

Vpliv strukture glin na njihove mehanske lastnosti

The impact of clay structure on their mechanical properties

Bojana DOLINAR

Univerza Maribor, Fakulteta za gradbeništvo, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija
e-pošta: bojana.dolinar@uni-mb.si

Ključne besede: gline, struktura, nedrenirana strižna trdnost
Keywords: clays, structure, undrained shear strength

Kratka vsebina

Prispevek prikazuje rezultate preiskav vpliva strukture na razmerje med vsebnostjo vode in nedrenirano strižno trdnostjo glin. S pojmom struktura je opredeljena tekstura glin (način združevanja in razporeditve zrn) in njena stabilnost. Slednja je odvisna od vrste in jakosti medzrnskih odbojnih in privlačnih sil, pogojenih s kemično sestavo glinenih delcev in porne vode. Rezultati preiskav so pokazali zelo velik vpliv strukture na nedrenirano strižno trdnost glin kar pomeni, da se mora ta vpliv odražati tudi na ostalih mehanskih lastnostih.

Abstract

This article presents the results of investigations that were focused on determining the impact of structure on the relationship between the water content and undrained shear strength in clays. The notion of structure encompasses the texture of clays (grain association and grain arrangement) and their stability. The latter depends on the type and magnitude of intergrain repulsive and attractive forces, conditioned by the chemical composition of clay grains and pore water. The results of investigations have shown that structure greatly influences the undrained shear strength of clays, which means that structure must also influence other mechanical properties.

Uvod

Mehanske lastnosti glin so odvisne od dejavnikov, ki izhajajo iz njihove mineraloške sestave in okolja. Sestava je opredeljena z vrsto in količino vsebujočih mineralov, njihovimi fizikalno kemičnimi lastnostmi, teksturo in jakostjo elektrostatičnih in elektromagnetnih medzrnskih sil. Podani dejavniki, ki se preiskujejo na porušeni vzorci glin, določajo območja, znotraj katerih se lahko pojavljajo posamezne mehanske lastnosti. Dejanske mehanske lastnosti glin pa so odvisne od okolja, ki narekuje razpoložljivost in kemično sestavo vode, vsebnost organskih primesi, temperaturo in tlak. Analiza

vpliva teh dejavnikov ni enostavna, ker zahteva večje število enakih intaktnih vzorcev glin z enako geološko zgodovino in razmerami v okolju. Bolj smiselno je zato najprej preiskati vplive, povezane s sestavo glin in s tem določiti mejne vrednosti možnih mehanskih lastnosti.

V predhodnih raziskavah je bil že preiskan vpliv vrste, količine in velikosti glinenih zrn na vsebnost vode pri posameznih mehanskih lastnostih glin (Dolinar & Trauner, 2004; 2005, Dolinar, 2006). Ker so omenjene preiskave potekale v pogojih, ki so zagotavljali izločitev ali izenačenje vseh ostalih vplivnih dejavnikov, veljajo dobljeni rezultati le za zemljine brez organskih pri-

mesi, s paralelno razporeditvijo glinenih zrn (enako strukturo) in temperaturo okolja približno 20 °C. Znano je, da se lahko struktura glin ob spremembi kemične sestave porne vode zelo hitro spremeni, posledično pa tudi trdnost glin pri enaki količini vsebujoče vode (Van Olphen, 1977; Ferrell, 1992). V prikazani raziskavi smo ugotavljali, kako velik je lahko vpliv strukture glin na razmerje med količino vode in nedrenirano strižno trdnostjo.

Pri raziskavah, opisanih v prispevku, smo enake vzorce kaolinitne gline zamešali z raztopinami NaCl različnih koncentracij. Z dodatkom tega elektrolita smo spreminjali razmerja med odbojnimi in privlačnimi silami med zrnji, istočasno pa tudi pH porne vode. S tem smo vplivali na vrsto in velikost medzrnskih sil in posledično na razporeditev zrn. Nedrenirano strižno trdnost tako pripravljenih vzorcev smo merili s krilno sondo. Pri vsakem vzorcu smo opravili več meritev nedrenirane strižne trdnosti v območju 1.5 – 20 kPa, vse meritve istega vzorca pa aproksimirali s potenčno funkcijo. Medtem ko smo razporeditev zrn v omočenih vzorcih opazovali z okoljskim vrstičnim elektronskim mikroskopom, smo lahko o vplivih posameznih elektrostatičnih in elektromagnetnih sil med zrnji gline pri različnih koncentracijah elektrolita sklepali le na osnovi predhodnih teoretičnih dognanj. Ker smo elektrolit dodajali v količinah, ki se pojavlja v naravnih okoljih, smo s tem nazorno pokazali, kako se lahko pri enaki glini in enaki količini vsebujoče vode, obravnavana mehanska lastnost spreminja tudi v odvisnosti od strukture.

Struktura glin

Strukturo glin opredeljuje način razporeditve posameznih zrn (tekstura) ter vrsta in jakost medzrnskih sil.

Glinena zrna nastopajo v zemljinah samostojno ali kot agregati paralelno razporejenih zrn. V prisotnosti vode se lahko razporedijo na tri različne načine (paralelno, stiki robov z robovi ali večjimi površinami zrn), prikazane na sliki 1 (van Olphen, 1977). Fizičen izgled gline je pri različnih tipih povezav povsem različen. Pri paralelni legi zrn se pojavljajo tanke in večje ploščice medtem, ko gradijo zrna, ki se stikajo z robovi ali z večjimi površinami in robovi odprto teksturo ali tako imenovano "hišo iz kart". Porazdelitev glinenih zrn je odvisna od vrste in jakosti medzrnskih odbojnih in privlačnih sil, prav razmerje med slednjimi pa narekuje tudi trdnost glin.

V zadnjih 30 letih je bilo ugotovljenih več vrst medzrnskih sil (Ferrell, 1992), med katerimi se kot najpomembnejše omenja elektrostatične odbojne in privlačne sile, ki se pojavljajo zaradi interakcije difuznih slojev električnih dvojnih plasti in van der Waalsove privlačne sile.

Odbojne sile med glinenimi zrnji se pojavljajo zaradi negativno nabitih površin, ki so najpogostejše posledica izomorfničnih zamenjav Si^{4+} in Al^{3+} v tetraedričnih in oktaedričnih plasteh s kationi z nižjim oksidacijskim številom. Manjkajoči naboji se kompenzirajo z izmenjalnimi kationi, ki so pri suhi glini tesno vezani na površine zrn, v prisotnosti vode pa se nekoliko oddaljijo od površine. Oddaljenost kationov je odvisna od elektrostatične privlačnosti površine zrn in koncentracije ionov v vodi. Negativna površina

POSAMEZNA GLINENA ZRNA



a) vzporedna razporeditev



b) pravokotna razporeditev



c) povezava rob-rob

SKUPKI GLINENIH ZRN



a) vzporedna razporeditev



b) pravokotna razporeditev



c) povezava rob-rob

Slika 1. Shematski prikaz osnovnih tipov razporeditve glinenih zrn.

Fig.1. Schematic representation of elementary clay particle arrangements.

glinenih delcev in pozitivna plast s povečano koncentracijo kationov (difuzna plast), ki se razširja v raztopino, tvorita električno dvojno plast. Debelina difuzne plasti je odvisna od električnega potenciala na površini glinenih zrn, vrste in koncentracije izmenjalnih kationov, kemične sestave, dielektrične konstante in pH raztopine ter temperature. Medtem ko se na zgornjih in spodnjih površinah ploščatih glinenih zrn pojavljajo negativne električne dvojne plasti, se lahko na robovih ustvarjajo električne dvojne plasti, ki so pozitivne v kislih raztopinah in negativne v bazičnih. pH vrednost raztopine v tem primeru določa način disociacije $\text{Al}(\text{OH})_3$ v oktaederskih plasteh in s tem naboj na robovih zrn.

Elektrostatične odbojne sile med glinenimi zrnji so posledica interakcije difuznih plasti z enakim nabojem. Njihova intenziteta narašča z debelino teh plasti, s tem pa tudi razdalja med zrnji. V primerih, ko se na robovih posameznih glinenih delcev pojavi pozitiven naboj, se lahko nasprotno naelektrene površine povežejo (rob-rob ali rob-površina), kar vodi v nastanek odprte teksture. Trdnost takih kontaktov je veliko večja kot tistih, ki so posledica van der Waalsovih privlačnih sil. Slednje delujejo med vsemi atomi enega zrna in vsemi atomi drugega zrna tako, da je privlačna sila v tem primeru vsota sil med vsemi atomskimi pari. Jakost van der Waalsovih sil je odvisna od dielektrične konstante porne raztopine in temperature. Strukturno iste gline je torej mogoče preoblikovati s spreminjanjem vrste in jakosti odbojnih in privlačnih sil, kar lahko dosežemo z dodatkom elektrolita v porno vodo.

Laboratorijske preiskave strižne trdnosti na nedreniranih vzorcih

Pri opazovanju vpliva različnih struktur na nedrenirano strižno trdnost gline je bilo potrebno pri preiskavah izločiti ali poeno-

titi vse vplivne dejavnike, ki izhajajo tako iz okolja kot sestave zemljin. Preiskave so zato potekale na umetno pripravljenih vzorcih iste kaolinitne gline, pri enaki temperaturi in z raztopinami z enako dielektrično konstanto. Edini spremenljivki sta bili koncentracija soli (NaCl) in pH vrednost uporabljene raztopine.

Povečanje koncentracije soli v porni vodi povzroči zmanjšanje elektrostatičnih odbojnih sil medtem, ko privlačne van der Waalsove sile ostanejo enake. Istočasno se z dodatkom elektrolita spremeni tudi pH porne vode, kar vpliva na elektrostatično privlačnost med pozitivno in negativno naelektrenimi deli glinenih zrn. Na tak način se torej spreminja razmerje med jakostjo odbojnih in privlačnih sil in posledično tekstura gline.

Pri opisanih preiskavah je bil uporabljen dobro kristaliziran kaolinit. Glina izhaja iz nahajališča v ZDA, njeno pridobivanje in pripravo pa vodi združenje Clay Mineral Society v okviru projekta Source Clays. Ker se sestava gline na različnih delih nahajališča nekoliko spreminja, so vzorci za raziskovalne namene pripravljeni tako, da se velike količine materiala predhodno homogenizira in shrani. Tak način omogoča dolgoletne različne raziskave popolnoma enakega materiala in s tem primerjanje in dopolnjevanje rezultatov predhodnih študij. Uporabljen vzorec ima tako že znano mineralno in kemično sestavo, strukturno formulo osnovne celice, specifično površino, velikost zrn in kationsko izmenjalno kapaciteto. Ti podatki so povzeti iz literature (Sutheimer et al., 1999; Van Olphen & Fripiat, 1979) in prikazani v preglednici 1.

Nedrenirana strižna trdnost vzorcev je bila preiskana z laboratorijsko krilno sondo (BS_1377, Part 7, 1990) v območju $s_u = 1.5$ kPa – 20.0 kPa. Pred preiskavo so bili popolnoma enaki uprašeni vzorci kaolinita zamešani z destilirano vodo in raztopinami 0.005 M NaCl , 0.010 M NaCl , 0.020 M NaCl , 0.050 M NaCl , 0.100 M NaCl in 0.175 M NaCl ($M =$

Preglednica 1. Mineraloške lastnosti uporabljenega kaolinita.

Table 1. Mineralogical properties of used kaolinite.

Strukturna formula	$(\text{Mg}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Na}_{0.1}\text{K}_{0.1})[\text{Al}_{3.86}\text{Fe(III)}_{0.2}\text{Mn}_{\text{sl}}\text{Ti}_{0.11}][\text{Si}_{3.83}\text{Al}_{0.17}\text{O}_{10}(\text{OH})_8]$
Specifična površina – A_s	12.50 m ² /g
Kationska izmenjalna kapaciteta	2.0 cmolc/kg
Premer zrn	109 – 3586 nm
Debelina zrn	11 – 143 nm

mol/l). pH vrednost je bila pri vseh vzorcih določena s pH metrom "Checker" pri enakem razmerju gline in vode 1:2, ker so merjene vrednosti odvisne tudi od koncentracije gline v raztopini. Za opazovanje mikro teksture vzorcev je bil uporabljen okoljski vrstični elektronski mikroskop QUANTA 200 3D, ki omogoča študij mokrih vzorcev. To je pomembno, ker se le tako ohrani struktura gline. Kljub temu, da so slike zaradi prisotnosti vode nejasne, se v vzorcih z različnimi koncentracijami soli kažejo vidne razlike pri razporeditvi zrn.

Rezultati in diskusija

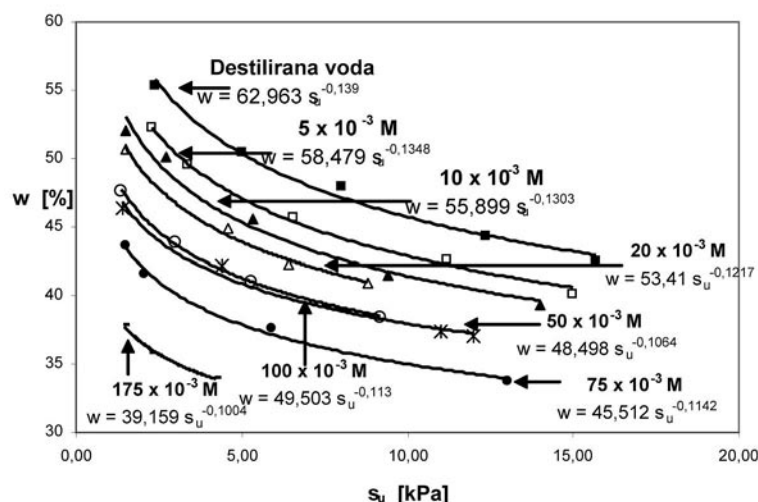
Merjene vrednosti nedrenirane strižne trdnosti s_u so v odvisnosti od pripadajočih vlažnosti w prikazane na sliki 2. Skladno s predhodnimi ugotovitvami (Koumoto & Houlsby, 2001), se lahko preiskane vrednosti, pri enaki koncentraciji elektrolita, aproksimira s potenčno funkcijo. Rezultati preiskav kažejo, da se že pri zelo majhnih spremembah količine soli v porni vodi, razmerje med vsebnostjo vode v vzorcih in nedrenirano strižno trdnostjo zelo spremeni.

Za bolj nadzorno predstavitev rezultatov preiskav je na sliki 3 prikazano (a) razmerje med molarostjo in količino raztopine pri enaki nedrenirani strižni trdnosti vzorcev (izbrana vrednost $s_u = 2.66$ kPa ustreza količini vode na meji židkosti v primeru določevanja meje židkosti s konusnim penetrometrom (BS 1377, Part 2, 1990)) in (b) razmerje med molarostjo raztopine in nedrenirano strižno trdnostjo pri enaki vlažnosti $w = 45\%$.

Iz podanih rezultatov je mogoče sklepati, da se pri različnih koncentracijah elektrolita pojavljajo različne vrste in jakosti medzrnskih sil in posledično različne razporeditve glinenih zrn. Na osnovi predhodnih, predvsem teoretičnih dognanj drugih raziskovalcev in posnetkov vlažnih vzorcev z okoljskim vrstičnim elektronskim mikroskopom, je mogoče rezultate preiskav obrazložiti na sledeč način.

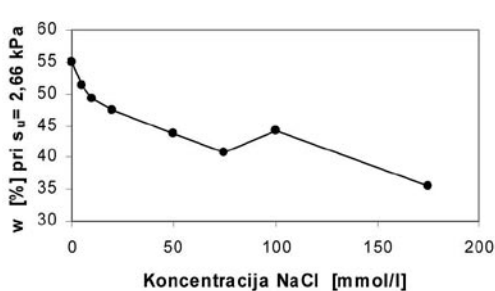
V destilirani vodi so na glinenih delcih dobro razvite dvojne električne plasti, kar preprečuje delovanje van der Waals-ovih privlačnih sil (van Olphen, 1977). Glede na pH vrednost zmesi preiskovanega kaolinita z vodo, ki je 4.1, je pričakovati pozitiven naboj na posameznih robovih zrn. Zaradi elektrostatične privlačnosti nasprotno naelektrenih površin, se glinena zrna v takih pogojih povežejo na robovi ali robovi in ploskvami, ter tako tvorijo odprto teksturo ali "hišo iz kart" (slika 4). Trdnost vezi med nasprotno naelektrenimi površinami je večja kot trdnost van der Waals-ovih vezi (Tchistiakov, 2000), s čimer je mogoče pojasniti visoke vrednosti nedrenirane strižne trdnosti preiskovanega vzorca (sliki 3 a,b).

V prisotnosti NaCl se efektivna debelina električnih dvojnih plasti na robovih in ploskvah zmanjša, s tem pa tudi privlačne sile med nasprotno naelektrenimi površinami. Istočasno se zaradi povečanja pH vrednosti porne vode zmanjša elektrostatičen potencial na površinah robov zrn. "Hiša iz kart" se prične v takšnih pogojih rušiti, s tem pa se, pri enaki količini vsebujoče vode, zmanjša tudi nedrenirana strižna trdnost gline. Ko postanejo privlačne sile med na-

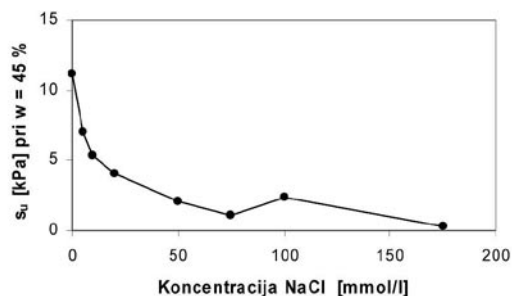


Slika 2. Razmerje med vsebnostjo vode w in nedrenirano strižno trdnostjo s_u pri različnih koncentracijah NaCl v porni vodi.

Fig. 2. Relationship between water content w and undrained shear strength s_u at different concentrations of NaCl in pore water.



3a



3b

Slika 3. Vpliv koncentracije elektrolita na (a) količino vode pri nedrenirani strižni trdnosti $s_u = 2.66$ kPa in na (b) nedrenirano strižno trdnosti pri vlažnosti $w = 45$ %.

Fig. 3. The impact of the electrolyte concentration on (a) moisture at undrained shear strength $s_u = 2.66$ kPa and (b) undrained shear strength at water content $w = 45$ %.

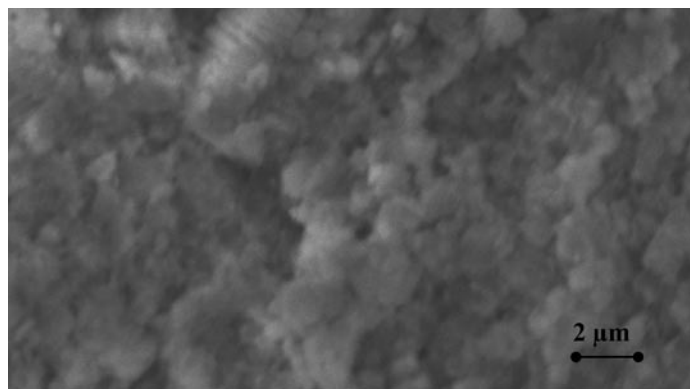


Slika 4. Mikro-tekstura kaolinita v destilirani vodi z vidnimi kontakti med robovi in robovi in ploskvami posameznih zrn in agregatov.

Fig. 4. Micro-fabric of kaolinite in distilled water showing edge-to-face and edge-to-edge arrangement of individual clay particles and particle groups.

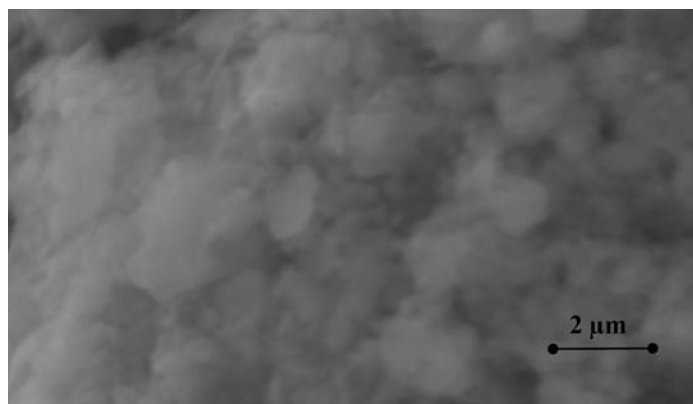
sprotno naelektrenimi površinami manjše od odbojnih, se struktura povsem preoblikuje. V takšnih pogojih se glinena zrna in agregati razporedijo bodisi paralelno (Van Olphen, 1977), ali pa se povežejo z robovi (Rand & Melton, 1977), v obeh primerih z van der Waals-ovo vezjo. Pri preiskovanem kaolinitu se je struktura povsem preobliko-

vala pri koncentraciji elektrolita 75 mmol/l (pH zmesi 7.7), kar nazorno kaže slika 5. Zelo nizke vrednosti nedrenirane strižne trdnosti (slika 3b) je mogoče obrazložiti s pojavom van der Waalsovih vezi, za katere velja, da potrebujejo za zlom precej manjšo energijo kot vezi, nastale zaradi elektrostatične privlačnosti.



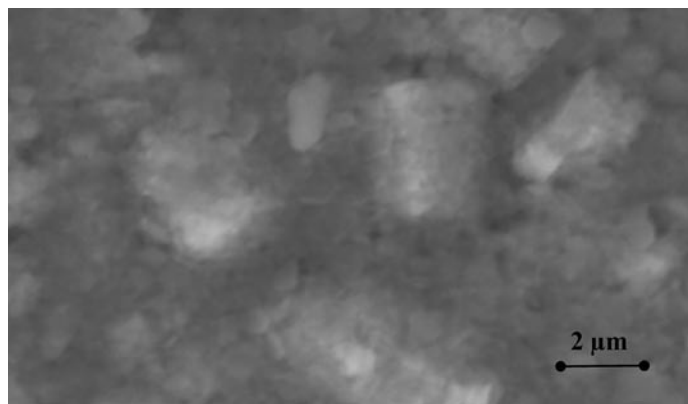
Slika 5. Mikro-tekstura kaolinita v 0.075 M raztopini NaCl kaže pretežno paralelno lego glinenih zrn in pojav agregatov.

Fig. 5. Micro-fabric of kaolinite in 0.075M solution of NaCl showing mostly parallel arrangement of clay particles and separate face-to-face aggregates.



Slika 6. Mikro-tekstura kaolinita v 0.100 M raztopini NaCl.

Fig. 6. Micro-fabric of kaolinite in 0.100 M NaCl.



Slika 7. Mikro-tekstura kaolinita v 0.175 M raztopini NaCl kaže številne agregate paralelno razporejenih zrn.

Fig. 7. Micro-fabric of kaolinite in 0.175 M NaCl showing numerous face-to-face aggregates.

Pri večji količini soli (0.100 M NaCl) se trdnost preiskovanega vzorca pri enaki vsebnosti vode ponovno poveča, kar je lahko posledica spremenjenega razmerja med privlačnimi in odbojnimi silami. Medtem ko ostanejo pri dodatku soli privlačne sile enake, se odbojne sile, zaradi zmanjšanih efektivnih debelin električnih dvojnih plasti, zmanjšajo. Pri teh pogojih lahko van der Waals-ove sile povežejo robove zrn (Rand & Melton, 1977). Takšna razporeditev zrn, ki je za preiskovan kaolinit prikazana na sliki 6, omogoča, pri enaki nedrenirani strižni trdnosti gline, večjo vsebnost vode (slika 3a).

Iz slike 3b je razvidno, da se pri še večji koncentraciji elektrolita (0.175 M NaCl), nedrenirana strižna trdnost preiskovanega vzorca ponovno zniža. Ta pojav je mogoče obrazložiti z dejstvom, da se zrna strnejo v majhne agregate (slika 7). Število vezi med agregati je sedaj manjše kot število vezi med posameznimi zrni, zato je tudi trdnost takšne gline manjša (van Olphen, 1977).

Zaključek

Namen prikazane raziskave je bil ugotoviti, kako različne strukture preiskovane kaolinitne gline vplivajo na njeno nedrenirano strižno trdnost pri enaki količini vsebujoče vode.

Struktura glin opredeljuje način povezave in razporeditve posameznih zrn v odvisnosti od vrste in jakosti medzrnskih sil. Pri preiskovanem, umetno pripravljenem vzorcu kaolinita smo strukturo spreminjali z uporabo raztopin, ki so vsebovale različne količine NaCl. Dodatek soli vpliva na razmerje med privlačnimi in odbojnimi silami, s tem pa tudi na razporeditev glinenih zrn. Medtem ko smo lahko razporeditev glinenih zrn opazovali z elektronskim mikroskopom, smo o delovanjih posameznih elektrostatičnih in elektromagnetnih sil sklepali le na osnovi predhodnih dognanj drugih raziskovalcev.

Rezultati preiskav so pokazali zelo velik vpliv strukture na nedrenirano strižno trd-

nost preiskovane gline kar pomeni, da se lahko ta vpliv odraža tudi na ostalih mehanskih lastnostih. Ker smo elektrolit dodajali v količinah, ki se pojavlja v naravnih okoljih, smo s tem nazorno pokazali, kako se lahko pri enaki glini in enaki količini vsebujoče vode, obravnavana mehanska lastnost spreminja tudi v odvisnosti od strukture.

Literatura

- British Standards Institution 1990: Methods of test for soils for civil engineering purposes.- BS 1377, Part 2, London.
- British Standards Institution 1990: Methods of test for soils for civil engineering purposes.- BS 1377, Part 7, London.
- Dolinar, B. & Trauner, L. 2004: Liquid limit and specific surface of clay particles.- *Geotechnical testing journal*, 27, 6, 580-584, Reston.
- Dolinar, B. & Trauner, L. 2005: Relationship between the undrained shear strength, water content, and mineralogical properties of fine-grained soils. - *International journal of geomechanics*, 5, 4, 350-355, Reston, [http://10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2005\)5:4\(350\)](http://10.1061/(ASCE)1532-3641(2005)5:4(350)).
- Dolinar, B. 2006: The impact of mineral composition on the compressibility of saturated soils. - *Mechanics of Materials* 38, 599-607 <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2005.11.003>.
- Ferrell, R.E., 1992: Clay water interface and its rheological implications. - *The clay minerals society, CMC Workshop lectures* 4, Aurora.
- Koumoto, T., Houlsby, G.T. 2001: Theory and practice of the fall cone test.- *Geotechnique*, LI, 8, 701-712, London.
- Rand, B. & Melton, I.E. 1977: Particle interactions in aqueous kaolinite suspensions. - *Journal of Colloid Interface Science*, 60, 2, 308-320.
- Sutheimer, S. H., Maurice, P.A. & Zhou, Q. 1999: Dissolution of well and poorly crystalized kaolinites: Al speciation and effects of surface characteristics. - *American Mineralogist*, 84, 620-628.
- Tchistiakov, A. A., 2000: Physico - chemical aspects of clay migration and injectivity decreases of geothermal clastic reservoirs. - *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, May 28 - June 10, Kyushu-Tohoku, Japan.
- Van Olphen, H. & Fripiat, J.J. 1979: *Data handbook for clay minerals and other non-metallic materials*. - Pergamon press, 346 pp., New York.
- Van Olphen, H. 1977: *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*. - Wiley Interscience, 318 pp., New York.

