

# 盐溶液侵蚀下砂-膨润土混合土 化学固结行为研究

张斯妤, 闫子壮, 陈云敏, 李育超\*

(浙江大学 岩土工程研究所 / 超重力研究中心, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 环境溶液中含盐量的增加可造成细粒土含量较高的土体不可忽略的沉降变形。本文采用砂-膨润土混合土作为试验材料, CaCl<sub>2</sub> 作为试验溶液, 发现随着孔隙液浓度从 0 mM 增加至 1 000 mM, 土样渗透系数上升逾 10 倍, 体积压缩系数下降 65%~71%。通过高浓度溶液渗透对土样进行化学固结, 由此造成的土样体积应变最高达 20%。提出了化学体积压缩系数的概念, 并将其引入考虑了化学-力学耦合作用的固结方程中, 根据模拟结果对高盐溶液侵蚀下砂-膨润土的固结行为进行了机理分析: 当污染物向土样内部迁移, 土样出现体积收缩趋势, 超静孔压逐渐增大, 而后超静孔压随着排水固结消散, 土样发生压缩变形。

**关键词:** 膨润土; 压缩; 渗透; 固结; 化学固结; 化学-力学耦合

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)03-0181-09

## Study on chemical consolidation behavior of sand-bentonite mixed soil under saline solution erosion

ZHANG Si-yu, YAN Zi-zhuang, CHEN Yun-min, LI Yu-chao\*

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University/

Center for Hypergravity Experimental and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

**Abstract:** For the soil body with high soil fines content, the increase of salt content in environment solution will cause the settlement deformation which cannot be ignored. In this paper, sand-bentonite mixed soil was used as the experimental material, and CaCl<sub>2</sub> solutions were prepared for laboratory tests. It was found that with the increase of pore fluid ionic concentration from 0 mM to 1 000 mM, the hydraulic conductivity of soil increased more than 10 times and the volumetric compressibility coefficient decreased by a percentage of 65 to 71. The soil samples were chemically consolidated through osmosis of high concentration solution, and it was found that the resulting maximum volume strain of soil reached 20%. The concept of chemical volumetric compressibility coefficient was proposed and introduced into the consolidation equation which considered the chemo-mechanical coupled effect. According to the simulation results, the mechanism of sand-bentonite consolidation behavior under high salt solution erosion was analyzed. It was found that with the migration of pollutants into the soil sample, the excess pore pressure increases gradually due to the volume shrinkage trend of the soil sample. Then, the excess pore pressure dissipates with the drainage consolidation, resulting in compression deformation of the soil sample.

**Key words:** bentonite; compressibility; osmosis; consolidation; chemical consolidation; chemo-mechanical coupled

## 0 引言

由于膨润土具有良好的膨胀性及防渗性, 常作

为重要的屏障材料广泛应用于各类固废填埋场及放射性废物深地处置库中<sup>[1-2]</sup>。此外, 全国多地的天然软土地基中也存在着较高的膨润土含量。然而,

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077241)。

作者简介: 张斯妤(1997—), 女, 上海人, 硕士研究生, 主要从事土与化学物质相互作用的研究工作。E-mail: 21912015@zju.edu.cn。

\*通讯作者: 李育超(1978—), 男, 浙江嘉兴人, 博士, 教授。主要从事地下防污屏障、土与化学物质相互作用的研究工作。

E-mail: liyuchao@zju.edu.cn。

污染场地中存在的大量重金属离子及沿海地区水体中的高含盐量,均增加了水土环境的复杂度。随着高浓度盐溶液向土体内部的逐渐侵蚀,土体渗透性、压缩性、强度等将发生变化,这些变化对工程设计及施工的影响不可忽视<sup>[3-5]</sup>。

土体沉降变形是工程界关注的重要问题,影响到周围建(构)筑物的质量及寿命<sup>[6]</sup>。膨润土是高压缩性细粒黏土,受到压缩后将产生不可忽略的沉降变形,进而影响周围结构的强度及稳定性<sup>[7]</sup>。MISHRA等<sup>[8]</sup>观察了不同浓度的NaCl和CaCl<sub>2</sub>对土-膨润土混合土压缩性的影响,结果表明其压缩性随孔隙液中盐浓度的增加而降低,SHARIATMADARI等<sup>[9]</sup>使用NaCl、CaCl<sub>2</sub>和MgCl<sub>2</sub>作为土-膨润土的孔隙液,发现土的压缩指数随盐浓度的增加而降低,与MISHRA的结论相互印证。张彤炜等<sup>[10]</sup>研究了膨润土-高岭土混合土压缩指数及回弹指数与孔隙液盐浓度的关系,并采用指数函数对其进行了良好的拟合。

目前大部分研究通过直接配制不同浓度孔隙液的土样来测试膨润土孔隙液浓度变化后土样的压缩性<sup>[7-11]</sup>,对膨润土受到外部高盐溶液侵蚀后的固结过程研究较少<sup>[12]</sup>。然而,实际工程中孔隙液性质的变化正是源于外部高盐环境向内的逐步侵蚀,因此针对渗透行为导致的土样固结进行深入研究相当必要。

本文首先通过一维固结试验研究不同浓度孔隙液土样压缩性及渗透性的变化规律,接着将力学固结压缩稳定后的土样浸没于高浓度溶液中,模拟外部高盐溶液侵入土样后造成的化学固结压缩现象,并提出能够表征这一作用下土样变形程度的试验参数。基于此两项试验中的参数定义,改进了考虑化学-力学相互作用的一维固结偏微分方程,并根据土中孔压与孔隙液浓度的演化趋势对固结过程进行机理分析,为后续高盐溶液侵蚀造成的土体沉降相关研究提供数据支持及理论依据。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验土样及溶液

试验土样由膨润土与砂土按1:1的质量比混合而成。膨润土产自美国怀俄明,其中蒙脱石含量71.4%,颗粒比重2.56,天然含水量12.6%,液限267.0%,塑限24.8%,阳离子交换总量76.37 cmol/kg。砂土产自福建,99.9%的颗粒粒径在0.1~0.25 mm之间,不均匀系数 $C_u=1.735$ ,曲率系数 $C_c=0.951$ ,属于级配不良细砂。

前人研究发现,孔隙液中阳离子化合价越高,砂-膨润土混合土的渗透性及压缩性越大<sup>[8,13]</sup>,为获得更为显著直观的试验现象,本文采用CaCl<sub>2</sub>作为试验溶液。

制样采用分层填土的方式,将水化24 h后的混合土均匀填入环刀内,并用调土刀整平土样。砂-膨润土混合土的初始含水率为其液限的1.2倍,当孔隙液为去离子水(0 mM CaCl<sub>2</sub>)时,混合土初始含水率为186.35%,随着孔隙液CaCl<sub>2</sub>浓度增加至1 000 mM,混合土的初始含水率降低至54.3%。

### 1.2 试验方法

共进行两项试验。第一项试验采用浓度为0~1 000 mM的CaCl<sub>2</sub>溶液作为孔隙液配制混合土,进行一维固结试验,研究混合土的压缩性及渗透性与孔隙液浓度的关系,具体步骤参考《土工试验方法标准》<sup>[14]</sup>。第二项试验采用0、25、100 mM CaCl<sub>2</sub>作为孔隙液配置混合土样,分别在12.5 kPa、25 kPa、50 kPa三种固结压力下固结稳定后,将周围溶液替换成25、100、1 000 mM的CaCl<sub>2</sub>溶液(见表1),研究外部高浓度溶液侵入试样内部的过程中试样发生的体积压缩现象。试验过程中,当试样每24 h的应变 $\Delta\epsilon \leq 1\%$ 时,则判定其变形稳定。为了保证渗透溶液的化学性质稳定,两项试验中周围溶液均每隔48 h更新1次。

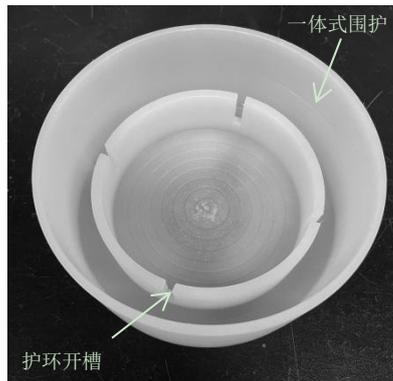
表1 高浓度周围溶液浸没土样试验条件汇总

Table 1 Summary of test conditions for high concentration solution immersed soil samples

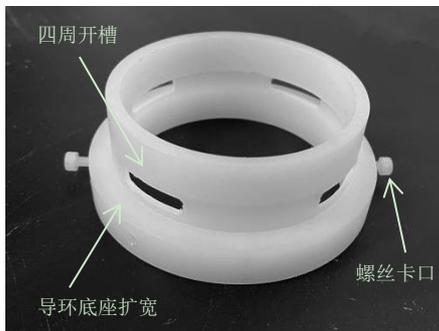
试验溶液/mM	固结压力 $p$ /kPa		
	12.5	25	50
初始孔隙 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 0 周围侵入 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 25	BS1-1	BS2-1	BS3-1
初始孔隙 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 25 周围侵入 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 100	BS1-2	BS2-2	BS3-2
初始孔隙 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 100 周围侵入 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 1 000	BS1-3	BS2-3	BS3-3

### 1.3 试验仪器

试验中采用的固结仪分为加压装置及固结容器两部分,其中加压装置产自南京土壤仪器厂,通过它可对试样施加不同大小的竖向荷载,而固结容器则起到维持试样饱和度的作用,并且通过改变其中储存的溶液浓度,可模拟不同工况下的周围溶液。由于溶液中较高的盐含量易使金属制品腐蚀,剥落下来的金属离子将改变周围溶液的性质,影响试样的孔隙液成分而造成试验误差。为消除这一影响,设计加工了一套新的固结容器,如图1所示。



(a) 一体式围护储水盒



(b) 导环

图1 尼龙材料固结容器示意图

Fig. 1 Consolidation container made of nylon material

新固结容器采用了防腐蚀、高承载力、小变形、易加工的尼龙材料<sup>[15]</sup>,并基于材料性质及功能目标主要进行了三点改进:(1)固结容器的护环与储水盒连成一体,解决了尼龙密度过小易浮起的问题;(2)导环底部半径扩大,与护环内径适配,并通过导环四周安装的尼龙螺丝与护环部分的凹槽锁紧,限制环刀及试样的水平及竖向位移;(3)护环及导环四周均匀开槽,使容器内部各区域中溶液流通。

试样安装时,首先在储水盒中放入大透水石及薄滤纸,随后装入环刀,最后将导环的螺丝与储水盒中的护环卡口匹配并拧紧固定。待试样上方依次放置薄滤纸、小透水石及加压盖板后,开始试验。

## 2 试验结果

### 2.1 不同浓度孔隙液土样的压缩性及渗透性

土样的压缩性可通过体积压缩系数  $m_v$  来评价,表示侧限条件下土受到单位压应力而产生的体积应变。

将体积压缩系数  $m_v$  随有效应力  $\sigma'$  的变化关系绘制在双对数坐标中(见图2)。有效应力为 12.5 kPa 时, 0 mM  $\text{CaCl}_2$  制成的混合土体积压缩系数为  $6.86 \times 10^{-3}$  1/kPa, 而 1 000 mM  $\text{CaCl}_2$  制成的混合土体积压缩系数为  $2.41 \times 10^{-3}$  1/kPa。有效应力为 400 kPa 时, 0 mM  $\text{CaCl}_2$  制成的混合土体积压缩系数为  $5.42 \times 10^{-4}$  1/kPa, 而 1 000 mM  $\text{CaCl}_2$  制成的混合土体积压缩系数为  $1.55 \times 10^{-4}$  1/kPa。随着有效应力从 12.5 kPa 增至 400 kPa, 土样的体积压缩系数下降了一个数量级。此外,相同有效应力下,随着孔隙液  $\text{CaCl}_2$  浓度从 0 mM 增加至 1 000 mM, 土样的体积压缩系数下降 65%~71%。孔隙液浓度的增加将导致土样压缩性降低,这一现象与 DUTTA 和 MISHRA<sup>[16]</sup> 发现的膨润土压缩性与孔隙液浓度变化规律一致。

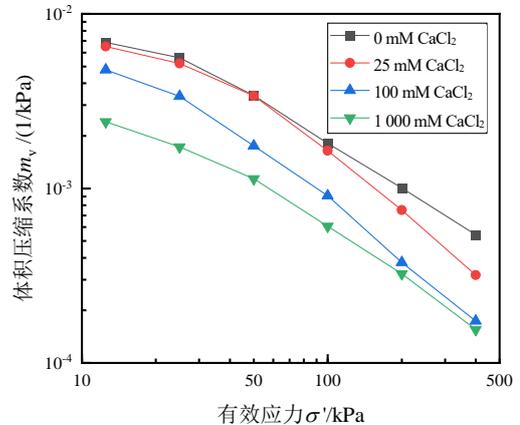


图2 一维固结试验中各土样体积压缩系数与有效应力关系  
Fig. 2 Relationship between volumetric compressibility and effective stress of soil samples in one-dimensional consolidation test

渗透性可通过渗透系数进行评估,渗透系数  $k_v$  根据式(1)求得<sup>[17]</sup>:

$$k_v = C_v m_v \gamma_f \tag{1}$$

式中:  $m_v$  为试样的体积压缩系数, 1/kPa;  $\gamma_f$  为孔隙液容重,  $\text{kN/m}^3$ ;  $C_v$  为固结系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ , 根据时间平方根法<sup>[14]</sup>, 其求取公式如下:

$$C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}} \tag{2}$$

式中： $H$  为土样高度的一半， $m$ ； $t_{90}$  为土样固结度达 90% 所经历的时间， $s$ 。

土样渗透系数与有效应力的关系见图 3。渗透系数随着有效应力增大而降低，与 12.5 kPa 有效应力下的试样相比，有效应力为 400 kPa 时，试样的渗透系数下降了 2 个数量级。0~25 mM 范围内，孔隙液  $\text{CaCl}_2$  浓度的改变对渗透系数无显著影响，25~1 000 mM 范围内，试样渗透系数随着孔隙液  $\text{CaCl}_2$  浓度的增大而显著增加。相同有效应力下，25 mM  $\text{CaCl}_2$  与 0 mM  $\text{CaCl}_2$  制成的混合土渗透系数比值在 1.0~1.7 范围内，而 1 000 mM  $\text{CaCl}_2$  制成的混合土渗透系数则比 25 mM  $\text{CaCl}_2$  制成的混合土渗透系数大 11~23 倍。

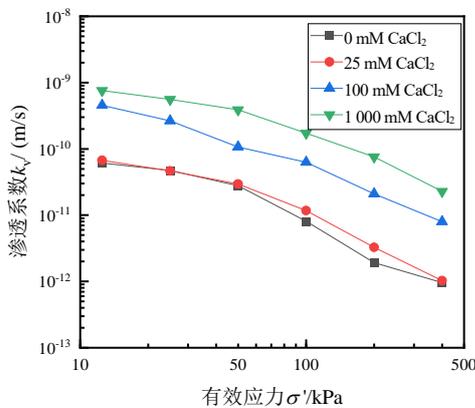


图 3 一维固结试验中各土样渗透系数与有效应力关系曲线  
Fig. 3 Relationship between hydraulic conductivity and effective stress of soil samples in one-dimensional consolidation test

## 2.2 外部盐溶液侵蚀后土样的体积变形

对低浓度孔隙液的土样逐级施加外荷，然后保持固结压力不变，将其浸没于周围高浓度溶液中，观察到土样体积随着时间逐渐减小的现象，这种由化学溶液侵入土体内部而造成的土体体积变化现象称为化学固结。体积应变与时间的关系曲线如图 4 所示，图中曲线终点对应试样 24 h 的应变量  $\Delta \epsilon \leq 1\%$ 。对于孔隙液化学性质相同的混合土而言，在 3 种不同的固结压力下，土样的体积应变-时间曲线呈相同的形状，且固结完成的时间几乎一致。25 mM  $\text{CaCl}_2$  溶液侵入孔隙液为 0 mM  $\text{CaCl}_2$  的试样后约 50 000 min 完成固结，100 mM  $\text{CaCl}_2$  溶液侵入孔隙液为 25 mM  $\text{CaCl}_2$  的试样后约 17 000 min 完成固结，1 000 mM  $\text{CaCl}_2$  溶液侵入孔隙液为 100 mM  $\text{CaCl}_2$  的试样后约 16 000 min 完成固结。

在 12.5、25、50 kPa 这 3 种不同的固结压力下，溶液渗透导致的土样体积应变无明显规律。孔隙液为

0 mM  $\text{CaCl}_2$  的混合土受到 25 mM  $\text{CaCl}_2$  溶液侵入（浓度梯度 25 mM）后，在上述固结压力下的体积应变分别为 20%、22%、20%；孔隙液为 25 mM  $\text{CaCl}_2$  的混合土受到 100 mM  $\text{CaCl}_2$  溶液侵入（浓度梯度 75 mM）后，在上述固结压力下的体积应变分别为 11%、11%、9%；孔隙液为 100 mM  $\text{CaCl}_2$  的混合土受到 1 000 mM  $\text{CaCl}_2$  溶液侵入（浓度梯度 900 mM）后，在上述固结压力下的体积应变分别为 0.9%、0.7%、0.7%。3 种浓度条件下土样体积应变有显著差异，与低浓度孔隙液土样相比，向高浓度孔隙液土样施加的浓度梯度更高，体积应变反而更小，可见土样的初始孔隙液浓度对溶液侵蚀造成的土样压缩现象起重要作用，工程实际中，需要重点关注低浓度孔隙液软土地基受到的高盐侵蚀现象。

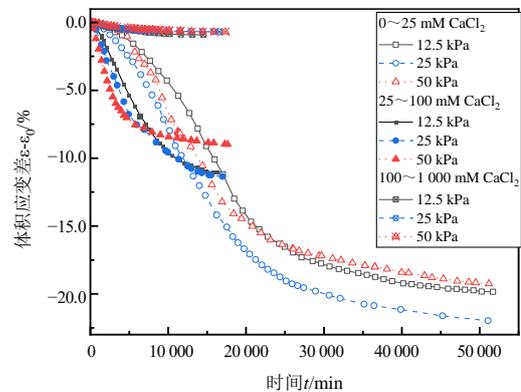


图 4 溶液侵入时试样的体积应变变化随时间的关系曲线  
Fig. 4 Volumetric strain change with time after high concentration solution intrusion

参考传统压缩试验中体积压缩系数  $m_v$  的定义，土样在浓度梯度作用下发生体积压缩，这种压缩性可用化学体积压缩系数  $m_c$  表征，其定义为单位孔隙液浓度增量导致的土样体积应变减少量，即：

$$m_{ci} = -\frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta c} = \frac{\frac{e_{i+1} - e_i}{(1+e_i)}}{(c_{i+1} - c_i)} = \frac{e_i - e_{i+1}}{(c_{i+1} - c_i)(1+e_i)} \quad (3)$$

式中： $\Delta c$  表示孔隙液浓度变化量； $\Delta \epsilon_v$  表示土样体积应变变化； $e_i$  与  $c_i$  表示试样初始孔隙比及初始孔隙液浓度； $e_{i+1}$  与  $c_{i+1}$  表示试样最终孔隙比及最终孔隙液浓度。

不同试验条件下试样的化学体积压缩系数见表 2。随着孔隙液中阳离子浓度的增加，试样的化学体积压缩系数呈指数级下降。各级固结压力下，试样的化学体积压缩系数在 0~25 mM  $\text{CaCl}_2$  浓度差渗透作用下为  $8.3 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$  1/mM；在 25~100 mM  $\text{CaCl}_2$  化学浓度差渗透作用下为  $1.5 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-3}$  1/mM；在 100~1 000 mM  $\text{CaCl}_2$

化学浓度差渗透作用下为  $8.4 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-5}$  1/mM, 比低浓度渗透的情况低 3 个数量级。与之相比, 不

同固结压力造成的试样化学体积压缩系数差异可以忽略。

表 2 高浓度溶液侵入后试样的化学体积压缩系数  $m_c$ /(1/mM)

Table 2 Chemical coefficient of volumetric compressibility after high concentration solution intrusion

试验溶液/mM	固结压力 $p$ /kPa		
	12.5	25	50
初始孔隙 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 0 周围侵入 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 25	$8.3 \times 10^{-3}$	$9.8 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-2}$
初始孔隙 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 25 周围侵入 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 100	$1.5 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$
初始孔隙 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 100 周围侵入 CaCl <sub>2</sub> 溶液: 1 000	$1.04 \times 10^{-5}$	$8.4 \times 10^{-6}$	$9.3 \times 10^{-6}$

### 3 数值模拟与机理分析

传统的 TERZAGHI 一维固结理论<sup>[18]</sup> 仅阐述了土颗粒间的力学关系, 并未将溶质运移产生的土与溶液间的化学相互作用考虑进来, 然而对于蒙脱土这种具有扩散双电层结构的土而言, 这种相互作用不可忽略<sup>[19]</sup>。GREENBERG 等<sup>[20]</sup> 最早考虑了土体固结过程中的物理-化学耦合问题, BARBOUR 和 FREDLUND<sup>[21]</sup> 在此基础上建立了考虑化学间相互作用的本构方程, 其中单元体应变变化由力学作用和化学渗透两种机制共同导致, 化学渗透的作用通过渗透压来表征。然而渗透压是一种间接量, 无法通过试验直接获得。

本文引入化学体积压缩系数  $m_c$ , 直接表征化学渗透的作用, 将固体力学关系与对流-弥散关系联合, 得到以下一维固结偏微分方程:

$$-\frac{k_v}{\gamma_f} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{k_c}{\gamma_f} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = -m_v \frac{\partial u}{\partial t} + m_c \frac{\partial c}{\partial t} \quad (4)$$

$$nD_h \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v \frac{\partial c}{\partial z} = n \frac{\partial c}{\partial t}$$

式中:  $u$  为超孔隙;  $c$  为孔隙液浓度;  $z$  为沿土样竖向的深度;  $v$  为渗流平均速度, 按下式计算:

$$v = -\frac{k_v}{\gamma_f} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{k_c}{\gamma_f} \frac{\partial c}{\partial z} \quad (5)$$

各参数定义见表 3, 其中  $n$ 、 $m_v$ 、 $m_c$ 、 $k_v$  取试验实测值。BARBOUR 和 FREDLUND<sup>[21]</sup> 将渗透固结与渗透诱导固结解耦, 通过模拟结果发现渗透诱导固结对土样体积变化的影响可忽略不计, 因此本文将代表渗透诱导固结的反渗系数  $k_c$  取为 0。

表 3 偏微分方程中各参数定义

Table 3 Parameter definitions in partial differential equations

变量名	单位	描述	取值
$n$	—	孔隙率	
$m_v$	1/Pa	体积压缩系数	试验数据
$m_c$	1/mM	化学体积压缩系数	
$k_v$	m/s	渗透系数	
$k_c$	kg·m <sup>3</sup> /(s <sup>3</sup> ·mol)	反渗系数	0
$D_h$	m <sup>2</sup> /s	水动力弥散系数	$5 \times 10^{-10}$
$g$	m <sup>2</sup> /s	重力加速度	9.8
$\gamma_f$	N/m <sup>3</sup>	孔隙液容重	$1 \times 10^4$

模型的初始条件及边界条件见图 5, 土样顶部坐标为 0, 底部坐标等于土样高度  $H$ , 初始孔压为 0, 初始孔隙液浓度定义为  $c_0$ , 由于上下边界均透水, 因此边界孔压为 0, 而边界孔隙液浓度分别等于上下表面接触溶液浓度  $c_1$ 、 $c_2$  (本试验中  $c_1=c_2$ )。

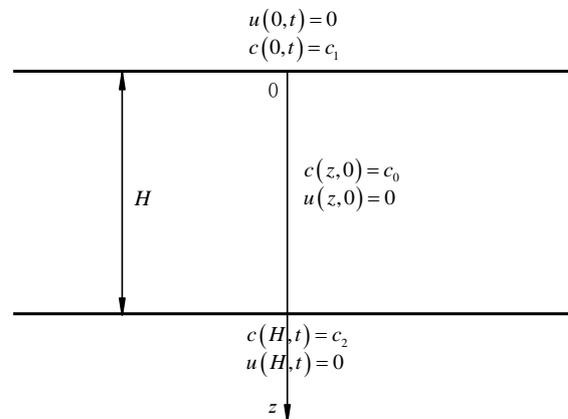


图 5 数值模型的初始条件及边界条件

Fig. 5 Initial and boundary conditions of numerical model

基于 py-pde 模块, 使用 Python 语言对该方程进行数值模拟, 得到土样内部各处孔隙液浓度  $c$  与孔压  $u$  随时间的变化关系, 代入式 (6) 后, 可得到土样高度变化量随时间的关系:

$$S = \int_0^H \varepsilon_z dH = \int_0^H (m_v \Delta u - m_c \Delta c) dH \quad (6)$$

图 6 展示了 12.5 kPa 固结压力下土样高度变化量随时间的发展曲线, 数值模拟与试验观察得到的固结过程有较高的一致性, 差异主要体现在试验土样受到化学渗透的初期。在初期的固结过程中, 土样孔隙比随时间缓慢减小, 固结速率逐渐加快。从微观进行解释, 由于低浓度孔隙液的土样具有较大的渗透压缩性<sup>[21]</sup>, 土颗粒表面的扩散双电层与高浓度溶液接触后, 双电层厚度将大幅减小, 然而该变化存在一定的弛豫时间<sup>[22]</sup>, 这一影响因素未被纳入固结方程的考虑范围。当孔隙液浓度越高, 扩散双电层的厚度越小, 此时弛豫时间也越短, 因此拟合的准确性越高。此外, 低孔隙液浓度的土颗粒对阳离子有吸附作用及交换作用<sup>[23]</sup>, 导致瞬时状态下孔隙液中的实际离子浓度低于理论值, 而理论模型中并未考虑这部分由于吸附/交换所造成的迁移延迟现象, 因此低浓度孔隙液土样中, 离子在黏土中的实际扩散速度低于理论值。

据式 (6) 可知, 土样的固结受孔压及孔隙液浓度共同控制。以 100 mM CaCl<sub>2</sub> 侵入 25 mM CaCl<sub>2</sub> 土样的情况为例, 通过数值模拟得到的土中孔隙液浓度分布随时间的变化关系如图 7 所示, 孔压分布随时间的变化关系如图 8 所示, 孔压及孔隙液浓度各自引起的变形量随时间发展曲线如图 9 所示。土样的固结行为受渗透性与压缩性两个工程特性控制, 暴露在高浓度溶液中时, 由于渗透性及压缩性的改变, 土样体积将发生变化, 现结合图 7、图 8 中孔压与孔隙液浓度的分布趋势变化对这一固结行为

进行机理分析。

化学渗透开始前, 土中孔隙液的浓度为初始浓度, 渗透系数较低, 随着时间的推移, 溶液从上下两侧渗透侵入土体, 最外层的土颗粒首先与高浓度溶液接触, 孔隙液浓度上升, 孔隙液浓度分布图呈 U 形分布, 随着时间的发展, 高浓度溶液逐渐自外向内层低浓度部分渗透, 直至遍布整个土样, 达到内外溶液浓度的平衡。

MITCHELL 等<sup>[7]</sup> 提出, 对于黏土而言, 土粒的双电层厚度是影响其持水性能的重要因素。根据 DLVO 理论<sup>[24]</sup>, 土粒间的静电斥力随着孔隙液浓度的增加而降低。在高浓度溶液向内渗透的过程中, 由于土粒中孔隙液浓度的增加, 双电层厚度减小, 静电斥力减小, 从而土样产生体积压缩趋势, 由于孔隙液无法及时排出, 产生正孔压。双电层变化产生的应力与孔隙液浓度的变化密切相关, 在化学渗透初期, 外层的孔隙液浓度发生明显变化, 因此这部分土样受到较大的应力, 而内层土样由于外部溶液尚未侵入因而孔隙液浓度仍保持初始浓度, 因此这部分土样不会由于双电层变化而产生应力。同时, 孔隙压力的消散与距离自由面的远近相关, 外层土样中的溶液排水路径较短, 因此这部分孔压消散得较快, 土中孔压较小, 而距离土样表面较远位置处的溶液将产生较高的孔压。

因此在溶液渗透初期, 土样中孔压分布呈双峰, 随着溶液逐渐侵入土体中心, 内层土样接触到高浓度溶液, 并且由于较高的浓度差而产生净斥力变化, 孔压增大, 孔压曲线逐渐过渡成单峰, 这部分孔压随着孔隙液从土样表面排出而消散, 最终趋向于 0。由于土样为饱和土, 其体积变化量与孔隙液的排出量相同, 因此这一过程中, 由于土样渗透及压缩的共同作用, 土样在外部高浓度溶液的侵蚀下体积随着时间减小, 发生固结现象。

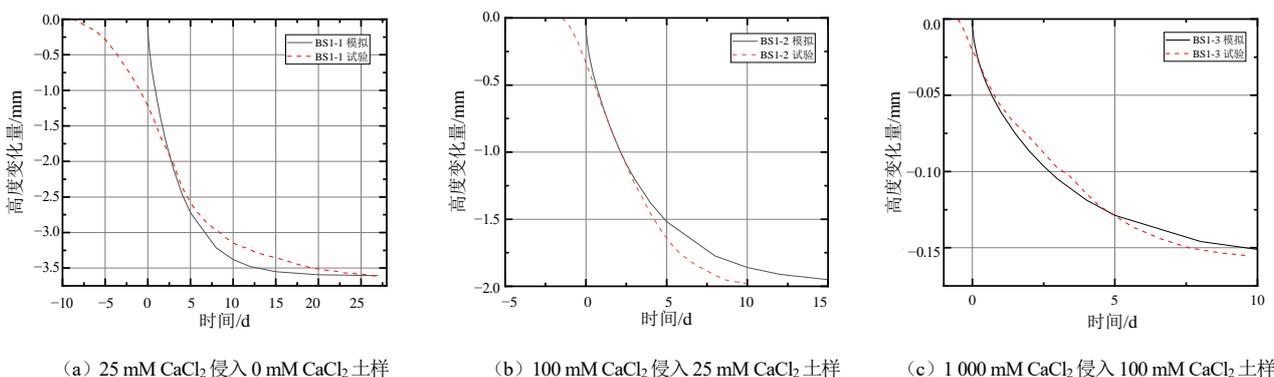


图 6 12.5 kPa 固结压力下受到高浓度溶液侵蚀后土样的高度变化量随时间的发展曲线

Fig. 6 Height variation of soil samples eroded by high concentration solution with time under 12.5 kPa consolidation pressure

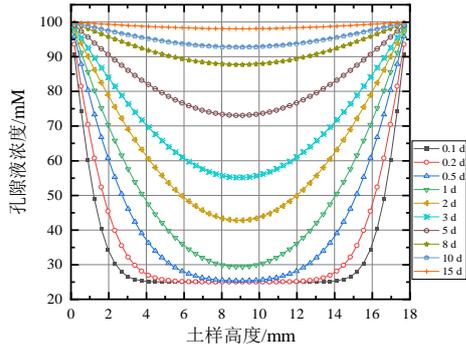


图7 BS1-2 土样中孔隙液浓度分布随时间的变化

Fig. 7 Distribution of pore fluid concentration with time in soil sample BS1-2

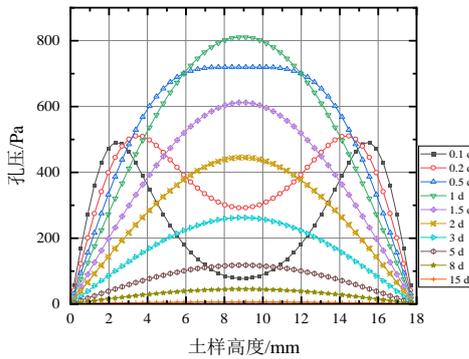


图8 BS1-2 土样中孔压分布随时间的变化

Fig. 8 Distribution of pore water pressure with time in soil sample BS1-2

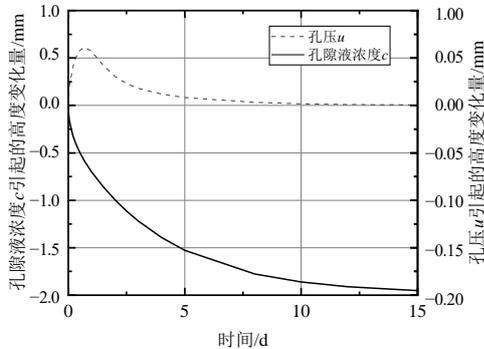


图9 孔压与孔隙液浓度各自引起的BS1-2土样固结曲线  
Fig. 9 Consolidation curves of soil sample BS1-2 caused by pore solution concentration and pore water pressure respectively

传统的一维固结理论中,土粒受到外部荷载后相互挤压,从而土体内部产生正孔压,随着土体内部的水向外排出,孔压逐渐消散至0<sup>[25]</sup>。而化学固结中孔压则呈现先增后减的趋势,这主要是由于污染物的迁移与孔压的产生及消散相互耦合造成的。如上文的分析所述,土中某处孔隙液浓度的增加将导致土粒间相互靠近,从而产生正孔压,然而这种浓度增加产生的孔压并不是瞬时产生的,而是随着污染物的迁移逐步产生,同时在这一过程中,随着

孔隙液被排出土样,孔压消散。因此,化学固结中孔压的产生及消散同时发生,与污染物迁移相互耦合,化学固结前期以孔压产生为主,而随着溶液的侵入,孔压的消散开始占主导地位。

分析图9中的土样变形量发展曲线可以发现,由孔隙液浓度造成的体积变形主导着土样的总体积变形,而孔压造成的那部分体积变形仅在固结初期产生作用,随着孔压的消散,最终土样的变形量仅由孔隙液浓度项控制。由此可知,当施加在土样上的浓度梯度相同时,化学体积压缩系数控制了土样的最终压缩量。

根据本文结论可知,在实际的设计及施工过程中,若膨润土含量较高的土体周围存在高盐环境,需特别关注溶液向内侵蚀造成的地基沉降风险,其中化学体积压缩系数为其最终沉降量的重要影响参数。

### 4 结论

本文针对膨润土在盐溶液侵蚀后发生的体积变形现象,采用CaCl<sub>2</sub>溶液开展了砂-膨润土混合土固结压缩试验,并通过数值模型研究了高盐渗透后土体固结的内在机理。主要结论如下:

(1) 随着孔隙液CaCl<sub>2</sub>浓度从0 mM增加至1 000 mM,相同有效应力下,混合土的体积压缩系数下降65%~71%。0~25 mM范围内,浓度改变对混合土渗透系数无显著影响,而随着浓度从25 mM增至1 000 mM,相同有效应力下,混合土渗透系数增大11~23倍。

(2) 分别用25 mM、100 mM、1 000 mM CaCl<sub>2</sub>溶液侵入由0 mM、25 mM、100 mM CaCl<sub>2</sub>制备的混合土,固结完成的时间分别约为50 000 min、17 000 min、16 000 min,产生的体积应变分别为20%、10%、1%左右。提出了化学体积压缩系数的概念,发现不同试验条件下该值相差3个数量级。

(3) 基于上述两项试验中测得的参数定义,改进了考虑化学-力学耦合作用的一维固结偏微分方程。根据模拟得到土样孔压与孔隙液浓度分布趋势随时间的变化,解释了高盐渗透后土样的固结行为机理:初期随着污染物进入土内部,土样出现体积收缩趋势,超静孔压增大,而后超静孔压随着排水固结消散,土样发生压缩变形。

### 参考文献

[1] 范日东,杜延军,陈左波,等. 受铅污染的土-膨润土

- 竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 841-848.
- FAN Ri-dong, DU Yan-jun, CHEN Zuo-bo, et al. Compressibility and permeability characteristics of lead contaminated soil-bentonite vertical cutoff wall backfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 841-848.
- [2] ZHANG L, SUN D A, JIA D. Shear strength of GMZ07 bentonite and its mixture with sand saturated with saline solution[J]. Applied Clay Science, 2016, 132: 24-32.
- [3] SHACKELFORD C D, SAMPLE-LORD K M. Hydraulic conductivity and compatibility of bentonite for hydraulic containment barriers[C]//From Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering: Honoring Roy E. Olson, 2014: 370-387.
- [4] RAY S, MISHRA A K, KALAMDHAD A. Influence of various concentration of lead on consolidation parameters of bentonite[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2019(6): 1-7.
- [5] DENG Y F, ZHANG T W, CUI Y J, et al. Pore water salinity effect on the intrinsic compression behaviour of artificial soft soils[J]. Applied Clay Science, 2018, 166: 299-306.
- [6] 张振海. 建筑物地基沉降的规律与特征分析——基于多个著名建筑物与城市地面出现的沉降为案例[J]. 地基处理, 2021, 3(5): 402-408.
- ZHANG Zhen-hai. Analysis on law and characteristic of building foundation settlement-based on the settlements of several famous buildings and urban land as cases[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(5): 402-408.
- [7] MITCHELL J, SOGA K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. 3rd Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [8] MISHRA A K, OHTSUBO M, LI L Y, et al. Controlling factors of the swelling of various bentonites and their correlations with the hydraulic conductivity of soil-bentonite mixtures[J]. Applied Clay Science, 2011, 52: 78-84.
- [9] SHARIATMADARI N, SALAMI M, KARIMPOUR M F. Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil bentonite mixtures as barriers[J]. International Journal of Civil Engineering, 2011, 9(2): 103-110.
- [10] 张彤炜, 邓永锋, 吴子龙, 等. 考虑孔隙水盐分效应的人工软黏土工程特性与本构模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1690-1697.
- ZHANG Tong-wei, DENG Yong-feng, WU Zi-long, et al. Engineering behavior and constitutive model of artificial soft clay considering pore water salinity effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1690-1697.
- [11] 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 Rong-tao, ZHAO Xu-yue, YU Ming-bo, et al. Isotropic compression characteristics of clayey soil saturated by salty solution[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 129-138.
- [12] DI M C. Exposure of bentonite to salt solution: Osmotic and mechanical effects[J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 695-707.
- [13] SHARIATMADARI N, SALAMI M. Effect of salt solutions found in landfill leachate on some properties of soil-bentonite mixtures as liners[C]//Proceedings of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics, New Delhi, India, 2010.
- [14] 国家市场监督管理总局, 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- State administration for market regulation, ministry of housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [15] 黄丽, 吕亚非, 田明. 高分子材料[M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- HUANG Li, LV Ya-fei, TIAN Ming. Polymer Materials[M]. 2nd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [16] DUTTA J, MISHRA A K. Consolidation behaviour of bentonites in the presence of salt solutions[J]. Applied Clay Science, 2016, 120: 61-69.
- [17] 李广信. 土力学[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- LI Guang-xin. Soil Mechanics[M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [18] TERZAGHI K. Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage[M]. Wien: Fanz Deuticke, 1925.
- [19] SMITH D W. One-dimensional contaminant transport

- through a deforming porous medium: Theory and a solution for a quasi-steady-state problem[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, 24(8): 693–722.
- [20] GREENBERG J A, MITCHELL J K, WITHERSPOON P A. Coupled salt and water flows in a groundwater basin[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(27): 6341–6353.
- [21] BARBOUR S L, FREDLUND D G. Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26(4): 551–562.
- [22] SANTAMARINA J C, FAM M. Changes in dielectric permittivity and shear wave velocity during concentration diffusion[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(32): 647–659.
- [23] SHACKELFORD C D, DANIEL D E. Diffusion in saturated soil I: Background[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117(3): 467–484.
- [24] SWARTZEN-ALLEN S L, MATIJEVIC E. Surface and colloid chemistry of clays[J]. *Chemical Reviews*, 1974, 74(3): 385–400.
- [25] 陈敬虞, 龚晓南, 邓亚虹. 软黏土层一维有限应变固结的超静孔压消散研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 191–195.
- CHEN Jing-yu, GONG Xiao-nan, DENG Ya-hong. Research on dissipation of excess pore water pressure in one-dimensional finite strain consolidation of soft clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 191–195.

## 关于举办优秀论文评选的通知

为提高《地基处理》期刊的学术水平和论文质量,鼓励和培育优秀作者,本刊自2022年1月开始开展优秀论文评选活动,评选活动每两年一次,对评选出的优秀论文将给予表彰,现将首次优秀论文评选的有关事项通知如下:

### 一、评选范围

2022—2023年在《地基处理》期刊上刊发的论文。

### 二、评选程序

参考科学计量指标定量(引用量、下载量等),经专家推选,由《地基处理》编辑委员会评选优秀论文10篇。评选结果在地基处理网站上进行公示,并在2024年第十八届全国地基处理学术讨论会上颁发证书和奖金。

《地基处理》编辑部  
2022年1月12日