

饱和盐渍土分数阶蠕变模型及试验研究

王立业^{1,2}, 周凤玺^{1,2}, 秦 虎¹

(1. 河西学院 土木工程学院, 甘肃 张掖 734000; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 采用等温条件下饱和盐渍土的固结蠕变试验研究了其蠕变特性。在元件模型的基础上, 通过引入 Abel 阻尼器和渗透吸力后, 建立了饱和盐渍土的分数阶蠕变模型, 从表观现象学方面展开了含盐量与饱和盐渍土蠕变特性的相关性讨论。结合试验结果和分数阶模型, 拟合分析了渗透吸力同次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c 和初始剪切模量以及初始剪切应变的相互作用关系。在蠕变试验的基础上, 通过不同应力水平、含盐量的试验结果对分数阶模型进行了拟合分析, 并结合给出的黏度系数公式对模型的有效性进行了验证。分析结果表明: 次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c 随着渗透吸力的增大而增大且呈指数关系, 初始剪切模量随着渗透吸力的增大而减小, 初始剪切应变与渗透吸力呈现出线性关系。相比与整数阶元件模型, 所提出的分数阶蠕变模型更适合于饱和盐渍土蠕变行为的预测。结合试验和模型分析结果, 发现含盐量的增大促进了盐渍土的蠕变行为。

关 键 词: 饱和盐渍土; 三轴蠕变试验; 渗透吸力; 理论模型; 蠕变特性

中图分类号: TU 411; TU 488

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 02-0543-09

Fractional creep model and experimental study of saturated saline soil

WANG Li-ye^{1,2}, ZHOU Feng-xi^{1,2}, QIN Hu¹

(1. School of Civil Engineering, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: The creep behaviors of saturated saline soil are studied in the consolidation creep test under isothermal conditions in this paper. Based on the element model, the fractional creep model of saturated saline soil was established by introducing Abel dashpot and osmotic suction. The phenomenological correlation between salt content and creep behavior of saturated saline soil is discussed. The effects of osmotic suction on the ratio C_a/C_c of the secondary compression coefficient to the compression index, initial shear modulus and initial shear strain are analyzed by combining experimental results with fractional model fitting. The fractional order model is fitted by the test results of different stress levels and salt content. The validity of the model is verified by the viscosity coefficient formula. The results show that the ratio C_a/C_c increases exponentially as the osmotic suction increases. The initial shear modulus decreases as the osmotic suction increases, and the initial shear strain exhibits a linear relationship with the osmotic suction. Comparing with the integer element model, the fractional creep model proposed in this paper is more suitable for predicting the creep behavior of saturated saline soil. Combined with the results of experiments and model analysis, it is found that the increase of salt content promotes the creep behavior of saline soil.

Keywords: saturated saline soil; triaxial creep test; osmotic suction; theoretical model; creep characteristics

1 引 言

由于降雨的淋洗作用、土壤的基质体系和全球气候变暖引起的地下水向地表迁移作用, 使土壤中的易溶盐由固态盐转变为液相溶液, 打破了土体原

有的平衡状态。从而导致地下水携带的易溶盐与土壤中的土颗粒重新进行离子交换和电离平衡。在此过程中由于土体与孔隙盐溶液间发生化学-力学耦合作用, 导致土体产生二次非稳态的不均匀压缩, 对基础工程、地下空间结构和道路桥梁工程产生了

一系列的影响^[1]。

迄今为止,有关饱和盐渍土蠕变特性和本构理论的研究成果甚少,相关的试验研究主要集中在饱和氯盐渍土的蠕变行为和力学行为方面。Ogata^[2]、Nixon^[3]、Wijeweera^[4]等针对含盐量对冻结砂土蠕变效应和剪切强度的影响开展了一系列的研究。分别采用等温条件下恒应变率的无侧限压缩试验和三轴蠕变试验以及剪切试验,得到含盐量对冻结砂土的蠕变效应和剪切强度均有明显的影响。即蠕变速率和蠕变量随着含盐量的增加而增加,而抗剪强度随着含盐量的增加而降低。刘松玉等^[5]结合已有的试验数据研究了盐溶液饱和后土体的压缩和渗透特性,并构造了能够预测两者行为的理论公式。颜荣涛^[6-8]、张彤炜^[9]、Xu^[10]等在试验和 Barbour 等^[11]基础上研究了盐溶液饱和后黏土的压缩变形和强度特征,并通过渗透吸力探讨了等压固结后饱和盐渍黏土的力学行为。给出了渗透吸力与压缩指数、回弹模量和初始固结压力等物理参数的相互关系。目前关于饱和盐渍土蠕变方面的研究无论是在试验及理论模型,还是在研究对象与理论研究方法都有很大的不足。

在描述土体蠕变的理论模型研究中,元件模型以理论推导简单、材料参数易获得等优点决定了其适用性较强的特点。但是几乎所有的元件模型都是在指数函数的基础上实现了非线性蠕变模型的建立,当脱离指数函数后退化为线性蠕变模型(Bingham 模型、Burgers 模型和 Nishihara 模型),导致诸多模型都无法有效地预测土体蠕变行为。因此,许多国内外学者^[12-17]提出了用分数阶微分理论代替整数阶理论建立相应蠕变模型的研究方法,并在此基础上丰富了元件模型。改进后的模型不仅完善了元件模型往返非线性和完全弹性/黏性限制等问题,而且强化了模型对描述土体蠕变路径依赖性的能力。

以分数阶微分理论为基础,本文建立了土体的分数阶蠕变模型,并通过采用渗透吸力描述了饱和盐渍土的化学-力学耦合作用以及构建了一般应力状态下饱和盐渍土的分数阶蠕变模型。然后根据固结试验、三轴不排水试验结果和分数阶模型,对饱和盐渍土蠕变特性与渗透吸力的相关性进行了讨论,并给出了两者的预测公式。最后结合不同应力水平和含盐量下的蠕变试验结果对饱和盐渍土的分数阶蠕变模型进行了分析验证,给出了饱和盐渍土蠕变模型中黏度系数的计算公式。

2 试验

2.1 试样制作

试验包含了固结试验和三轴不排水蠕变试验,仪器分别采用中压固结仪和 SR-6 型三联式三轴蠕变仪以及位移计等数据采集设备。试样的尺寸大小分别选用 $\phi 6.18 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 和 $\phi 6.18 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm}$ 。试验用土取自兰州七里河区,制样前对土进行了洗盐,保证了试验的准确性。洗盐后土壤的最大干密度为 1.7 g/cm^3 ,试样的初始含水率为 16.88%,干密度为 1.641 g/cm^3 。

2.2 试验方案

固结试样的制作过程为:洗盐—风干—碾碎过筛(0.5 mm)—配水制样—风干。其饱和方法是将土样放入试验槽后加水进行饱和,且饱和所用的水溶液分别为蒸馏水、氯化钠溶液和硫酸钠溶液。其中,氯化钠与硫酸钠溶液的质量摩尔浓度分别为 0.6、1.2、1.8 mol/kg。在加溶液饱和后进行加载试验,并在试验过程中保持水槽水位和试验温度基本不变,温度保持在 $25 \pm 1^\circ \text{C}$ 。固结试验每级荷载的持续时间为 24 h,且加荷顺序为 50、100、200、300、400、800、1 600 kPa。试验总共设计了 10 组。

三轴试样饱和是采用真空饱和装置进行饱和,即将洗盐风干后的试样进行抽真空饱和。试样饱和安装后首先进行等压排水固结,待固结完成后施加竖向应力。其中围压和竖向应力是通过空压机和标定砝码施加的,而为了消除围压对轴向传动轴的反压时施加了与围压对应的平衡砝码。其次,为保证竖向加载系统与试样完全接触时提前施加托盘(12.5 kPa)。待固结稳定后先关闭排水阀门,再一次性施加设计砝码,开始不排水剪切蠕变。其中,围压大小分别为 200、300、400 kPa;偏应力大小分别为 200、300、400 kPa。

3 试验结果与分析

3.1 固结试验

图 1 为不同溶液饱和后土体的固结试验结果。根据试验结果计算得到采用蒸馏水、氯化钠溶液和硫酸钠溶液饱和后试样的压缩指数都基本相等,且压缩指数 $C_c = 0.087$ 。该试验结果与颜荣涛等^[7]的试验结果相吻合。表 1 是在图 1 中 24 h 固结试验结果的基础上,使用 $C_a = \Delta e / \lg(t/t_0)$ 得到不同溶液饱和后土体的次固结系数 C_a 。从表中可以发现,采用硫酸钠溶液和氯化钠溶液饱和后的土体次固结系数大于采用蒸馏水饱和后的。再者次固结系数不仅随着

溶液浓度的增加而增大, 而且采用相同浓度硫酸钠溶液和氯化钠溶液饱和后的土体次固结系数也不相等。

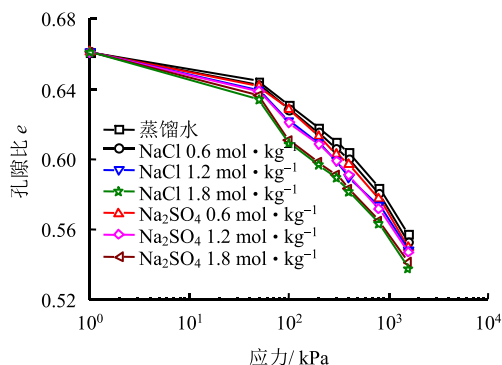


图1 固结试验结果

Fig.1 Consolidation test results

表1 饱和盐渍土的平均次固结系数

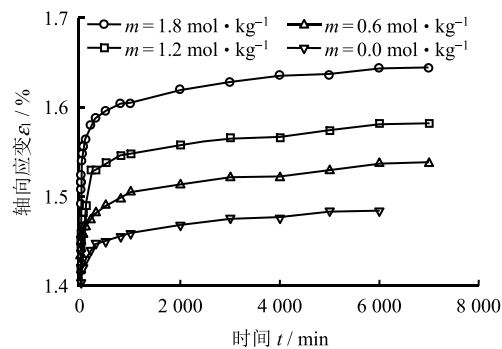
Table 1 Average secondary consolidation coefficient of saturated saline soil

孔隙溶液	质量摩尔浓度 (mol · kg ⁻¹)	次固结系数 C _a
蒸馏水	0.0	0.001 330
NaCl 溶液	0.6	0.001 375
	1.2	0.001 690
	1.8	0.002 035
Na ₂ SO ₄ 溶液	0.6	0.001 464
	1.2	0.001 748
	1.8	0.002 010

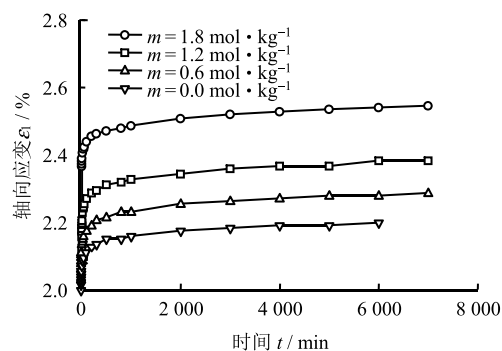
3.2 三轴不排水剪切蠕变

饱和硫酸盐渍土在不同偏应力下的三轴剪切蠕变试验如图2所示。从图中可以看出, 饱和硫酸盐渍土的蠕变与含盐量有着明显的相关性。即在相同的应力水平作用下, 硫酸盐渍土的蠕变行为明显与非盐渍土不同, 并且两者的差异与含盐量的变化趋势有关。

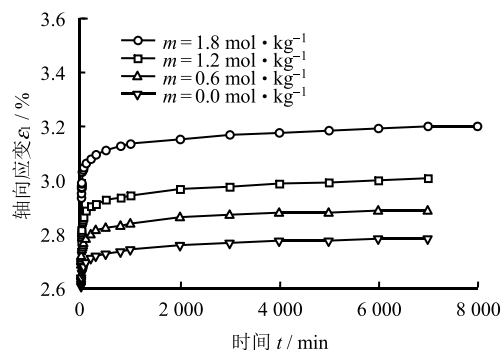
分别对比偏应力为200、300、400 kPa时的蠕变情况, 发现在不同偏应力作用下的蠕变初始量、速率和稳定时间会随着含盐量的变化而有所不同。在偏应力为200 kPa, 质量摩尔浓度 m 分别为0.6、1.2、1.8 mol/kg时, 应变差 $\Delta\epsilon$ ($\Delta\epsilon = \epsilon_{t=1000} - \epsilon_{t=end}$) 分别为0.032%、0.034%和0.04%。而在 $m = 1.8$ mol/kg, 偏应力分别为200、400、800 kPa时, 应变差 $\Delta\epsilon$ 分别为0.04%、0.058%和0.064%。但是不同条件下的蠕变情况总体上呈现为衰减状态, 应变率逐渐趋于0, 应变最后趋于一个稳定值。



(a) $\sigma_1 - \sigma_3 = 200$ kPa, $\sigma_3 = 200$ kPa



(b) $\sigma_1 - \sigma_3 = 300$ kPa, $\sigma_3 = 300$ kPa



(c) $\sigma_1 - \sigma_3 = 400$ kPa, $\sigma_3 = 400$ kPa

图2 饱和盐渍土的三轴剪切蠕变试验

Fig.2 Triaxial shear creep test of saturated saline soil

4 分数阶蠕变模型

4.1 水化学作用的描述

在荷载作用下, 饱和盐渍土的原始平衡被打破, 导致孔隙盐溶液会与土颗粒发生电离平衡和离子相互作用, 产生不同的渗透应力场, 改变了土体的应力状态。因此, 在建立盐渍土的本构模型时需要考虑土-水体系的水化学效应, 以此来反映孔隙盐溶液对土体特性的影响。根据已有的研究结果^[8,9,11], 发现饱和盐渍土的化学-力学耦合效应可以采用渗透吸力来描述。其中渗透吸力 π 可以采用 Van't Hoff 方程^[18]计算:

$$\pi = \omega RT c \phi \quad (1)$$

式中: ω 为盐溶液中阴、阳离子的总数; R 为摩尔气体常数, $R = 8.315 \text{ kg}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为热力学温度; c 为盐溶液的物质的量浓度 (mol/L); ϕ 为渗透系数, 采用 Pitzer 等^[19-20]提出的公式计算:

$$\phi = 1 + |z_M z_X| f_\phi + 2m \frac{\omega_M \omega_X}{\omega} B_\phi^{MX} + 2m^2 \frac{(\omega_M \omega_X)^{3/2}}{\omega} C_\phi^{MX} \quad (2)$$

式中: z_M 、 z_X 分别为组成溶质的阳离子 M 和阴离子 X 的电荷数; ω_M 为阳离子的离子总数; ω_X 为阴离子的离子总数; $\omega = \omega_M + \omega_X$; f_ϕ 为 Debye-Hückel 项; B_ϕ^{MX} 和 C_ϕ^{MX} 为离子相互作用系数。

Fredlund 等^[21]在描述非饱和土有效应力的表达式时, 提出了独立应力状态变量法, 从而很好地反映了吸力对有效应力的贡献。因此, 本文借助独立应力状态变量法的概念, 通过单一有效应力与有效渗透应力的总和来反映饱和盐渍土的有效应力 σ^* 。即:

$$\sigma^* = \sigma_a^* + \sigma_\pi^* \quad (3)$$

式中: σ_a^* 为 Terzaghi 有效应力, 即 $\sigma_a^* = \sigma - \mu_w$, σ 和 μ_w 分别为总应力和孔隙水压力; σ_π^* 为饱和盐渍土中粒子相互作用后产生的有效渗透应力, $\sigma_\pi^* = \chi\pi$, χ 为模型参数。

4.2 分数阶微积分理论

由 Abel 积分理论得到, 当 $I \in [0, +\infty)$, $r \in R^+$ 且 $t > 0$ 时, $f(t)$ 在阶数 $r \in (0, 1)$ 且 $t \in (t_0, t)$ 时的 Riemann-Liouville (RL) 分数阶积分方程为

$${}_t I_t^r f(t) = \frac{1}{\Gamma(r)} \int_{t_0}^t (t - \xi)^{r-1} f(\xi) d\xi \quad (4)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数, 即

$$\Gamma(r) = \int_0^\infty t^{r-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

RL 的分数阶导数是其分数阶积分逆运算的结果。因此, 得到 $r \in (0, 1)$ 时分数阶导数表达式为

$${}_t D_t^r f(t) = D^1 {}_t I_t^{1-r} f(t) \quad (6)$$

采用 Abel 阻尼器是将整数阶元件模型转化为分数阶模型的一种典型方法, 其本构关系为^[17, 22]

$$\sigma(t) = \eta D^r \varepsilon(t) \quad (0 \leq r \leq 1) \quad (7)$$

式中: η 为黏度系数。

4.3 黏-弹塑性模型

使用 Abel 阻尼器替换了元件模型中的 Newtonian 黏壶后, 不仅可以消除 Newtonian 阻尼完全弹

性和极致黏性的限制, 而且在摆脱指数函数依赖性后仍然能够建立非线性的蠕变模型。如图 3 给出了采用 Newtonian 弹簧、Abel 阻尼器和塑性元件构造的分数阶蠕变模型。

根据图 3 的模型组成可以得到总应变的组成:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_v + \varepsilon_{vp} \quad (8)$$

式中: ε 、 ε_e 、 ε_v 、 ε_{vp} 分别为总应变、弹性应变、黏性应变和黏塑性应变。

弹性变形根据虎克定律得到:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma^*}{E} \quad (9)$$

式中: E 为图 3 中弹簧的弹性模量。

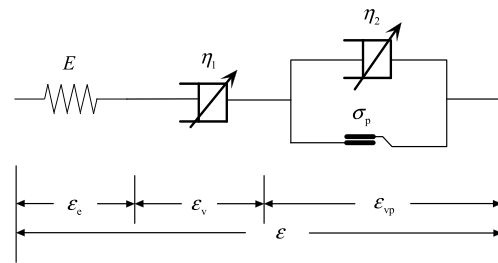


图3 分数阶蠕变模型
Fig.3 Fractional creep model

黏性变形在 Abel 阻尼器本构关系式 (7) 的基础上, 选择恒应力 ($\sigma = \text{const}$) 条件下的理论关系, 再通过 Laplace 积分变换得到:

$$\varepsilon_v(t) = \frac{\sigma^*}{\eta_1} \frac{t^r}{\Gamma(r+1)} \quad (10)$$

式中: η_1 为黏性系数。

图 3 中黏塑性体在恒应力加载下时, 应力分量满足串并联关系:

$$\sigma^* = \sigma_v^* + \sigma_p^* \quad (11)$$

在分数阶理论的基础上, 根据应力大小与屈服极限 σ_s 的关系, 分别展开如下讨论:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p^* < \sigma_s^*, \quad \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_v \\ \sigma_p^* \geq \sigma_s^*, \quad \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_v + \varepsilon_{vp} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

根据 Abel 阻尼和塑性元件串联关系, 以及在初始条件 $\varepsilon(0) = 0$ 的情况下, 使用 Laplace 积分变换得到黏塑性应变方程的解析解为

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\sigma^* - \sigma_s^*}{\eta_2} \frac{t^r}{\Gamma(1+r)} \quad (13)$$

式中: η_2 为黏塑性体单元的黏度系数。

结合式 (9)、(10)、(12)、(13) 得到饱和盐渍土的非线性蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma^*}{E} + \frac{\sigma^*}{\eta_1} \frac{t^r}{\Gamma(1+r)}, \quad \sigma_p^* < \sigma_s^* \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma^*}{E} + \left(\frac{\sigma^*}{\eta_1} + \frac{\sigma^* - \sigma_s^*}{\eta_2} \right) \frac{t^r}{\Gamma(1+r)}, \quad \sigma_p^* \geq \sigma_s^* \quad (15)$$

根据土力学理论与力学参数间的相互关系, 可以将式 (14) 和式 (15) 变换为三维应力状态下的蠕变方程。

当 $\sigma^* < \sigma_s^*$, $f < 0$ 时:

$$\varepsilon_{ij} = \left[\frac{1}{2G_0} + \frac{1}{2\beta_1} \frac{t^r}{\Gamma(1+r)} \right] s_{ij} \quad (16)$$

当 $\sigma^* \geq \sigma_s^*$, $f \geq 0$ 并采用相关联的流动法则 $f = g$ 时:

$$\varepsilon_{ij} = \left[\frac{1}{2G_0} + \frac{1}{2\beta_1} \frac{t^r}{\Gamma(1+r)} \right] s_{ij} + \frac{1}{2\beta_2} \frac{t^t}{\Gamma(1+r)} \left\langle \frac{p^*}{p_0^*} \right\rangle \frac{\partial f}{\partial s_{ij}} \quad (17)$$

式中: ε_{ij} 为应变张量的各分量; G_0 为虎克体剪切模量; β_1 和 β_2 分别为考虑分数阶理论后的 Maxwell 模型和复杂应力状态下的黏度系数; p^* 和 p_0^* 分别为动态加载条件和静态参考状态下的平均主应力; s_{ij} 为偏应力张量的各分量, $s_{ij} = \sigma_{ij}^* - p^* \delta_{ij}$, σ_{ij}^* 为应力张量的各分量, δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

采用屈服准则理论较为完善、适用范围较广的修正 Cam-Clay 模型, 其屈服准则为^[23]

$$f = q^{*2} + M^2 p^{*2} - M^2 p^* p_0^* = 0 \quad (18)$$

式中: q^* 为广义剪应力; M 为临界状态线的斜率。

因此, 式 (17) 可以表示为

$$\varepsilon_{ij} = \left[\frac{1}{2G_0} + \frac{1}{2\beta_1} \frac{t^r}{\Gamma(1+r)} \right] s_{ij} + \frac{1}{2\beta_2} \frac{t^t}{\Gamma(1+r)} \left\langle \frac{p^*}{p_0^*} \right\rangle \frac{3}{M^2} \frac{s_{ij}}{p^*} \quad (19)$$

5 分析与验证

5.1 蠕变特性分析

结合试验结果和考虑了饱和盐渍土化学-力学耦合作用的分数阶蠕变方程展开对饱和盐渍土固结蠕变特性的研究。主要针对其渗透吸力与次固结系数和压缩指数的比值 C_a/C_c 、初始剪切模量和初始剪切应变的相互关系。同时结合三轴剪切蠕变试验

对分数阶蠕变方程的预测能力进行了分析验证, 给出了黏度系数的取值公式。数值计算中所采用饱和硫酸盐渍土的材料参数如表 2 所示。

表 2 饱和硫酸盐渍土的模型参数

Table 2 Model parameters of saturated sulfuric saline soil

m /(mol·kg ⁻¹)	χ	C_ϕ^{MX} /(kg ² ·mol ⁻²)	f_ϕ	B_ϕ^{MX} /(kg·mol ⁻¹)
0.0		0.000 00	0.000 00	0.000 0
0.6	0.15	-0.004 83	-0.201 2	0.109 8
1.2		-0.004 83	-0.226 7	0.067 0
1.8		-0.004 83	-0.240 1	0.055 0

临界状态线斜率 M 和剪切模量 G_0 根据三轴剪切试验得到。本文根据内摩擦角得到 $M = 1.2$, 没有考虑含盐量的影响。而剪切模量可由三轴试验确定, 即瞬时变形可以认为是纯弹性的。因此, 方程 $q^* = 3G_0\varepsilon_0$ 成立, 其中 ε_0 为初始剪切应变。结合三轴试验结果得到 m 为 0.0、0.6、1.2、1.8 mol/kg 时的剪切模量 G_0 分别为 5 021.2、4 886、4 737.8、4 432.7 kPa。

为了研究饱和盐渍土中含盐量对次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c 、初始剪切模量和初始剪切应变的影响, 采用式 (1) 计算的渗透吸力量化了饱和盐渍土固结蠕变特性与含盐量的相互关系。图 4~6 分别反映了渗透吸力 π 与次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c 、初始剪切模量 G_0 和初始剪切应变 ε_0 的关系曲线。

Mesri 等^[24]以次固结系数和压缩指数的比值 C_a/C_c 为桥梁, 讨论了固结蠕变过程中体积变化的情况, 并发现同一土体的次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c 是一个定值。张彤炜等^[9]对氯化钠溶液饱和后黏土的 C_a/C_c 进行了研究。图 4 为饱和盐渍土次固结系数和压缩指数的比值 C_a/C_c 与渗透吸力曲线图。

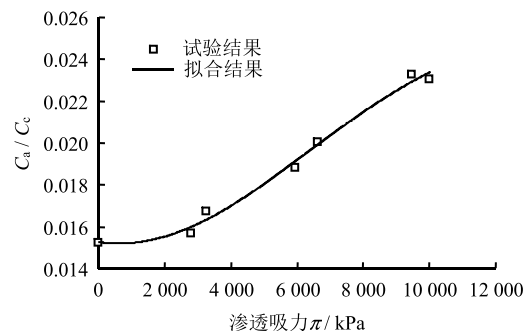


图 4 C_a/C_c 与渗透吸力的关系曲线

Fig.4 Relationship between C_a/C_c and osmotic suction

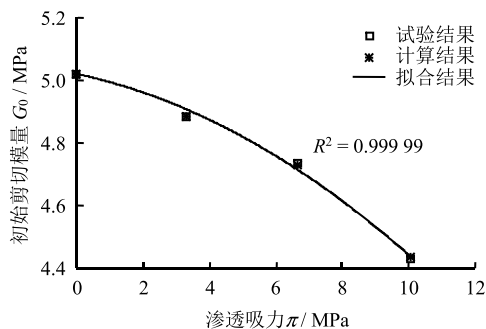


图5 初始剪切模量与渗透吸力的关系曲线
Fig.5 Relationship between initial shear modulus and osmotic suction

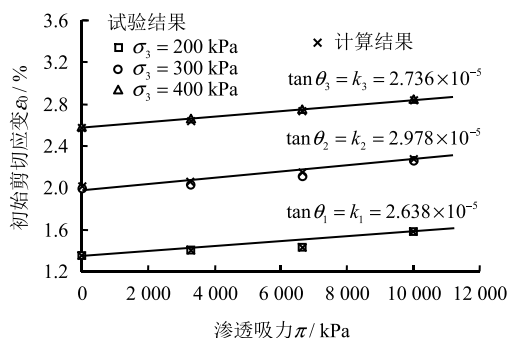


图6 初始剪切应变与渗透吸力的关系曲线
Fig.6 Relationship between initial shear strain and osmotic suction

从图中可以看出,饱和盐渍土的 C_a/C_c 随着渗透吸力的增大而缓慢增长,两者的变化关系可以采用指数函数来拟合,拟合方程为

$$\frac{C_a}{C_c} \times 10^{-2} = 2.612 - 1.089 \exp \left[-2 \left(\frac{\pi - 621.537}{11\,280.610} \right)^2 \right] \quad (20)$$

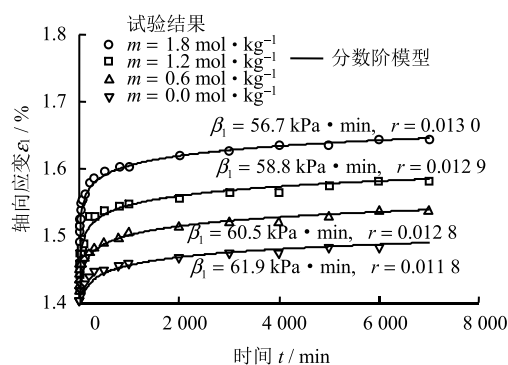
图5描述了饱和硫酸盐渍土的初始剪切模量与相应渗透吸力间的相互关系。从图中发现,试验结果与模型计算结果较为吻合,并且初始剪切模量在原有的基础上随着渗透吸力的增加而缓慢减小。本文采用二次多项式拟合出了两者的关系式,其中拟合的相关系数 $R^2 = 0.999\,99 \approx 1$, 拟合方程为

$$G_0 = 5.021\,2 - 0.022\,6\pi - 0.003\,5\pi^2 \quad (21)$$

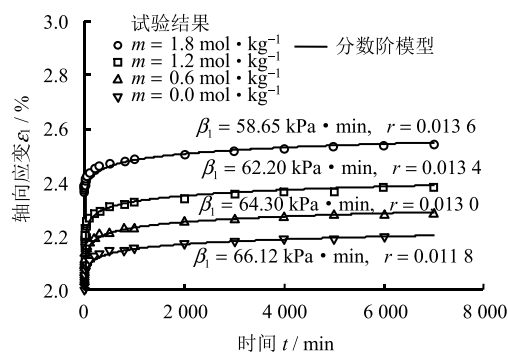
图6为不同应力水平下初始剪切应变与渗透吸力的关系曲线。从图中可以发现,饱和盐渍土在不同应力条件下的初始剪切应变与渗透吸力都呈现出良好的线性关系,并在3种应力水平下的直线几乎平行(斜率平均值 $\bar{k} = 2.784 \times 10^{-5}$)。即应力水平只改变直线在应变轴上的截距不影响直线的斜率。总体上讲,饱和盐渍土的初始剪切应变随着渗透吸力

的增大而缓慢增加,并且模型计算结果与试验结果也较为吻合。该现象与图4和图5以及文献[2-4]的研究结果相同。但是图4所示的次压缩系数与渗透吸力的增长关系与张彤炜等[9]研究结果有所不同。

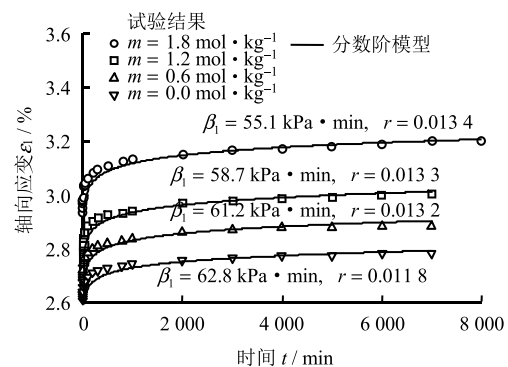
分数阶蠕变模型与三轴蠕变试验结果的拟合情况如图7所示。在Abel阻尼和元件模型的基础上建立的分数量蠕变模型,消除了整数阶元件模型对指数函数的依赖性,并改善了整数阶条件下的线性蠕变模型,实现了岩土材料的非线性蠕变描述。由图可以发现,分数量蠕变模型很好地拟合了饱和盐渍土在不同应力状态和含盐量情况下的蠕变行为,并较好地体现了饱和盐渍土的非线性蠕变过程。



(a) $\sigma_1 - \sigma_3 = 200$ kPa



(b) $\sigma_1 - \sigma_3 = 300$ kPa



(c) $\sigma_1 - \sigma_3 = 400$ kPa

图7 分数量蠕变模型与试验结果分析
Fig.7 Fractional order model and test result analysis

分析相同应力状态下饱和硫酸盐渍土在不同含盐量时的蠕变情况与黏度系数 β_1 、分数阶阶数 r 的相关性。分析结果发现黏度系数 β_1 随着含盐量的增加而减小, 而分数阶阶数 r 随着含盐量的增加而增加。其中, 黏度系数 β_1 随含盐量的变化情况反映了饱和盐渍土蠕变量与含盐量的相互关系。而分数阶阶数 r 随着含盐量变化的情况表明了含盐量对其蠕变应变率的影响机制。即随着含盐量的增大, 加快了饱和盐渍土中黏塑性重新调整和离子相互作用的程度和速度, 从而增加了盐渍土蠕变的蠕变量和加快了蠕变速率。

对比3种应力水平下的蠕变情况, 发现饱和非盐渍土(含盐量为0.0 mol/kg)蠕变的分数阶阶数都相同, 即 $r=0.0118$ 。这与表1给出非盐渍土次压缩系数的情況相同, 表明应力水平对蠕变效应的影响不太明显。而不同含盐情况下阶数 r 的不同正好反映了含盐量对土体蠕变行为存在着一定的影响。

为了明确含盐量对黏度系数 β_1 的影响, 对黏度系数 β_1 的确定方法进行了讨论。根据现有元件模型的研究结果发现黏度系数 β_1 与应力水平、温度等因素有明显的相关性^[25-26]。根据图7的研究结果, 结合偏应力和渗透吸力构造了黏塑系数的求解公式:

$$\beta_1 = \beta_1^0 + b_{11} \exp(b_{12} q_a^*) - c_{11} \pi - c_{12} \pi^2 \quad (22)$$

式中: q_a^* 为不考虑有效渗透应力的剪应力; β_1^0 为初始黏度系数; b_{11} 和 b_{12} 分别表示在不同土体结构中 β_1 与应力水平的相互作用系数; c_{11} 和 c_{12} 表示渗透吸力对参数 β_1 的影响系数。

图8为采用式(22)的计算结果与图7中黏度系数 β_1 的对比情况。其中参数的取值采用拟合结果解方程得到。根据图示结果发现, 只有在偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3 = 200$ kPa, $m = 1.2$ mol/kg 和 $m = 1.8$ mol/kg 时出现较大偏差, 而其他情况下的计算结果与拟合

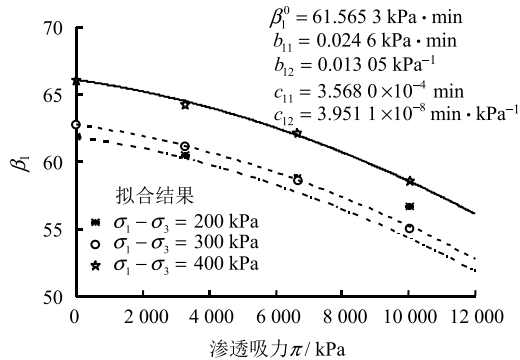


图8 β_1 计算结果与拟合结果的对比

Fig.8 Comparison between calculation results and fitted results of β_1

结果都非常接近。因此, 表明采用式(22)计算黏度系数是有效的。

5.2 模型验证

图9为采用式(22)计算黏度系数后的模型计算结果与图7拟合结果的对比。

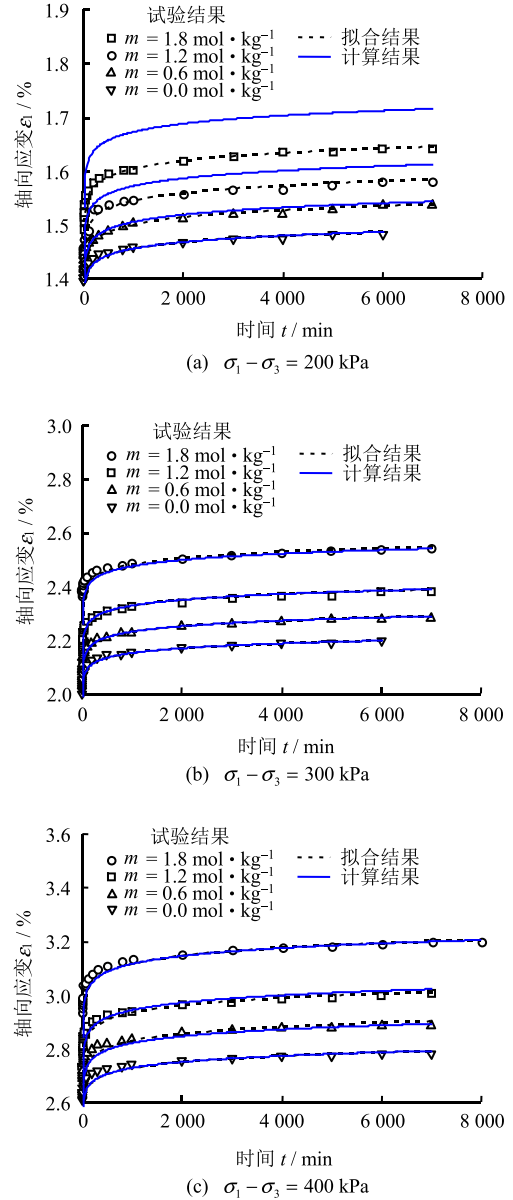


图9 模型计算结果与拟合结果的对比

Fig.9 Comparison between model calculation results and fitting results

从图中可以发现除了偏应力为200 kPa作用下, 且 $m = 1.2$ mol/kg 和 $m = 1.8$ mol/kg 时的计算结果存在明显的误差外, 其他条件下的计算结果、拟合结果与试验结果都较为吻合。上述结果正好与图8的比较结果相类似。根据图8和图9的比较结果发现, 在200 kPa时出现的误差极有可能是试验操作引起的误差(如击样过程中产生的压实度差异), 而不太

可能是式(22)的计算误差。因此,可以认为式(22)及饱和盐渍土的分阶蠕变模型是有效的。

6 结 论

本文首先对3种溶液饱和下的土体进行了固结试验和三轴剪切蠕变试验。其次,结合基于渗透吸力和Abel阻尼器以及Bingham模型建立的分阶蠕变模型,展开了渗透吸力对饱和盐渍土固结蠕变特性影响的一系列研究。其中,主要的研究结论概括为以下两个方面:

(1) 次固结系数与压缩指数的比值 C_a/C_c 随着渗透吸力的增大而增大,两者的表达式可以采用指数函数表示。而初始剪切模量和初始剪切应变随着渗透吸力的增大分别呈现出减小和增大的趋势,并且两者与渗透系数分别为二次函数关系和线性关系。其中 C_a/C_c 随着渗透吸力变化的机制从侧面反映了含盐量、含盐种类对盐渍土蠕变行为存在着不同程度的促进作用。初始剪切模量与渗透吸力的关系反映了含盐量增大会降低土体的抗剪强度,而初始剪切应变随渗透吸力的增加反映了含盐量对土体应变效应的贡献。

(2) 饱和盐渍土的分阶蠕变模型在改进原有元件模型的基础上实现了不同含盐量情况下饱和盐渍土蠕变行为的描述。通过与试验结果比较,发现该模型能够预测饱和盐渍土的蠕变行为,而且根据参数的拟合结果给出并验证了求解不同应力状态下饱和盐渍土的黏度系数公式及分阶模型的有效性。结合黏度系数 β_1 和阶数 r 随渗透吸力的变化趋势,发现盐渍土的蠕变量和蠕变应变率随着含盐量的增大而增大。

参 考 文 献

- [1] LADE, POUL V. Creep effects on static and cyclic instability of granular soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 120(2): 404-419.
- [2] OGATA N, YASUDA M, KATAOKA T. Effects of salt concentration on strength and creep behavior of artificially frozen soils[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 1983, 8(2): 139-153.
- [3] NIXON J F, LEM G. Creep and strength testing of frozen saline fine-grained soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1984, 21(3): 518-529.
- [4] WIJEWEERA H, JOSHI R C. Creep behavior of saline fine-grained frozen soil[J]. **Journal of Cold Regions Engineering**, 1993, 7(3): 77-89.
- [5] 刘松玉, 范日东, 杜延军, 等. 盐溶液作用下土的压缩及渗透特性预测方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 43(增刊 1): 14-19.
- LIU Song-yu, FAN Ri-dong, DU Yan-jun, et al. Prediction of compression and permeability behavior of salt-contaminated soils[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2016, 43(Suppl.1): 14-19.
- [6] 赵续月, 颜荣涛, 梁维云, 等. 渗透吸力对饱和黏土变形-强度特性的影响[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 56-60.
- ZHAO Xu-yue, YAN Rong-tao, LIANG Wei-yun, et al. Effect of suction on strength characteristics of saturated clay[J]. **Journal Guilin University of Technology**, 2017, 37(3): 56-60.
- [7] 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.
- [8] 颜荣涛, 纪文栋, 陈星欣, 等. 盐溶液饱和黏土的力学行为模拟[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 546-552.
- YAN Rong-tao, JI Wen-dong, CHEN Xing-xin, et al. Modeling mechanical behaviors of clayey soil saturated by salt solution[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 546-552.
- [9] 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 Tong-wei, DENG Yong-feng, LIU Song-yu, 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.
- [10] XU Yong-fu, XIANG Guo-sheng, JIANG Hao, et al. Role of osmotic suction in volume change of clays in salt solution[J]. **Applied Clay Science**, 2014, 101: 354-361.
- [11] 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.
- [12] 何利军, 孔令伟, 吴文军, 等. 采用分数阶导数描述软黏土蠕变的模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 239-243.
- HE Li-jun, KONG Ling-wei, WU Wen-jun, et al. A description of creep model for soft soil with fractional

- derivative[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Suppl.2): 239-243.
- [13] 何志磊, 朱珍德, 朱明礼, 等. 基于分数阶导数的非定常蠕变本构模型研究[J]. **岩土力学**, 2016, 37(3): 737-744.
HE Zhi-lei, ZHU Zhen-de, ZHU Ming-li, et al. An unsteady creep constitutive model based on fractional order derivatives[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(3): 737-744.
- [14] ENELUND M, MÄHLER L, RUNESSON K, et al. Formulation and integration of the standard linear viscoelastic solid with fractional order rate laws[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1999, 36(16): 2417-2442.
- [15] SCHIESSEL H, METZLER R, BLUMEN A, et al. Generalized viscoelastic models: their fractional equations with solutions[J]. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, 1999, 28(23): 6567-6584.
- [16] ZHOU H W, WANG C P, HAN B B, et al. A creep constitutive model for salt rock based on fractional derivatives[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(1): 116-121.
- [17] LIAO Meng-ke, LAI Yuan-ming, LIU En-long, et al. A fractional order creep constitutive model of warm frozen silt[J]. **Acta Geotechnica**, 2016, 12(2): 1-13.
- [18] SPOSITO G. The thermodynamics of soil solutions[M]. [S. l.]: Clarendon Press, 1981.
- [19] PITZER K S. Thermodynamics of electrolytes. I. Theoretical basis and general equations[J]. **Journal of Physical Chemistry**, 1972, 77(2): 268-277.
- [20] 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.
- [21] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1977, 103(5): 447-466.
- [22] KIRYAKOVA V, AL-SAQABI B. Explicit solutions to hyper-Bessel integral equations of second kind[J]. **Computers & Mathematics with Applications**, 1999, 37(1): 75-86.
- [23] ROSCOE K H, BURLAND J B. On the generalized stress-strain behavior of wet clay[M]. New York: Cambridge University Press, 1968: 535-609.
- [24] MESRI G, GODLEWSKI P M. Time and stress-compressibility interrelationship[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1977, 103(5): 417-430.
- [25] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(6): 1081-1106.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [26] 李鑫, 刘恩龙, 侯丰. 考虑温度影响的冻土蠕变本构模型[J]. **岩土力学**, 2019, 40(2): 210-217.
LI Xin, LIU En-long, HOU Feng. A creep constitutive model for frozen soils considering the influence of temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(2): 210-217.

上接第 542 页

- [13] 中华人民共和国水利部. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
Ministry of Water Resources of People's Republic of China. GB/T 50145—2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [14] ISHIHARA K, YAMAZAKI A. Analysis wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand[J]. **Soils and Foundations**, 1984, 24(3): 85-100.
- [15] 周正龙, 陈国兴, 赵凯, 等. 循环加载方向角对饱和粉土不排水动力特性的影响[J]. **岩土力学**, 2018(1): 36-44.
ZHOU Zheng-long, CHEN Guo-xing, ZHAO Kai, et al. Effect of the direction angle of cyclic loading on undrained cyclic behavior of saturated silt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018(1): 36-44.
- [16] HUANG B, CHEN X, ZHAO Y. A new index for evaluating liquefaction resistance of soil under combined cyclic shear stresses[J]. **Engineering Geology**, 2015, 199: 125-139.
- [17] SIVATHAYALAN S, LOGESWARAN P, MANMA-THARAJAN V. Cyclic resistance of a loose sand subjected to rotation of principal stresses[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2015, 141(3): 04014113.