

DOI: 10.11779/CJGE20221559

# 非饱和盐渍黏土物理化学作用的应力依赖特性

王立业<sup>1</sup>, 周凤玺<sup>\*1,2</sup>, 周立增<sup>3</sup>, 梁玉旺<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;

3. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 为了揭示物理化学作用对含盐溶液非饱和黏土压缩行为的影响及其与应力水平的依赖特性, 对孔隙含蒸馏水、氯化钠和硫酸钠溶液及控制基质吸力条件下的试样进行了一维压缩试验。然后, 根据试验结果测定了不同条件下黏土的压缩指数、次固结系数和屈服应力, 并标定了它们随基质吸力和渗透吸力的变化规律。此外, 对不同基质吸力和渗透吸力下非饱和盐渍黏土主、次固结行为展开了深入分析, 明确了非饱和盐渍黏土物理化学作用的应力依赖特征, 并对非饱和盐渍黏土的 LC 屈服行为进行了探索。结果表明: 不同物理化学力下非饱和盐渍黏土的次固结系数与压缩指数的比值  $C_a/C_c$  以及屈服应力可以使用基质吸力和渗透吸力来统一描述; 由塑性加载区压缩曲线斜率以及特征参量、 $C_a/C_c$  与竖向应力的相关性指出非饱和盐渍黏土物理化学作用与应力水平息息相关; 此外, 化学-水力-力学耦合作用下非饱和盐渍黏土的 LC 屈服曲线是由 MLC 屈服曲线和 OLC 屈服曲线组成的一条光滑曲线。

**关键词:** 非饱和黏土; 孔隙盐溶液; 物理化学作用; 应力依赖性; LC 屈服行为

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)04-0814-09

**作者简介:** 王立业(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事盐渍土试验和理论模型方面的研究。E-mail: gwly1024@163.com。

## Stress-dependent properties of physicochemical interaction of unsaturated saline clay

WANG Liye<sup>1</sup>, ZHOU Fengxi<sup>\*1,2</sup>, ZHOU Lizeng<sup>3</sup>, LIANG Yuwang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Engineering Research Center of Disaster

Mitigation in Civil Engineering of Ministry of education, Lanzhou 730050, China; 3. School of Mechanics, Civil Engineering and

Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** To reveal the impact of physicochemical effects on the compressive behaviors of unsaturated clay containing salt solution and its dependence properties on stress level, one-dimensional compression tests are performed on the specimens with pores containing distilled water, sodium chloride solution, sodium sulfate solution and controlled matric suction conditions. Then, the compression index, secondary compression coefficient and yield stress of clay under different conditions are measured according to the test results, and their variation laws with the matric suction and osmotic suction are calibrated. Furthermore, the stress-dependent characteristics of physicochemical action are clarified through an in-depth analysis of the primary and secondary consolidation behaviors of unsaturated saline clay under different matric suctions and osmotic suctions, and the LC yielding behaviors of unsaturated saline clay are explored. The results show that the ratio of the secondary compression coefficient to the compression index  $C_a/C_c$  and the yield stress of unsaturated saline clay at different physicochemical forces can be described uniformly using the osmotic suction and matric suction. From the slope of compression curve in the plastic loading zone and the correlation between characteristic parameter,  $C_a/C_c$  and the vertical stress, it is noted that the physicochemical action of unsaturated saline clay is closely related to the stress level. Moreover, the LC yield curve of unsaturated saline clay is a smooth curve composed of MLC yield curve and OLC yield curve under chemo-hydro-mechanical coupling.

**Key words:** unsaturated clay; pore salt solution; physicochemical action; stress dependence; LC yield behavior

## 0 引言

盐渍土中孔隙盐溶液在外部环境变化下的相态转变以及盐溶液中离子间的相互作用等物理化学效应对

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11962016, 51978320); 甘肃省基础研究创新群体项目 (20JR5RA478); 甘肃省教育厅: 优秀研究生“创新之星”项目 (2022CXZX-451)

收稿日期: 2022-12-28

\*通信作者 (E-mail: geolut@163.com)

土力学行为及其工程特性具有显著的影响<sup>[1-2]</sup>, 比如毛细作用和化学渗透效应对黏土的结构<sup>[3]</sup>以及强度和变形行为的影响<sup>[4]</sup>等, 使得研究盐渍黏土的物理化学作用及其与应力水平的依赖性具有重要的实际意义<sup>[5]</sup>。另外, 在非饱和盐渍黏土中, 盐溶液的侵入会使黏土发生水力、化学和力学间的耦合行为<sup>[6]</sup>, 最终导致地基产生严重的不均匀沉降<sup>[7]</sup>。因此, 研究非饱和盐渍黏土物理化学效应及其与应力水平的依赖性和 LC (loading collapse) 屈服行为具有一定的理论和实践意义。

对于土壤特性应力依赖性的研究多集中于模量<sup>[8-9]</sup>和水力特性<sup>[10-11]</sup>方面, 且主要利用控制应力水平的试验结果揭示模量或水力行为与应力水平的依赖性。但在土壤物理化学效应方面, 国内外学者分别使用应力加载试验和基质吸力加载试验明确了物理和化学作用对土变形、屈服等行为的影响规律。其中以非饱和土<sup>[12-14]</sup>和饱和盐渍黏土<sup>[15-20]</sup>为研究对象, 开展了控制基质吸力或含盐条件的一维压缩试验<sup>[15-16, 19-20]</sup>和等向压缩试验<sup>[12-14, 18]</sup>。根据试验结果分别揭示了基质吸力和含盐条件对土壤固结特性的影响规律, 并获得了非饱和土的 LC 屈服曲线<sup>[21]</sup>和饱和盐渍黏土屈服应力与渗透吸力的经验公式<sup>[17-18]</sup>。此外, 陈正汉等<sup>[22-23]</sup>使用研发的非饱和土固结仪开展了大量吸力加载试验, 揭示了吸力对非饱和黄土变形、水力-力学耦合屈服等行为的影响规律<sup>[23]</sup>, 并根据试验结果发现应力水平对吸力加载曲线存在明显的影响。除此之外, Thyagaraj 等<sup>[24, 6]</sup>借助一维压缩试验结果指出化学作用对非饱和黏土的收缩特性和 LC 屈服行为具有明显的影响。但是, 上述研究很少涉及物理化学作用与应力水平的依赖性以及缺乏对非饱和盐渍黏土 LC 屈服曲线的系统研究。

因此, 本文首先对孔隙含蒸馏水、氯化钠和硫酸钠溶液的非饱和黏土开展了一维压缩试验和土水特征曲线试验。然后, 根据试验结果揭示了非饱和盐渍黏土的压缩行为和内部的物理化学作用, 并通过对比、次固结过程的深入分析揭示了物理化学作用的应力依赖特性。最后, 利用屈服应力与基质吸力和渗透吸力的相关性以及巴塞罗那模型, 明确了非饱和盐渍黏土的 LC 屈服行为, 为研究非饱和盐渍黏土力学行为提供了依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验土样采用甘肃省张掖市某地的粉质黏土。它由于气候因素、地形地貌因素以及高含盐量地表径流等作用, 在渗透和蒸发等效应下形成了典型的盐渍土。因此, 使用离子滴定法和色谱法测量了试验用土中可

溶性盐离子的种类、含量和 pH 值, 详细如表 1 所示。由表 1 可以发现试验用土的总含盐量约为 1%, 属于盐渍土的范畴。因此, 在开始试验之前, 采用蒸馏水对土进行了洗盐, 洗盐完成的判定标准为透明滤液含盐量小于 0.1% (使用烘干法测含盐量)。将洗盐后的土进行烘干、碾碎、过筛 (2 mm), 并测得洗盐后土的最优含水率为 14.8%, 最大干密度为 1.78 g/cm<sup>3</sup>, 液限为 29.0%, 塑限为 14.5%, 土粒相对质量密度为 2.72。

### 1.2 试验方案和过程

将洗盐后的土分别与定量的蒸馏水 (W)、1.22 mol/kg 的氯化钠 (C) 和硫酸钠 (S) 溶液充分混合、拌和并养护 24 h。然后, 采用压样装置将制备的盐渍土一次性压缩为直径 61.8 mm 高度 20 mm, 干密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup> 的圆柱试样。试验过程中, 控制试样的孔隙气压分别为 0, 50, 100, 200 kPa, 且排水阀门保持打开状态, 因此吸力平衡后的基质吸力与孔隙气压力相等。

不同含盐情况和基质吸力下黏土的一维压缩试验是在 FGJ-20 型非饱和土固结试验仪上进行。在安装试样之前, 先使用同浓度的孔隙溶液饱和陶土板, 以避免气泡和内外渗透压的影响。试样安装完成之后, 借助气压控制装置施加设定的孔隙气压力并保持不变, 开始吸力平衡, 待轴向变形小于 0.01 mm/d 时认为试样内部吸力处于平衡状态。试样达到平衡后, 逐级施加荷载, 开始固结试验。逐级施加荷载的顺序为: 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 800, 600, 400, 300, 200 kPa。另外, 为了刻画非饱和盐渍黏土中的物理化学作用, 利用标准 Whatman No.1442-055 和 Leong 等<sup>[25]</sup>标定的吸力率定曲线, 测量了孔隙含蒸馏水、1.22 mol/kg 的氯化钠和硫酸钠溶液试样的总吸力和基质吸力, 并根据总吸力和基质吸力的差值确定了渗透吸力。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 压缩曲线

不同基质吸力和盐溶液作用下的压缩曲线如图 1 所示, 且图例中的 W、C 和 S 分别代表孔隙含蒸馏水、氯化钠和硫酸钠溶液的试样。其中, 图 1 (a), (b) 分别是竖向应力和竖向净应力坐标中的压缩曲线。从图 1 (a) 中可以发现, 基质吸力和渗透吸力对非饱和盐渍黏土的压缩曲线有明显的影响。随着基质吸力的增大, 毛细力逐渐增大, 增强了颗粒团聚体间的联结强度<sup>[26]</sup>, 从而使压缩曲线逐渐向上移动。该现象同样也出现在非饱和盐渍黏土的试验中, 例如相同含盐情况下基质吸力为 200 kPa 时试样的  $\varepsilon_v$ - $\ln \sigma$  曲线位于

表 1 试验用土中易溶盐的离子种类和含量

Table 1 Ion species and contents of soluble salts in experimental soil

阳离子/%					阴离子/%			总含盐量/%	pH 值
K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ga <sup>2+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>		
0.0113	0.4470	0.0481	0.0546	—	0.0235	0.3222	0.0912	1.0	7.47

基质吸力为 50 kPa 试样的上方。但是，孔隙含 1.22 mol/kg 氯化钠和硫酸钠溶液的试样却表现出比含蒸馏水试样更大的体积变形，使它们的  $\varepsilon_v-\ln\sigma$  曲线始终低于等基质吸力下含蒸馏水试样的  $\varepsilon_v-\ln\sigma$  曲线。这可能是由于化学-力学耦合作用下孔隙盐溶液诱导黏土颗粒发生更为显著的絮凝和团聚效应引起的<sup>[4]</sup>。即盐溶液的侵入会减小团聚体内的层间微孔隙体积，增大团聚体之间的宏观孔隙体积，并在竖向应力作用下宏观孔隙体积逐渐减小。然而，在净应力坐标中基质吸力和盐溶液都会增加试样的初始变形，且相同含盐情况下非饱和盐渍黏土的压缩曲线都具有一个交点。这与 Rampio 等<sup>[27]</sup>开展的非饱和土压缩试验结果相同。除此之外，由于 1.22 mol/kg 硫酸钠溶液中阳离子浓度是同浓度氯化钠溶液的两倍，使孔隙含硫酸钠溶液试样在化学-力学耦合作用下表现出更加显著的体积变形。

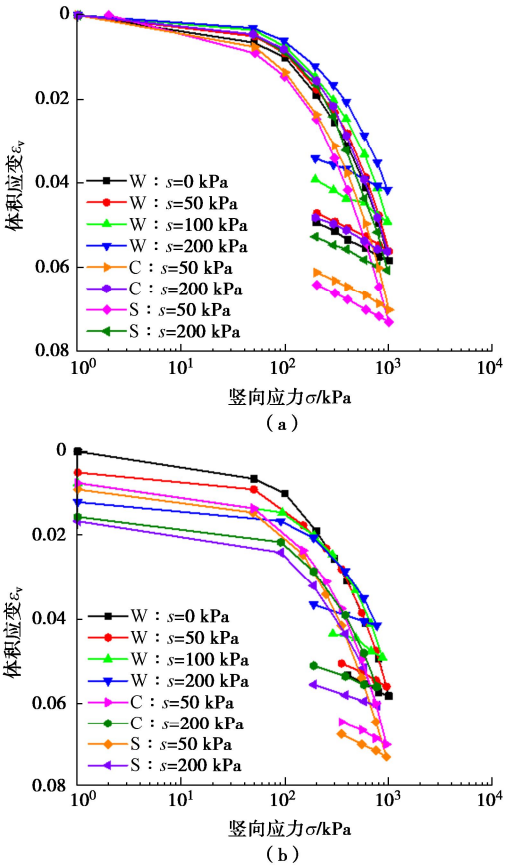


图 1 非饱和盐渍黏土的一维压缩试验结果

Fig. 1 One-dimensional compression test results of unsaturated saline clay

图 2 展示了基质吸力为 0, 50, 100, 200 kPa 下孔隙含蒸馏水、1.22 mol/kg 氯化钠和硫酸钠溶液试样在压缩过程中体积应变的变化情况。在相同荷载作用下，随着基质吸力的减小试样的体积应变逐渐增加。另外，由于双电层斥力的减小使孔隙含氯化钠溶液和硫酸钠溶液试样的体积变形大于含蒸馏水试样的，且含同浓度硫酸钠溶液试样的体积变形略大于含氯化钠溶液试样的。

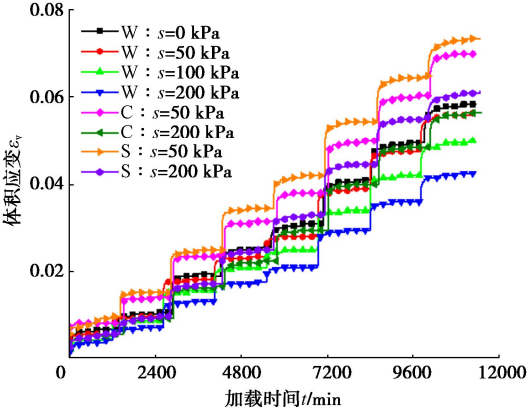


图 2 非饱和盐渍黏土在压缩过程中体积应变的变化情况

Fig. 2 Change in volume strain of unsaturated saline clay during compression process

2.2 土的物理化学作用

土中的物理化学力又可以称为局部的粒间作用力或吸应力，主要由 van der Waals 引力、双电层斥力、化学胶结作用触发的引力、气液界面表面张力引起的吸引力和负孔隙水压力产生的吸引力组成<sup>[28]</sup>。在黏土颗粒-盐溶液-气体组成的三相系统中，它们取决于固-液系统的物理化学性能，例如：土的矿物成分、比表面积和颗粒的带电性以及孔隙溶液的化学性质<sup>[29]</sup>，因此统称为物理化学效应。另外，在非饱和土中，由相互作用与水分子间的内外关系，可将土的物理作用分为毛细和吸附两部分<sup>[30]</sup>，且毛细作用是气-液界面上水分子之间的内部相互作用，吸附效应是土颗粒与水分子间的外部作用<sup>[31]</sup>。当然，在黏土颗粒-盐溶液-气体构成的非饱和盐渍黏土系统中物理化学作用也可以分解为毛细作用、物理化学吸附作用和渗透作用。这些物理化学作用是导致土体孔隙水势变化、影响力学性能的主要因素，且可以利用吸力大小来量化。即由毛细作用和物理吸附作用控制的吸力通常称为基质吸力，而源自化学吸附效应和渗透作用的吸力称之为渗

透吸力。

为了描述不同含水和含盐条件下非饱和盐渍黏土的物理化学作用, 测定了孔隙含蒸馏水、1.22 mol/kg 氯化钠和硫酸钠溶液试样的总吸力、基质吸力, 并计算了渗透吸力, 结果如图3所示。如图所示, 黏土总吸力同时受到孔隙含水和含盐情况的控制, 而基质吸力与含水率息息相关, 受孔隙含盐情况的影响较小。相反地, 渗透吸力受到含盐种类和浓度的控制, 且基本不受含水率的影响。因此, 孔隙含蒸馏水、1.22 mol/kg 氯化钠和硫酸钠溶液试样的平均渗透吸力分别为 457, 5630, 5902 kPa。

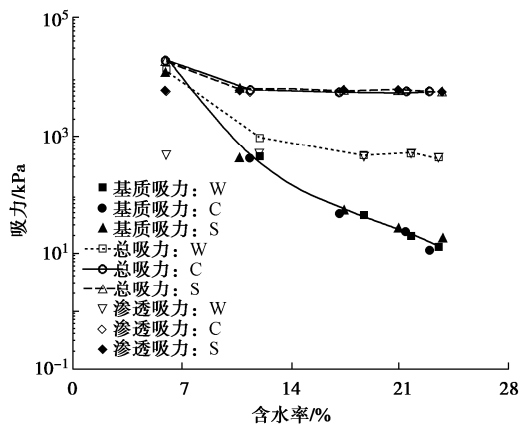


图3 不同含水和含盐条件下试样的吸力

Fig. 3 Suctions of samples under different water and salt contents

## 2.3 物理化学作用的应力依赖性

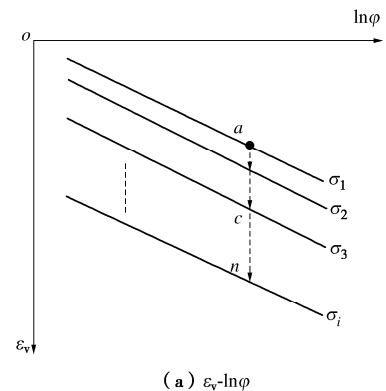
土力学性质的应力依赖性是指力学性质随应力水平改变而改变的行为<sup>[32]</sup>, 例如土的模量随应力水平变化而变化的现象<sup>[8-9]</sup>。土物理化学作用的应力依赖性是指物理化学作用对土力学行为的影响程度与应力水平相互依赖的特性, 并且土物理化学作用的应力依赖性可以在  $\varepsilon_v - \ln \phi$  平面和  $\varepsilon_v - \ln \sigma$  平面来讨论, 详细如图4所示。其中, 图4(a)和(b)分别为物理化学加载和力学加载下盐渍黏土的压缩曲线, 且符号  $\phi$  表示物理化学力, 即  $\phi_i$  代表  $s = s_i$  和  $\pi = \pi_i$  的加载条件。在物理化学加载试验中, 土物理化学作用的应力依赖特征可以直接利用不同应力水平下  $\varepsilon_v - \ln \phi$  曲线的变化率来分析。或者, 通过特征参量  $\zeta_\phi$  与应力水平的关系来讨论。在应力加载试验中, 土物理化学作用的应力依赖性也可以借助  $\varepsilon_v - \ln \sigma$  曲线变化率与物理化学作用的相关性或特征参量  $\zeta_\sigma$  与应力水平的关系来分析。此时, 如果非饱和盐渍黏土的物理化学作用与应力水平相互依赖, 则在塑性加载阶段  $\varepsilon_v - \ln \sigma$  曲线的斜率与物理化学作用相关 (这与温度效应的应力依赖性类似<sup>[33]</sup>), 且  $\zeta_\sigma$  随着应力水平的变化而变化 (图4(c))。其中, 物理化学加载试验和应力加载试验条件下特征参量

$\zeta_\phi$  和  $\zeta_\sigma$  分别为

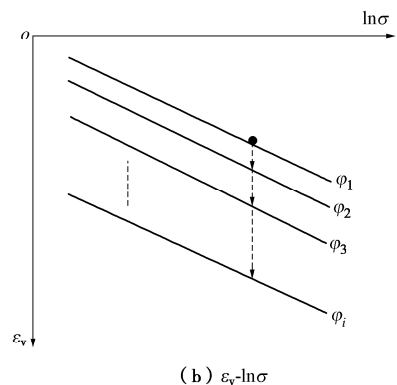
$$\zeta_\phi = \varepsilon_n^\phi - \varepsilon_a^\phi = \frac{e_n - e_a}{1 + e_0}, \quad (1)$$

$$\zeta_\sigma = \varepsilon_N^\sigma - \varepsilon_A^\sigma = \frac{e_N - e_A}{1 + e_0}. \quad (2)$$

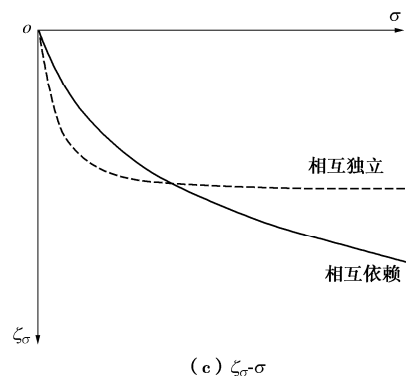
式中:  $e_0$  为初始孔隙比;  $\varepsilon_n^\phi$  和  $\varepsilon_a^\phi$  分别是图4(a)中点  $a$  和点  $n$  对应的体积应变;  $e_a$  和  $e_n$  分别是图4(a)中点  $a$  和点  $n$  对应的孔隙比;  $\varepsilon_N^\sigma$  和  $\varepsilon_A^\sigma$  分别是图4(b)中点  $A$  和点  $N$  对应的体积应变;  $e_A$  和  $e_N$  分别是图4(b)中点  $A$  和点  $N$  对应的孔隙比。



(a)  $\varepsilon_v - \ln \phi$



(b)  $\varepsilon_v - \ln \sigma$



(c)  $\zeta_\sigma - \sigma$

图4 非饱和盐渍黏土物理化学作用应力依赖性的示意图

Fig. 4 Schematic of stress dependence of physicochemical interaction of unsaturated saline clay

除此之外, 还可以借助不同物理化学作用下黏土压缩特性与应力水平的相关性来揭示其间的依赖性。

表 2 不同基质吸力和渗透吸力下的次固结系数

Table 2 Secondary consolidation coefficients under different conditions of matric suction and osmotic suction															
$s = 0 \text{ kPa}$				$s = 50 \text{ kPa}$				$s = 100 \text{ kPa}$				$s = 200 \text{ kPa}$			
$\pi = 457 \text{ kPa}$		$\pi = 457 \text{ kPa}$		$\pi = 5630 \text{ kPa}$		$\pi = 5902 \text{ kPa}$		$\pi = 457 \text{ kPa}$		$\pi = 457 \text{ kPa}$		$\pi = 5630 \text{ kPa}$		$\pi = 5902 \text{ kPa}$	
$\sigma'/\text{kPa}$	$C_a \times 10^2$	$\sigma'/\text{kPa}$	$C_a \times 10^2$	$\sigma'/\text{kPa}$	$C_a \times 10^2$	$\sigma'/\text{kPa}$	$C_a \times 10^2$	$\sigma'/\text{kPa}$	$C_a \times 10^2$	$\sigma'/\text{kPa}$	$C_a \times 10^2$	$\sigma'/\text{kPa}$	$C_a \times 10^2$	$\sigma'/\text{kPa}$	$C_a \times 10^2$
100	0.1165	100	0.1165	100	0.0764	97	0.0872	101	0.1156	97	0.1161	99	0.0792	97	0.1126
200	0.1685	200	0.1222	200	0.1650	201	0.1676	194	0.1160	194	0.1141	200	0.1451	201	0.1540
300	0.2186	300	0.1318	300	0.1555	291	0.1657	291	0.1220	291	0.1140	300	0.1669	291	0.1673
400	0.2184	401	0.1755	400	0.2141	388	0.2339	387	0.1625	388	0.1159	400	0.1256	387	0.1675
600	0.2672	601	0.1959	600	0.2644	581	0.2626	581	0.1739	581	0.1645	599	0.2098	581	0.2201
800	0.2911	802	0.2645	800	0.3076	775	0.3529	775	0.2040	775	0.1744	800	0.2511	774	0.2722
1000	0.3623	1003	0.3075	1001	0.3952	969	0.4083	969	0.2915	969	0.2510	1000	0.3028	968	0.3217

因此，接下来通过不同孔隙盐溶液作用下非饱和和黏土的一维压缩试验结果来分析黏土物理化学作用的应力依赖行为。

(1) 主固结阶段

根据图 1 (b) 所示的压缩曲线确定了不同盐溶液和基质吸力作用下盐渍黏土的压缩指数以及  $\zeta_\sigma$ - $\sigma$  曲线，详细如图 5 和图 6 所示。从图 5 中可以观察到，压缩指数随着基质吸力的增加而逐渐减小。但是，孔隙含 1.22 mol/kg 硫酸钠和氯化钠溶液试样的压缩指数明显大于孔隙含蒸馏水试样的，说明压缩指数随着渗透吸力的增加而增加。也就是说，非饱和盐渍黏土的压缩曲线塑性加载段的斜率随着渗透吸力和基质吸力的变化而变化，且变化规律符合：

$$\omega = \omega_o \left[ (1 - \beta_2) e^{-\beta_1 s} + \beta_2 \right] \left( 1 + \beta_3 \lg \frac{\pi + \pi_r}{\pi_r} \right) \quad (3)$$

式中：当  $\omega$  表示压缩指数  $C_c$  时， $\omega_o$  表示饱和黏土的压缩指数  $C_c^o$ ； $\beta_1$ 、 $\beta_2$  和  $\beta_3$  分别为材料参数，且反映了基质吸力和渗透吸力对  $\omega$  的影响； $s$  表示基质吸力； $\pi$  表示渗透吸力； $\pi_r$  表示参考渗透吸力，它是为了考虑孔隙含蒸馏水时试样渗透吸力不为零的现象。

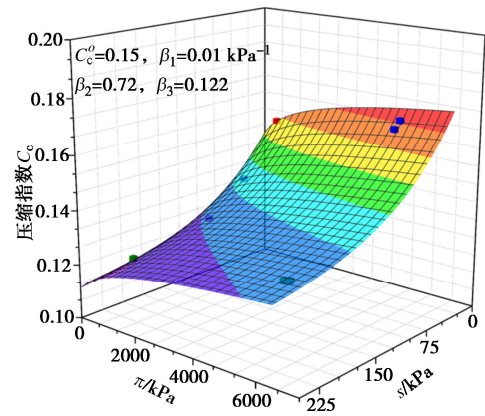


图 5 压缩指数随基质吸力和渗透吸力的变化规律

Fig. 5 Variation of compression index with matric suction and osmotic suction

不同基质吸力和渗透吸力下盐渍黏土的  $\zeta_\sigma$ - $\sigma$  曲线如图 6 所示。在塑性加载阶段， $\zeta_\sigma$  随着竖向应力的变化而变化，且在不同基质吸力和渗透吸力下都保持着与应力水平的相关性。因此，结合塑性加载阶段内压缩曲线斜率与物理化学作用的相关性以及  $\zeta_\sigma$  与应力水平的依赖性说明非饱和盐渍黏土的物理化学作用与应力水平息息相关。

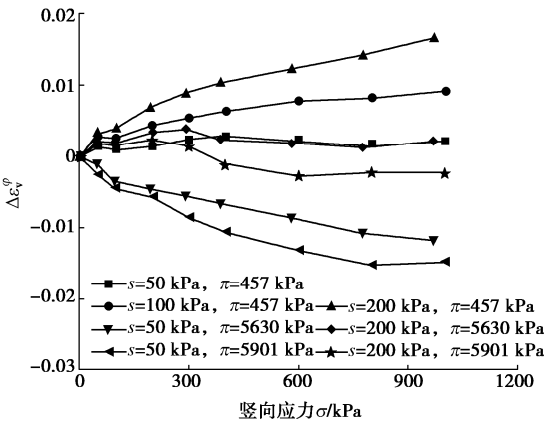


图 6 非饱和盐渍黏土物理化学作用的应力依赖性分析

Fig. 6 Analysis of stress dependence of physicochemical interaction of unsaturated saline clay

(2) 次固结过程

此外，根据不同应力水平下次固结系数与基质吸力和渗透吸力的相关性，进一步对非饱和盐渍黏土物理化学作用的应力依赖行为进行了说明。由图 2 所示的  $\varepsilon_v$ - $t$  曲线计算了不同应力水平、基质吸力和渗透吸力下的次固结系数  $C_a$ ，详细如表 2 所示。由表 2 的数据发现次固结系数  $C_a$  随基质吸力、渗透吸力和应力水平的变化而变化。明显地，在测量范围内，次固结系数  $C_a$  随着应力水平的增加而逐渐增加，但随着基质吸力和渗透吸力的增加，次固结系数  $C_a$  分别表现出逐渐降低和略有增加的变化趋势。因此，认为次固结系数同时受到应力水平、基质吸力和渗透吸力的

共同影响。

此外, 次固结系数和压缩指数的比值  $C_a/C_c$  也作为判定黏土延时压缩变形的重要指标, 被用来衡量土的变形性能<sup>[34]</sup>。因此, 使用式 (3) 对不同基质吸力和渗透吸力下的  $C_a/C_c$  值进行了拟合分析 (此时,  $\omega = C_a/C_c$ ,  $\omega_o = C_a^o/C_c^o$ ) , 结果如图 7 所示。其中, 图 7 (a) ~ (f) 展示了竖向应力为 200, 300, 400, 600, 800, 1000 kPa 作用下  $C_a/C_c$  随基质吸力和渗透吸力的变化规律, 并绘制了所需参数随竖向应力的变化曲线, 详细如图 8 所示。由图 8 所可知, 参数  $C_a^o/C_c^o$ 、

$\beta_1$ ,  $\beta_2$  和  $\beta_3$  都与竖向应力存在明显的相关性。因此, 根据对不同基质吸力和渗透吸力下主、次固结特性的分析, 表明非饱和盐渍黏土的物理化学作用具有明显的应力依赖性。

## 2.4 LC 屈服行为

Alonso 等<sup>[21]</sup>为了描述非饱和土的加载湿陷行为, 提出了著名的 LC 屈服曲线。它既是塑性体积应变的等值面, 也反映了屈服应力随基质吸力的变化规律。因此, 为了考虑盐溶液侵入引起的塑性变形和屈服应力的改变, 也需要建立渗透吸力与 LC 屈服曲线的关

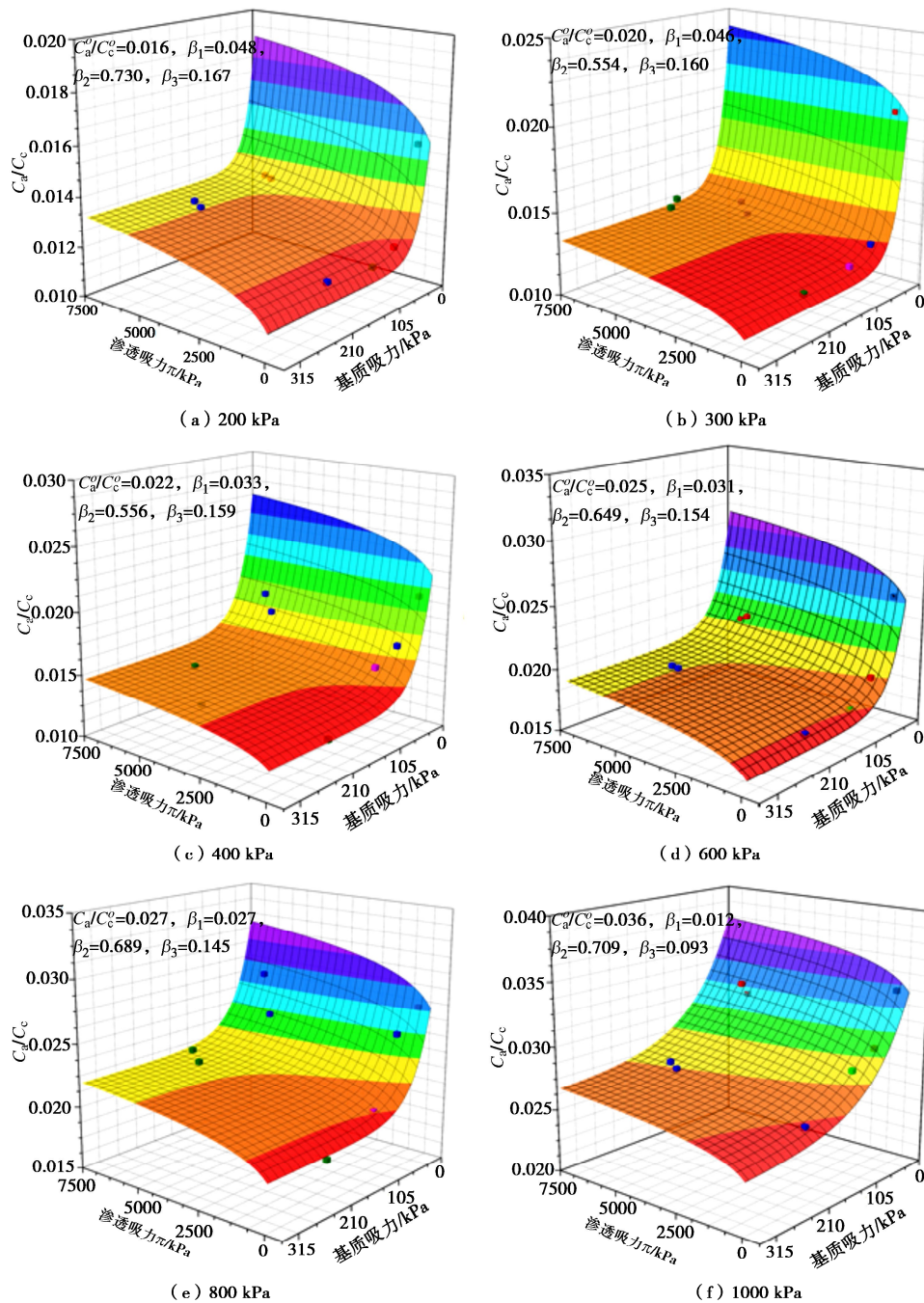


图 7 不同应力水平下  $C_a/C_c$  与渗透吸力和基质吸力的关系

Fig. 7 Relationship among  $C_a/C_c$ , osmotic suction and matric suction at different stress levels

系。Thyagaraj 等<sup>[6]</sup>使用一维压缩试验探索了盐溶液浓度和种类对非饱和土 LC 屈服曲线的影响,发现浓度的增大会使 LC 曲线向左移动,以此来解释盐溶液侵入产生的塑性体积应变和屈服应力减小的现象。所以,基于图 1(b)和图 5 的试验结果标定了不同基质吸力和渗透吸力下非饱和盐渍黏土的屈服应力,并探索了非饱和盐渍黏土的 LC 屈服行为。

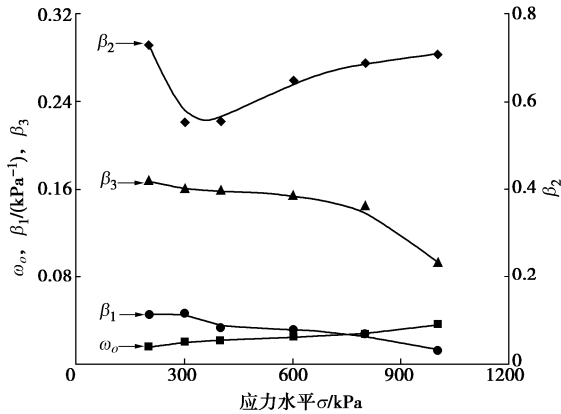


图 8 拟合参数随竖向应力的变化规律

Fig. 8 Variation of fitting parameters with vertical stress

在巴塞罗那模型<sup>[21]</sup>的基础上,引入式(3)可得到非饱和盐渍黏土的 LC 屈服曲线:

$$p_o = p_r \left( \frac{p_o^*}{p_r} \right)^{(\lambda_0 - \kappa)/(\lambda - \kappa)} \quad (4)$$

式中:  $p_o^*$  和  $p_o$  分别是饱和黏土和非饱和盐渍黏土的屈服应力;  $p_r$  是参考应力;  $\lambda_0$  和  $\lambda$  分别是饱和黏土和非饱和盐渍黏土的压缩曲线在半对数坐标中塑性阶段的斜率,  $\lambda_0 = C_c^0 / \ln 10$ ,  $\lambda = C_c / \ln 10$ ;  $\kappa$  是回弹曲线的斜率。

图 9 是不同基质吸力和渗透吸力作用下屈服应力随基质吸力和渗透吸力的变化规律。其中,使用式(3), (4)计算了不同基质吸力和渗透吸力下非饱和盐渍黏土的屈服应力。从图中可以观察到,使用式(3), (4)的计算结果与试验结果基本吻合,也就是说,式(3), (4)可以反映屈服应力随基质吸力和渗透吸力的变化规律。

基于此,探讨了非饱和盐渍黏土的 LC 屈服行为,结果如图 10 所示。如图所示,非饱和盐渍黏土的 LC 屈服曲线可以分为 MLC 屈服曲线和 OLC 屈服曲线共同组成。它不仅反映了基质吸力和渗透吸力对屈服应力的影响,也可以描述吸湿和盐化过程中塑性体积应变的变化。其中,MLC 屈服曲线是与基质吸力相关的水力-力学耦合屈服曲线,而 OLC 屈服曲线是受渗透吸力控制的化学-力学耦合屈服曲线。虽然,非饱和盐渍黏土的 LC 屈服曲线由 MLC 和 OLC 两部分组成,

但是它始终是一条光滑的曲线。因此,认为使用式(4)可以描述任意基质吸力和渗透吸力下非饱和盐渍黏土的 LC 屈服行为。

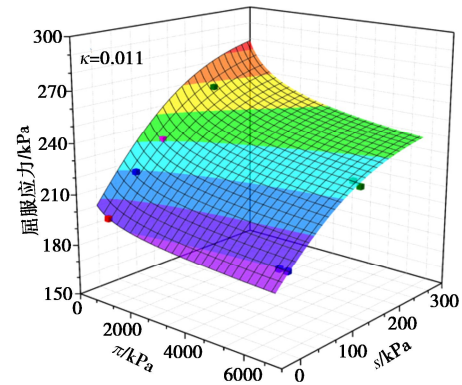


图 9 屈服应力随基质吸力和渗透吸力的变化规律

Fig. 9 Variation of yield stress with matrix suction and osmotic

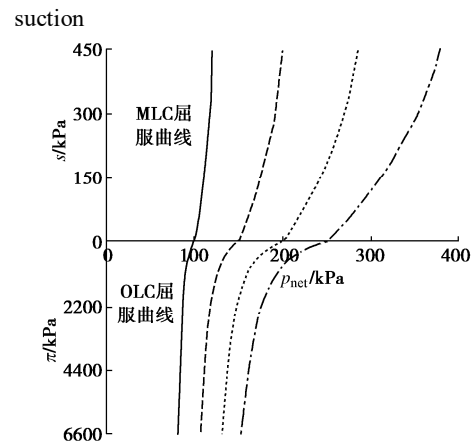


图 10 非饱和盐渍黏土的 LC 屈服曲线

Fig. 10 LC yield curves of unsaturated saline clay

### 3 结 论

以非饱和盐渍黏土为研究对象,通过控制试样的孔隙溶液和基质吸力探索了含盐溶液非饱和黏土压缩行为的影响。然后,借助试验结果对非饱和盐渍黏土物理化学作用的应力依赖特性和 LC 屈服行为进行了深入分析,揭示了基质吸力和渗透吸力对黏土压缩特性和 LC 屈服行为的影响,主要得到以下 3 点结论。

(1) 非饱和盐渍黏土的压缩行为受到物理化学作用的强烈影响,且压缩指数、次固结系数和  $C_a/C_c$  与吸力息息相关。由拟合分析结果指出,压缩指数和  $C_a/C_c$  随基质吸力和渗透吸力的变化规律都可借助式(3)描述。

(2) 从吸力加载试验和力学加载试验出发,明确了判别非饱和盐渍黏土物理化学作用应力依赖性的方法,并标定了特征参量  $\zeta_o$  在应力相关和应力无关时的变化规律。

(3) 通过对非饱和盐渍黏土主、次固结行为的深入分析, 发现基质吸力和渗透吸力对塑性加载区的变形行为和  $C_a/C_c$  的影响受竖向应力的影响。这证实了非饱和盐渍黏土物理化学作用与应力水平息息相关的结论。

(4) 化学-水力-力学耦合作用下非饱和盐渍黏土的 LC 屈服曲线由 MLC 屈服曲线和 OLC 屈服曲线共同组成, 且在吸力空间中始终保持为一条光滑曲线。因此, 在建立非饱和盐渍黏土本构模型时, 可以选择基质吸力和渗透吸力作为类应力变量展开研究。

## 参考文献:

- [1] 张莎莎, 谢山杰, 杨晓华, 等. 火山灰改良粗粒硫酸盐渍土路基填料及其作用机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 588-594. (ZHANG Shasha, XIE Shanjie, YANG Xiaohua, et al. Action mechanism of coarse particle sulfate soil subgrade modified by volcanic ash[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 588-594. (in Chinese))
- [2] ZHANG Y, YE W M, CHEN B, et al. Desiccation of NaCl-contaminated soil of earthen heritages in the Site of Yar City, northwest China[J]. Applied Clay Science, 2016, 124-125: 1-10.
- [3] LU N, GODT J W, WU D T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil[J]. Water Resources Research, 2010, **46**(5): W05515.
- [4] YAO C Q, CHEN P, MA T T, et al. Physicochemical effect on shear strength characteristics of clayey soils based on ring-shear experiment[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, **57**(12): 1820-1831.
- [5] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 1-46. (CHEN Yunmin. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 1-46. (in Chinese))
- [6] THYAGARAJ T, DAS A P. Physico-chemical effects on collapse behaviour of compacted red soil[J]. Géotechnique, 2017, **67**(7): 559-571.
- [7] 孙重初. 酸液对红粘土物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 1989, **11**(4): 89-93. (SUN Zhongchu. The effect of acidizing fluid on the physico mechanical properties of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **11**(4): 89-93. (in Chinese))
- [8] 陈声凯, 凌建明, 罗志刚. 路基土回弹模量应力依赖性分析及预估模型[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(6): 95-99, 104. (CHEN Shengkai, LING Jianming, LUO Zhigang. Stress-dependent characteristics and prediction model of the resilient modulus of subgrade soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(6): 95-99, 104. (in Chinese))
- [9] 弋晓明, 李术才, 王松根, 等. 非饱和粉土回弹模量的应力依赖性与水敏感性耦合分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2013, **43**(2): 84-88, 110. (YI Xiaoming, LI Shucan, WANG Songgen, et al. Coupling analysis of stress dependence and water sensitivity for the resilient modulus of unsaturated silt soil[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2013, **43**(2): 84-88, 110. (in Chinese))
- [10] SUN D A, SHENG D C, CUI H B, et al. A density-dependent elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated compacted soils[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010, **31**(11): 1257-1279.
- [11] XU X T, JIAN W B, WU N S, et al. Void ratio-dependent water retention model for a deformable residual clay[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(8): 04020131-1.
- [12] CUI Y J, DELAGE P. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt[J]. Géotechnique, 1996, **46**(2): 291-311.
- [13] RAMPINO C, MANCUSO C, VINALE F. Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(4): 748-763.
- [14] 高登辉, 陈正汉, 郭楠, 等. 干密度和基质吸力对重塑非饱和黄土变形与强度特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(3): 736-744. (GUO Denghui, CHEN Zhenghan, HUO Nan, et al. The influence of dry density and matric suction on the deformation and the strength characteristics of the remolded unsaturated loess soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(3): 736-744. (in Chinese))
- [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**(5/6): 435-451.
- [16] 张彤炜, 邓永锋, 刘松玉, 等. 渗透吸力对重塑黏土的压缩和渗透特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2260-2266. (ZHANG Tongwei, DENG Yongfeng, LIU Songyu, et al. Experimental investigation of osmotic suction effect on hydro-mechanical behaviour of remolded clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,

- 36(12): 2260-2266. (in Chinese))
- [17] WITTEVEEN P, FERRARI A, LALLOU L. An experimental and constitutive investigation on the chemo-mechanical behaviour of a clay[J]. *Géotechnique*, 2013, **63**(3): 244-255.
- [18] 颜荣涛, 赵续月, 于明波, 等. 盐溶液饱和黏土的等向压缩特性[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(1): 129-138. (YAN Rongtao, ZHAO Xuyue, YU Mingbo, et al. Isotropic compression characteristics of clayey soil saturated by salty solution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(1): 129-138. (in Chinese))
- [19] 周凤玺, 王立业, 赖远明. 饱和盐渍土的一维蠕变试验与模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(1): 142-149. (ZHOU Fengxi, WANG Liye, LAI Yuanming. One-dimensional creep tests and model studies on saturated saline soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(1): 142-149. (in Chinese))
- [20] 王立业, 周凤玺, 秦 虎. 饱和盐渍土分数阶蠕变模型及试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(2): 543-551. (WANG Liye, ZHOU Fengxi, QIN Hu. Fractional creep model and experimental study of saturated saline soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(2): 543-551. (in Chinese))
- [21] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(3): 405-430.
- [22] 陈正汉, 扈胜霞, 孙树国, 等. 非饱和土固结仪和直剪仪的研制及应用[J]. *岩土工程学报*, 2004, **26**(2): 161-166. (CHEN Zhenghan, HU Shengxia, SUN Shuguo, et al. Development & application of consolidation apparatus and direct shear apparatus for unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(2): 161-166. (in Chinese))
- [23] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. *岩土工程学报*, 1999, **21**(1): 82-90. (CHEN Zhenghan. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, **21**(1): 82-90. (in Chinese))
- [24] THYAGARAJ T, THOMAS S R, DAS A P. Physico-chemical effects on shrinkage behavior of compacted expansive clay[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, **17**(2): 06016013.
- [25] LEONG E, RAHARDJO H, HE L. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2002, **25**(3): 8198.
- [26] SHENG D C. Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, **38**(6): 757-776.
- [27] RAMPINO C, MANCUSO C, VINALE F. Laboratory testing on an unsaturated soil: equipment, procedures, and first experimental results[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, **36**(1): 1-12.
- [28] LU N, LIKOS W J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(2): 131-142.
- [29] 周凤玺, 王立业, 赖远明. 饱和盐渍土渗透吸力的回顾及研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(7): 1199-1210. (ZHOU Fengxi, WANG Liye, LAI Yuanming. Review and research on osmotic suction of saturated saline soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(7): 1199-1210. (in Chinese))
- [30] PHILIP J R. Unitary approach to capillary condensation and adsorption[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1977, **66**(11): 5069-5075.
- [31] LU N, ZHANG C. Soil Sorptive Potential: Concept, Theory, and Verification[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, **145**(4): 04019006.
- [32] 赵建斌, 申俊敏, 张艳聪. 考虑土体应力依赖性的水泥混凝土路面基层力学响应研究[J]. *公路*, 2014, **59**(12): 54-58. (ZHAO Jianbin, SHEN Junmin, ZHANG Yancong. Research on mechanical responses of the base for cement concrete pavement considering stress dependence of subgrade[J]. *Highway*, 2014, **59**(12): 54-58. (in Chinese))
- [33] KONG L M, YAO Y P, QI J L. Modeling the combined effect of time and temperature on normally consolidated and overconsolidated clays[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(3): 2451-2471.
- [34] MESRI G, GODLEWSKI P M. Time and stress-compressibility interrelationship[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, **103**(5): 417-430.