

Primljen / Received: 17.9.2013.

Ispravljen / Corrected: 28.1.2014.

Prihvaćen / Accepted: 21.2.2014.

Dostupno online / Available online: 10.4.2014.

Utjecaj temperature na stišljivost i potencijal kolapsibilnosti rezidualnog granitnog tla

Autori:



Dr. sc. **Mehrdad Kholghifard**
Tehnološko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
Sveučilište Islamic Azad, Yasouj Branch, Iran
Kholghifard.m@gmail.com



Izv. prof. dr. sc. **Kamarudin Ahmad**
Tehnološko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
kamarudin@utm.my



Izv. prof. dr. sc. **Nazri Ali**
Tehnološko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
nazriali@utm.my



Izv. prof. dr. sc. **Azman Kassim**
Tehnološko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
azmankassim@utm.my



Dr. sc. **Roohollah Kalatehjari**
Tehnološko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
kalatehjari@yahoo.com



Mr. sc. **Farzad Babakanpour**
Uprava grada Yasouj
Yasouj, Iran
babkan.saverz@yahoo.com

Izvorni znanstveni rad

[M. Kholghifard, K. Ahmad, N. Ali, A. Kassim, R. Kalatehjari, F. Babakanpour](#)

Utjecaj temperature na stišljivost i potencijal kolapsibilnosti rezidualnog granitnog tla

U ovom se radu istražuje utjecaj temperaturnih promjena na indeks stišljivosti i potencijal kolapsibilnosti rezidualnog granitnog tla na koje se često nailazi u Maleziji. Zbijeno tlo analizirano je pomoću modificiranog edometra s kontrolom temperature. Dvije serije uzoraka tla s raznim vrijednostima suhe gustoće ispitane su pri temperaturama od 27, 40 i 60 °C. Rezultati ispitivanja pokazuju da vrijednost indeksa stišljivosti ne ovisi o temperaturi. S druge strane, grijanje dovodi do smanjenja potencijala kolapsibilnosti, a ta je pojava izraženija pri niskim vrijednostima suhe gustoće.

Ključne riječi:

temperatura, indeks stišljivosti, potencijal kolapsibilnosti, rezidualna granitna tla

Original scientific paper

[M. Kholghifard, K. Ahmad, N. Ali, A. Kassim, R. Kalatehjari, F. Babakanpour](#)

Temperature effect on compression and collapsibility of residual granitic soil

This research aims to investigate the effect of temperature changes on the compression index and collapse potential of the residual granitic soil that is widely encountered in Malaysia. An experimental study was conducted on the compacted soil using a modified temperature-controlled oedometer. Temperatures of 27, 40, and 60 °C were applied on two series of soil specimens with different values of dry density. Experimental results showed that the value of compression index is independent of temperature. On the other hand, heating caused a reduction in collapse potential, which was more pronounced at low dry density.

Key words:

temperature, Compression index, Collapse potential, Residual granitic soils

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

[M. Kholghifard, K. Ahmad, N. Ali, A. Kassim, R. Kalatehjari, F. Babakanpour](#)

Temperatureinflüsse auf die Kompressibilität und Kollapsibilität von residualen Granitböden

In dieser Arbeit wird der Einfluss von Temperaturveränderungen auf den Kompressibilitätsmodul und das Kollapspotential in Malaysia häufig vorkommender residualer Granitböden untersucht. Proben verdichteten Bodens sind mittels eines modifizierten Ödometers mit Temperaturkontrolle analysiert worden. Zwei Versuchsserien mit Bodenproben verschiedener Trockendichten sind für Temperaturwerte von 27, 40 und 60 °C durchgeführt worden. Die Resultate haben gezeigt, dass der Kompressibilitätsmodul nicht von der Temperatur abhängt. Andererseits führt ein Temperaturanstieg zur Reduktion des Kollapspotenzials, und diese Erscheinung ist ausgeprägter für niedrige Werte der Trockendichte.

Schlüsselwörter:

Temperatur, Kompressibilitätsmodul, Kollapspotential, residuale Granitböden

1. Uvod

U protekla dva desetljeća geotehničari u sve većoj mjeri istražuju utjecaj topline na fizikalna i mehanička svojstva tla. Na početku su istraživači pokušavali objasniti utjecaj promjene temperature na parametre obujma i čvrstoće uzoraka tla pomoću eksperimentalnih istraživanja [1, 2]. Ta ranija istraživanja uglavnom su bila usredotočena na inženjerska svojstva tla pri temperaturama nižim od 50°C. Današnje aktivnosti povezane s područjem geotehnike, kao što su skladištenje nuklearnog otpada, bušenje s naftnih platformi, te temeljenje u zonama podložnim promjenama temperature, potaknule su istraživače na proučavanje termomehaničkog ponašanja tla pri temperaturama do 100°C i više.

Neki istraživači [3-6] ispitivali su utjecaj termičkih djelovanja na fizikalno-mehanička svojstva glinenog tla. Na temelju tih istraživanja može se općenito zaključiti da povećanje temperature dovodi do smanjenja koeficijenta pora u normalno konsolidiranom tlu, dok zagrijavanje može dovesti do bujanja kod prekonsolidiranog tla. Te studije također pokazuju da koeficijent prekonsolidacije i usis utječu na termičko volumetrijsko ponašanje nezasićenog tla.

S druge strane, dugotrajno povećanje temperature bitno utječe na hidromehaničko ponašanje jako zbijenog glinovitog tla oko odlagališta otpada [7, 8]. Francois i Laloui [8] upućuju na blago smanjenje sposobnosti tla da zadrži vodu u slučaju porasta temperature. Cekerevac i Laloui [4] izučavaju termomehaničko ponašanje nekih vrsta umjetnog glinovitog tla da bi ocijenili mogućnost korištenja takvog tla kao tamponskog sloja kod spremnika s nuklearnim otpadom. Oni tvrde da povećanje temperature zasićenog tla do temperature niže od one potrebne za ključanje vode (100°C) utječe na promjenu obujma, posmičnu čvrstoću i krutost tla.

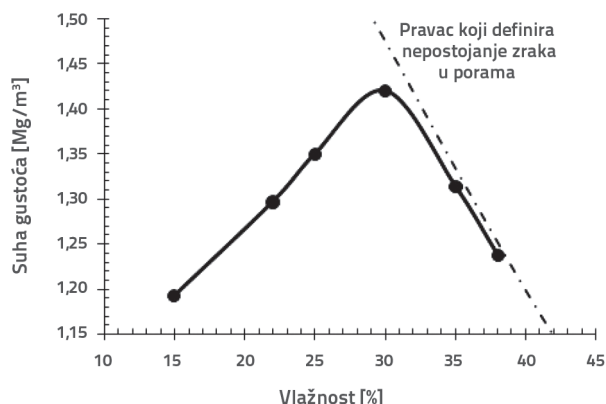
U posljednjih pedesetak godina provedene su brojne analize u svrhu ocjenjivanja parametara koji utječu na potencijal kolapsibilnosti zbijenog tla [6, 9-11]. Međutim, pregledom literature ustanovljeno je da još uvijek nisu dostupni podaci o utjecaju temperature na potencijal kolapsibilnosti rezidualnog granitnog tla. Stoga se u ovom radu prikazuju rezultati dobiveni eksperimentalnom analizom utjecaja temperature na indeks stišljivosti i potencijal kolapsibilnosti rezidualnog granitnog tla.

2. Materijali i metode

2.1. Osnovna svojstva tla

Crvenkastosmeđi uzorci rezidualnog granitnog tla uzeti su za potrebe ovog istraživanja na dubini od 1,7 m na području Tehnološkog sveučilišta u Maleziji (UTM). Provedbom klasifikacijskih ispitivanja prema BS1377: Drugi dio [12] ustanovljeno je da se radi o prahu visoke plastičnosti (MH).

Osim toga, rezultati dobiveni rendgenskom difrakcijom (XRD) pokazuju da se reprezentativni uzorak tla sastoji od neglinovitih minerala, tj. kvarca, tinjca i feldspata, te minerala gline - kaolinita i montmorilonita. Slika 1. pokazuje rezultate dobivene zbijanjem prema standardnom Proctorovom pokusu koje je obavljeno da bi se odredila maksimalna suha gustoća tla. Neka osnovna inženjerska svojstva uzoraka prikazana su u tablici 1.



Slika 1. Krivulja zbijanja rezidualnog granitnog tla

Tablica 1. Osnovna svojstva rezidualnog granitnog tla

Svojstvo	Vrijednost
Granica tečenja [%]	68
Granica plastičnosti [%]	35
Indeks plastičnosti [%]	33
Relativna gustoća	2.67
Granulometrijska analiza i hidrometar	
Šljunak [%]	3
Pijesak [%]	36
Prah [%]	40
Glina [%]	21
Optimalna vlažnost [%]	30
Maksimalna suha gustoća [Mg/m³]	1.41
Prirodna suha gustoća [Mg/m³]	1.21
Prirodna vlažnost [%]	26

2.2. Pripremanje zbijenih uzoraka tla

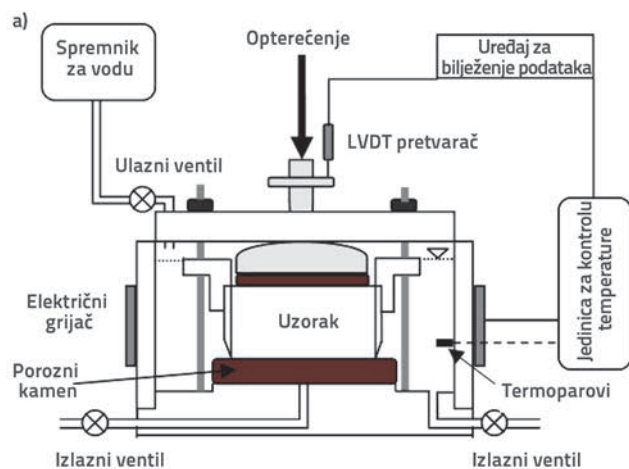
Na zraku sušeni reprezentativni uzorci tla, čije frakcije prolaze kroz sito promjera 2 mm, potpuno su ručno pomiješani pri vlažnosti od 30 %. Da bi došlo do uravnoteženja, mješavina je zabrtvljena plastičnim poklopcem na 24 sata. Potrebna masa pripremljenih vlažnih uzoraka tla zbijena je do raznih vrijednosti suhe gustoće primjenom ručnog dinamičkog postupka zbijanja prema BS1377: Četvrti dio [13]. Osnovna svojstva ispitanih uzoraka tla prikazana su u tablici 2.

Tablica 2. Svojstva pripremljenih zbijenih uzoraka

Uzorci (serija)	Suha gustoća [Mg/m ³]	Zbijanje [%]	Početa vlažnost [%]	Temperatura [°C]	Početni koeficijent pora
A	1,21	85	30	27 / 40 / 60	1,21
B	1,35	95	30	27 / 40 / 60	1,03

2.3. Provedba ispitivanja

Ova eksperimentalna analiza sastojala se od niza dvostrukih edometarskih ispitivanja uzoraka tla pri raznim temperaturama i pri različitim početnim suhim gustoćama. Za ispitivanje je korišten modificirani edometar prikazan na slici 2.



Slika 2. Modificirani edometar: a) shematski dijagram; b) fotografija edometra

Modificirani edometar sastojao se od uobičajenog edometra, prstenastog grijača s vanjskim edometarskim prstenom, termoparova kao temperaturnih senzora, spremnika s vodom i jedinice za kontrolu temperature. Ovime je konvencionalni edometar prilagođen da služi i kao temperaturna komora spojena s jedinicom za kontrolu temperature točnosti $\pm 1^\circ\text{C}$. Jedinica za kontrolu temperature mogla je kontrolirati temperature do 90°C .

Dvostruka edometarska ispitivanja [14] provedena su u svrhu određivanja potencijala kolapsibilnosti na dvije serije uzoraka rezidualnog granitnog tla. Ova se metoda sastoji od dva konsolidacijska ispitivanja koja se obavljaju na dva istovjetna uzorka po seriji. Ti istovjetni uzorci stavljaju se u edometre gdje se drže pod niskim opterećenjem od 1 kPa. Jedan od uzoraka se na početku dovodi u potpuno zasićeno stanje te se drži pod niskim opterećenjem (1 kPa) u vremenu od 24 sata, nakon čega se na uzorak nanosi opterećenje od 400 kPa primjenom standardnog postupka za inkrementalno nanošenje pritiska. Drugi uzorak postupno se opterećuje do 400 kPa bez prethodnog zasićenja, tj. pri početnoj vlažnosti. Razlika u koeficijentu pora zasićenog i nezasićenog uzorka smatra se potencijalom kolapsibilnosti. Za svaku seriju uzoraka, dvostruko edometarsko ispitivanje obavljeno je pri tri različite temperature (27, 40 i 60°C) pomoću modificiranog edometra. Temperatura uzorka tla posredno se povećavala grijanjem vode u prostoru između vanjskog prstena edometra i prstena uzorka. Baždarnim je ispitivanjem ustanovljeno da je u prosjeku potrebno 18 minuta da specifična temperatura održavana u kružnom prostoru dopre do središta uzorka. Stoga se potrebna temperatura trebala održavati barem dvadeset minuta prije početka svakog ispitivanja.

Potencijal kolapsibilnosti određen je pri vertikalnom naprezanju od 25, 50, 100, 200 i 400 kPa za sve uzorke. Vrijednost potencijala kolapsibilnosti (C_p %) uzoraka određena je pomoću sljedeće jednadžbe definirane u ASTM D 5333 [15]:

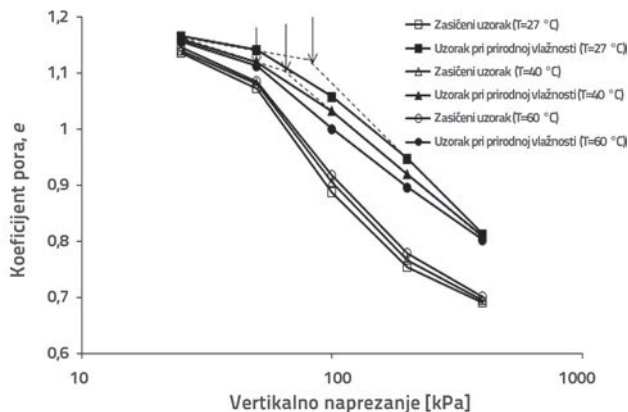
$$C_p(\%) = \left[\frac{e_i - e_f}{1 + e_0} \right] \times 100\% \quad (1)$$

gdje je e_0 početni koeficijent pora, dok su e_i i e_f koeficijenti pora dobiveni edometarskim ispitivanjem pri početnoj vlažnosti i u zasićenom stanju, pod istim vertikalnim naprezanjem.

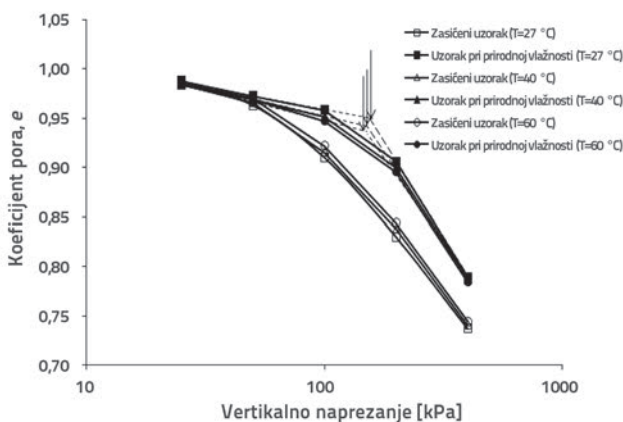
3. Rezultati i diskusija

Slike 3. i 4. prikazuju dijagrame odnosa koeficijenta pora i naprezanja dobivene iz dvostrukih edometarskih ispitivanja uzoraka serija A i B koja su obavljena pri različitim temperaturama.

Sjecište elastičnog i plastičnog dijela krivulje koje se definira kao naprezanje prekonsolidacije prikazano je na slikama 3. i 4. Ovu metodu također su koristili i Lloret i dr. [16]. Naprezanje prekonsolidacije (kod kojeg dolazi do popuštanja) za obje grupe pri uvjetima vlažnosti iskazano je u tablici 3.



Slika 3. Edometarske krivulje uzoraka iz serije A



Slika 4. Edometarske krivulje uzoraka iz serije B

Može se zamijetiti da se naprezanje prekonsolidacije uzoraka tla smanjuje sa smanjenjem temperature. Međutim, to je smanjenje zanemarivo kod zbijenijeg uzorka. Slično ponašanje gline opisuju i Cekerevac i Laloui [4]. Uočava se i sličan oblik edometarskih krivulja svake od serija kod raznih temperatura. Potrebno je uz to napomenuti da je razlika između edometarskih

krivulja pri raznim temperaturama beznačajna kod zbijenijih uzoraka (serija B) jer tlak generiran nanesenim opterećenjem kontrolira odziv tla. Niski koeficijenti pora dobiveni u obje serije pri višim temperaturama mogu se objasniti pojavom termičkog zbijanja [4] ili pojavom termičkog otvrdnjavanja [6].

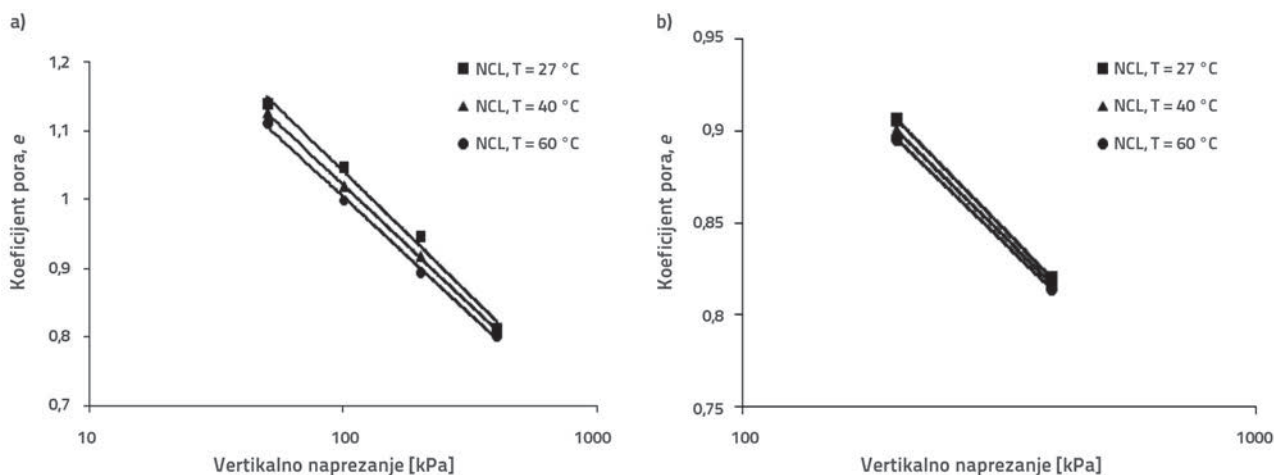
Tablica 3. Naprezanje prekonsolidacije u uvjetima vlažnosti

Uzorci tla (serije)	Naprezanje prekonsolidacije [kPa]		
	27 [°C]	40 [°C]	60 [°C]
A	81	65	50
B	150	149	148

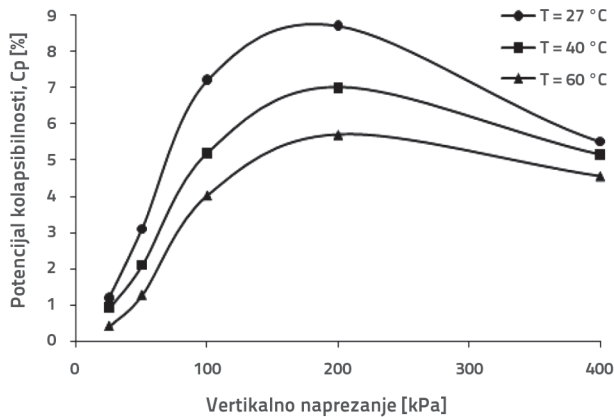
Slike 5.a i 5.b prikazuju linije normalne konsolidacije (NCL) za vlažne uzorke iz serija A i B. Svojstva linija NCL prikazana su u tablici 4. Utjecaj temperature na indeks stišljivosti tla ispitan je uspoređivanjem vrijednosti NCL pri raznim temperaturama. Nagibi linija NCL dobiveni iz dijagrama, poznati kao indeks stišljivosti (C_c), prikazani su u tablici 4. Rezultati pokazuju da se indeks stišljivosti blago smanjuje s porastom temperature. Drugim riječima, utjecaj temperature na indeks stišljivosti smatra se zanemarivim.

Tablica 4. Svojstva linija normalne konsolidacije (NCL)

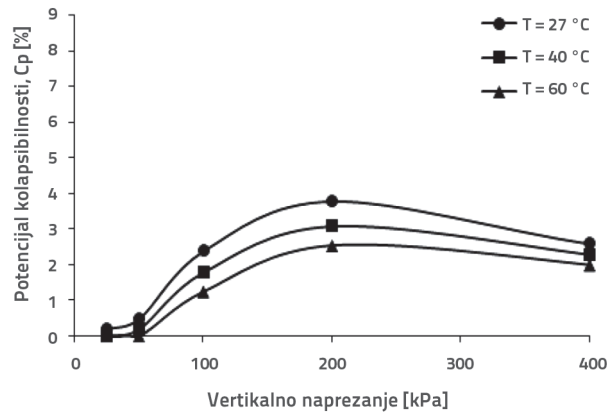
Uzorci tla (serije)	Suha gustoća [Mg/m ³]	Temperatura [°C]	Jednadžba koja najbolje aproksimira normalno konsolidirani dio edometarske krivulje	Nagib linija NCL (C_c)
A	1,21	27	$\gamma = -0,361 \log(x) + 1,7614$	0,361
		40	$\gamma = -0,350 \log(x) + 1,7224$	0,350
		60	$\gamma = -0,343 \log(x) + 1,6907$	0,343
B	1,35	27	$\gamma = -0,286 \log(x) + 1,5634$	0,286
		40	$\gamma = -0,276 \log(x) + 1,5344$	0,276
		60	$\gamma = -0,270 \log(x) + 1,5142$	0,270



Slika 5. Linije normalne konsolidacije (NCL) pri temperaturi od 27, 40 i 60 °C za vlažne uzorke iz: a) serije A; b) serije B



Slika 6. Potencijal kolapsibilnosti za uzorke iz serije A pri temperaturi od 27, 40, i 60 °C



Slika 7. Potencijal kolapsibilnosti za uzorke iz serije B pri temperaturi od 27, 40 i 60 °C

Utjecaj temperature na potencijal kolapsibilnosti (C_p) uzoraka tla prikazan je na slikama 6. i 7. Tu se može uočiti da se potencijal kolapsibilnosti uzoraka smanjuje s porastom temperature u obje serije (A i B) i to zbog termičkog zbijanja ili termičkog otvrdnjavanja. Smanjenje je značajnije kod rastresitih uzoraka nego kod zbijenih uzoraka. Maksimalno smanjenje vrijednosti C_p iznosilo je 3,01 % za seriju A i 1,25 % za seriju B.

Maksimalni potencijal kolapsibilnosti registriran je pri vertikalnom naprezanju od otprilike 200 kPa za obje serije A i B pri temperaturi od 27 °C. Međutim, utjecaj zagrijavanja na vrijednost C_p je manje očit pri povećanju vertikalnog naprezanja. Potencijal kolapsibilnosti tla u početku se povećao do maksimalne vrijednosti usporedo s povećanjem vertikalnog naprezanja, nakon čega dolazi do smanjivanja pri višim vrijednostima vertikalnog naprezanja. Medero i dr. [17] zabilježili su slično ponašanje tla stabiliziranog cementom.

4. Zaključak

Sljedeći se zaključci mogu izvesti iz eksperimentalnih rezultata dobivenih edometarskim ispitivanjem rezidualnog granitnog tla:

- Naprezanje prekonsolidacije rezidualnog granitnog tla smanjuje se s porastom temperature. Međutim, to je smanjenje zanemarivo kod zbijenih uzoraka.
- Pri raznim temperaturama, linije normalne konsolidacije (NCL) su malo razmaknute, ali se uočava paralelni trend. To znači da se indeksi stižljivosti tla (nagibi linija NCL) mogu smatrati neovisnima o temperaturi.
- Potencijal kolapsibilnosti tla smanjuje se s povećanjem temperature. Smanjenje je izraženije kod rastresitijih uzoraka nego kod zbijenijih uzoraka. Međutim, potencijal kolapsibilnosti uzoraka povećava se do maksimalne vrijednosti usporedo s povećanjem vertikalnog naprezanja, nakon čega se smanjuje pri višim vrijednostima vertikalnog naprezanja.

Zahvale

Autori su dobili financijsku podršku Tehnološkog sveučilišta u Maleziji (University Teknologi Malaysia). Ovim putem izražavaju svoju zahvalnost na toj podršci.

LITERATURA

- [1] Campanella, R. G., Mitchell, J. K.: Influence of temperature variations on soil behavior, *Journal of Geotechnical Engineering, Division, ASCE*, Vol. 94 (1968) 3, pp. 709–734.
- [2] Viridi, S. P. S., Keedwell, M. J.: Some observed effect of temperature variation on soil behavior, *Proceedings of International Conference on Rheology and Soil Mechanics, Coventry*, 1988.
- [3] Villar, M. V., Lloret, A.: Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite, *Applied Clay Science*, Vol. 26 (2004), pp. 337–350.
- [4] Cekerevac, C., Laloui, L.: Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay, *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 28 (2004), pp. 209–228.
- [5] Romero, E., Villar, M. V., Lloret, A.: Thermohydro-mechanical behaviour of two heavily overconsolidated clays, *Engineering Geology*, Vol. 81 (2005) 3, pp. 255–268.
- [6] Haghghi, A., Medero, G., Woodward, P., Laloui, L.: Effect of temperature on collapse potential of kaolin clay, *Unsaturated Soils*, Alonso & Gens eds. © 2011 Taylor & Francis Group, London, pp. 543–548, 2011.

- [7] Tang, A. M., Cui, Y. J., Barnel, N.: Thermomechanical behaviour of a compacted swelling clay, *Geotechnique*, Vol. 58 (2008) 1, pp. 44–54.
- [8] Francois, B., Laloui, L.: ACMEG-TS: A constitutive model for unsaturated soils under non-isothermal conditions, *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 32 (2008), pp. 1955–1988.
- [9] Lawton, E. C., Fragaszy, R. J., Hetherington, M. D.: Review of wetting-induced collapse in compacted soil, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 118 (1992) 9, pp.1376–1394.
- [10] Pereira, J. H. F., Fredlund, D. G.: Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126 (2000), pp. 907–916.
- [11] Rao, S. M., Revanasiddappa, K.: Influence of cyclic wetting drying on collapse behavior of compacted residual soil, *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 24 (2006), pp. 725–734.
- [12] British Standards Institution, BS 1377:1990: Part 2: Classification tests, London, 1990.
- [13] British Standards Institution, BS 1377:1990: Part 4: Compaction-related tests, London, 1990.
- [14] Jennings, J.E., Knight, K.: The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sandy subsoils on wetting, *Proc., Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3, Butterworths, London, pp. 316–319, 1957.
- [15] American Society for Testing and Materials (ASTM), Test method for measurement of collapse potential of soils, ASTM standards, Philadelphia, 2003.
- [16] Lloret, A., Villar, M. V., Sanchez, M., Gens, A., Pintado, X., Alonso, E. E.: Mechanical behavior of heavily compacted bentonite under high suction changes. *Geotechnique*, Vol. 53 (2003) 1, pp. 27–40.
- [17] Medero, G. M., Schnaid, F., Gehling, W. Y. Y.: Oedometer behavior of an artificial cemented highly collapsible soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135 (2009) 6, pp. 840–843.