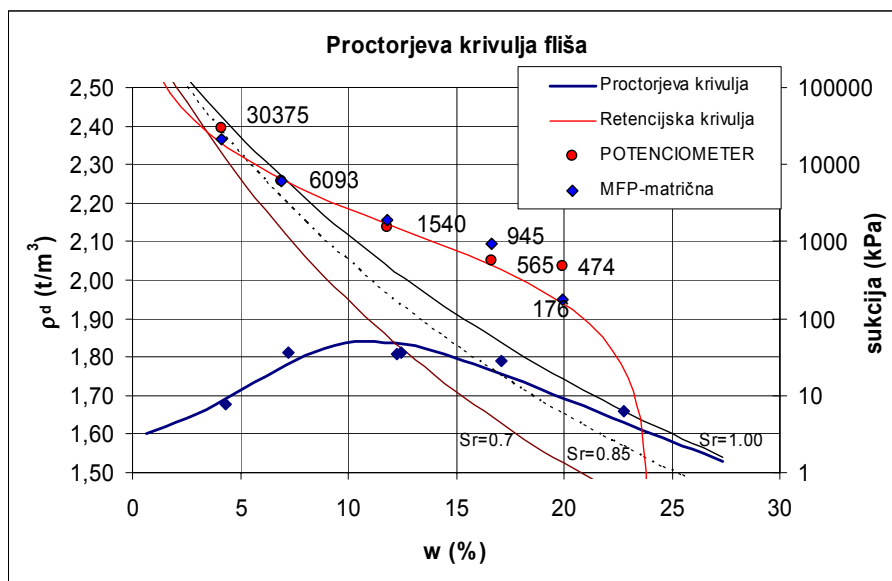
Slika 4: Retencijske krivulje zemljin (Zapata et al., 2005).

Na sliki 5 je prikazana Proctorjeva krivulja fino zdrobljenega flišnega laporja, ki ima v naravnem stanju vlago $w_0 = 5 - 8 \%$ in sukciijo nad 10 MPa. Zdrobljena zrna imajo mejo židkosti $w_L = 45 \%$ in indeks plastičnosti $I_p = 31 \%$. V diagramu so izrisane tudi krivulje, ki ustrezajo 70%, 85% in 100% zasičenosti ter pripadajoča retencijska krivulja. Fliš, nabit pri optimalni vlagi ima vrojeno sukciijo 1500 kPa. V intervalu relativne zgoščenosti $D_{PR} \geq 97 \%$ je vrojena sukciija pri zgoščanju na mokri strani Proctorjeve krivulje 500 kPa in pri zgoščanju na suhi strani do 6000 kPa. Če bi zgoščali fliš pri naravni vlagi ali pri kateri koli vlagi, ki je nižja od optimalne vlage, bi zaradi visoke vrojene sukciije prišlo do velikih gradientov sukciije v trenutku, ko bi se površina zadnje plasti omočila. Proces bi povzročil naraščanje saturacije in z njo povezane volumske spremembe in upad trdnosti in togosti plasti.

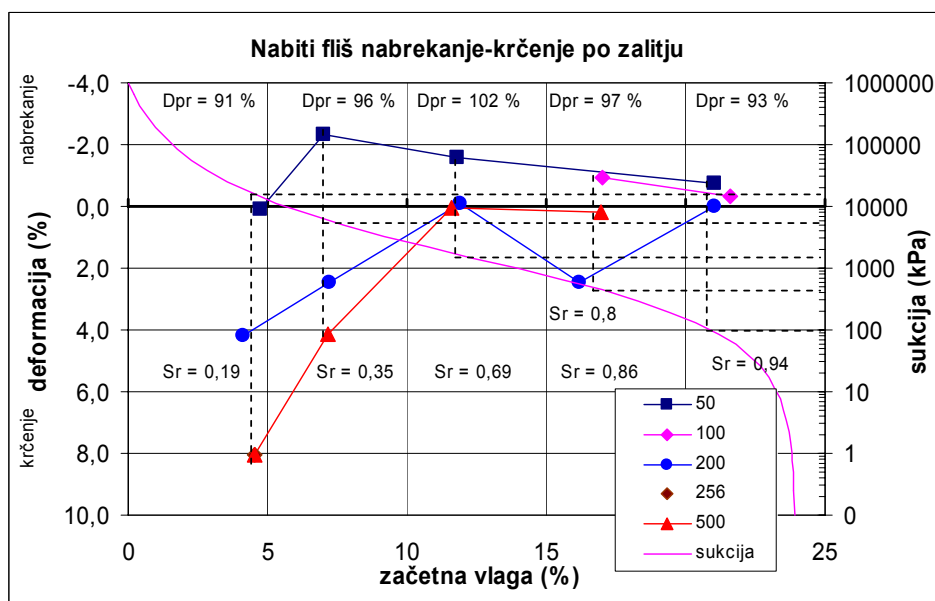
Na sliki 6 so prikazane linearne deformacije nabitega fliša, merjene v edometru pri različnih bremenskih stopnjah od $\sigma' = 50 - 500$ kPa. Pri primerljivih stopnjah zgoščenosti so deformacije veliko višje takrat, ko ima fliš visoko vrojeno sukciijo. Pri nizkih stopnjah zgoščenosti se deformacije ob vlaženju odrazijo v obliki krčenja, pri visokih stopnjah zgoščenosti pa v obliki nabrekanja. Pri sukciijah, ki so ob vgradnji nižje od 500 kPa, so deformacije zanemarljivo majhne ne glede na velikost bremenske stopnje.

Zaključek

Na izbranem primeru zdrobljenega flišnega laporja smo pokazali, da klasična načela vrednotenja fliša za nasipe avtocest in drugih prometno obremenjenih površin ne zadoščajo več. Starejši inženirji smo bili vzgajani v prepričanju, da je treba fliš vgrajevati v nasipe takoj po izkopu, v čim bolj suhem stanju in jih čim prej zapreti z asfaltem ali drugimi plastmi.



Slika 5: Proctorjeva krivulja fino zdrobljenega flišnega laporja v kombinaciji z retencijsko krivuljo in krivuljami zasičenja (Petkovšek, 2006).



Slika 6: Deformacijsko obnašanje fliša, nabitega pri različnih vrojenih sukciyah (Petkovšek, 2006).

Številni primeri predčasnih poškodb, na primer na tesnilnem jedru pregrade akumulacije Vogršček leta 1986, na vozišču v globokem avtocestnem vkopu na Razdrtem leta 1995, na visokih nasipih iz fliša na HC Selo – Šempeter v letu 2000 in drugi pa so nas naučili, da je treba fliš in flišu podobne materiale:

- pred vgradnjo v nasipe ustrezno navlažiti in prekvasiti, ali
- pustiti, da odležijo na deponijah, kjer bo v zavaljanih plasteh prišlo do ekvilibracije vlage in znižanja vrojene sukcije pred vgrajevanjem v nasipe, ali
- dograjene nasipe v času gradnje ali po izgradnji pustiti v mirovanju toliko časa, da pride do ekvilibracije vlage pred nadgradnjo z vezanimi cementno betonskimi ali asfaltno betonskimi plastmi oziroma pred obremenitvijo z visokimi hidrostatskimi tlaki v vodnih akumulacijah.

Ugotovitve, prikazane na opisanem primeru fliša držijo v vseh vrstah zemljin, razlikujejo se le v velikosti pojava, ki ga določa potek retencijske krivulje. Z vpeljavo znanj o zemljinski sukuciji smo po letu 2005 uspešno dogradili visoke nasipe iz fliša na ČHE Avče, določili pogoje gradnje avtocestnih nasipov iz miocenskih laporjev in visoko plastičnih pliocenskih glin v vzhodni Sloveniji, pravilnost napovedi obnašanja nasipov, izdelanih z uporabo sukucije, pa so potrdile redne terenske meritve med gradnjo.

Klimatologi napovedujejo, da se bodo v naslednjih trideset do štirideset letih temperature v Sloveniji dvignile za nekaj stopinj Celzija. Danes opisujemo klimo v Sloveniji kot zmerno, razlike v količinah padavin med Bovcem in Lendavo so med 3000mm/letno in 600 mm/letno. V geotehniki smo bili doslej pozorni na zaščito pred pojavi zmrzali in ekvibracije vlage zaradi vlaženja. Ob napovedih klimatologov bo treba pozornost preusmeriti na deformacije, ki jih v nasipih in temeljnih tleh povzročijo sušenje in krčenje. Brez vedenj o sukuciji teh pojavov ne bo možno niti opisati niti razumeti.

ZEMLJINSKA SUKCIJA PRI NADZOROVANJU PLAZOV IN BLATNIH TOKOV

Uvod

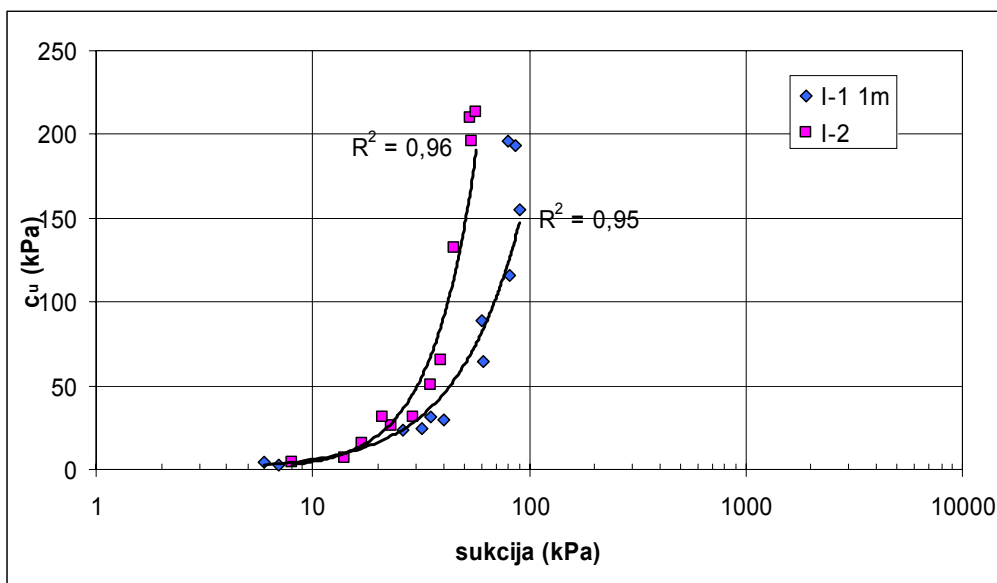
Pojav drobirskega toka na pobočjih pod Stožjem nad Logom pod Mangartom ter viskozni blatni tokovi na plazovih Slano blato nad Ajdovščino in Macesnikovem plazu nad Solčavo so nas v zadnjem desetletju presenetili z obsežnostjo pojava ter številnimi vprašanji, na katera še ne znamo prav odgovoriti (Majes et al. 2002; Majes, 2004; Kočevar in Ribičič, 2002). Viskozni blatni tokovi so tipična posledica odzivov nezasičene zemljine na klimatske spremembe, zlasti na ekstremne padavine, vselej v tesni povezavi s posegi v prostor. Še posebej zanimivi so zato, ker se lahko nenadoma pojavijo in prav tako nenadoma ustavijo. Za razumevanje mehanizmov napajanja in praznjenja nesaturirane zemljine na pobočju in s tem povezanega proženja tokov, klasični sistemi opazovanj z inklinometri in piezometri ne zadoščajo. Terenske meritve sukucije postajajo na ranljivih pobočjih čedalje pomembnejše orodje tako pri temeljnih raziskavah kot tudi pri vzpostavljanju celovitega monitoringa na ozemljih, ki jih ogrožajo blatni tokovi (Zhan et al., 2007).

Instrumentacija plazu Slano blato z merilniki sukucije

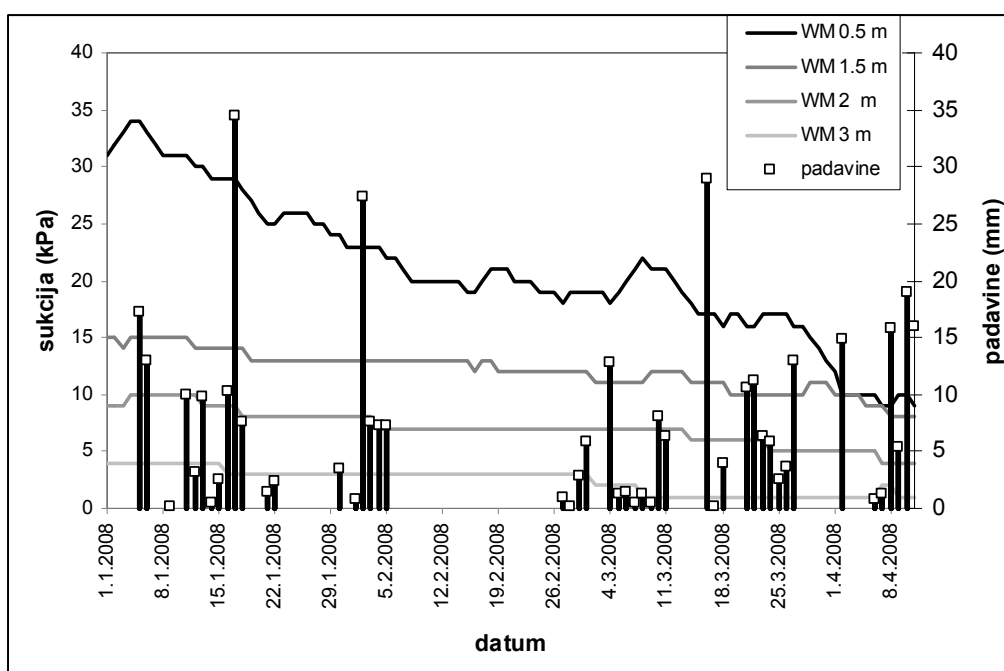
Namen instrumentacije je vzpostavitev dolgoročnega opazovanja sukucije in sezonsko pogojenega napajanja in praznjenja por flišne preperine na pobočju. Instrumentacija z merilniki sukucije je del sistema opazovanj plazu Slano blato, v katerega je vključena tudi vremenska postaja in površinsko opazovanje gibanja plazu s kamero. To je prva tovrstna instrumentacija plazu v Sloveniji, od katere veliko pričakujemo, predvsem pa se bomo morali iz nje še veliko naučiti. Pri instrumentaciji sodelujejo E-net računalniški sistemi iz Ajdovščine ter Geoinženiring in UL FGG iz Ljubljane.

V čem je bistvo instrumentacije plazu z merilniki sukucije? Pri klasičnih geotehničnih raziskavah opisujemo različna konsistenčna ali gostotna stanja zemljin s podatki o vlagi, indeksu konsistence, indeksu relativne zbitosti itd. Vendar so absolutne vrednosti za različne zemljine težko primerljive. Meljast grušč iz pobočij pod Stožami nad Logom pod Mangartom lahko teče kot drobirski tok že pri vlagah okoli 15 %, flišna glina pa je, nasprotno, pri 40 % vlagi še »trdno na mestu«.

Zemljinska sukucija je za razliko od različnih indeksnih kazalnikov direktno merljiva. Pri sukuciji 10 – 33 kPa je v zemljini največja količina vode – zemljina je 100 % zasičena. Zrak, ki je še prisoten v vodi, je ujet le v obliki mehurčkov. V peščenih tleh je to pri sukuciji okoli 10 kPa, v glinastih tleh pa pri sukuciji okoli 33 kPa. V zelo gostih glinastih tleh se lahko vrednost vstopa zraka premakne v območje sukucije 100 kPa. Pri sukuciji 1 – 3 kPa je zemljina na meji židkosti in pri sukucijah 50 – 1000 kPa na meji plastičnosti. Širok razpon sukucije pri meji plastičnosti kaže, kako zelo pomembno je poznati naravo materiala, če želimo razumeti mehanizme proženja hitro tekočih drobirskih in počasnejših viskoznih blatnih tokov. Na sliki 7 je prikazana eksperimentalno določena zveza med nedrenirano trdnostjo in sukucijo za zemljine na mestu vgradnje merilnikov, na sliki 8 pa je prikazano gibanje sukucije na plazu v opazovanem obdobju od vgradnje merilnikov do aprila 2008. Slika 8 kaže, da je obdobje, ko je prišlo do povečane nevarnosti prehoda zemljine na pobočju v židko stanje in v viskozni blatni tok nastopilo prvič po dolgotrajnem aprilskem deževju.



Slika 7: Eksperimentalno določena zveza med sukcijo in nedrenirano trdnostjo zemljine na plazu.



Slika 8: Rezultati spremljanja gibanja sukcije na plazu Slano blato v času januar – april 2008. To seveda ne pomeni, da se plaz Slano blato v tem času ni premikal. Majhni premiki so bili, vendar pa do nastanka blatnega toka ni prišlo. Dosedanja opazovanja tudi kažejo, da je pozitiven vpliv burje na prirast sukcije zemljine v površinskih plasteh izjemen. Upamo, da bodo merilniki sukcije – vgradili smo senzorje tipa Watermark – delovali vsaj dve do tri leta in da bomo v tem času uspeli zasledovati vplive različnih vremenskih pojavov na sukcijo. Zima 2007/2008 na primer ni bila »prava« zima, saj ni prišlo do zamrznitve plasti niti do globine 0,5 m.

ZAKLJUČEK

Z uporabo podatkov o zemljinski sukuciji lahko pomembno izboljšamo razumevanje trdnostno deformacijskega obnašanja zemljin v naravnih tleh ali v geotehničnih zgradbah. Z lastnimi raziskavami zemljinske sukucije smo v laboratoriju UL FGG Ljubljana začeli leta 2004. Zaradi izjemno pomembnih informacij, ki jih v sebi nosi retencijska krivulja, smo v zelo kratkem času uspeli prenesti njeno rabo iz raziskovalnega na operativni nivo na velikih zemeljskih delih. Začeli smo na avtocestah v vzhodni Sloveniji, kjer so bili podatki v pomoč pri določanju pogojev uporabnosti nabreklih glin za nasipe. Meritve sukucije smo nato razširili na z apnom stabilizirane zemljine. Preko retencijskih krivulj smo dokazali, da je za zagotavljanje volumske stabilnosti stabiliziranih nasipov najpomembnejša visoka stopnja zasičenja v času izvajanja stabilizacije in ne doseganje zahtevane trdnosti po 4 dneh ali 7 dneh vezanja, kot to določajo sedanji tehnični pogoji.

Z uporabo retencijskih krivulj in podatkov o sukuciji smo uspeli pojasniti nekatere poškodbe na cestnih nasipih in voziščih v preteklosti. Zelo obetajoče so raziskave, ki jih razvijamo za potrebe napovedovanja procesov mehčanja in postopnega zniževanja trdnosti prekonsolidiranih glin in laporjev v globokih vkopih in v zaledju predorskih cevi. Tu se sicer srečujemo s težavami pri pridobivanju »intaktnih« vzorcev iz vrtn, saj so le ti ključ do pravilnega vrednotenja sukucije.

Z merilniki sukucije nismo opremili le plazu Slano blato. Uporovni merilniki sukucije so vgrajeni v visokih avtocestnih nasipih iz gline med Mariborom in Lenartom in pri Spodnji Senarski. Slednji so že v celoti upravičili svoj namen, saj so redne meritve pokazale, da je v času nekaj mesecev prišlo do ekvilibracije vlage v nasipih in do znižanja sukucije pod kritično vrednost. Sedaj bomo spremljali vplive visokih temperatur na morebitni prirast sukucije in tudi vplive zatratitve brežin in asfaltiranja površin na gibanje sukucije. Nova instrumentacija je v letu 2008 predvidena na jalovišču Jazbec, kjer bomo z merilniki sukucije opremili plasti v pokrovu jalovišča. Ker je radonski tok direktno odvisen od stopnje zasičenosti zemljin v pokrovu, bodo meritve sukucije služile za kontrolo učinkovitosti delovanja pokrova.

Raziskave sukucije so v svetovnem merilu v velikem razcvetu in danes predstavljajo že okoli 20 % vseh objav v geotehnični literaturi. Podatki o sukuciji v kombinaciji z retencijsko krivuljo prinašajo drugačne, klasično izobraženemu geotehničnemu inženirju včasih tudi težko sprejemljive poglede na vrednotenje zemljin, še zlasti poltrdnih glin in mehkih glinastih kamnin v nezasičeni coni. Tudi v Sloveniji bo treba temu razvoju slediti, z najnovejšimi znanji in dognanji pa čim prej dopolniti ne le tehničnih specifikacij za zemeljska dela, temveč tudi naš splošni pristop k raziskavam in vrednotenju trdnostnih parametrov zemljin v nezasičeni coni.

PRIZNANJE

Za hitro razširitev preiskav zemljinske sukucije iz akademskega nivoja v operativno rabo in na velika slovenska gradbišča so zaslužni vsi, ki so bili pripravljene nove postopke sprejeti in so verjeli in zaupali našim rezultatom, posebej še A. Ločniškar iz DDC, M. Bebar iz inštituta IGMAT, I. Benko iz E – net računalniških sistemov in M. Kočevar iz Geonženiringa, ki so tudi z lastnim angažiranjem na terenu učinkovito podprli naše delo. Posebna zahvala gre profesorju Bojanu Majesu, ki to razvojno delo spremlja in podpira od prvih začetkov in je bil vselej dobrohoten ocenjevalec in kritični sogovornik.

LITERATURA

- (1) Fredlund, D.G. 1999. The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. The 1999 R. M. Hardy lecture. 52nd Canadian Geotechnical Conference. Regina, Saskatchewan, Canada.
- (2) Fredlund, D. G. 1979. Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. Can. Geotech. J. 16, 121-139
- (3) Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. 1977. Stress State variables for Unsaturated Soils. ASCE J. Geotech. Eng. Div. GT 5, vol. 103, No 3: 261- 276.
- (4) Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. 1976. Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal 13(3): 261-276.
- (5) Fredlund, D.G., Rahardjo, H. 1993. Soil Mechanics for unsaturated Soils. New York.

- Wiley & Sons.
- (6) Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D., Barbour, S.L. 1996. The Relationship of the Unsaturated Soil Shear Strength Function to the Soil – Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 33: 440- 448.
 - (7) Hillel, A. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. London.
 - (8) Khallili, N., Khabbaz, M. H. 1998. A unique relationship for the determination of the shear strength of unsaturated soils. *Geotechnique*, 48(5): 681-687.
 - (9) Kočevar, M., Ribičič, M. 2002. Geološke, hidrogeološke in geomehanske raziskave plazju Slano blato. *Geologija* 45/2: 427-432. Ljubljana
 - (10) Majes, B., Petkovšek, A., Logar, J. 2002. Primerjava materialnih lastnosti drobirskih tokov iz plazov Stože, Slano blato in Strug. *Geologija* 45/2: 457-463. Ljubljana.
 - (11) Majes, B. 2005. Izvajanje postopne sanacije velikih plazov v Sloveniji = Carrying out gradual repair of large landslides in Slovenia. *Zbornik referatov*. Ljubljana: Slovensko geotehniško društvo, 2005: str. 17-38.
 - (12) Marolt, D. 2005. *Klimatografija Slovenije*. Povprečna višina padavin, obdobje 1961-1990. ARSO, Urad za meteorologijo: 2 str.
 - (13) Matyas, E. L., Radhakrishna, H. S. 1968. Volume change characteristics of Partially Saturated Soils. *Geotechnique*, vol. 18, No. 4, 432 – 448.
 - (14) Oberg, A., Salfors, G. 1977. Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve. *Geotechnical Testing Journal*, 20(1):40-48.
 - (15) Petkovšek, A. 2006. Vpliv matrične sukcije na trdnostno deformacijske lastnosti zemljin. Doktorsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. 274 str.
 - (16) Petkovšek, A. 2006. Stabiliziranje zemljin pri gradnji avtocest v severovzhodni Sloveniji. *Zbornik referatov*. Megra 2006 - Gornja Radgona. DRC Ljubljana: 13-35.
 - (17) Petkovšek, A. 2001. Obnašanje zemljin iz predvokopov Stanjevci na železniški progi Puconci-Hodoš v nasipih. Megra 2001. *Zbornik referatov*. Ljubljana: DRC: 244-253.
 - (18) Petkovšek, A., Pavšič, P. 2004. Dielektrične meritve za kontinuirano spremljanje spreminjanja vlage v zemljinah – prve izkušnje tudi v Sloveniji. *Razprave 4. posvetovanja slovenskih geotehnikov*, Rogaška Slatina. Maribor, Slovensko geotehnično društvo: 183-192.
 - (19) Petkovšek, A., Pavšič, P., Kokot, D., Leben, B. 2006. Using dielectric measurements to predict seasonal water movement in unbound road base and sub-grade layers. *Proceed. XIII. Danube – European Conference on Geotechnical Engineering*. Ljubljana. Vol.2: 999-1004.
 - (20) Zapata, C. E., Andrei, D., Witczak, M. W., Houston, W. N. 2005. Incorporation of environmental effects in pavement design. *International Workshop on Water in Pavements-wip 2005*. Madrid.
 - (21) Zhan, L.T., Charles, W.W., Fredlund, G. 2007. Field study of rainfall infiltration into a grassed unsaturated expansive soil slope. *Can. Geotech. J.* 44, 392-408.