

氯化钠溶液对粘性土的强度影响

颜荣涛, 梁维云, 杨德欢, 张启航, 张煜东, 肖玉龙

(桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 试验证实水化学状态变化对于以蒙脱石为主要矿物成分的粘性土的力学特性存在明显影响, 但对于其他的普通粘性土却缺乏类似的研究。本文以普通粘性土(粘土矿物成分为高岭石、伊利石和蛭石)为研究对象, 利用直接剪切试验研究了不同浓度氯化钠溶液饱和粘性土的强度特性, 得出了以下结论: 孔隙水化学状态的改变对粘性土强度有明显影响, 在低竖向压力下, 土体强度随盐溶液浓度的增大而减小; 而在相对较高竖向压力下, 土体强度随盐溶液浓度变化不大; 对于该类粘性土, 盐溶液浓度的提高会降低粘聚力, 但对内摩擦角影响不大。该试验结果说明盐溶液产生的孔隙水化学作用除了减小双电层厚度还会改变粘性土的孔隙状态和结构, 从而改变剪切过程中的变形破坏形式及强度特性。也就是说, 普通粘性土对水化学状态改变展现出的强度变化规律也可以采用吸附电子双层理论来进行解释, 但是必须考虑其对土体组构的影响。

关键词: 饱和粘性土; NaCl 盐溶液; 强度

中图分类号: TU411

文献标志码: A

0 引言

在一些与环境相关的岩土工程问题中, 土体孔隙水溶液成分和浓度会因气候环境变化而发生改变, 这种水化学状态变化会对土体的强度特征产生重要影响^[1-4]。例如, 在钻探过程中, 护壁泥浆会改变原有孔隙水的组分以及浓度, 导致井壁土体的强度特性发生改变, 井壁失稳坍塌; 强降雨下, 雨水入渗会降低孔隙水原有的离子浓度, 改变土体强度, 诱发边坡失稳。因此, 探究水化学状态变化对土体强度的影响规律具有重要意义。

目前, 学者关于水化学状态变化对土体力学特性的影响展开了一些研究, 主要集中于液塑限、压缩性等力学指标, 针对土体强度的研究并不多见。Warkentin 等^[4]利用直剪试验研究了不同浓度钠离子、钙离子溶液对膨润土、高岭土强度的影响规律, 认为随着盐溶液浓度增加, 饱和膨润土的强

度会降低, 而饱和高岭土的强度会提高, 并试图利用静电斥力-引力相互作用的理论揭示其影响机理, 但并没有取得令人满意的结果; Di Maio 等^[5]通过反复直剪强度试验探究了剪切过程中盐分向土体扩散对膨润土和高岭土残余强度特性的影响, 发现膨润土的残余强度明显变大, 而高岭土基本不受影响; Calvello 等^[6]研究了膨润土的残余强度与孔隙溶液介电常数之间的关系, 试图利用介电常数来描述孔隙盐溶液对残余强度的影响, 并且取得了一定进展; Spagnoli 等^[7]测试了不同浓度氯化钠溶液饱和情况下混合土(膨润土和砂土)的不排水抗剪强度, 并结合液塑限试验结果进行综合分析, 对理解盐溶液对土体力学强度的影响机制提供一些基础; 陈炜韬等^[8]通过室内试验, 分析不同含盐量和含水量条件下氯盐盐渍土抗剪强度的变化规律, 阐述了含盐量及含水量对抗剪强度的作用机理; 郭菊彬等^[9]研究了盐渍土抗剪力学术性质的变化, 认

收稿日期: 2015-09-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51309055); 广西自然科学基金项目(2011GXNSFE018004); 广西研究生教育创新计划项目(YCSZ2015159); 大学生创新创业计划项目(201410596037)

作者简介: 颜荣涛(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 化学-力学耦合的岩土工程问题, yrt301@163.com。

引文格式: 颜荣涛, 梁维云, 杨德欢, 等. 氯化钠溶液对粘性土的强度影响[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(1): 88-93.

为土体的粘聚力和内摩擦角均与含盐量同含水量的比值存在良好的线性关系;徐海林等^[10]对人工制备的不同盐浓度盐渍土的抗剪强度指标进行研究,试验表明随着土样中可溶性盐浓度的增加,粘聚力呈线性下降的趋势,内摩擦角近似呈线性上升趋势。此外,很多学者也对不同水化学状态下的土体强度作了类似的试验研究^[11-16]。

综上所述,目前开展的关于盐溶液对饱和粘性土强度特性影响的试验研究主要是针对蒙脱土和高岭土两种情况进行了分析讨论:对以蒙脱石为主要矿物成分的膨润土,孔隙盐溶液浓度增加可以提升土体强度,其主要机制是减小了吸附电

子双层的厚度,提高了摩擦强度;而对于一般的粘性土,目前还缺少类似的研究。为此,本文以普通粘性土为研究对象,利用不同浓度的氯化钠溶液饱和后进行直接剪切试验,旨在探究水化学状态变化对一般粘性土强度的影响规律,并且试图揭示其影响机理。

1 试验部分

1.1 试验方案

采用不同浓度 NaCl 溶液饱和的普通粘性土试样进行固结慢速直接剪切试验。其试样干密度为 1.6 g/cm³, 竖向压力和溶液浓度配置如表 1 所示。

表 1 不同浓度 NaCl 溶液、不同竖向压力组合下的直剪试验编号
Table 1 Direct shearing tests number under different concentrations and different normal stresses

浓度/ (mol · L ⁻¹)	竖向压力/kPa							
	50	100	150	200	250	300	350	400
0	S0-050	S0-100	S0-150	S0-200	S0-250	S0-300	S0-350	S0-400
0.01	S1-050	S1-100	S1-150	S1-200	S1-250	S1-300	S1-350	S1-400
0.02	S2-050	S2-100	S2-150	S2-200	S2-250	S2-300	S2-350	S2-400
0.05	S5-050	S5-100	S5-150	S5-200	S5-250	S5-300	S5-350	S5-400
0.10	-	-	-	-	-	-	S10-350	S10-400

1.2 试样基本物性

土样取自桂林尧山脚下,为石灰岩残坡积粘性土,具体物性指标如下:比重为 $G_s = 2.67$ 、液限为 $\omega_L = 43.7\%$ 、塑限为 $\omega_p = 20.1\%$;颗粒分析曲线如图 1 所示。其中,试验土样粘粒部分(小于 0.005 mm)的矿物成分组成及含量如表 2 所示。

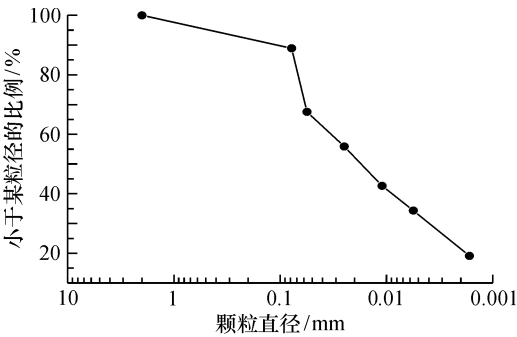


图 1 试验粘土的颗粒分布曲线

Fig. 1 Distribution curve of particle of testing clay

表 2 土样粘性颗粒矿物组成及含量

Table 2 Mineral components and percentage composition for clay minerals of soil sample

矿物成分	伊利石	高岭石	蛭石	伊利石蛭石混层
相对含量/%	27	45	9	19

可知,试验土样粘性矿物由高岭石、伊利石、蛭石以及伊利石蛭石混层组成,主要成分为高岭石,占 45%。孔隙盐溶液采用分析纯级的氯化钠白色晶性粉末与实验室自制蒸馏水(电导率 < 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$)配制而成。氯化钠由广东汕头市西陇化工股份有限公司生产。

1.3 试样制备

为了避免土体中原有易溶盐的影响,试验前需先对土体进行洗盐处理。具体操作过程:将碾散的风干土样过 2 mm 筛,取筛下土与蒸馏水混合、搅拌均匀,待上层清液澄清后,测其电导率,然后将上层清液倒出,并重新注入蒸馏水与土样混合,重复上述步骤直至导电率稳定。对洗盐后的土样进行低温烘干(温度为 80 $^{\circ}\text{C}$,约烘 72 h),然后用碾钵碾碎过 2 mm 筛;将筛下土再次在 80 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温下烘至恒重后,装入保鲜袋并放在干燥器中冷却至室温。之后,向上述土样喷洒预先配置的 NaCl 溶液,调制均匀,装入保鲜袋中密封保存 7 d。而后,取出复测湿土样含水率,其值控制在 $(20 \pm 0.3)\%$ 以内,利用千斤顶压制环刀试样,试样干密度控制在 $(1.6 \pm 0.01) \text{ g}/\text{cm}^3$,试样尺寸

为直径 61.8 mm、高 20 mm。最后,采用真空泵抽真空后(抽真空约 8 h)灌入预设浓度的溶液进行饱和,浸泡 7 d 后进行剪切试验。

1.4 剪切试验

采用固结排水剪切模式,常规直剪仪进行剪切试验。固结时间约 12 h,通过安装的百分表监测变形情况,当变形量不超过 0.005 mm/h,则认为固结完成。之后,采用 0.01 mm/min 的剪切速率进行剪切,剪切过程中剪切应力-剪切位移曲线出现峰值,则取峰值作为土体强度;否则,取剪切位移为 4 mm 对应的应力值作为土体的强度。

2 试验结果

2.1 剪切应力-剪切位移曲线

图 2 给出了 50、150、350 和 400 kPa 竖向压力下不同浓度(0、0.01、0.02、0.05、0.10 mol/L) NaCl 溶液饱和粘土的剪切应力-位移曲线。

在图 2a 中,试样 S0-50 在竖向压力为 50 kPa 下的剪切过程中展现出很明显的应变软化现象,这种软化现象是由于 1.6 g/cm³ 的干密度相对于 50 kPa 的竖向压力是较为密实的,土体在剪切过程中发生了体积膨胀和软化效应。然而,随着孔隙溶

液浓度的增加,这种效应逐渐减弱,说明水化学作用使土体变得相对疏松。而图 2b 中, S0-150 试样在 150 kPa 的竖向压力下展现出应变硬化特性。

在 50 和 150 kPa 的竖向压力下,随孔隙溶液浓度的增大(0~0.05 mol/L),强度显现出很明显的下降,并且变化趋势具有较好的一致性。50 kPa 竖向压力下(图 2a),0.01、0.02、0.05 mol/L 盐溶液饱和粘土的强度下降幅度分别为 10.7%、14.9%、40.1%;150 kPa 竖向压力下(图 2b),0.01、0.02、0.05 mol/L 盐溶液饱和粘土的强度下降幅度分别为 2.75%、14.2%、24.5%。然而,在竖向压力为 350 和 400 kPa 的情况下(图 2c、d),试样的剪切曲线基本重合,很难区分盐溶液浓度对强度的影响,也没有很一致的下降或上升趋势。

图 2 较好地反映了不同竖向压力下不同浓度孔隙溶液对土体强度特性的影响。

2.2 强度特征

图 3 中给出了不同竖向压力下的抗剪强度随孔隙溶液浓度变化的演变规律。

很明显,在竖向压力为 50、100 和 150 kPa 的情况下,剪切强度随着孔隙水盐浓度的增大呈现出

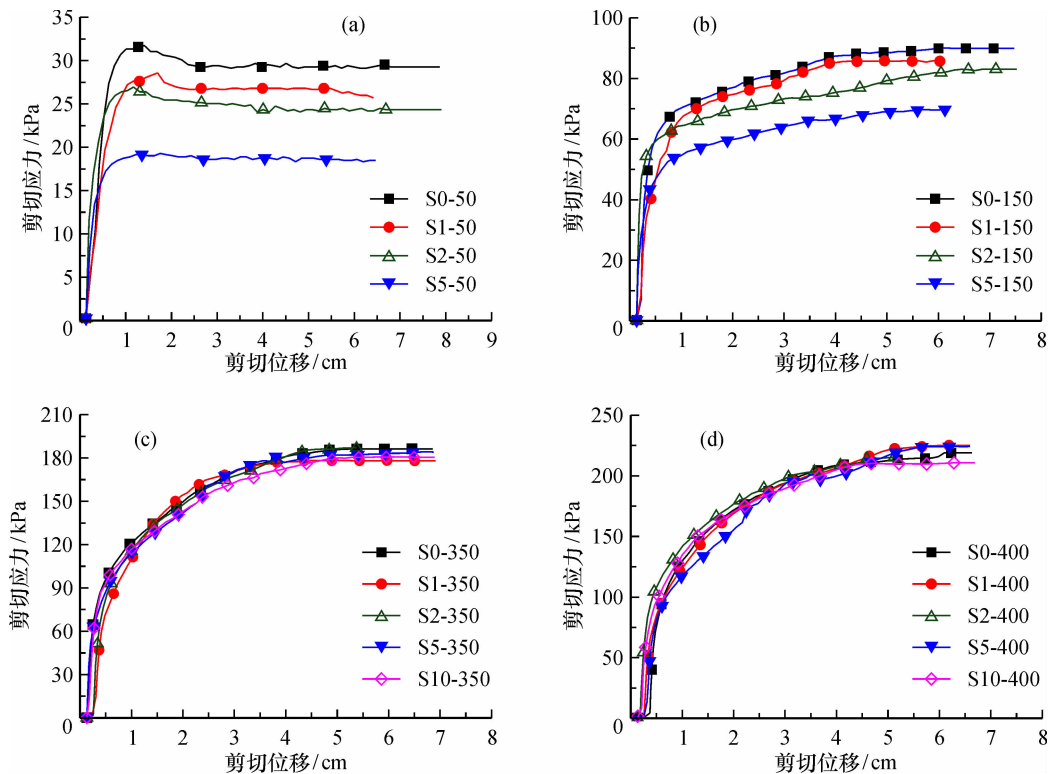


图 2 不同竖向压力、不同浓度盐溶液饱和粘土的剪切应力-位移曲线

Fig. 2 Shearing stress displacement of clay saturated by salt solution with different concentrations under different normal stresses

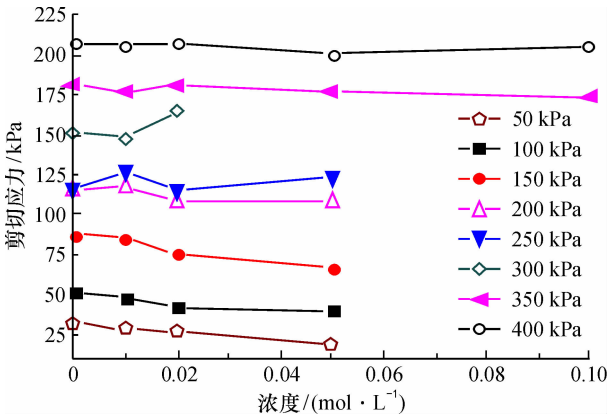


图 3 剪切强度随浓度的变化规律

明显的下降，然而在竖向压力为 200 ~ 400 kPa 的情况下，剪切强度基本上保持不变。这与 Warkentin 等^[4]对蒙脱土和高岭土进行直剪试验得到的结论是一致的，即随着盐溶液浓度的变大，剪切强度降低，但其并未讨论水化学作用下不同竖向压力对强度的影响。

强度指标分析是岩土力学强度分析中非常关键的一环。图 4 给出了粘聚力和内摩擦角随孔隙溶液浓度的变化情况。可见，随着孔隙溶液浓度增大，粘聚力逐渐降低，但降低梯度逐渐变小，最后可能趋于一致；而内摩擦角变化并不明显，在 27° 处上下波动。

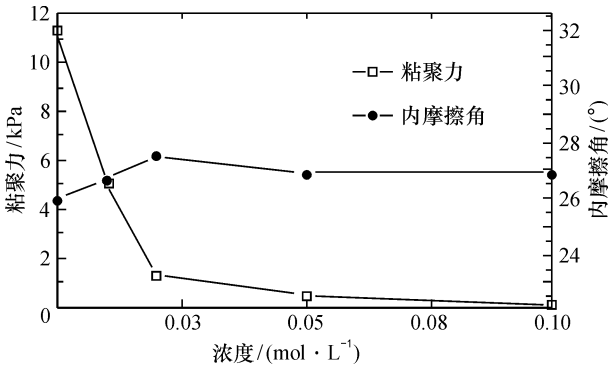


图 4 强度指标随浓度的变化规律

Fig. 4 Variation of shearing strength indexes with concentration

3 分析与讨论

在以前的相关研究中，主要是针对纯的蒙脱土或高岭土开展的试验研究，并对其影响机制进行了探讨^[17-20]。大多数学者从电子双层吸附理论出发，对这些试验现象取得了较好的定性解

释^[6,15,21-23]。根据电子双层吸附理论，随着盐溶液浓度的增大，吸附电子双层变薄，斥力减弱，主要体现为引力增强，同时摩擦角也有相应的增大，结果应该是使土体的强度有所增加；然而，本文试验结果却与之相悖。这是因为土体的强度除了与土颗粒的自身强度存在关系外，还与土体结构存在直接关系。

根据土壤矿物学，硅铝酸盐薄片组成土颗粒团，这些粒团构成了整个土体，而土体的抗剪强度则大部分是由粒团的结构排布和强度控制(图 5)。当孔隙溶液由纯水变为盐溶液时，离子会通过吸附、替换等一系列的水化学作用使吸附电子双层变薄，薄片之间的斥力变小，引力占主导，粒团将展现出收缩的状态，导致粒团颗粒间孔隙增大。上述分析经电镜扫描微观结构得到了证实，如图 6 所示，0.10 mol/L 氯化钠溶液作用后的土体具有更大的孔隙结构。在较小的竖向压力情况下，孔隙溶液为盐溶液的土体将拥有较纯水更大的孔隙、更为疏松，当然这种大孔隙的存在将降低土体的抗剪强度。然而，在较高的竖向压力下，虽然盐溶液使土体结构的孔隙变大，但在高压力的作用下会被压缩形成与原有状态类似的组构，所以强度所受影响不大。

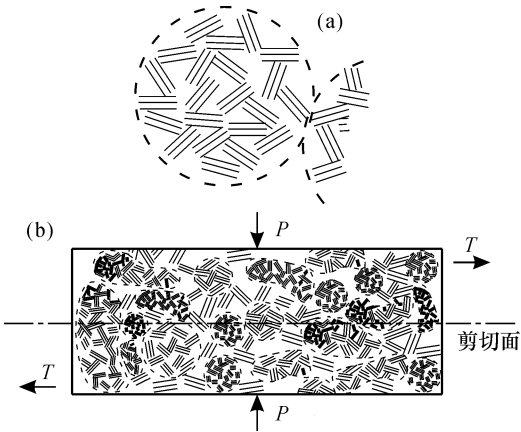


图 5 土体结构

Fig. 5 Sketch structure diagram of clays

莫尔-库仑准则是描述土体强度最基础、最经典的准则。它很清楚地说明了土的强度受粘聚力和内摩擦角两个因素的影响。其中，粘聚力是微观层面上范德华力、静电引力、静电斥力、非饱和土吸力、化学胶结力等众多力的宏观表现，与土体的矿物成分、结构、孔隙水组分等因素存

在紧密联系。内摩擦角体现了剪切面之间的光滑程度,剪切面越不光滑,内摩擦角越大,反之亦然。然而,这两者并不是完全孤立的。从以上讨论可知,盐溶液的水化学作用会使土体孔隙增大,导致各粒团之间距离增大,减弱了团粒之间的各种胶结力,从而降低土体的粘聚力。土颗粒之间的内摩擦角一般与吸附水厚度存在较大关系,对于以蒙脱石为主要矿物成分的膨润土而言,具有较厚的吸附电子双层,因此剪切接触面较为光滑,内摩擦角一般较小。故微小的水化学状态变化都会引起较大的内摩擦角改变,从而改变摩擦强度,提高土体抗剪强度。而本文的试验土体主要以高岭石、伊利石类矿物为主,吸附电子双层一般较薄,水化学的作用虽能引起土体结构的改变,但是对于土体颗粒间摩擦强度影响较小,因而内摩擦角变化很小。

4 结 论

本文采用 NaCl 溶液饱和粘性土,研究了不同浓度盐溶液对以高岭石、伊利石和蛭石为主要矿物的普通粘性土的强度影响规律,并且探讨了盐溶液对粘性土强度的影响机理。经过研究分析,得出了以下结论:

(1) 孔隙水化学状态的改变对粘性土强度有明显影响。在低竖向压力下,土体强度随盐溶液浓度增大而减小;而在相对较高竖向压力下,土体强度随盐溶液浓度变化不大。

(2) 随着盐溶液浓度的提高,试验土体的粘聚力呈现减小趋势,而内摩擦角变化不大。

(3) 水土化学作用可以改变粘性土的孔隙状态和结构,从而改变剪切过程中变形破坏形式及强度特性。

(4) 普通粘性土对水化学状态改变展现出的强度变化规律也可以很好地采用吸附电子双层理论来进行解释,但是必须考虑土体组构的影响。

参考文献:

- [1] 汪民. 饱水粘性土中粘粒与水相互作用的初步探讨 [J]. 水文地质工程地质, 1987, 13 (3): 1-5, 12.
- [2] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (7): 1146-1152.
- [3] Nguyen X P, Cui Y J, Tang A M, et al. Effects of pore water chemical composition on the hydro-mechanical behavior of natural stiff clays [J]. Engineering Geology, 2013, 166: 52-64.
- [4] Warkentin B P, Yong R N. Shear strength of montmorillonite and kaolinite related to interparticle forces [J]. Clays and Clay Minerals, 1962, 9 (1): 210-218.
- [5] Di Maio C, Fenelli G B. Residual strength of kaolin and bentonite: the influence of their constituent pore fluid [J]. Geotechnique, 1994, 44 (4): 217-226.
- [6] Calvello M, Lasco M, Vassallo R, et al. Compressibility and residual shear strength of smectitic clays: influence of pore aqueous solutions and organic solvents [J]. Italian Geotechnical Journal, 2005, 1: 34-46.
- [7] Spagnoli G, Feinendegen M, Fernández-Steeger T. Influence of salt solutions on the undrained shear strength and the clogging of smectite-quartz mixtures [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2011, 17 (3): 293-305.
- [8] 陈炜韬, 王明年, 王鹰, 等. 含盐量及含水量对氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27 (4): 1-5.
- [9] 郭菊彬, 宋吉荣, 张昆. 盐渍土强度参数与含盐量、含水量关系初探 [J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33 (5): 98

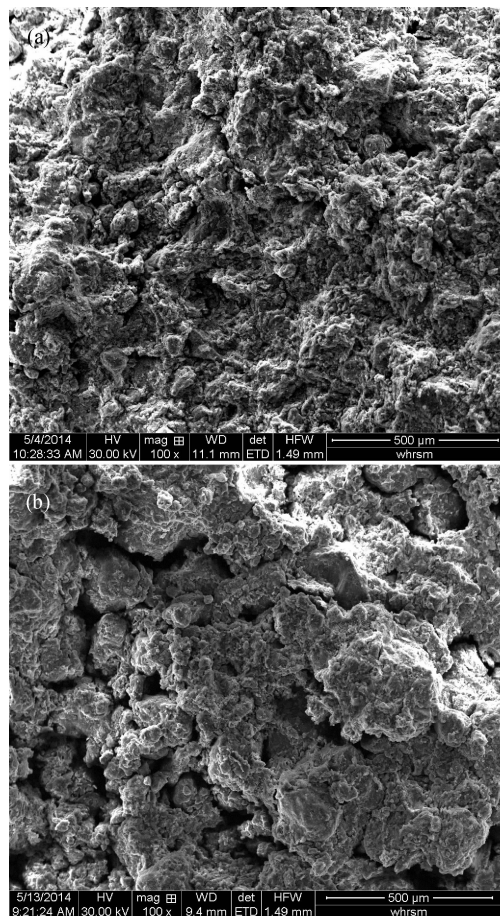


图6 去离子水 (a)、0.10 mol/L 氯化钠溶液 (b) 饱和试验土体电镜扫描结构图

Fig. 6 Micro-structures photos of testing clay saturated by distilled water(a) and NaCl solution of 0.1 mol/L(b)

- 99, 109.
- [10] 徐海林, 高明星, 李小丰, 等. 可溶性盐浓度对土的抗剪强度指标影响的研究 [J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2012, 33 (2): 159 - 161.
- [11] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染软黏土变形性质的三轴试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31 (10): 1559 - 1563.
- [12] Spagnoli G, Rubinos D, Stanjek H, et al. Undrained shear strength of clays as modified by pH variations [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71 (1): 135 - 148.
- [13] Anson R W W, Hawkins A B. The effect of calcium ions in pore water on the residual shear strength of kaolinite and sodium montmorillonite [J]. Géotechnique, 1998, 48 (6): 787 - 800.
- [14] Anandarajah A, Zhao D. Triaxial behavior of kaolinite in different pore fluids [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126 (2): 148 - 156.
- [15] Di Maio C, Santoli L, Schiavone P. Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state [J]. Mechanics of Materials, 2004, 36 (5): 435 - 451.
- [16] Di Maio C. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects [J]. Géotechnique, 1996, 46 (4): 695 - 707.
- [17] Loret B, Hueckel T, Gajo A. Chemo-mechanical coupling in saturated porous media: elastic - plastic behaviour of homoionic expansive clays [J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39 (10): 2773 - 2806.
- [18] Hueckel T, Hu L B. Feedback mechanisms in chemo-mechanical multi-scale modeling of soil and sediment compaction [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36 (6): 934 - 943.
- [19] Deng Y F, Cui Y J, Tang A M, et al. Investigating the pore-water chemistry effects on the volume change behaviour of Boom clay [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2011, 36 (17): 1905 - 1912.
- [20] Wahid A S, Gajo A, Di Maggio R. Chemo-mechanical effects in kaolinite. Part 2: exposed samples and chemical and phase analyses [J]. Géotechnique, 2010, 61 (6): 449 - 457.
- [21] Gajo A, Loret B, Hueckel T. Electro-chemo-mechanical couplings in saturated porous media: elastic - plastic behaviour of heteroionic expansive clays [J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39 (16): 4327 - 4362.
- [22] Gajo A, Loret B. The mechanics of active clays circulated by salts, acids and bases [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55 (8): 1762 - 1801.
- [23] Arasan S, Yetimoglu T. Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays [J]. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2008, 32 (2): 107 - 115.

Strength characteristics of clay saturated by pore sodium chloride solution with different chemical states

YAN Rong-tao, LIANG Wei-yun, YANG De-huan, ZHANG Qi-hang, ZHANG Yu-dong, XIAO Yu-long
(Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: It is demonstrated that the chemical state of pore solution affect the mechanical characteristics of clay, in which mineral is mainly smectite. However, few researches performed for general clay soil. In this paper, clay soil from Yaoshan of Guilin, in which mineral compositions are kaolinite, vermiculite and illite, was selected to study the effect of chemical state of pore solution on mechanical strength. The experimental result shows that chemical state of pore solution has significantly influence on strength for testing clay soil at relative low vertical stress, but negligible influence at relative high vertical stress. In addition, with the increasing of salt concentration, the cohesion decreases, while the friction angle almost keeps constant. It is the reason that exposing clay soil to salt solution could change the deformation and broken mode by increasing the pore void and changing the structure of pore. In other words, electronic double layer adsorption theory can be employed to explain well the changing rule of strength for testing clay soil, but the variation of fabric structure affected by chemical state of pore solution should be considered at the same time.

Key words: saturated clayed soils; salt solution; strength