

DOI: 10.11779/CJGE202001016

饱和盐渍土的一维蠕变试验与模型研究

周凤玺^{1, 2}, 王立业¹, 赖远明²

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 饱和盐渍土中土颗粒和孔隙盐溶液间相互的物理化学作用对土体的力学行为有较强的影响, 使得盐渍土表现出不同的变形特性。为了能够准确地描述饱和盐渍土的这种相互作用, 首先采用常规固结试验和恒载蠕变试验对通过蒸馏水、硫酸钠溶液和氯化钠溶液饱和后的重塑土样进行了试验研究。试验结果显示: 盐渍土和非盐渍土的固结蠕变存在明显差异, 此类现象会随着含盐量的增加而更加明显; 而同含盐量的硫酸盐渍土和氯盐渍土的固结蠕变效应也不尽相同。其次, 基于 Yin-Graham 一维蠕变方程, 利用 Pitzer 离子相互作用模型和 Van't Hoff 渗透吸力方程, 通过引入有效渗透应力, 建立了饱和盐渍土的一维蠕变理论模型。最后, 将改进的理论模型与试验数据进行了对比分析。结果表明, 所提出的理论模型不仅能够描述饱和盐渍土中化学力学耦合, 而且可以有效地预测一维蠕变行为。

关键词: 硫酸盐渍土; 氯盐渍土; 蠕变试验; 渗透吸力; Yin-Graham 模型

中图分类号: TU411; TU488 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)01-0142-08

作者简介: 周凤玺(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: geolut@163.com。

One-dimensional creep tests and model studies on saturated saline soil

ZHOU Feng-xi^{1,2}, WANG Li-ye¹, LAI Yuan-ming²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil

Engineering, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The physical and chemical interaction between soil particles and pore salt solutions in saturated saline soils has a strong influence on the mechanical behavior of soils, which makes the saline soils exhibit different deformation characteristics. In order to accurately describe this interaction of saturated saline soil, the experimental studies on the remolded specimens saturated with distilled water, sodium sulfate solution and sodium chloride solution are carried out by the conventional oedometer tests and constant load creep tests. The test results show that there is a significant difference in the consolidation creep between saline soils and non-saline soils. This phenomenon is more obvious with the increase of salt content. The consolidation creep effect of sulphate soils and chloride soils with the same salt content is different. Secondly, based on the Yin-Graham one-dimensional creep equation, a one-dimensional creep theoretical model for saturated saline soils is established by using the Pitzer ion interaction model and the van't Hoff osmotic suction equation and introducing the effective osmotic stress. Finally, the improved theoretical model and experimental data are compared and analyzed. The results show that the proposed theoretical model can describe the chemical-mechanical coupling in saturated saline soils and effectively predict the one-dimensional creep behavior.

Key words: sulfate saline soil; chloride saline soil; creep test; osmotic suction; Yin-Graham model

0 引言

近年来, 由于地下水、盐的迁移和全球气温升高等物理现象改变了土体的蠕变机理。使土体在地基处理、水利工程和道路桥梁工程中会出现不稳定的非均匀沉降, 从而对工程建设和使用防护产生了一系列的影响^[1-3]。

目前, 对不含盐土体蠕变模型的研究已经较为成熟。现有的理论模型主要以经验模型、元件模型和弹-黏塑性模型为主, 并且三者都能够很好地描述在指定

条件下土体的蠕变行为^[4-6]。其中, Yin 等^[7-9]在等时间线和弹-黏塑性理论为基础建立了一维蠕变模型, 该模型的本构理论简单, 参数少并容易获得。此外还将其推广到一维应力松弛及三维应力状态下的蠕变和应力松弛。但是该模型不能描述盐渍土中土颗粒与孔隙溶液间离子相互作用关系及对蠕变效应的影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41230630, 11962016); 甘肃省陇原青年创新创业人才项目

收稿日期: 2019-02-26

表1 洗盐后土样的物理性质指标

Table 1 Physical properties of soil samples after salt washing

初始孔隙 比 e_0	颗粒相对 密度	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑限指 数 I_p	土粒粒组含量/%		
					$d \leq 0.005 \text{ mm}$	$0.005 \text{ mm} < d < 0.075 \text{ mm}$	$d \geq 0.075 \text{ mm}$
0.66	2.7	28.2	18.4	9.8	20.33	71.11	8.56

盐渍土是土中含有可溶性盐类, 且盐分浓度较高的一类特殊土。而有关盐渍土固结蠕变的试验研究主要集中在氯盐渍土中。从采用完全侧限条件下的固结蠕变试验到三轴条件下的等压蠕变、剪切蠕变和应变速率试验, 并在此基础上采用盐溶液饱和后的冻结砂、黏土等岩土材料展开了一系列的研究讨论^[10-14]。在与盐渍土相关的本构理论研究中, 学者们提出了能够描述饱和状态下孔隙溶液与土颗粒相互作用的概念模型和分形模型。并以渗透吸力为媒介桥梁, 作为描述盐渍土中化学力学耦合的重要指标。Barbour 等^[15]认为在盐溶液饱和后的土体中, 由于土体的渗透性导致有效应力的增加, 并且提出将有效应力和渗透吸力作为应力状态变量来描述土体的力学性质。Shivananda^[16]、Rao 等^[17]分别讨论了外来盐对孔隙溶液渗透吸力的影响和 Van't Hoff 方程在有无 Van't Hoff 因子时计算值与试验值的误差范围。并且明确了在恒定荷载作用下, 采用氯化钠和蒸馏水饱和后试样的应变差可以通过渗透吸力的增加来预测试样的渗透诱导固结。Xu 等^[18]在上述理论的基础上采用分形理论描述了 Van't Hoff 方程中的渗透系数, 提出了一种新的有效应力计算方法。

通过渗透吸力来描述岩土材料中化学-力学耦合性质已经成为研究盐渍土本构的一种有效研究方法。但是现有的理论主要是通过浓液的溶度来反映土水体系的化学性质, 无法实现孔隙溶液中化学离子的定量描述, 并且相关研究也主要集中在饱和氯盐中。因此本文对分别采用蒸馏水、氯化钠溶液和硫酸钠溶液饱和后的试样进行了固结蠕变试验, 讨论了硫酸盐渍土与氯盐渍土的固结蠕变特性。在 Van't Hoff 方程中引入 Pitzer 离子相互作用模型, 实现了土颗粒与孔隙溶液间的离子相互作用描述。在 Yin-Graham 一维蠕变模型的框架下建立了饱和盐渍土的一维蠕变模型, 并结合蠕变试验结果, 对原有模型和改进模型进行了详细的对比分析。

1 试验条件与结果

1.1 试样制作

试验用土取自兰州七里河区。邴慧等^[19]研究表明, 洗盐对土颗粒粒组和土体结构影响较为明显。因此表1给出了洗盐后土样的物理性质指标。

试验在杠杆式中压固结仪上进行, 数据采集通过电子位移计和数据采集仪共同工作, 不仅保证了采集数据的精度, 也保证了数据采集的连续性。土样制做

的主要步骤为: 洗盐(蒸馏水)一风干一碾碎过筛(0.5 mm)一配水制样(无盐试样)一风干, 主要步骤严格按照《土工试验方法标准》的要求。试样尺寸的大小为: 直径 6.18 cm, 高度 2 cm; 制样含水率为 16.88%, 干密度为 1.641 g/cm³。

试样饱和时先将干燥土样安放完成, 然后向固结仪水槽中注一定浓度的盐溶液后立即加载。饱和溶液根据是否含盐与易溶盐种类分为蒸馏水、硫酸钠溶液和氯化钠溶液; 其中硫酸钠和氯化钠溶液的浓度分设了 3 组, 其质量摩尔浓度分别为 0.6, 1.2, 1.8 mol/kg。其次硫酸盐渍土对应上述质量摩尔浓度的质量分数分别为 7.6%, 14.6%, 20.4%, 氯盐渍土对应上述质量摩尔浓度的质量分数分别为 3.4%, 6.6%, 9.5%。在试验过程中为了保持溶液浓度、试验温度($25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$)和饱和程度不变, 在试验过程中设置了防止溶剂蒸发和保温隔热装置, 并且在加载周期内保证水槽水位基本不变。

1.2 试验结果

(1) 固结试验

固结回弹试验结合土样的物理特性将加荷卸荷顺序设计为 50, 100, 200, 300, 400, 800, 1600, 800, 400, 300, 200 kPa, 每级荷载持续时间为 24 h。图 1 给出了采用不同溶液饱和下的固结试验结果。从图 1 中发现非盐渍土与盐渍土的固结曲线存在明显的差异, 而且采用硫酸钠和氯化钠溶液饱和后的盐渍土固结曲线也有所不同。通过观察图 1 发现, 易溶盐对压缩变形的影响是贯穿于整个固结回弹过程中的。从而导致了在不同固结应力下, 相同浓度的同类盐渍土对压缩变形的贡献是基本相等的。这与图 1 所表现出在 50~1600 kPa 的固结曲线和 1600~200 kPa 的回弹曲线几乎平行的结果相符合。这也证实了孔隙溶液的变化不会改变土体的压缩系数、压缩指数与回弹再压缩指数^[13-14]。

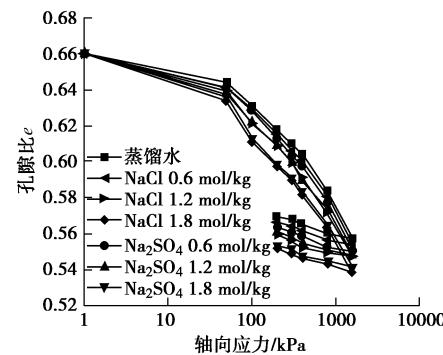


图 1 不同盐溶液饱和下的固结试验结果

Fig. 1 Consolidation test results under saturation of different salt solutions

(2) 蠕变试验

蠕变是土体的超静孔隙水压力消散后，有效应力不变的情况下土体继续被压缩的宏观表象。也可以认为是在排水固结过程中发生的次固结压缩。图2描述了土样分别在蒸馏水、硫酸钠和氯化钠溶液饱和下的恒载蠕变情况。其中图2(a)~(c)分别是在200, 400, 800 kPa作用下的蠕变过程，直观地反映了盐渍土与非盐渍土蠕变行为的差异。

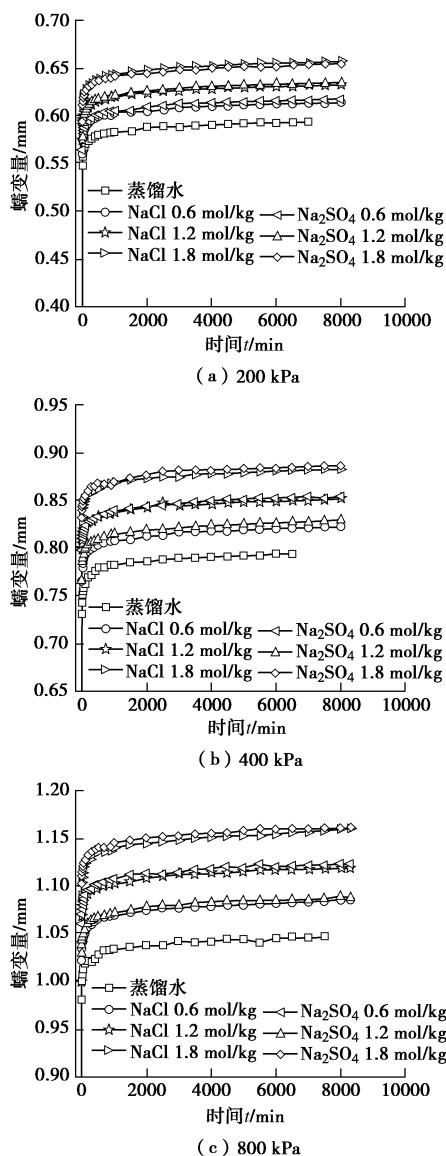


图2 不同孔隙溶液饱和下的蠕变试验结果

Fig. 2 Creep test results under saturation of different pore solutions

对比同一荷载情况下3种孔隙溶液饱和后的蠕变情况，发现孔隙溶液中盐分的存在增大了土体的初始蠕变变形与最终蠕变量。而这种增大的程度与含盐种类和含盐量息息相关。其次，盐渍土与非盐渍土的蠕变稳定时间明显不同，但是不同种类盐渍土的蠕变稳定时间在试验中没有表现出较为明显的差异。当荷载

为200 kPa时，蒸馏水饱和下的蠕变时间大约在4.8 d，而由盐溶液饱和后的蠕变时间为6 d左右。表明土体盐渍化后的蠕变性明显要强于非盐渍化。同时还发现在盐溶液浓度为1.8 mol/kg时，经硫酸钠和氯化钠溶液饱和后的试验结果恰好与0.6和1.2 mol/kg的结果相反，同时在400, 800 kPa和固结试验中也表现出了类似的结果。造成这种现象的原因可能是当浓度超过1.2 mol/kg时，由于硫酸钠溶液的活度小于氯化钠溶液，从而导致氯盐渍土表现出稍强的固结蠕变特性。

对比同盐类和盐度的盐渍土在不同荷载下的蠕变结果发现：随着荷载的增大，蠕变变形越大，并且蠕变稳定所需要的时间越长。当浓度为1.2 mol/kg时荷载为200, 800 kPa下的蠕变稳定时间分别为5.8, 6.1 d。

2 饱和盐渍土的一维蠕变模型

2.1 渗透吸力

土中的吸力由基质吸力和渗透吸力（溶质吸力）组成，而在饱和土中一般认为总吸力等于渗透吸力。渗透吸力是由于孔隙水中溶解盐的存在导致土体中孔隙水化学势的降低，其实质是通过土体内外的渗透压，使土体内部出现负的孔隙水压力，从而导致有效应力的增加（图3）。

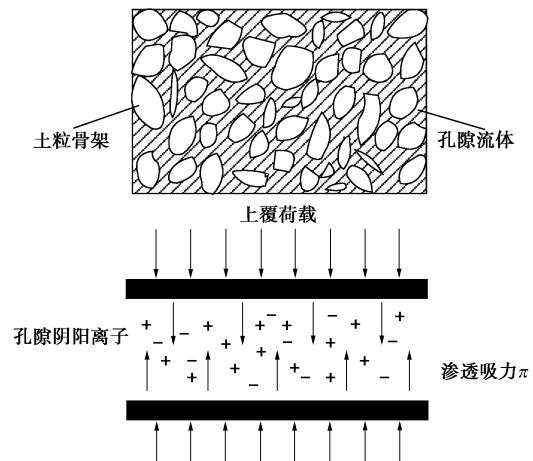


图3 饱和盐渍土中渗透吸力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of osmotic suction in saturated saline soils

渗透吸力可由 Van't Hoff 方程^[18-21]给出：

$$\pi = \nu R T c \phi \quad , \quad (1)$$

式中， R 为通用的摩尔气体常数， $R = 8.32 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ， T 为绝对 K 氏温度 ($T=298.15\text{K}$)， c 为孔隙溶液的浓度 (mol/L)， ϕ 为溶质渗透系数，可根据 Pitzer^[22-23]提出的电解质渗透系数公式计算。当孔隙溶液只有一种溶质 (MX) 时：

$$\phi = 1 + |z_M z_X| f_\phi + 2m \frac{v_M v_X}{v} B_\phi^{\text{MX}} + 2m^2 \frac{(v_M v_X)^{3/2}}{v} C_\phi^{\text{MX}}, \quad (2)$$

式中, z_M , z_X 分别为电解质阳离子 M 和阴离子 X 的电荷数; v 为盐溶解后的总离子数, v_M 为阳离子的离子总数, v_X 为阴离子的离子总数, 即 $v = v_M + v_X$; m 为盐溶液的质量摩尔浓度; f_ϕ 为 Debye-Hückel 项; B_ϕ^{MX} 和 C_ϕ^{MX} 是离子相互作用系数。

表 2 给出温度在 298.15K 时, 采用式 (1) 计算氯盐渍土和硫酸盐渍土在不同浓度时的渗透吸力大小。将其与 Van't Hoff 方程计算结果和 Fredlund 等^[24] 采用滤纸法测试结果进行了比较。说明该公式不仅明确了土粒与孔隙溶液间化学-力学耦合效应的离子作用, 而且有效地改善了使用 Van't Hoff 方程计算时随浓度增大而产生的较大误差。

表 2 298.15K 时不同浓度氯化钠和硫酸钠溶液的渗透吸力

Table 2 Osmotic suctions of sodium chloride and sodium sulfate solutions with different concentrations at 298.15K (kPa)

浓度/(mol·L ⁻¹)	NaCl	Na ₂ SO ₄
0.2	915.11	1119.33
0.5	2281.01	2597.24
0.6	2742.22	3067.43
1.2	5593.46	5787.71
1.6	7584.01	7559.54
1.7	8093.60	8000.32
1.8	8608.10	8440.47
2.0	9651.91	9310.95

2.2 蠕变方程

土体的固结蠕变由可恢复的瞬时变形和不可恢复的延时变形组成。其中瞬时变形是完全弹性的, 延时变形是黏性变形和塑性变形的总和, 并且黏性变形和塑性变形是同时发生的。因此, 基于上述假设, Yin 等^[7-8]给出了非盐渍土的一维蠕变方程:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} + \frac{\lambda}{V_0} \ln \left(\frac{\sigma_z^*}{\sigma_{z0}^*} \right) + \frac{\xi}{V_0} \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (3)$$

式中 σ_z^* 为有效应力; $\varepsilon_{z0}^{\text{ep}}$ 为黏性应变为零时的弹塑性应变, 即 $\sigma_z^* = \sigma_{z0}^*$ 时对应的应变; V_0 为土体的初始比体积, $V_0 = 1 + e_0$; λ/V_0 为参考时间线的斜率; ξ/V_0 为蠕变曲线在 $\varepsilon_z - \ln t$ 中直线段的斜率; $t = t_0 + t_e$, t_0 , t_e 分别为参考时间和等效时间。

饱和盐渍土在轴向荷载作用下的应力状态变量可以理解为由传统的有效应力和颗粒孔隙间的净排斥力组成, 且两部分应力可以看成一个应力状态变量。其中可以通过渗透压将颗粒间的排斥应力变化与流体间的渗透吸力联系起来, 满足了渗透吸力作为应力状态变量的一致性条件^[15-18]。因此饱和盐渍土的总有效应力由传统有效应力和有效渗透应力组成, 即

$$\sigma^* = \sigma_z^* + \sigma_\pi^* \quad (4)$$

式中 σ_z^* 为传统的有效应力, 其值由 Terzaghi 提出的饱和土的有效应力原理计算, 即 $\sigma_z^* = \sigma_z - u_w$; σ_π^* 为有效渗透应力, $\sigma_\pi^* = \chi \pi$, χ 是量纲为“1”的参数, 且 $0 < \chi < 1$ 。

将式 (4) 代入式 (3) 可得到改进的饱和盐渍土一维蠕变模型:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} + \frac{\lambda}{V_0} \ln \left(\frac{\sigma^*}{\sigma_{z0}^*} \right) + \frac{\xi}{V_0} \ln \frac{t}{t_0} \quad (5)$$

3 模型参数

本文是在 Yin-Graham 模型的框架上考虑了盐渍土中孔隙盐溶液的有效渗透应力对固结蠕变的贡献; 因此模型参数包含了原有的 Yin-Graham 模型参数外 (σ_{z0}^* , $\varepsilon_{z0}^{\text{ep}}$, λ/V_0 , ξ/V_0 , t_0), 还新增了描述渗透应力的参数 (χ , f_ϕ , B_ϕ^{MX} , C_ϕ^{MX})。

3.1 Yin-Graham 模型参数

基本参数 σ_{z0}^* , $\varepsilon_{z0}^{\text{ep}}$ 和 λ/V_0 可以通过 24 h 固结试验测得, 其中 $\lambda = \Delta e / [\ln(\sigma^* / \sigma_{z0}^*)]$, 由试验结果得到 λ 的值不随孔隙溶液改变。图 4 分别给出了 σ_{z0}^* 和 λ 的取值方法, 其中根据图 1 的试验结果和 σ_{z0}^* 的取值方法发现 σ_{z0}^* 受土中含盐种类和含盐量的影响显著, 故不同溶液饱和下的 σ_{z0}^* 也不尽相同, 而 $\varepsilon_{z0}^{\text{ep}}$ 为 $\sigma^* = \sigma_{z0}^*$ 时的应变。 t_0 为参考时间, 取 $t_0 = 10 \text{ min}$ 。

盐渍土的蠕变系数 ξ/V_0 不是一个定值, 它会随着荷载和含盐量的变化而改变。表 3 给出了 400 kPa 和 800 kPa 作用下的计算结果, 结果显示蠕变系数与压缩指数、回弹指数不同, 它会随着荷载和渗透吸力的增大而增大。

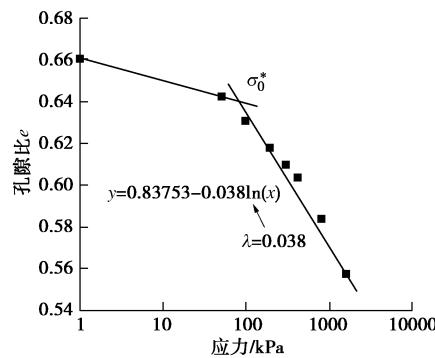


图 4 参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of parameters

3.2 有效渗透应力参数

有效渗透应力是渗透吸力的宏观表达, 而渗透吸力又通过渗透系数和溶液浓度描述盐渍土的化学物理性质。因此参数包含了模型参数 χ 和离子相互作用参数 (f_ϕ , B_ϕ^{MX} , C_ϕ^{MX})。并且都是在恒定的体积、温

表 3 模型参数
Table 3 Model parameters

孔隙溶液	浓度 $m/(mol \cdot kg^{-1})$	σ_0^*/kPa	蠕变系数 ξ/V		$C_\phi^{MX}/(kg^2 \cdot mol^{-2})$	$f_\phi/(kg \cdot mol)^{\frac{1}{2}}$	$B_\phi^{MX}/(kg \cdot mol^{-1})$
			400 kPa	800 kPa			
蒸馏水	0	79	0.03053	0.03284	0	0	0
	0.6	77.12	0.03146	0.03634		-0.1572	0.1307
氯化钠	1.2	71.05	0.03494	0.03730	0.00106	-0.1853	0.1054
	1.8	61.21	0.03626	0.03859		-0.2012	0.0944
硫酸钠	0.6	75.09	0.03306	0.03655		-0.2012	0.1098
	1.2	69.26	0.03466	0.03710	-0.00483	-0.2267	0.0670
	1.8	64.40	0.03552	0.03827		-0.2401	0.0550

度和化学状态下的拟合参数与试验参数。其中 f_ϕ 和

B_ϕ^{MX} 采用下式计算^[22]:

$$f_\phi = -A_\phi \frac{I^{1/2}}{I + \theta I^{1/2}}, \quad I = (1/2) \sum m_i z_i^2, \quad (6)$$

$$B_\phi^{MX} = D_0^{MX} + D_1^{MX} \exp(\alpha_1 I^{1/2}) + D_2^{MX} \exp(\alpha_2 I^{1/2}). \quad (7)$$

式中 A_ϕ 为 Debye-Hückel 参数, 当温度等于 25°C 时, $A_\phi = 0.392 \text{ kg}^{-1/2} \cdot \text{mol}^{-1/2}$; I 为离子强度; θ 为恒定常数, $\theta = 1.2 \text{ kg}^{1/2} / \text{mol}^{1/2}$; m_i 为离子 i 的质量摩尔浓度, $m_i = v_i m$; B_ϕ^{MX} 的数值是由离子强度 I 所决定的, 当电解质为一价型时 B_ϕ^{MX} 值取前两项; 此时 $\alpha_1 = 2$; D_0^{MX} , D_1^{MX} , D_2^{MX} 是盐溶液中溶质阴阳离子决定的相互作用参数^[25]。

χ 是表征渗透吸力转化为有效渗透应力的效率参数。当 $\chi = 1$ 时, 表示盐渍土的渗透吸力完全转化为有效渗透应力, 即所有的溶液离子都与土颗粒发生反应。而 $\chi = 0$ 时, 表明盐渍土中的易溶盐离子都没有与土粒相互反应。显然这两种极限状态是不存在的, 因此认为 $\chi \in (0, 1)$ 。图 5 是在相同条件下参数 χ 的不同取值情况, 发现参数 χ 的敏感性在计算蠕变变形时表现的不强, 而本文通过模型计算与试验结果拟合分析, 确定 $\chi = 0.15$ 。

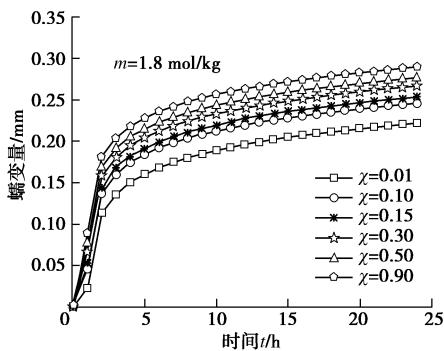


图 5 参数的敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of parameters

4 模型验证

通过改进模型和 Yin-Graham 模型对饱和盐渍土和非盐渍土恒载蠕变结果进行对比分析。验证了改进模型对预测饱和盐渍土一维蠕变行为的有效性。

图 6 为 400, 800 kPa 下饱和非盐渍土的蠕变试验结果与 Yin-Graham 蠕变方程式 (3) 计算结果的对比情况。根据图示结果发现, 采用 Yin-Graham 一维蠕变模型能够很好地预测饱和非盐渍土的蠕变行为。

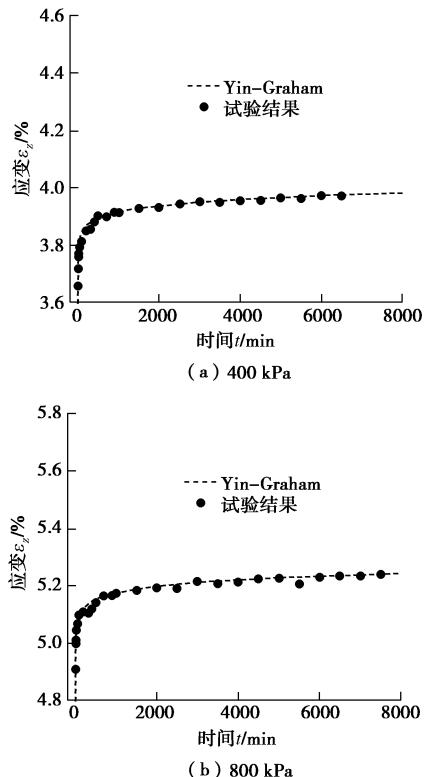


图 6 蒸馏水饱和下的蠕变试验结果与 Yin-Graham 模型计算结果

Fig. 6 Creep test results of saturated distilled water and calculated results of Yin-Graham model curves

图 7,8 为分别采用硫酸钠溶液和氯化钠溶液饱和后的恒载蠕变试验结果及使用方程式(3), (5)计算结果的对比情况。从图中可以发现采用 Yin-Graham 蠕变方程式(3)无法准确预测饱和盐渍土的蠕变行为, 总是小于试验结果。采用改进模型式(5)不仅能够在其数值上预测饱和盐渍土的蠕变效应, 而且还能够在详细描述饱和盐渍土化学力学耦合效应的同时预测不同类饱和盐渍土的蠕变特性。

图 7 是饱和硫酸盐渍土的蠕变结果。对比分析了相同轴向荷载作用下和同浓度溶液饱和下的模拟结果。发现 Yin-Graham 模型在孔隙溶液较低时, 其计算结果与试验结果很接近, 而且随着轴向荷载的增加计算误差也有所减小。从总体上讲, 计算误差的大小同盐渍土孔隙溶液浓度呈正比, 而与轴向荷载成反比。图 8 是饱和氯盐渍土的模拟结果, 表现出

与硫酸钠盐渍土相同的规律。所以在低浓度高承载作用时, 饱和盐渍土的蠕变应变量可以采用 Yin-Graham 模型预测。但是在较高浓度的饱和盐渍土中, Yin-Graham 模型的适用性有所降低。此类现象正好同图 1, 2 固结蠕变试验结果和表 3 渗透理论的结果相一致。

5 结 论

首先通过固结蠕变试验, 分析了盐渍土与非盐渍土、硫酸盐渍土与氯盐渍土的固结蠕变特性。然后基于 Pitzer 离子相互作用模型和 Van't Hoff 方程, 完善了饱和盐渍土中化学力学耦合效应的描述。并在 Yin-Graham 模型的基础上, 建立了饱和盐渍土的蠕变模型。此外还将模型与试验结果进行了比较, 得到以下 3 点结论。

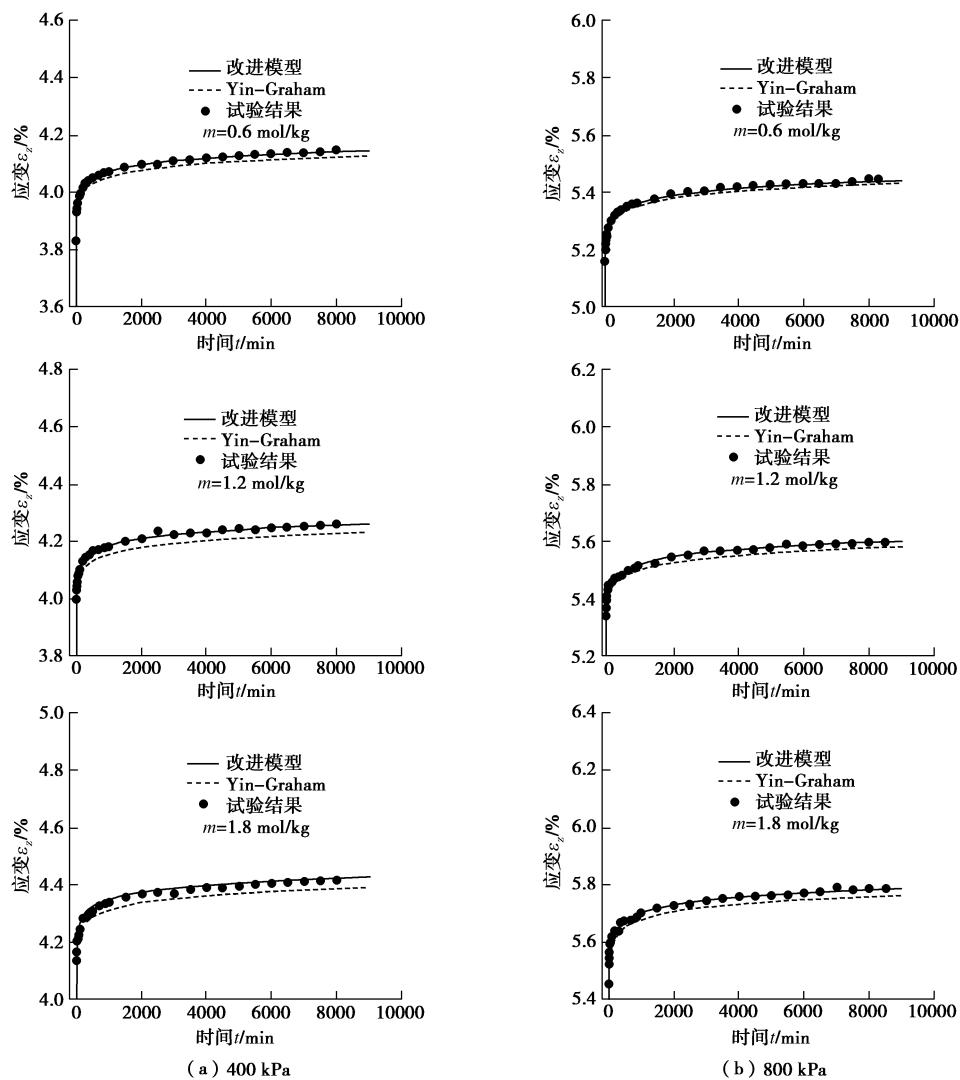


图 7 硫酸钠溶液饱和下的蠕变试验与模型计算结果

Fig. 7 Creep tests and model results under saturation of sodium sulfate solution

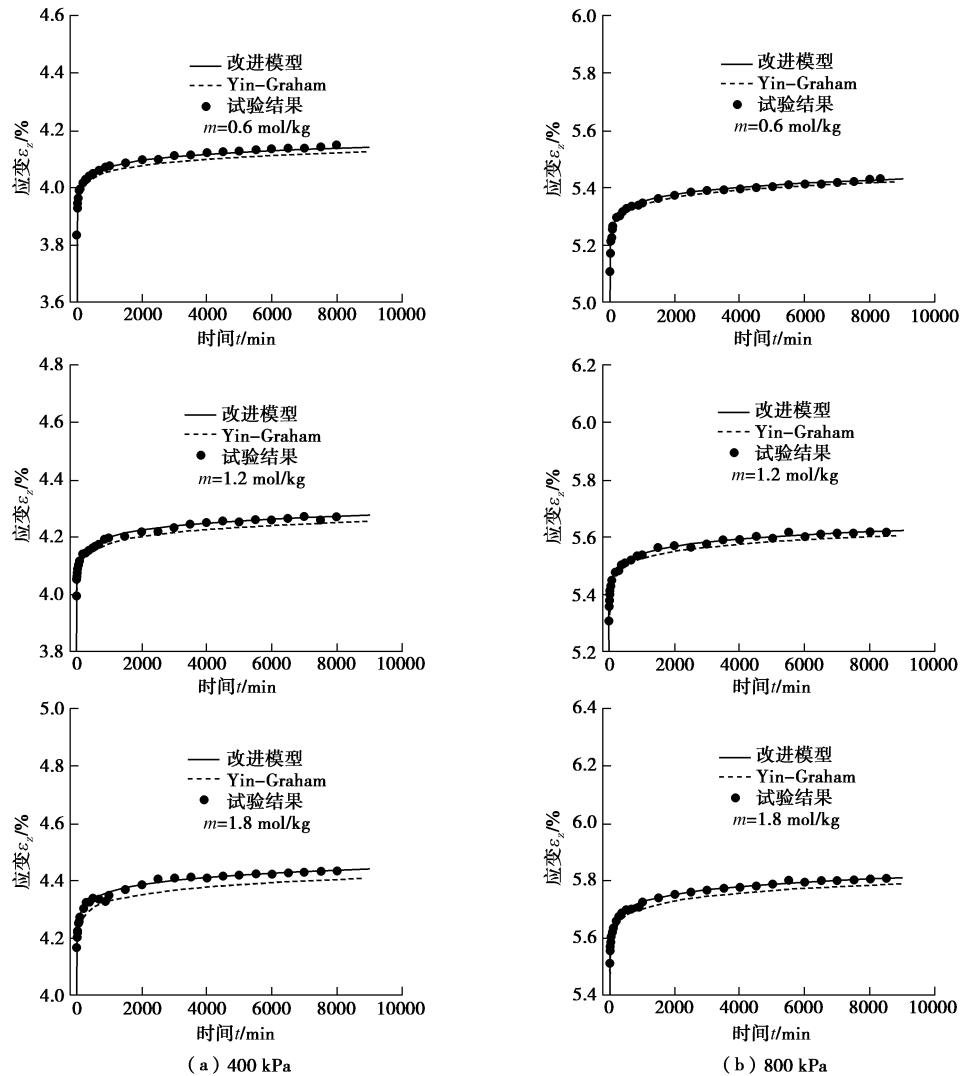


图 8 氯化钠溶液饱和下的蠕变试验与模型计算结果

Fig. 8 Creep tests and model results under saturation of sodium chloride solution

(1) 相同的土粒粒组、荷载和温度条件下, 盐渍土较非盐渍土表现出更强的蠕变性; 而硫酸盐渍土与氯盐渍土也表现出不同的固结蠕变效应, 并且在高、低浓度时的固结蠕变行为表现出相反的结果。

(2) 改进的 Van't Hoff 方程不仅能够更深层次地反映饱和盐渍土中易溶盐的离子化学性质, 也降低了使用传统 Van't Hoff 方程的计算误差; 为建立盐渍土本构模型提供了帮助。

(3) 改进后的 Yin-Graham 一维蠕变模型, 不仅能够描述饱和盐渍土中物理化学相互作用, 而且可以更加有效地反应其蠕变行为。

参考文献:

- [1] 陈耀光, 杨军, 彭芝平, 等. 饱和盐渍土地基处理孔隙水压力实测分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 529 - 532. (CHEN Yao-guang, YANG Jun, PENG Zhi-ping, et al. Test analysis on pore water pressure in ground treatment to

saturated saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 529 - 532. (in Chinese))

- [2] 牛富俊, 林战举, 鲁嘉豪, 等. 青藏铁路路桥过渡段沉降变形影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 372 - 377. (NIU Fu-jun, LIN Zhan-ju, LU Jia-hao, et al. Study of the influencing factors of roadbed settlement in embankment-bridge transition section along Qinghai-Tibet Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 372 - 377. (in Chinese))
- [3] BING Hui, ZHANG Ying, MA min. Impact of desalination on physical and mechanical properties of lanzhou loess[J]. Eurasian Soil Science, 2017, 50(12): 1444 - 1449.
- [4] 张云, 薛禹群, 施小清, 等. 饱和砂性土非线性蠕变模型试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1869 - 1873. (ZHANG Yun, XUE Yu-qun, SHI Xiao-qing, et al. Study on nonlinear creep model for saturated sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1869 - 1873. (in Chinese))

- [5] 袁静, 龚晓南, 益德清. 岩土流变模型的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 772 - 779. (YUAN Jing, GONG Xiao-nan, YI De-qing. Comparison study on rheological constitutive models[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 772 - 779. (in Chinese))
- [6] 尹振宇. 天然软黏土的弹黏塑性本构模型: 进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1357 - 1369. (YIN Zhen-yu. Elastic viscoplastic models for natural soft clay: review and development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1357 - 1369. (in Chinese))
- [7] YIN J H, GRAHAM J. Equivalent times and one-dimensional elastic viscoplastic modelling of time-dependent stress-strain behaviour of clays[J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 1994, 31(1): 42 - 52.
- [8] YIN J H, GRAHAM J. Elastic viscoplastic modelling of the time-dependent stress-strain behaviour of soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 736 - 745.
- [9] YIN J H, ZHU J G, GRAHAM J. A new elastic viscoplastic model for time-dependent behaviour of normally and overconsolidated clays: theory and verification[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(1): 157 - 173.
- [10] NIXON J F, LEM G. Creep and strength testing of frozen saline fine-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21(3): 518 - 529.
- [11] OGATA N, YASUDA M, KATAOKA T. Effects of salt concentration on strength and creep behavior of artificially frozen soils[J]. Cold Regions Science & Technology, 1983, 8(2): 139 - 153.
- [12] WIJEWERA H, JOSHI R C. Creep behavior of saline fine-grained frozen soil[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1993, 7(3): 77 - 89.
- [13] WITTEVEEN, Ferrari, Laloui. An experimental and constitutive investigationon the chemo-mechanical; behaviour of a clay[J]. Géotechnique, 2013, 63(3): 244 - 255.
- [14] 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 & Soil Mechanics, 2018, 39(1): 129 - 138. (in Chinese))
- [15] 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.
- [16] SHIVANANDA S M R P. Role of osmotic suction in swelling of salt-amended clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(1): 307 - 315.
- [17] RAO S M, THYAGARAJ T. Swell-compression behaviour of compacted clays under chemical gradients[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(5): 520 - 532.
- [18] XU Y F, XIANG G S, JIANG H, et al. Role of osmotic suction in volume change of clays in salt solution[J]. Applied Clay Science, 2014, 101: 354 - 361.
- [19] 邝慧, 武俊杰, 邓津. 黄土状盐渍土洗盐前后物理力学性质的变化[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 796 - 800. (BING Hui, WU Jun-jie, DENG Jin. Variations of physical and mechanical properties of saline loess before and after desalting[J]. Journal of Glaciology & Geocryology, 2011, 33(4): 796 - 800. (in Chinese))
- [20] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 1999. (Standard for Soil Test Method: GB/T 50123—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [21] SUN D A, CUI H, SUN W. Swelling of compacted sand-bentonite mixtures[J]. Applied Clay Science, 2009, 43(3/4): 485 - 492.
- [22] PITZER K S. Thermodynamics of electrolytes: I theoretical basis and general equations[J]. Journal of Physical Chemistry, 1972, 77(2): 268 - 277.
- [23] PITZER K S, MAYORGA G. Thermodynamics of electrolytes: II activity and osmotic coefficients for strong electrolytes with one or both ions univalent[J]. Journal of Physical Chemistry, 1973, 77(19): 2300 - 2308.
- [24] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [25] KIM H T, JR W J F. Evaluation of Pitzer ion interaction parameters of aqueous electrolytes at 25. Degree. C. 1. single salt parameters[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 1988, 33(2): 177 - 184.