

Procjena hidrauličkih značajki nezasićenog ekspanzivnog tla

Boris Kavur, Ivan Vrkljan, Biljana Kovačević Zelić

Ključne riječi

ekspanzivno tlo, hidrauličke značajke, krivulja retencije vode, promjena volumena, hidraulička provodljivost, numerički model

Key words

expansive soil, hydraulic properties, water retention curve, change in volume, hydraulic conductivity, numerical model

Mots clés

sol expansif, propriétés hydrauliques, courbe de la rétention d'eau, changement de volume, conductivité hydraulique, modèle numérique

Ключевые слова

экспансивный грунт, гидравлические характеристики, кривая ретенции воды, изменение объема, гидравлическая проводимость, цифровая модель

Schlüsselworte

expansiver Boden, hydraulische Kennzeichen, Kurve der Wasserretention, Volumenänderung, hydraulische Leitfähigkeit, numerisches Modell

B. Kavur, I. Vrkljan, B. Kovačević Zelić

Izvorni znanstveni rad

Procjena hidrauličkih značajki nezasićenog ekspanzivnog tla

Polazi se od toga da je za kvantitativni opis ponašanja ekspanzivnog tla nužno odrediti njegove hidrauličke značajke: krivulje retencije vode i promjene volumena te funkciju hidrauličke provodljivosti. Opisani su eksperimentalni i analitički postupci kojima su te karakteristike istraživog tla procijenjene. Inicijalno zasićeni uzorci ekspanzivnog tla podvrgnuti su sušenju. Pokusi sušenja uspješno su simulirani numeričkim modelom ne temelju procijenjenih značajki materijala.

B. Kavur, I. Vrkljan, B. Kovačević Zelić

Original scientific paper

Analysis of hydraulic properties of unsaturated expansive soil

The paper starts with assertion that, in order to make a quantitative description of expansive soil behaviour, it is indispensable to determine its hydraulic properties: water retention curves and changes in volume, and the hydraulic conductivity function. Experimental and analytic procedures that were used to determine these properties of the studied soil are described. Initially saturated specimens of expansive soil were subjected to drying. The drying tests were successfully simulated via numerical model, based on the estimated properties of material.

B. Kavur, I. Vrkljan, B. Kovačević Zelić

Ouvrage scientifique original

L'analyse des propriétés hydrauliques du sol expansif non saturé

L'ouvrage commence par l'assertion que, si l'on veut établir une description quantitative du comportement expansif du sol, il est impératif de déterminer ses propriétés hydrauliques: courbes de rétention d'eau et de changement de volume, et la fonction de la conductivité hydraulique. Les procédures expérimentales et analytiques utilisées pour déterminer ces propriétés du sol étudié sont décrites. Les échantillons du sol expansif initialement saturés ont été soumis au séchage. Les essais de séchage ont été simulés avec succès en utilisant le modèle numérique, sur la base des propriétés estimées du matériau.

Б. Кавур, И. Врклјан, Б. Ковачевич Зелић

Оригинална научна работа

Оценка гидравлических характеристик ненасыщенного экспансивного грунта

Исходится из того, что для количественного описания поведения экспансивного грунта необходимо определить его гидравлические характеристики: кривые ретенции воды и изменения объема, а также функцию гидравлической проводимости. Описаны экспериментальные и аналитические процедуры, посредством которых производилась оценка указанных характеристик исследованного грунта. Инициально насыщенные образцы экспансивного грунта подвергнуты просушке. Опыты просушки успешно смоделированы цифровой моделью на базе оцененных характеристик материала.

B. Kavur, I. Vrkljan, B. Kovačević Zelić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Abschätzung der hydraulischen Kennzeichen des ungesättigten expansiven Bodens

Man geht davon aus dass man für die quantitative Beschreibung des Benehmens des expansiven Bodens seine hydraulischen Kennzeichen bestimmen muss: die Kurven der Wasserretention und der Volumenänderung, sowie die Funktion der hydraulischen Leitfähigkeit. Beschrieben sind experimentale und analytische Verfahren nach denen diese Kennzeichen des untersuchten Bodens abgeschätzt wurden. Anfänglich gesättigte Proben des expansiven Bodens unterwarf man der Trocknung. Die Experimente des Trocknens sind erfolgreich durch das numerische Modell der abgeschätzten Kennzeichen des Materials nachgeahmt.

Autori: Dr. sc. **Boris Kavur**, dipl. ing. rud.; prof. dr. sc. **Ivan Vrkljan**, dipl. ing. rud., Institut IGH d.d.; prof. dr. sc. **Biljana Kovačević Zelić**, dipl. ing. rud., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

1 Uvod

Zbog promjene udjela vode ekspanzivna tla mijenjaju svoj volumen. Povećanjem vlažnosti bubre, a gubitkom vode smanjuju volumen. Ovakva tla stvaraju ozbiljne probleme graditeljima ako se u njima (tuneli i podzemne prostorije) ili na njima gradi (temeljenje). Bezbrojni su primjeri oštećenja tunela ili ozbiljnih oštećenja cijelih naselja i prometnica izgrađenih na ekspanzivnom tlu. Za racionalno je projektiranje u takvim uvjetima potrebno dobro razumjeti mehanizme koji dovode do promjene volumena te imati mogućnost realne prognoze ponašanja ekspanzivnog tla tijekom izvedbe i kasnije tijekom uporabe građevine.

Ekspanzivno je tlo sastavljeno od mješavine minerala, među kojima smektitni imaju najvažniji utjecaj na pojave bubrenja i skupljanja. Montmorilonit pripada smektit-skoj skupini minerala gline. Glavna je karakteristika ovih minerala veliki afinitet prema molekulama vode koje vežu i tako povećavaju svoj volumen. Mikrostrukturu tvore nakupine jediničnih čestica minerala montmorilonita u kojima dominiraju međuslojni porni prostori te mikropore između pojedinih čestica. Mikrostruktura je dio makrostrukture tla koju čine nakupine čestica s makroporama. Fizikalno-kemijska djelovanja unutar mikrodomene i makrodomene određuju ponašanje ekspanzivnog tla tijekom sušenja i vlaženja [1].

Uočeno je da tlo s visokim potencijalom bubrenja, ako se nalazi u potpuno zasićenom stanju, neće bubriti pri potapanju odnosno izlaganju vodi [2]. Potencijal bubrenja bit će aktiviran samo ako se tlo na određen način desaturira. Do desaturacije u prirodnim uvjetima najčešće dolazi zbog sušenja tla odnosno evaporacije porne vode. Sušenje je realna pojava pri izgradnji bilo koje građevine bez obzira na to radi li se o površinskim ili podzemnim iskopima ili pak uporabi ekspanzivnog materijala kao vodonepropusne barijere u odlagalištima otpada.

Problemi bubrenja i skupljanja su usko povezani s klimatskim prilikama, pa je problem najizraženiji u krajevima s aridnom i poluaridnom klimom. Promjena volumena ekspanzivnog tla istovremeno uključuje fenomen promjene stanja naprezanja i deformacije medija zbog promjene vlažnosti i saturacije te fenomen tečenja vode u nesaturiranom, deformabilnom, poroznom mediju. Racionalno rješenje takvog problema zahtijeva definiranje karakterističnih hidrauličkih značajki ekspanzivnog tla: krivulje retencije vode, funkcije hidrauličke provodljivosti i krivulje odnosa volumena i udjela vode u tlu. Unatoč tome, prognoze bubrenja na temelju varijable usisa nisu do sada našle širu primjenu zbog poznatih poteškoća u mjerenju usisa, kao i problema u eksperimentalnom određivanju hidrauličke provodljivosti nesaturiranog medija [3].

Ovdje će se razmatrati slučaj inicijalno saturiranog ili zasićenog (pore tla potpuno ispunjene vodom) ekspanzivnoga tla koje u procesu sušenja na zraku gubi vodu. Gubici vode na površini tla, koja je u kontaktu s atmosferom, dovode do tečenja porne vode iz unutarnjih dijelova prema površini. Sušenjem tlo prelazi iz saturiranog (zasićenog) u nesaturirano (nezasićeno) stanje. Za definiranje takvog medija nužno je poznavati njegove karakteristične hidrauličke krivulje.

Karakteristična krivulja retencije vode jedan je od temeljnih konstitutivnih odnosa u mehanici nesaturiranog tla. Njome je definiran odnos između usisa i vlažnosti odnosno termo-dinamički potencijal porne vode u odnosu na potencijal slobodne vode u funkciji vlažnosti. Krivulja retencije u stručnoj se literaturi mehanike nesaturiranih tala naziva i karakterističnom krivuljom tlo-voda. Za njezino određivanje rabe se različite tehnike mjerenja usisa koje se međusobno znatno razlikuju po mjernom opsegu koji obuhvaćaju, kompleksnosti i pouzdanosti mjerenja, trajanju ispitivanja, troškovima i dr. Geotehnički laboratoriji obično nemaju iskustva u takvim ispitivanjima.

Hidraulička je provodljivost u nesaturiranom mediju funkcija materijalnih varijabli koje opisuju strukturu pora (npr. poroznost i koeficijent pora), svojstva pornog fluida (gustoća i viskoznost) te relativne količine pornog fluida (vlažnost i stupanj zasićenosti) u sustavu [4]. Ovisnost hidrauličke provodljivosti o relativnoj količini vode u porama opisana je tzv. karakterističnom funkcijom hidrauličke provodljivosti. Ova je funkcija izrazito nelinearna, a provodljivost se kreće u vrlo širokim granicama (promjene do desetak redova veličine). Zbog toga je određivanje karakteristične funkcije hidrauličke provodljivosti vrlo delikatan zadatak, a izravno eksperimentalno mjerenje je vrlo teško ostvariti.

Ponašanje ekspanzivnog tla pri sušenju može se prikazati tzv. krivuljom skupljanja koja predstavlja odnos između promjene volumena odnosno koeficijenta pora i udjela vode. U fazi tzv. proporcionalnog skupljanja tlo ostaje potpuno zasićeno unatoč gubicima vode, a promjena volumena odgovara volumenu evaporirane vode sve do točke u kojoj dolazi do prodora zraka u tlo. Tada slijedi faza tzv. rezidualnog skupljanja kada su promjene volumena manje od volumena evaporirane vode, a stupanj zasićenosti opada (nesaturirano stanje) s gubitkom vode.

Ponašanje ekspanzivnog tla tijekom sušenja ovdje će se modelirati kao kombinirani hidrauličko-mehanički proces koji uključuje jednodimenzijnsko tečenje vode u saturiranim i nesaturiranim uvjetima, uz istodobnu promjenu volumena deformabilno-ekspanzivnog medija zbog promjene udjela vode.

Cilj ovog istraživanja bio je kvantificirati ponašanje ekspanzivnog tla na razini laboratorijskog uzorka te definirati program eksperimentalnih i analitičkih postupaka kojima je moguće relativno brzo, jednostavno i pouzdano procijeniti navedene hidrauličke značajke ekspanzivnog tla.

2 Materijal i postupci ispitivanja

Istraživanja su provedena na laboratorijskim uzorcima ekspanzivnog tla s lokaliteta Muvrinski Jarak smještenog u širem području naselja Gornja Jelenska sjeveroistočno od Popovače. Indeks plastičnosti odabranog tla iznosi 54 %, a granica tečenja kreće se u granicama od 99 do 112 %. U prirodnom se stanju udio vode kreće u vrlo širokim granicama od 45 do 71 %, a koeficijent pora od 1,29 do 1,97. Mineraloške analize pokazale su da je montmorilonit dominantan mineral glina u odabranom tlu.

Karakteristična krivulja retencije vode i hidraulička provodljivost tla u saturiranom stanju određeni su na temelju konsolidacijskih svojstava rekonstituiranog materijala. Pod terminom rekonstitucija podrazumijeva se postupak formiranja ispitnog uzorka konsolidacijom paste pripremljene od prethodno osušenog i dezintegriranog tla.

Fredlund i Rahardjo [3] pokazali su na primjeru zasićenog praha koji je bio podvrgnut izotropnoj konsolidaciji, a potom sušenju, da je promjena volumena zasićenog materijala pod djelovanjem povišenoga ukupnoga normalnog naprezanja jednaka promjeni volumena koja nastane zbog povišenoga matričnog usisa jednake magnitude sve dok materijal ostaje u stanju potpune zasićenosti. Abu-Hejleh i Znidarčić [5] pokazali su također na primjeru mekane zasićene keramičke gline da se karakteristike njezine stišljivosti tijekom jednodimenzijske konsolidacije i sušenja vrlo malo razlikuju te da bi se krivulju odnosa normalnog efektivnog naprezanja i koeficijenta pora moglo pretpostaviti kao praktično identičnu krivulji odnosa matričnog usisa i udjela vode u zasićenom stanju.

Na temelju takvih spoznaja pretpostavljeno je da će karakteristični odnos koeficijenta pora i usisa, koji vlada unutar rekonstituiranoga zasićenoga ekspanzivnog materijala podvrgnutog sušenju, biti sličan odnosu koeficijenta pora i efektivnog naprezanja tijekom njegove jednodimenzijske konsolidacije u uvjetima potpune zasićenosti.

Proces konsolidacije jasno je opisan teorijom McNabba [6] koju su kasnije proširili Gibson i dr. [7]. Proces konsolidacije ovisi o karakteristikama stišljivosti i vodopropusnosti materijala. Liu i Znidarčić [8] definirali su konsolidacijska svojstva mekanog tla s dvjema eksponenci-

jalnim funkcijama (tablica 1.) koje predstavljaju odnos između efektivnog naprezanja (σ_v') i koeficijenta pora (e) te odnos između koeficijenta vodopropusnosti (k) i koeficijenta pora (e).

Tablica 1. Rezultati SICTA pokusa dobiveni na uzorku rekonstituiranog materijala

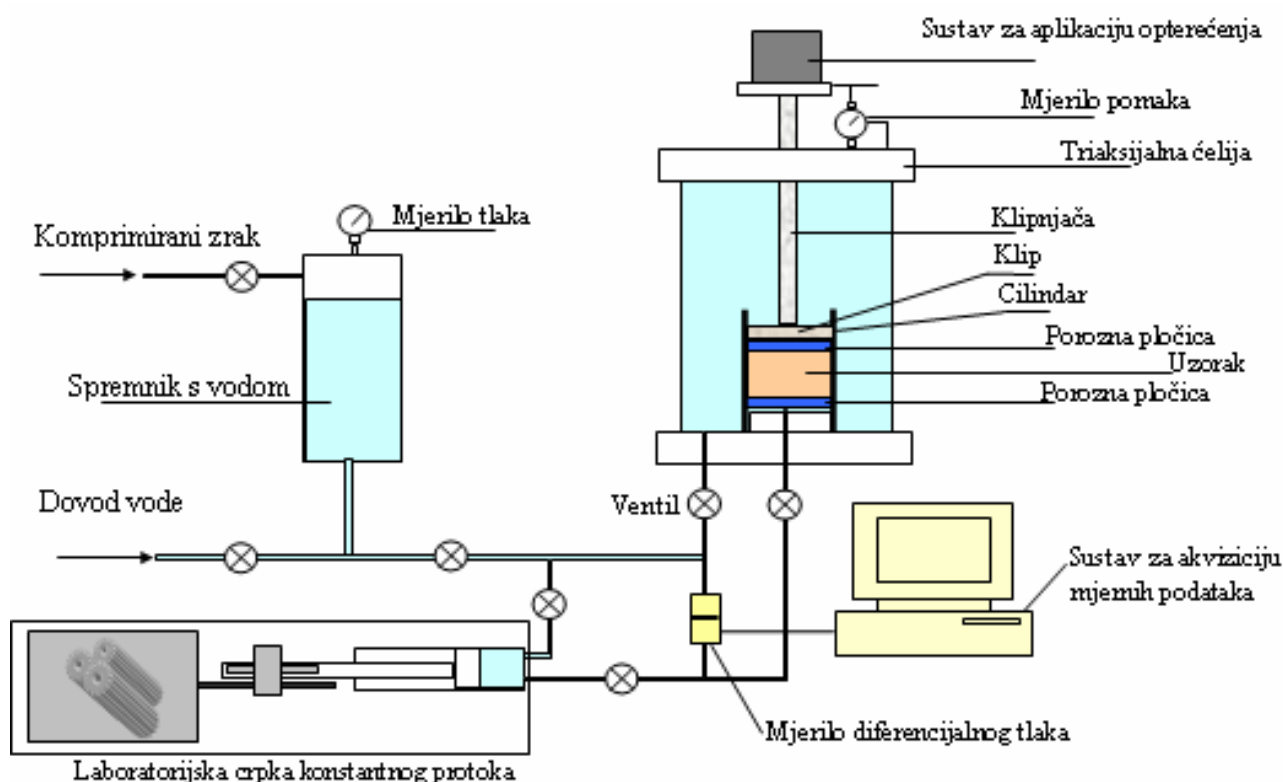
Model	Parametar	Vrijednost parametra
$e = A (\sigma + Z)^B$	A	4,54
	B	-0,193
	Z	0,312
$k = C e^D$	C	$7,45 \times 10^{-5}$ mm/h
	D	5,58

Za definiranje parametara (A , B , Z , C i D u tablici 1.) navedenih funkcija primjenjuju se rezultati pokusa konsolidacije inducirane protokom (SICT, engl. *Seepage Induced Consolidation Test*) i procedura rješavanja inverznog problema [9].

Osušeni i dezintegrirani materijal ekspanzivnog tla pomiješan je s destiliranom, deaeriranom vodom u pastu velikog početnog udjela vode ($w > 200$ %). Konsolidacijska svojstva pripremljene paste određena su analizom rezultata pokusa konsolidacije inducirane protokom (SICT). Ova je tehnika ispitivanja razvijena na Sveučilištu Colorado u Boulderu pod vodstvom Znidarčića [10].

Eksperimentalni dio SICT procedure sastoji se od tri različite faze koje zajedno pružaju podatke za analizu pokusa. Prva faza predstavlja određivanje koeficijenta pora pri nultoj odnosno minimalnoj vrijednosti efektivnog naprezanja. Druga faza predstavlja uspostavu stacionarnog stanja protoka koji inducira konsolidaciju uzorka pri maloj vrijednosti efektivnog naprezanja. Treća faza predstavlja izravno mjerenje vodopropusnosti uzorka koji je prethodno konsolidiran pri apliciranom opterećenju odnosno koji se nalazi pri stanju većeg efektivnog naprezanja.

Laboratorijska oprema za provedbu SICT pokusa shematski je prikazana na slici 1. Tijekom pokusa voda se crpi iz uzorka stalnom brzinom protoka preko njegove donje baze. Zbog uspostavljenog protoka vode uzorak se konsolidira, a nastala razlika tlakova između gornje i donje baze uzorka se povećava. Protok kroz uzorak održava se stalnim dok se ne uspostave uvjeti stacionarnog toka odnosno dok se ne završi proces konsolidacije kada razlika tlaka duž uzorka postaje također stalnom. Laboratorijska crpka omogućava vrlo preciznu kontrolu i stalnu vrijednost odabranog protoka kroz uzorak. Diferencijalni pretvornik precizno mjeri razliku tlaka između referentne vrijednosti uspostavljenoga povratnog tlaka i tlaka koji je generiran radom crpke ispod donje baze uzorka.



Slika 1. Laboratorijska oprema za SICT pokus (konsolidacija induciranim protokom)

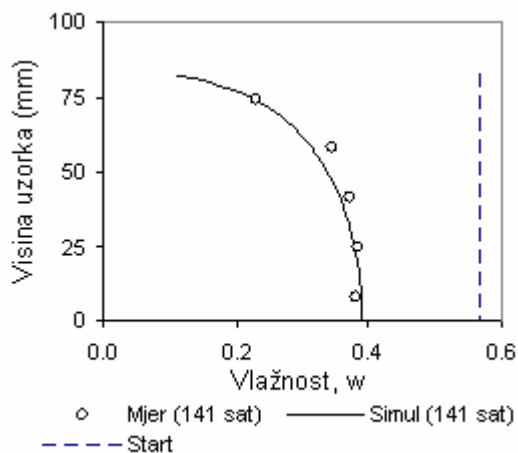
Uzorci prirodnoga, neporemećenog tla također su podvrgnuti ispitivanjima hidrauličke provodljivosti prema normi ASTM D 5084, metoda D (stalna brzina protoka) u zasićenom stanju.

U svrhu istraživanja desaturacije neporemećenog tla u uvjetima jednodimenzijskog (1-D) sušenja, od većeg neporemećenog komada formiran je cilindrični uzorak promjera 50 mm i visine 83 mm. Uzorak je podvrgnut 1-D sušenju na zraku u laboratoriju. Plašt i donja baza

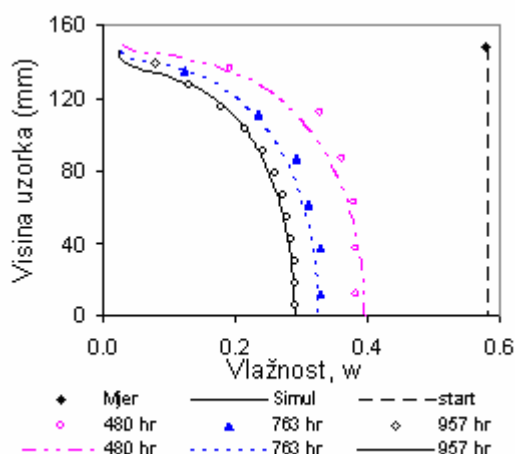
uzorka zaštićeni su od gubitka vlage tankom gumenom membranom. Tijekom sušenja mjerene su promjene mase, visine i promjera uzorka. Nakon sušenja u trajanju od 141 sat uzorak je razrezan okomito na os, na 5 diskova jednakih visina. Diskovima je određen udio vode (slika 2.).

Za istraživanje na razini laboratorijskog uzorka s obzirom na utjecaj mjerila, nužno je da uzorci budu manjeviše homogenog sastava i strukture, odnosno da eventualne lokalne nepravilnosti u sastavu i/ili strukturi materijala ne utječu bitno na rezultat ispitivanja. Rabljeno prirodno tlo nažalost karakterizira sporadična pojava izoliranih, manjih i većih gnijezda (inkluzija) slabo vezanog pijeska, kongrecija i drugih tvorevina koji su u promjeru do jednog, a ponekad i više centimetara. Budući da ove pojave nije bilo moguće unaprijed uočiti i isključiti tijekom formiranja neporemećenih ispitnih uzoraka, pribjeglo se pripremi homogenih tzv. rekonstituiranih uzoraka iz osnovnoga ekspanzivnog materijala.

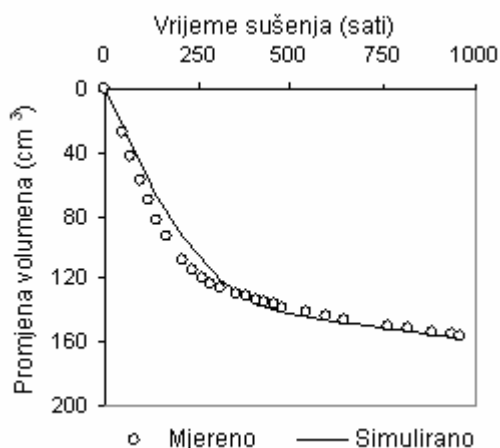
Konsolidacijom paste u posebno konstruiranom visokom cilindru, pri opterećenju od 1600 kPa, pripremljeni su rekonstituirani uzorci promjera 70 i visine 160 mm. Formiranjem homogenih zasićenih uzoraka uklonjeni su utjecaji lokalnih nehomogenosti na ponašanje bubrivog materijala, a to je omogućilo pouzdanu verifikaciju numeričkog modela u sušenju.



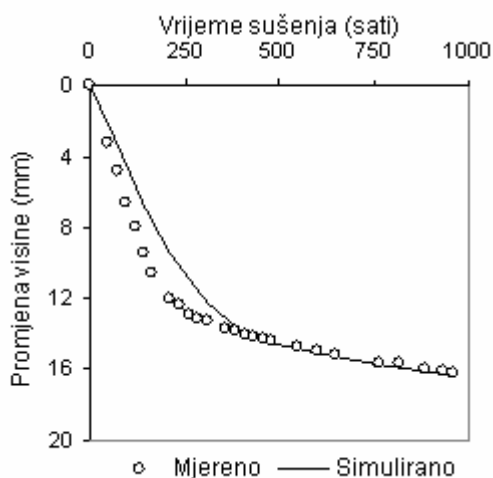
Slika 2. Mjereni i simulirani profil vlažnosti tijekom sušenja uzorka neporemećenog materijala



Slika 3. Mjereni i simulirani profili vlažnosti tijekom sušenja uzorka rekonstituiranog materijala



Slika 4. Mjereni i simulirani promjene volumena tijekom sušenja uzorka rekonstituiranog materijala



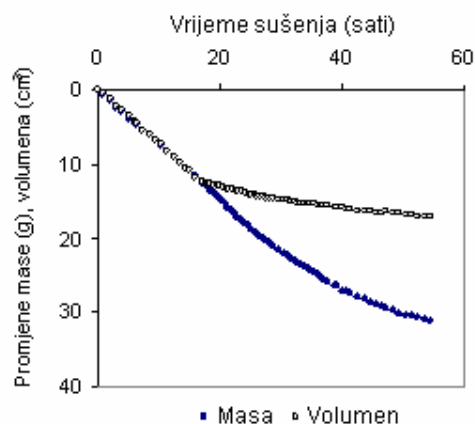
Slika 5. Mjereni i simulirani promjene visine tijekom sušenja uzorka rekonstituiranog materijala

Rekonstituirani su uzorci izloženi 1-D sušenju kroz razdoblje od 40 dana. Tijekom sušenja mjerene su promjene mase, visine i promjera uzorka. Promjene promjera mjerene su po visini uzorka na ravnomjerno raspoređenim presjecima. Nakon 40 dana sušenja jedan je uzorak razrezan na 12 diskova jednake visine da bi se ustanovila raspodjela vlažnosti po dubini uzorka (slika 3.). Tijekom sušenja zabilježene su krivulje promjene mase, volumena (slika 4.), visine (slika 5.), promjera i brzine sušenja.

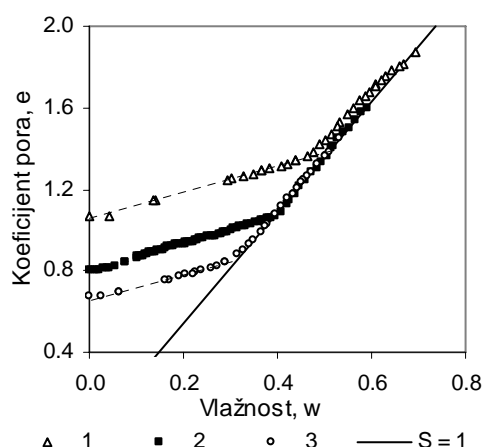
U nesaturiranoj je domeni funkcija hidrauličke provodljivosti procijenjena tehnikom rješavanja inverznog problema na temelju rezultata pokusa jednodimenzijskog sušenja rekonstituiranih uzoraka tla. Znidarčić i dr. [11] rabe pristup tzv. inverznog rješavanja problema za određivanje funkcije hidrauličke provodljivosti. U takvoj proceduri eksperimentalni se podaci promatraju kao rješenje problema za koji je poznata diferencijalna jednačba te početni i rubni uvjeti, a funkcije materijala odnosno parametri u diferencijalnoj jednačbi predstavljaju nepoznanice koje otkrivamo u iterativnoj proceduri numeričkim simulacijama pokusa dok se ne postigne zadovoljavajuće mala razlika između simuliranih i mjerenih vrijednosti.

Podaci prikupljeni u pokusima 1-D sušenja visokih uzoraka poslužili su i kao pouzdana baza za verificiranje kvantitativnog modela i ocjenu primijenjenih eksperimentalnih i analitičkih postupaka za procjenu hidrauličkih značajki ekspanzivnog tla. Iscrpni su podaci prikazani u [12].

Radi određivanja krivulje skupljanja materijala, pokusi sušenja obavljani su na neporemećenim i rekonstituiranim uzorcima oblika diska [13]. Diskovi su se sušili izlaganjem zraku u laboratoriju, postavljanjem na izvodnicu plašta kako bi se dobilo što ravnomjerniju raspodjelu vlažnosti unutar uzorka. Tijekom sušenja mjerile su se promjene mase i volumena uzorka (slika 6.).



Slika 6. Promjene mase i volumena rekonstituiranog materijala tijekom sušenja (uzorak oblika diska)

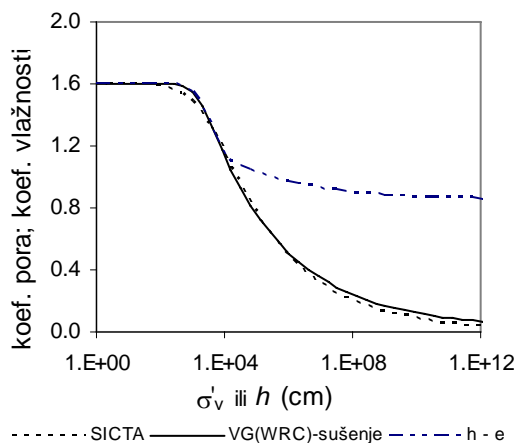


Slika 7. Krivulje skupljanja rekonstituiranih uzoraka (konsolidacija pri različitim opterećenjima: 1: 800kPa, 2: 1600kPa i 3: 3200kPa)

Na slici 7. prikazane su krivulje skupljanja rekonstituiranog materijala. Uočeno je da se nagib rezidualnog dijela krivulje skupljanja znatnije ne mijenja sa stupnjem prekonsolidacije ili promjenom varijable normalnog naprezanja. Izvodi se zaključak da nagib krivulje u rezidualnoj fazi skupljanja predstavlja specifičnu karakteristiku materijala.

3 Rezultati ispitivanja

Analizom obavljenog pokusa konsolidacije inducirane protokom pomoću algoritma SICTA za procjenu parametara (računalni program SICTA, [9]), ustanovljene su vrijednosti empirijskih parametara (tablica 1.) rekonstituiranog materijala ekspanzivnog tla.



Slika 8. Krivulja retencije vode VG(WRC) u sušenju, krivulja $\sigma'_v(e)$ - SICTA i krivulja $h - e$

Na slici 8. prikazana je krivulja odnosa koeficijenta pora i efektivnog naprezanja, $\sigma'_v(e)$. Na temelju krivulje $\sigma'_v(e)$, van Genuchtenovim [14] (VG) modelom (tablica 2.) pa-

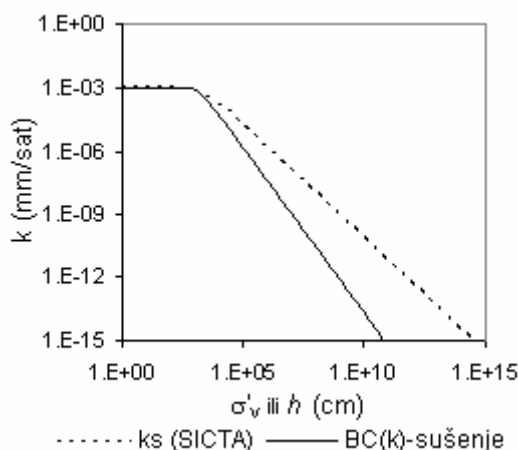
rametrizirana je krivulja retencije vode $VG(WRC)$. S obzirom da se ekspanzivnom mediju zbog promjena udjela vode mijenja ukupni volumen, umjesto volumenskog udjela vode, θ , (uobičajena varijabla u VG modelu) upotrijebljena je varijabla koeficijenta udjela vode, \mathcal{S} (kvocijent volumena vode i volumena čvrstih čestica tla), gdje su: \mathcal{S}_r rezidualni koeficijent udjela vode, \mathcal{S}_s koeficijent udjela vode pri punoj saturaciji, a $h(\text{cm})$ ukupni usisni potencijal. Upotrijebljen numerički model (ECOUL) upotrebljava usisni potencijal izražen u cm stupca vode. Tako su usisni potencijal i vertikalno efektivno naprezanje prikazani na slikama 8. i 9. u jedinici cm stupca vode kako bismo ih mogli usporediti iako to nije uobičajeno za naprezanje.

Tablica 2. Parametri VG modela krivulje retencije vode u sušenju

VG model	Parametar	Vrijednost parametra
$\mathcal{S} = \mathcal{S}_r + \frac{\mathcal{S}_s - \mathcal{S}_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$	\mathcal{S}_s	1,60
	\mathcal{S}_r	0,03
	α	0,0007 (cm ⁻¹)
	n	2,18
	$m = 1-2/n$	0,08257

Parametrizirana krivulja retencije vode ($VG(WRC)$ -sušenje) u sušenju prikazana je na slici 8. zajedno s krivuljom $\sigma'_v(e)$ (SICTA). Početna vrijednost koeficijenta udjela vode u VG modelu odgovara stanju udjela vode uzoraka ekspanzivnog tla prije sušenja (\mathcal{S}). Odabirom odgovarajućih vrijednosti parametara VG modela, nastojalo se postići što bolju podudarnost simulirane krivulje retencije, $h(\mathcal{S})$, s početnim dijelom krivulje $\sigma'_v(e)$ koji se odnosi na saturirano područje tijekom sušenja. Pri tome \mathcal{S}_r približno odgovara rezidualnom stanju udjela vode na samom vrhu rekonstituiranog uzorka nakon dugotrajnog sušenja u laboratorijskim uvjetima [12]. Na slici 8. prikazana je i krivulja $h-e$ odnosa usisnog potencijala i koeficijenta pora koja od navedenih krivulja divergira s početkom nesaturiranog područja. Kako rješenje problema konsolidacije Liu i Znidarčić [8] počiva na teoriji Gibsona i dr. [7], a jednačba tečenja vode u deformabilnom mediju u modelu ECOUL na Philipovu rješenju [15], pretpostavljena je sličnost između krivulja $\sigma'_v(e)$ (SICTA) i $VG(WRC)$ -sušenje (iako se prva odnosi samo na zasićeno stanje, a druga na zasićeno i nezasićeno) jer su oba rješenja praktično istovjetna [12] s obzirom na to da su problem promjene volumena tla i tečenja vode opisali formulacijom u materijalnim (Lagrangeovim) koordinatama. Pretpostavka o sličnosti ovih krivulja pokazala je dobre rezultate u ovom istraživanju.

SICT eksperimentom je određena funkcija hidrauličke provodljivosti $k_s(e)$ za saturirano stanje materijala (slika 9.). Na temelju Brooksova & Coreyeva [16] (BC) modela (tablica 3.) parametrizirana je krivulja hidrauličke provodljivosti $k(\theta)$ u funkciji vlažnosti materijala, gdje su: k_s hidraulička provodljivost u saturiranom stanju (na početku sušenja), a B empirijski parametar za prilagodbu krivulje.



Slika 9. Krivulja hidrauličke provodljivosti BC(k) rekonstituiranog materijala u sušenju i krivulja k_s (SICTA) u ovisnosti o usisu odnosno efektivnom naprezanju

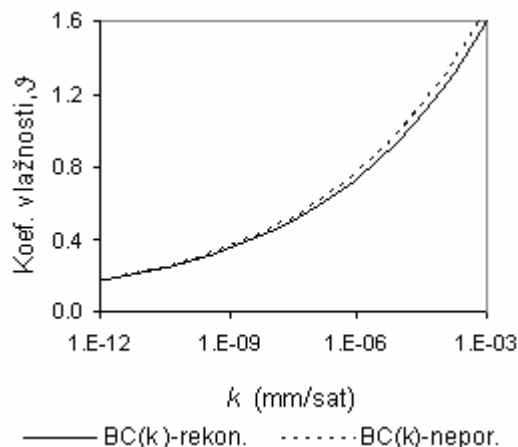
Parametrizirana krivulja hidrauličke provodljivosti u sušenju (BC(k)-sušenje) prikazana je na slici 9. zajedno s krivuljom k_s (SICTA) u ovisnosti o usisnom potencijalu odnosno efektivnom naprezanju. Pri tome je krivulja k_s (SICTA) simulirana eksperimentalno dobivenim vrijednostima parametara C i D (tablica 1.). Krivulja BC(k)-sušenje prikazana na slici 9. predstavljena je BC modelom i vrijednostima parametara za rekonstituirani materijal (tablica 3.). Profili udjela vode utvrđeni nakon 1-D sušenja visokih uzoraka u laboratoriju iskorišteni su za inverzno određivanje funkcije hidrauličke provodljivos-

Tablica 3. Parametri BC modela krivulje hidrauličke provodljivosti u sušenju

BC model	Parametar	Vrijednost parametra za	
		neporemećeni materijal	rekonstituirani materijal
$k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^B$	k_s	$0,6 \times 10^{-3}$ mm/h	$1,0 \times 10^{-3}$ mm/h
	B	8,7	8,7

ti, $k(\theta)$, u nezasićenom području (parametar B u BC modelu) [12] pomoću numeričkog modela.

Ispitivanja hidrauličke provodljivosti uzoraka prirodno-ga, neporemećenog tla pokazala su da se provodljivosti k_s zasićenog rekonstituiranog i neporemećenog tla pri jednakim vrijednostima poroznosti nalaze unutar istog reda veličine (tablica 3.). Pod pretpostavkom da za neporemećeni materijal približno odgovara krivulja retencije koja je određena za rekonstituirani, korigirana je samo vrijednost saturirane hidrauličke provodljivosti (k_s) u BC modelu u skladu s eksperimentalno dobivenom provodljivosti k_s u neporemećenom materijalu, a pretpostavljeno je da vrijednost B parametra u sušenju ostaje ista kao kod rekonstituiranog materijala. Krivulje hidrauličke provodljivosti rekonstituiranog i neporemećenog materijala u sušenju, prikazane su zajedno na slici 10. u ovisnosti o koeficijentu vlažnosti. Vidljivo je da se dobivene krivulje vrlo malo razlikuju, te bi se mogle uzeti praktično identičnim.



Slika 10. Krivulje hidrauličke provodljivosti BC(k) rekonstituiranog i neporemećenog materijala u sušenju u ovisnosti o koeficijentu vlažnosti

Kvantificiranje krivulje skupljanja obavljeno je modelom koji je predložio Braudeau [17]. Za kvantificiranje krivulje skupljanja istraživanog tla iskorišteni su linearni segmenti Braudeauova (BR) modela budući da je eksperimentalne krivulje (slika 7.) moguće predstaviti s dva pravca: proporcionalnom fazom po liniji pune saturacije do točke ulaska zraka (e_{AE}) i linearnom, rezidualnom fazom sve do granice skupljanja (e_{SL}). Tako je krivulja skupljanja rekonstituiranog materijala definirana kao: $e_{AE} = 1,11$ i $e_{SL} = 0,84$, a neporemećenog kao: $e_{AE} = 1,61$ i $e_{SL} = 1,34$. Ovi su podaci određeni iz pokusa sušenja rekonstituiranih i neporemećenih uzoraka oblika diska.

Opisana procedura procjene hidrauličkih značajki uglavnom uključuje standardnu opremu geotehničkog laboratorija i uobičajene postupke pripreme uzoraka. Eksperimente je moguće obaviti u vremenu od 7 do 10 dana.

4 Numerička simulacija sušenja

Na osnovi Richardsove [18] odnosno Philipove [15] jednadžbe tečenja vode u nesaturiranom mediju, ali i teorije konsolidacije prema rješenju Gibsona i dr. [7], do sada je predstavljeno više numeričkih modela tečenja vode u deformabilnom poroznom mediju. Perrier i dr. [19] razvili su softver pod nazivom ECOUL koji je iskorišten u ovom istraživanju za numeričke simulacije sušenja ekspanzivnog tla prema modelu što su ga razvili Garnier i dr. [20].

U radu [19] detaljno su opisani algoritam i mogućnosti softvera ECOUL. Modelom je pretpostavljeno vertikalno, jednodimenzijnsko, monofazno tečenje vode u homogenom poroznom, deformabilnom mediju. Pretpostavka o jednodimenzijnskom tečenju opravdana je u slučaju kada je tlo na početku sušenja intaktno, tj. neispucano, te za uvjete koji vladaju na razini laboratorijskog uzorka izloženog 1-D sušenju u ovom istraživanju. Utjecaj zraka na tečenje se zanemaruje odnosno pretpostavlja se stalni tlak zraka jednak atmosferskom. Kemijski i temperaturni gradijenti u simulaciji također su zanemareni.

Pokusi sušenja rekonstituiranog i neporemećenog uzorka simulirani su modelom. Uzorci su simulirani jednim homogenim slojem čije su hidrauličke značajke predstavljene VG , BC i BR modelima te vrijednostima parametara navedenih u poglavlju 3. Svaki je uzorak prostorno razdijeljen u 54 segmenta po dubini. Na početku simulacija pretpostavljena je jednolika raspodjela udjela vode unutar zasićenoga bubrivog materijala. Rubni uvjeti na površini stupca izloženog sušenju definirani su kao inkrementalni, evaporacijski tokovi na temelju izmjerenih tijekom pokusa sušenja, a donja je granica definirana kao hidraulički nepropusna. Brzina sušenja se kod rekonstituiranog uzorka kretala u rasponu od 3,9 do 0,5 mm/dan, a kod neporemećenog u rasponu od 4,2 do 2,5 mm/dan (detaljni podaci u [12]).

Na slici 4. prikazana je mjerena i simulirana promjena volumena, a na slici 5. mjerene i simulirane promjene visine rekonstituiranog uzorka. Na slici 3. prikazani su zajedno mjereni i simulirani profili vlažnosti pri različitim vremenima sušenja. Na slici 2. prikazani su izmjereni i simulirani profil vlažnosti uzorka neporemećenog materijala nakon sušenja od 141 sata.

Simulirani profili vlažnosti dobro se slažu s izmjerenim podacima. Isto tako, simulirane promjene visine i volumena, kao i promjene promjera (ovdje nisu pokazane) duž visine uzorka, kvalitativno i kvantitativno dobro odgovaraju izmjerenim vrijednostima. Na temelju ovoga izvodi se zaključak da je ponašanje ekspanzivnog tla

tijekom sušenja realno opisano ovakvim kvantitativnim modelom. Stoga je modelom moguće obaviti analizu utjecaja sušenja na desaturaciju tla pod pretpostavljenim uvjetima okoliša te na temelju takve analize dati i realnu prognozu bubrenja [12].

Rezultati obavljenih simulacija pokazuju da su hidrauličke značajke materijala dobro procijenjene na temelju rezultata SICT pokusa. Kvantitativni je model omogućio inverzno određivanje funkcije hidrauličke provodljivosti u nesaturiranom tlu.

5 Zaključak

Za racionalno projektiranje u ekspanzivnom tlu potrebno je dobro razumjeti mehanizme koji dovode do bubrenja i skupljanja te imati mogućnost realne prognoze ponašanja tla pod očekivanim ili pretpostavljenim uvjetima.

Problem promjene volumena ekspanzivnog tla uključuje fenomen promjene stanja naprezanja i deformacije medija zbog promjene udjela vode i saturacije te fenomen tečenja vode u nesaturiranom, deformabilnom mediju. Rješenje takvog problema zahtijeva definiranje hidrauličkih značajki: krivulje retencije vode, funkcije hidrauličke provodljivosti u saturiranim i nesaturiranim uvjetima te krivulje ovisnosti promjene volumena i udjela vode ekspanzivnog tla. Hidrauličke značajke potrebno je poznavati i kod primjene ekspanzivnog materijala za vodonepropusne barijere u ekološkim projektima.

U pokusima sušenja ekspanzivnog tla uočeno je da se nagib rezidualnog dijela krivulje skupljanja ne mijenja znatnije sa stupnjem prekonsolidacije ili promjenom varijable normalnog naprezanja (slika 7.). Izvodi se zaključak da nagib krivulje u rezidualnoj fazi skupljanja predstavlja specifičnu karakteristiku materijala. Ovo zapažanje znatno olakšava kvantificiranje ponašanja tla u sušenju.

Ponašanje ekspanzivnog tla tijekom sušenja moguće je kvalitativno i kvantitativno dobro opisati ovdje primijenjenim numeričkim modelom. Hidrauličke se karakteristike mogu pouzdano procijeniti na temelju konsolidacijskih karakteristika rekonstituiranog materijala te postupcima rješavanja inverznog problema. Opisane eksperimentalne postupke moguće je obaviti standardnom opremom geotehničkog laboratorija u razumnom vremenu.

Rezultati ovog istraživanja otvorili su mogućnost racionalne prognoze dubine desaturirane zone, a time i mogućnost realne prognoze bubrenja koja bi trebala zamijeniti empirijsko razumijevanje ponašanja ekspanzivnih tala za potrebe projektiranja.

LITERATURA

- [1] Vrkljan, I.; Kavur, B.; Znidarčić, D.: *Influence of desiccation on swelling behavior of initially saturated swelling rocks*, Proc. of the XIIIth Danube-European Conference on Geotechnical Engineering (2006), Vol. 2, pp.159-164, Ljubljana, Slovenia.
- [2] Vrkljan, I.: *Bujanje stijena i njegov utjecaj na podzemne objekte*, Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1997.
- [3] Fredlund, D. G., and Rahardjo, H.: *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, New York, 1993.
- [4] Lu, N. and Likos, J.: *Unsaturated soil mechanics*. Wiley, New York, 2004.
- [5] Abu-Hejleh, A. N., and Znidarčić, D.: *Desiccation theory for soft cohesive soils*, J. Geotech. Engrg., ASCE, 121(6) (1995), pp. 493-502.
- [6] McNabb, A.: *A Mathematical Treatment of One-Dimensional Soil Consolidation*, Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 17 (1960), pp. 337-347.
- [7] Gibson, R. E.; England, G. L.; and Hussey, M. J. L.: *The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: 1. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers*. Geotechnique 17 (1967), 261-273.
- [8] Liu, J. C., and Znidarčić, D.: *Modeling One-Dimensional Compression Characteristics of Soils*, Journal of Geotechnical Engrg. Div., ASCE, Vol. 117 (1991), (GT1), 162-169.
- [9] Abu-Hejleh, A. N., and Znidarčić, D.: *Consolidation Characteristics of Phosphatic Clays*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122 (1996), No. 4. pp. 295-301.
- [10] Znidarčić, D., and Liu, J. C.: *Consolidation characteristics determination for dredged materials*, Proc., 22nd Annu. Dredging Seminar, Ctr. For Dredging Studies, Texas A&M Univ., College Station, Tex. (1989), 45-65.
- [11] Znidarčić, D., Hwang, C., and Bicalho, K.V.: *Experimental determination of hydraulic characteristics for unsaturated soils*, Proc. of the 3rd Inter. Conf. on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brazil, Unsaturated Soils (2002), eds: Juca, J.F.T., de Campos, T.M.P. & Marinho, F.A.M., A.A. Bakema.
- [12] Kavur, B.: *Utjecaj sušenja na ponašanje bubre stijene*, disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2009.
- [13] Kavur, B.; Vrkljan, I.; and Znidarčić, D.: *Prediction of rock swelling behaviour*, Proceedings of the Sri Lankan Geotechnical Society's First International Conference on Soil & Rock Engineering, (2007).
- [14] Van Genuchten, M. T.: *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*, Soil Sci. Soc. Am. J. (1980), 44: 892-898.
- [15] Philip, J. R.: *Hydrostatistics and hydrodynamics in swelling soils*, Water Resour. Res. (1969), 5:1070-1077.
- [16] Brooks, R.H., and Corey, A.T.: *Hydraulic properties of porous media*, Hydrology Paper No. 3 (1964), Colorado State University, Fort Collins.
- [17] Braudeau, E.: *Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sols structurés*, C.R.Acad. Sci. Ser. (1988) 2.307:1731-1734.
- [18] Richards, L. A.: *Capillary conduction of liquids through porous mediums*, Physics (1931), 1:318-333.
- [19] Perrier, E.; Garnier, P. & Leclerc, C.: *ECOUL: an interactive computer tool to study hydraulic behavior of swelling and rigid soils*, Computers & Geosciences 28 (2002), 1107-1118.
- [20] Garnier, P.; Perrier, E.; Angulo Jaramillo, R.; and Baveye, P.: *Numerical model of 3-dimensional anisotropic deformation and 1-dimensional water flow in swelling soils*, Soil Sci. 162 (1997), pp. 410-420.