

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S2.015

# 孔隙溶液对膨胀土力学性质影响

姚传芹<sup>1,2</sup>, 韦昌富<sup>1,2</sup>, 马田田<sup>1,2</sup>, 陈合龙<sup>1,2</sup>, 陈火东<sup>1</sup>

(1. 岩土力学与工程国家重点实验室 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**为研究孔隙溶液的浓度和组分对膨胀土力学性质的影响规律,对含不同浓度的 NaCl、CaCl<sub>2</sub> 溶液的膨胀土进行自由膨胀率试验和直剪试验。试验结果表明,随着溶液浓度的增大,自由膨胀率先快速降低,再平缓下降;浓度相同时含 NaCl 溶液的膨胀土其自由膨胀率比含 CaCl<sub>2</sub> 溶液的稍大,随着溶液浓度的增大,土样的剪切强度和黏聚力降低;溶液对内摩擦角的影响较小。分析试验结果认为,膨胀土表面具有固定的负电荷,颗粒表面会形成双电层;随着盐溶液浓度的增大,双电层厚度降低,颗粒间斥力减小,使得粒间应力增大,土颗粒沉降,降低了自由膨胀率;阳离子化学价越高,半径越大,对双电层的影响越显著,因此 CaCl<sub>2</sub> 溶液比 NaCl 溶液对自由膨胀率的影响更大。另一方面,盐溶液会改变膨胀土的结构,使其从集聚状变成絮凝状。盐溶液增大粒间应力,使膨胀土的强度增大,结构的改变会使强度降低,上述两种影响因素对强度呈相反的趋势,对该广西膨胀土,结构的作用超过了粒间应力的影响。

**关键词:**膨胀土;盐溶液;自由膨胀率;剪切强度;双电层;粒间应力

**中图分类号:** TU 463

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 增 2 - 0116 - 07

## Effects of pore solution on mechanical properties of expansive soil

YAO Chuan-qin<sup>1,2</sup>, WEI Chang-fu<sup>1,2</sup>, MA Tian-tian<sup>1,2</sup>, CHEN He-long<sup>1,2</sup>, CHEN Huo-dong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To investigate effects of the concentration and composition of the pore solution on the mechanical properties of the expansive soil, free swelling rate tests and direct shear tests are performed on Guangxi expansive soils containing different concentrations of NaCl and CaCl<sub>2</sub> solutions. The experimental results show that with the increase of solution concentration, the free swelling rate decreased rapidly and then decreased gradually. When the concentration is the same, the free swelling rate of expansive soil containing NaCl solution is slightly larger than that of CaCl<sub>2</sub> solution; the strength and the cohesive of soil decrease with the increase of concentration; however, the influence of solution concentration on the internal friction angle is smaller. Analysis of the test results shows that the expansive soil surface has a negative charge fixed, the particle surface will form electric double layer; as the concentration of salt solution increases, the thickness of the double layer decreases, the repulsion between particles decreases, the intergranular stress increased, soil particle sedimentation, reducing the free swelling rate; meanwhile, the higher cationic chemical price, the greater cationic radius, the more significant effects on the double layer; therefore CaCl<sub>2</sub> solution has a greater effects on the free swelling rate than NaCl solution. On the other hand, the salt solution can change the structure of expansive soil from agglomeration to flocculation. The salt solution will increase the intergranular stress, increasing the strength of the expansive soil; however, structural changes can reduce the strength. The above two influencing factors have the opposite trend to the strength, for Guangxi expansive soils, the effect of the structure larger than the effect of intergranular stress.

**Keywords:** expansive soil; salt solution; free swelling rate; shear strength; double electric layer; intergranular stress

## 1 引 言

膨胀土在我国分布范围很广,是对孔隙水环境极其敏感的特殊土。近年来环境污染问题日益严

收稿日期: 2002-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 11502276, No. 51239010, No. 11372078)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11502276, 51239010, 11372078).

第一作者简介: 姚传芹, 女, 1991 年生, 博士研究生, 主要从事膨胀土化学力学耦合方面的研究。E-mail: yaochuanqin@163.com

通讯作者: 韦昌富, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事多孔介质理论及其工程应用研究。E-mail: cfwei@whrsm.ac.cn

重,例如垃圾的随意填埋,长时间后会发生各种溶质的迁移,改变了周围土体孔隙溶液中的浓度与组分,使土体的结构、强度及变形特性等发生变化<sup>[1-2]</sup>,引发周围建筑物的沉降、坍塌等。水库的建立会影响周边岩土体介质内赋存的地下水的水化学状态,可能会引起库岸滑坡,造成巨大的损失。有关膨胀土工程灾害问题一直是国内外岩土工程问题中亟待解决的难题,研究孔隙溶液变化对膨胀土力学性质的影响极其重要。

1967年 Kenney<sup>[3]</sup>发现孔隙水中可溶盐的浓度增加,会使黏性土的残余内摩擦角显著提高,很多学者也通过实验证实了这种现象<sup>[4-7]</sup>。Moore<sup>[8]</sup>对蒙脱石和高岭石进行不同浓度下的剪切试验发现,随着孔隙水浓度的变化,两种矿物的残余强度均随之改变。随后 Wahid 等<sup>[9]</sup>却发现高岭石的残余强度对孔隙水浓度变化并不是特别敏感。陈昌炳等<sup>[10]</sup>、汪民<sup>[11]</sup>、唐晓武等<sup>[12]</sup>通过快速直剪试验,分析探讨了孔隙溶液浓度变化对土体剪切强度的影响。徐海林等<sup>[13]</sup>对不同浓度 NaCl 溶液土体进行三轴剪切试验,得到浓度与内摩擦角、黏聚力间的函数关系,发现随着土样中盐溶液浓度的增大,黏聚力呈线性下降的趋势,内摩擦角近似呈线性上升趋势。郭菊彬等<sup>[14]</sup>对格尔木盐渍土的研究也得到了相似的结论。土样中膨润土的含量不同会导致其对溶液浓度的敏感性不同,梁健伟等<sup>[15]</sup>对含盐量不同的人工土进行常规直剪试验和阳离子交换量试验等,得出孔隙溶液离子浓度和颗粒表面电位与土体抗剪强度指标之间的关系,发现溶液浓度大小对膨润土的强度参数影响比对其他土体影响大。Warkentin 等<sup>[16]</sup>利用直剪试验研究了含不同浓度的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  溶液对膨润土以及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。

对于产生这些现象的原因分析大多数理论认为,当孔隙溶液的物理化学环境(包括浓度、离子类型、pH 值等)发生改变时,由于颗粒和孔隙溶液之间的相互作用,土体的颗粒排布、结构特征以及孔隙水赋存状态会产生变化,从而改变宏观的物理力学特性<sup>[17-18]</sup>。对于伊利石和高岭土来说,通常是采用絮凝机制解释的<sup>[19]</sup>。对于膨胀土,目前主要是采用双电层理论来解释,即随着浓度的增大,双电层厚度降低,但陈永贵等<sup>[2]</sup>综述了核废料处置库中化学场对膨润土的物理力学特性影响的研究进展,指出当黏土密实度较大时双电层理论的应用具有局限性。

相较于孔隙溶液浓度、组分对岩土体强度影响的研究,其对土体膨胀变形影响的研究并不是特别多。本文研究孔隙溶液分别为不同浓度 NaCl 和  $\text{CaCl}_2$  时膨胀土的膨胀变形与剪切强度的变化,并分析其机理。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

本次试验材料取自广西宁明,为强膨胀土,物理性质见表 1,主要矿物成分见表 2。试验所用溶液为浓度 0、0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0 mol/L 的 NaCl 与  $\text{CaCl}_2$  溶液,其中阳离子交换量是采用氯化钡缓冲溶液测量土中阳离子交换总量(见土工试验规程<sup>[20]</sup>),比表面积是采用乙二醇乙醚法测量的总比表面积。

表 1 土样的物理性质指标

| 土粒相对密度 | 液限 / % | 塑限 / % | 阳离子交换量 / (mol/kg) | 比表面积 / (m <sup>2</sup> /g) | 粒径 < 0.075 含量 / % | 自由膨胀率 / % |
|--------|--------|--------|-------------------|----------------------------|-------------------|-----------|
| 2.85   | 218    | 58     | 0.260 6           | 463.5                      | 92                | 370       |

表 2 土样的主要矿物成分

| 主要矿物   | 钠长石   | 石英    | 伊利石   | 蒙脱石   |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 含量 / % | 39.21 | 27.92 | 21.57 | 11.31 |

### 2.2 自由膨胀率试验方法

根据土工试验规程进行试验,将试验过程中纯水替换为相应浓度的 NaCl 与  $\text{CaCl}_2$  溶液,试验结果如图 1 所示。

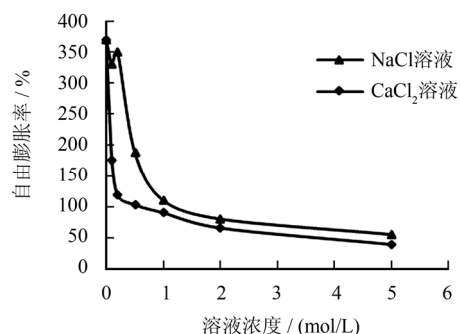


图 1 自由膨胀率与溶液浓度间关系

Fig.1 Relationships between free swelling rate and solution concentration

### 2.3 直剪试验方法

直剪试验中土样均为重塑土样,干密度为  $1.48 \text{ g/cm}^3$ 。将风干碾碎土样放在保湿缸中静置 48 h,使

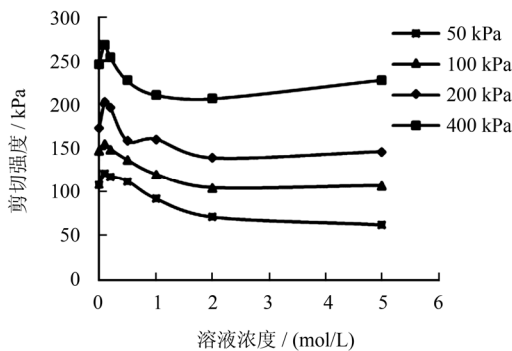
水分均匀分布,测其含水率,根据干密度,称取土体质量,用静压法制样。制好的土样采用抽真空方法饱和,饱和溶液为相应浓度的NaCl与CaCl<sub>2</sub>溶液。

根据土工试验规程,采用固结慢剪。将饱和后的土样放在直剪仪上固结24h后进行剪切,剪切速率为0.02 mm/s,施加的竖向垂直压力分别为50、100、200、400 kPa。

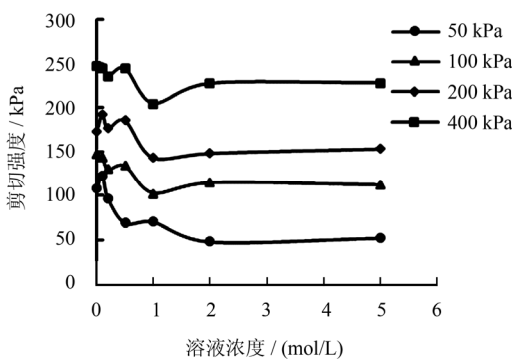
### 3 试验结果与分析

#### 3.1 试验结果

从图1中土体自由膨胀率随溶液组分和浓度的变化可知,随着孔隙溶液浓度增大,自由膨胀率快速降低,当溶液浓度达到1 mol/L时,降低的速度减慢,且在浓度相同时孔隙溶液为NaCl的土样膨胀率比孔隙溶液为CaCl<sub>2</sub>时土样的膨胀率大。图2为含NaCl和含CaCl<sub>2</sub>溶液土样在不同正应力下剪切强度随溶液浓度的变化。从图中可以看出,土样的剪切强度随着孔隙溶液浓度增大,表现出先增大再减小的趋势。



(a) 剪切强度与NaCl溶液浓度关系



(b) 剪切强度与CaCl<sub>2</sub>溶液浓度关系

图2 剪切强度与NaCl、CaCl<sub>2</sub>溶液浓度的关系  
Fig.2 Relationships between shear strength and concentration of NaCl and CaCl<sub>2</sub> solutions

图3为含NaCl和含CaCl<sub>2</sub>溶液土样的黏聚力随孔隙溶液浓度的变化情况。从图中可以看出,随着溶液浓度增大,两种孔隙溶液的土样黏聚力都是先增大,与于海浩<sup>[21]</sup>试验结果相同,且在溶液浓度为

0.1 mol/L时达到最大,然后再减小,最后趋于稳定。相同浓度下孔隙溶液为NaCl溶液的土样黏聚力高于孔隙溶液为CaCl<sub>2</sub>溶液土样的黏聚力。

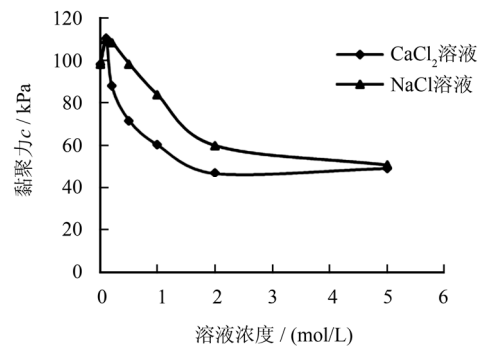


图3 黏聚力与溶液浓度的关系  
Fig.3 Relationships between cohesion and solution concentration

图4为土样的内摩擦角随孔隙溶液的组分、浓度变化的情况。从图中可以看出,两种溶液下内摩擦角先减小,再缓慢增大,最后趋于稳定。孔隙溶液为CaCl<sub>2</sub>时土样的内摩擦角要稍大于孔隙溶液为NaCl时土样的内摩擦角,不过整体上溶液浓度变化对内摩擦角影响较小。

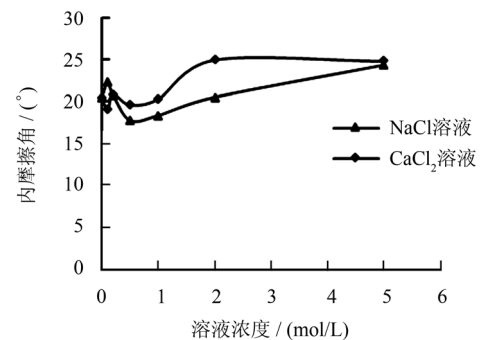


图4 内摩擦角与溶液浓度间关系  
Fig.4 Relationships between internal friction angle and solution concentration

#### 3.2 试验结果分析

从表1可见,土样的阳离子交换能力(CEC)很大,土样颗粒表面带电现象非常明显,孔隙中的Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等离子会与土颗粒发生水化反应,改变了土颗粒表面带电场,从而改变颗粒间结合水膜的厚度与颗粒间斥力。根据平板扩散双电层理论,颗粒双电层厚度的计算公式<sup>[22]</sup>为

$$\frac{1}{K} = \left( \frac{\epsilon^0 D k T}{2 n^0 e^2 v^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中:1/K为双电层厚度;ε<sup>0</sup>为真空系数;D为介电常数;k为波尔兹曼常数;T为温度;n<sup>0</sup>为孔隙溶液浓度;e为单元电荷;v为离子电价。

由式(1)可见,颗粒间双电层厚度与孔隙溶液浓度成反比,即溶液浓度增大,双电层厚度会随之减小,如图5所示。浓度增大,颗粒间的引力增大,斥力降低,使得粒间应力增大。

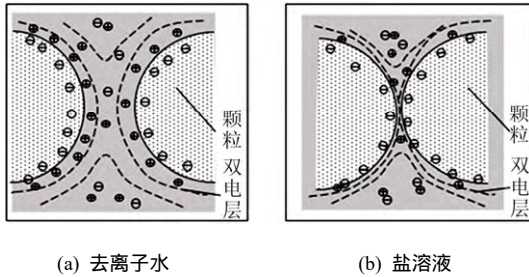


图5 双电层厚度变化示意图  
Fig.5 Sketches of double layer thickness variation

式(1)是从微观机理方面进行的定性分析,Wei<sup>[23]</sup>从宏观上推导出了一个粒间应力表达式,将微观的物理化学相互作用力纳入到一个宏观变量中,应用于饱和土中,公式为

$$\sigma'_i = \sigma - (p^w + \Pi) \mathbf{1} = \sigma' - \Pi \mathbf{1} \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为总应力张量;  $p^w$  为测量孔压;  $\sigma'$  为太沙基有效应力;  $\Pi$  为广义渗透压,表征土-水之间的相互作用,包括毛细、吸附和渗透,分为两部分:

$$\Pi = \Pi_D - \rho^{h_{20}} \Omega^l \quad (3)$$

式中:  $\Pi_D$  为 Donnan 渗透压;  $\rho^{h_{20}}$  纯水的质量密度,假设为常数;  $\Omega^l$  为微观表面力引起的表面势能,包括范德华力、静电力等。

Donnan 效应指的是土体颗粒带有一定的固定负电荷,土壤类似于一个半透膜,盐溶液可以自由通过,固定负电荷则不能自由移动,当达到平衡时土壤内外的盐溶液浓度分布不均等。Donnan 渗透压则是由于内外浓度差引起的压力:

$$\Pi_D = \frac{RT \rho^{h_{20}}}{M_{H_2O}} \ln \left( \frac{a_R^{h_{20}}}{a^{h_{20}}} \right) \quad (4)$$

式中:  $R$  为气体常数( $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T$  为 Kelvin 温度;  $M_{H_2O}$  为水的摩尔质量;  $a_R^{h_{20}}$  为平衡溶液中水的活性;  $a^{h_{20}}$  为土体孔隙溶液中水的活性,这里平衡溶液指的是与孔隙溶液达到热力学平衡的容器中的溶液。Donnan 渗透压  $\Pi_D$  与土体中的孔隙率和溶液浓度有关,其与溶液浓度关系如图6所示。

由式(2)可知,与传统的太沙基有效应力相比,粒间应力考虑了微观的物理化学作用力,该粒间应力可以较好地描述上述的试验结果。在相同干密度状态下,假设表面力引起的表面势能  $\Omega^l$  与浓度无

关,不同浓度作用下的盐溶液只对 Donnan 渗透压  $\Pi_D$  产生影响<sup>[23-24]</sup>。

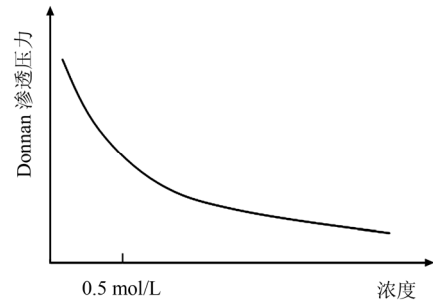


图6 Donnan 渗透压  $\Pi_D$  与溶液浓度关系曲线  
Fig.6 Relation curve between osmotic pressure and solution concentration

### 3.2.1 孔隙溶液浓度对自由膨胀率的影响

从图6可以看出,盐溶液浓度增大时  $\Pi_D$  降低,粒间应力增大,最终使得土体发生沉降,抑制了土体的膨胀,自由膨胀率降低。由图1可见,当浓度低于  $1 \text{ mol/L}$  时,自由膨胀率迅速降低;随着溶液浓度的持续增大,自由膨胀率缓慢变化。上述变化趋势与 Donnan 渗透压  $\Pi_D$  随浓度的变化趋势一致。

但是,当浓度较低时,自由膨胀率随着浓度有一小段先增大的趋势,然后迅速降低,是因为在胶体化学中 DLVO 理论认为在溶胶中加入少量电解质,可以使胶粒吸附的离子增加,Zeta 电势提高。即在少量电解溶液作用下土颗粒表面吸附的离子增加,使得固体表面电荷增大,Donnan 渗透压  $\Pi_D$  略微增大,使得土体的膨胀性增强,自由膨胀率有增大的趋势。

另一方面,由试验结果可知  $\text{CaCl}_2$  溶液与  $\text{NaCl}$  溶液具有同样的规律,在相同浓度作用下  $\text{CaCl}_2$  溶液中土样的自由膨胀率比  $\text{NaCl}$  溶液稍低。从微观机理方面,双电层厚度与阳离子的价位有关,  $\text{Ca}^{2+}$  比  $\text{Na}^+$  的离子交换能力强,更容易置换出土中吸附的阳离子,使得颗粒间的扩散层变薄,渗透膨胀量降低。 $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Na}^+$  相比,二价阳离子的斥力更低,土样颗粒间结合更加紧密,也会导致土体的自由膨胀率要更低一些。在宏观模拟方面,Donnan 渗透压  $\Pi_D$  与离子浓度有关,对于相同摩尔浓度的盐溶液,  $\text{CaCl}_2$  比  $\text{NaCl}$  多离解出 1 倍的  $\text{Cl}^-$ ,因此  $\text{CaCl}_2$  溶液的  $\Pi_D$  比  $\text{NaCl}$  溶液中的低,粒间应力大,自由膨胀率小。

### 3.2.2 孔隙溶液浓度对剪切强度的影响

由前文分析可知,当孔隙溶液浓度增大时粒间应力增大,土体膨胀性降低,土体强度应该增大,而试验结果正好是相反的,随着浓度的增大,强度

降低。当浓度继续增大时强度降低速度逐渐缓慢至稳定，并且不同的盐溶液（CaCl<sub>2</sub>、NaCl）强度变化趋势是相同的，也排除了离子交换的影响，可见除了上述粒间应力的作用之外，还有其他影响因素。

有研究发现，当土体中孔隙溶液的浓度增大时土颗粒之间的排列及结构会发生改变<sup>[17-18]</sup>，土体的结构对抗剪强度具有重要的影响。如图7所示，当孔隙溶液浓度增大时粒间应力增大，使土颗粒从面与面相联结的集聚结构变成面与边或边与边联结的絮凝结构的排列方式<sup>[21]</sup>。

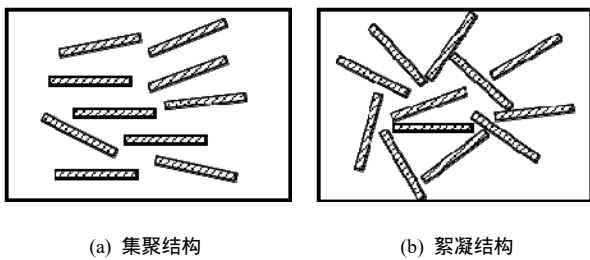


图7 土颗粒结构  
Fig.7 Structure of soil particle

为了探究土样在不同浓度盐溶液下的孔隙和结构特征，本次进行了扫描电镜实验，以观察其变化情况。限于篇幅，选取其中4种浓度进行分析，放大倍数为2000。

从图8中可以看出，当孔隙溶液为蒸馏水（见图8(a)）时可以看到卷曲层状的黏土矿物，土样由黏土片堆叠而成，由于水分子与土颗粒表面发生水化作用，颗粒表面出现羽翼状胶体<sup>[25]</sup>。扫描电镜图片中，黑色区域代表孔隙，土样内部孔隙的分布较少；当孔隙溶液中含有极少量的盐时，如图8(b)中土颗粒表面的羽翼状胶体增多，颗粒间联结增强。这与土样剪切强度在盐溶液浓度为0.1 mol/L时表现出的稍增大的趋势一致。

随着溶液浓度的增大（见图8(c)、8(d)），粒间应力增大，土样内部面与面联结的层状排列减少，大多转化为面与边或边与边联结的一种排列方式，羽翼状胶体逐渐消失，且图中黑色区域变的密集，即土样内部孔隙分布范围变大，土样变成松散的絮凝状结构，使得土体结构变得疏松，土样的抗剪强度会降低，但随溶液浓度持续增大，粒间应力并不会随之无限增大，会趋于一个稳定的值，较高浓度时土样的内部结构变化不大，也是趋于一个稳定的状态，剪切强度大小变化不大。

孔隙溶液为CaCl<sub>2</sub>时扫描电镜图片所呈现出的土样孔隙、结构的变化也与上面分析的一致，因此认为孔隙中盐溶液浓度增大，土样结构变化导致土

体剪切强度降低是完全合理的。

由实验结果可知，该广西膨胀土表现出随着溶液浓度增大，剪切强度减小的趋势，说明对该土样

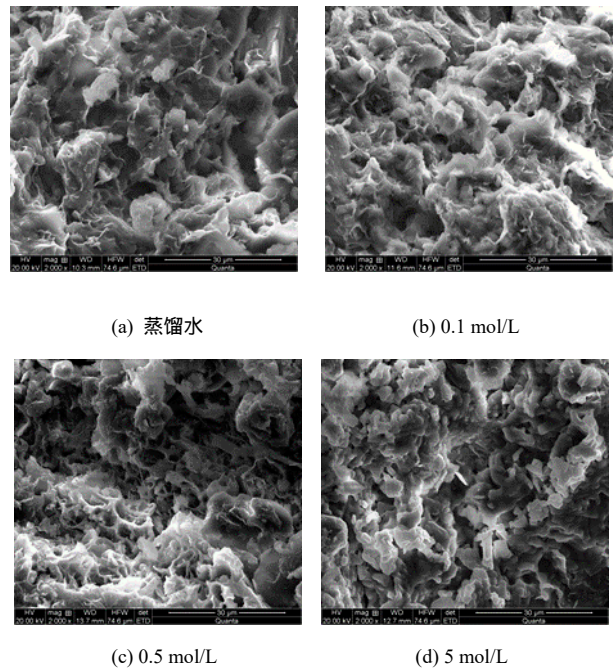


图8 孔隙溶液为NaCl时扫描电镜图片  
Fig.8 Pictures of SEM when pore solution is NaCl

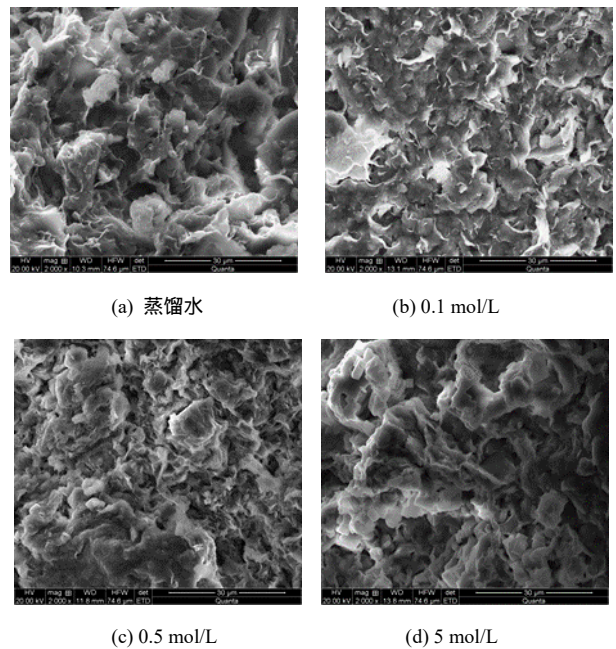


图9 孔隙溶液为CaCl<sub>2</sub>时扫描电镜图片  
Fig.9 Pictures of SEM when pore solution is CaCl<sub>2</sub>

结构对抗剪强度的影响比粒间应力对土样抗剪强度的影响大。孔隙溶液浓度相同时，由于上覆正应力的存在会对土样进行压缩，且正应力越大土样压缩越大，导致土样孔隙比减小，当正压力增大时土体剪切强度也会提高。

3.2.3 孔隙溶液浓度对土样黏聚力、内摩擦角的影响

由试验结果可知，盐溶液对名义黏聚力的影响明显大于内摩擦角，当采用粒间应力式(2)表示的抗剪强度为

$$\tau = \sigma'_1 \tan \varphi + c \quad (5)$$

式中： $\varphi$ 为内摩擦角； $c$ 为材料的本征黏聚力。试验结果得到的名义黏聚力可表示为

$$c' = c - \Pi \tan \varphi \quad (6)$$

由式(6)可知，随着浓度的增大，广义渗透压  $\Pi$  降低，名义黏聚力增大(根据图4可知，摩擦角  $\varphi$  的影响较小，可假设为常数)。

除了粒间应力的影响之外，土样内部结构也会对其产生影响，盐溶液对结构的改变使得黏聚力随着盐溶液浓度的增大而降低<sup>[15]</sup>，并且降低作用明显大于粒间应力的影响。在上述两种因素共同作用下黏聚力随着浓度增大呈现明显降低的趋势，内摩擦角则呈现出一种缓慢上升的趋势，但影响程度明显小于黏聚力。

## 4 结 论

(1) 孔隙中盐溶液的存在使得土体的自由膨胀率先有增大的趋势，当孔隙溶液浓度继续增大时，由于粒间应力的作用，自由膨胀率开始减小，最后相对稳定，且孔隙溶液为  $\text{CaCl}_2$  溶液时膨胀要更低一些。Wei 提出的考虑颗粒间物理化学作用力的粒间应力表达式可以完全解释上述试验现象。

(2) 孔隙溶液组分与浓度大小会对土样的抗剪强度参数产生影响，随孔隙溶液浓度升高，土样的内摩擦角缓慢增大，土样的黏聚力先增大后减小，慢慢趋于稳定，且  $\text{Na}^+$  影响下的黏聚力比  $\text{Ca}^{2+}$  影响下的黏聚力要大，说明不同阳离子对土样强度参数的影响程度也不相同。

(3) 土体的抗剪强度受盐溶液会增大粒间应力，使得强度增大和盐溶液会导致土体的结构发生变化，使得强度降低两个因素的影响，对强度具有相反的作用，对于该广西膨胀土结构的作用明显大于粒间应力的影响。广西膨胀土的强度性质表现为随着浓度的增大强度降低的趋势。

## 参 考 文 献

[1] DI MAIO C, HUECKEL T, LORET B. Chemo-mechanical coupling in clays: From nano-scale to engineering applications[M]. Lisse: Balkema A A Publishers: [s. n.], 2002.

[2] 陈永贵, 黄润秋, 朱春明, 等. 化学场对膨润土水-力

特性影响研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 398 - 405.

CHEN Yong-gui, HUANG Run-qiu, ZHU Chun-ming, et al. Chemical environment effect on hydromechanical behaviour of compacted bentonite[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 2014, 42(3): 398 - 405.

- [3] KEENY T C. The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils[C]//Proceedings of the Geotechnical Conference. Oslo: [s. n.], 1967: 123 - 129.
- [4] DI MAIO C, FENELLI G B. Residual strength of kaolin and bentonite: The influence of their constituent pore fluid[J]. **Geotechnique**, 1994, 44(2): 217 - 226.
- [5] DI MAIO C. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects[J]. **Geotechnique**, 1996, 46(4): 695 - 707.
- [6] ANSON R W W, HAWKINS A B. The effect of calcium ions in pore water on residual shear strength of kaolinite and sodium montmorillonite[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(6): 787 - 800.
- [7] SPAGNOLI G, Fernandez-Steeger T, FEINENDEGEN M, et al. The influence of the dielectric constant and electrolyte concentration of the pore fluids on the undrained shear of smectite[J]. **Soils and Foundations**, 2010, 50(5): 757 - 763.
- [8] MORE R. The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays[J]. **Geotechnique**, 1991, 41(1): 35 - 47.
- [9] WAHID A S, GAJ A, DI MAGGIO R. Chemo-mechanical effects in kaolinite. part 2. Exposed samples and chemical and phase analyses[J]. **Geotechnique**, 2011, 61(6): 449 - 457.
- [10] 程昌炳, 徐昌伟. 重塑高岭土的力学特性与  $\zeta$ ——电位的关系[J]. 水文地质工程地质, 1985, 29(1): 40 - 41.
- CHENG Chang-bing, XU Chang-wei. The relationship between mechanical properties and  $\zeta$  of the remolded kaolinite[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1985, 29(1): 40 - 41.
- [11] 汪民. 饱和黏土中黏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.

- WANG Min. Preliminary study of particle interaction with water viscosity in saturated clay[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1987, 13(3): 1 - 5, 12.
- [12] 唐晓武, 应丰, 寇乃羽, 等. 吸附离子对粉质黏土及改良土特性的影响[J]. **岩土力学**, 2010, 31(8): 2519 - 2524.
- TANG Xiao-wu, YING Feng, KOU Nai-yu, et al. Effects of cation adsorption on properties of silt clay and mixed dredged soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2519 - 2524.
- [13] 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**, 2012, 33(2): 159 - 161.
- XU Hai-lin, GAO Ming-xing, LI Xiao-feng, et al. Research on influence of soluble salt concentration on shear strength index[J]. **Journal of Inner Mongolia Agricultural University**, 2012, 33(2): 159 - 161.
- [14] 郭菊彬, 宋吉荣, 张坤. 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 - 99.
- GUO Ju-bin, SONG Ji-rong, ZHANG Kun. Exploration on the relation between strength parameters of saltbearing soil and water content and salt content[J]. **Sichuan Building Science**, 2007, 33(5): 98 - 99.
- [15] 梁健伟, 房营光, 陈松. 含盐量对极细颗粒黏土强度影响的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(5): 3821 - 3829.
- LIANG Jian-wei, FANG Ying-guang, CHEN Song. Experimental research on effect of salt content on strength of tiny-particle clay[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(5): 3821 - 3829.
- [16] WARKENTIN B P, YONG R N. Shear strength of montmorillonite and kaolinite related to interparticle force[J]. **Clays and Clay Minerals**, 1962, 9(1): 210 - 218.
- [17] 蔡晋晋, 叶为民, 宛志缓, 等. 弱碱性溶液对膨润土性能的影响试验研究[J]. **工程地质学报**, 2012, 20(增刊): 143 - 147.
- CAI Jin-jin, YE Wei-min, WAN Zhi-huan. Effect of weak alkaline solution on the performances of bentonite[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2012, 20(Supp.): 143 - 147.
- [18] 汤连生. 水-土化学作用的力学效应及机理分析[J]. **中山大学学报(自然科学版)**, 2000, 39(4): 104 - 109.
- TANG Lian-sheng. Mechanical effect of chemical action of water on soil and analysis on its mechanism[J]. **Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni**, 2000, 39(4): 104 - 109.
- [19] ARASAN S, YETİMOĞLU T. Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays[J]. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, 2008, 32: 107 - 115.
- [20] 南京水利科学研究所. SL 237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. SL 237-1999 Specification of soil tests[S]. Beijing: China WaterPower Press, 1999.
- [21] 于海浩, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 孔隙溶液浓度的变化对黏土强度的影响[J]. **岩土工程学报**, 2015, 37(3): 564 - 569.
- YU Hai-hao, WEI Chang-fu, YAN Rong-tao, et al. Effects of pore solution concentrations on shear strength of clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(3): 564 - 569.
- [22] JAMES K. Mitchell and kenichi soga[M]//Fundamentals of Soil Behaviour. New York: Wiley, 2005.
- [23] WEI C F. A theoretical framework for modeling the chemomechanical behavior of unsaturated soils[J]. **Vadose Zone Journal**, 2014, 13(9): 1 - 21.
- [24] MA T T, WEI C F, XIA X L, et al. Soil freezing and soil water retention characteristics: Connection and solute effects[J]. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 2015, 31(1): D4015001.
- [25] 陈宝, 张会新, 陈萍. 高碱溶液对高庙子膨润土侵蚀作用的研究[J]. **岩土工程学报**, 2013, 35(1): 181 - 186.
- CHEN Bao, ZHANG Hui-xin, CHEN Ping. Erosion effect of hyper-alkaline solution on Gaomiaozhi bentonite[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(1): 181 - 186.