

膨胀土膨胀变形时程特性研究

黄华县¹, 张春顺²

(1. 广州城建开发南沙房地产有限公司, 广东 广州 511457; 2. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 为研究膨胀土膨胀变形随时间的变化, 进行了2组南宁膨胀土室内单向浸水膨胀试验和膨胀土桩基灌溉模拟试验, 分别对有荷、无荷膨胀土的线胀率的时程特性和桩基周膨胀土变形的时程特性进行了较长时间的研究。研究发现, 尽管土样的初始含水量及干密度不同, 但土样有荷膨胀变形的时程特性具有相似的规律: 有荷(大于50 kPa)情况下, 土样线胀率 $\lg \delta$ 与时间 t 曲线可分为3个阶段, 且该曲线可以用指数关系进行精准描述; 无荷膨胀土膨胀率 $\lg \delta$ 与 t 的关系用对数函数拟合更为精确; 对桩基模拟试验结果进行分析和数值拟合, 建立了考虑时间因素的桩周土隆起量的指数函数关系式, 为进一步研究桩-土共同作用奠定了试验基础。

关键词: 膨胀土; 线胀率; 时程特性; 变形规律

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)04-0006-05

Study on Time-Related Characteristics of Expansive Soils Swelling Deformation

Huang Huaxian¹, Zhang Chunshun²

(1. Guangzhou City Construction and Development Nansha Real Estate Co., Ltd., Guangzhou 511457, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to study the expansive soils deformation over time, carries out two groups of experiments on Nanning expansive soils, which one is indoor 1-D immersion test and the other is foundation irrigation simulation. After a long period investigation on the time-related swelling ratio and the expansive soils deformation around pile base, finds that though soil samples containing different initial moisture and dry densities, the loaded expansive soils appear similar deformation behavior over time. When loaded (>50 kPa), the curve of swelling ratio $\lg \delta$ against time can be generally divided into three stages, which can be accurately described by exponential law in semi-logarithmic coordinates, and for unloaded samples, the relation of $\lg \delta-t$ can be more precisely fitting with logarithmic function. Then conducts a numerical simulation to analyze the model pile test, establishes an exponential function relation concerning the time-related swelling behavior of the pile side soil, and lays experimental basis for further exploration on interactions between piles and expansive soils.

Keywords: expansive soils; swelling ratio; time-related characteristics; deformation law

1 概述

膨胀土是一种特殊的土, 粘粒成分主要由强亲水矿物组成, 尤其是以蒙脱石、伊利石或蒙脱-伊利石混层矿物为主。它遇水强烈膨胀, 失水又会强烈收缩, 对上部工程有较大危害, 尤其是对于低层建筑及道路的危害严重, 因为这些工程荷载轻, 整体性不强, 基

础埋置浅, 地基土易受外界因素而产生严重的变形, 所以, 充分认识和把握膨胀土的不良工程性质, 尤其是在外界环境因素影响下所发生的胀缩变形是非常重要的。

国内外许多学者对膨胀土膨胀的性能从强度和变形两方面做了大量的研究, 得到了膨胀变形量或膨胀

收稿日期: 2009-06-28

基金项目: 湖南省教育厅基金资助重点项目(07A017), 湖南省自然科学基金资助项目(08JJ3092)

作者简介: 黄华县(1982-), 男, 浙江温州人, 广州城建开发南沙房地产有限公司工程师, 硕士, 主要从事房地产开发工作,

E-mail: oliver_hero@126.com

力与土样初始含水量、干密度、饱和度及上覆压力间的关系^[1-8], 李献民等^[9]通过试验验证了在无荷条件下膨胀土的胀缩是不完全可逆。本项研究进一步通过有荷膨胀试验证明, 在有荷条件下膨胀土的胀缩也是不完全可逆的, 程度上比无荷情况有所不同, 且失水收缩速率比吸水膨胀速率要快。

众所周知, 膨胀土的变形与时间是有密切关系的, 它随时间变化而变化, 其含水率、干密度、饱和度等的变化都与时间直接相关, 国内这方面的研究尚不多见。袁俊平等^[10]曾提出膨胀率与时间呈半对数关系, 将膨胀过程分为3个阶段, 分别用函数进行拟合, 并运用神经网络方法对单向浸水条件下的膨胀土的胀缩特性进行了研究, 但该关系仅适用于在垂直荷载为25 kPa时或无荷情况。在本文中研究, 当荷载分别为50 kPa、75 kPa、100 kPa时, 研究结果表明并不完全呈现文献^[4]中所提到的膨胀率与时间半对数关系。试验分析表明: 在试验时间3 000 min内, 线胀率-时间曲线在半对数坐标中呈精准的指数关系, 且该曲线可分为3个阶段: 快速增加、缓慢增加和趋于平稳段; 在试验时间20 000 min内, 无荷膨胀土膨胀率与时间的关系在半对数坐标下并非呈比较精确的双曲线关系, 而应采用对数函数拟合更为精确。

另一方面, 膨胀土与桩的共同作用的研究还鲜有报道, 本文通过基桩模拟试验对桩侧土的变形时程特性进行了初步分析, 提出了考虑时间因素的桩周土隆起量的指数函数关系式, 为进一步研究桩土共同作用奠定了试验依据。

2 膨胀土线胀率时程性研究

2.1 土样介绍及制备

试验所用的土样为广西南宁膨胀土, 其成因为冲洪积膨胀土, 土体呈灰白色, 属中等膨胀土。其中土样液限48.10%, 塑限为21.22%, 塑性指数 IP 为26.78%, 最优含水量 ω 为15.8%, 最大干密度为1.89 g/cm³; 膨胀和收缩试验装置为南京电力自动化设备总厂出厂的三联中压固结仪; 膨胀试验时一直要注意保持水面略高于土样5 mm左右; 试验数据由南京电力自动化设备总厂制造的土工试验微机数据采集处理系统自动采集。

有荷膨胀试验时进行了1组土样的制备, 共计3个土样, 土样初始条件为 $W_0=20.5\%$, $\rho_0=1.62\text{ g/cm}^3$, 荷载分别采用50 kPa、75 kPa、100 kPa; 无荷膨胀试验时进行了2组土样的制备, 每组3个土样。2组试验土样的初始含水率分别为14.25%、17.61%; 土样的密实度分别为88%、90%、和95%。

试样制备: ①将碾碎的风干土样过2 mm筛, 充分拌匀; ②测定风干含水率, 计算配置一定含水率的土样所须的加水量; ③用喷雾器喷洒预计的含水量, 然

后用塑料袋将搅拌的土样装入, 扎紧袋口后放置于保湿缸内静置24 h以上, 以确保土样水分均匀; ④用烘干法量测土样的含水量($T=105\sim 110^\circ\text{C}$, $t\geq 8\text{ h}$), 按设计干密度计算制备环刀土样所需的质量; ⑤将两环刀背靠背放置于较大的平整垫块上, 将称量好的土样均匀地放入一个外径与环刀内径相同、高度与环刀等高的金属垫块, 用击实方法将上面的金属垫块均匀地压入环刀内, 直到垫块与环刀平齐为止。

2.2 有荷膨胀土膨胀的时程特性研究

土样变形的大小用膨胀率 δ 表示, 即

$$\delta = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: ΔH 为土样膨胀后的高度变化量;

H_0 为土样浸水前的高度。

通过对试验数据进行分析, 得到土样在不同压力作用下的膨胀时程特性结果($W_0=20.5\%$, $\rho_0=1.62\text{ g/cm}^3$)如图1所示。

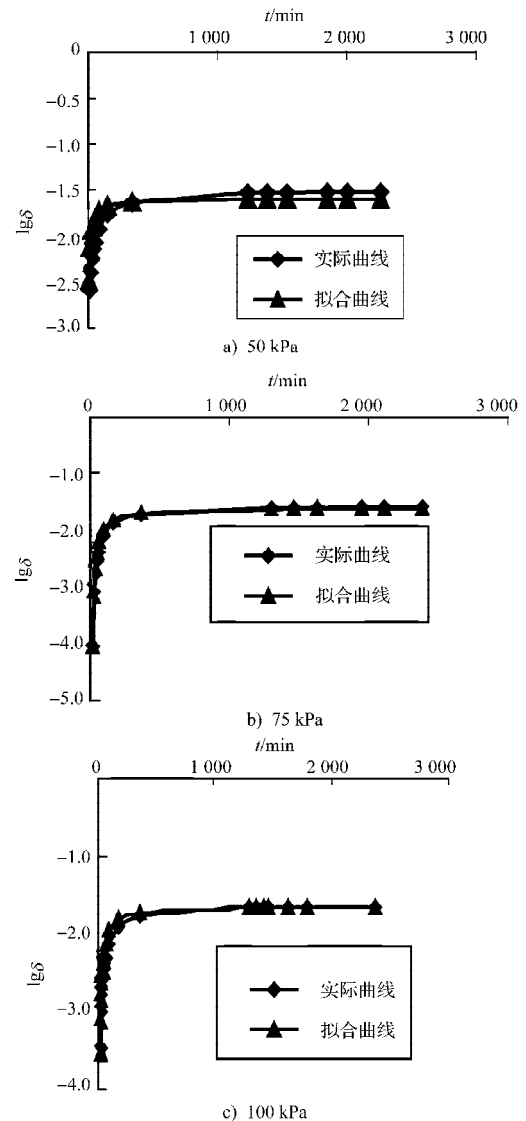


图1 有荷线胀率的时程关系

Fig. 1 The time-relations of loaded linear swelling ratio

很明显,对于本项研究中所做的膨胀土的膨胀与时间关系,在压力大小一定时,膨胀率的对数和时间呈现出较好的双曲线关系,双曲线可分为2段,即迅速膨胀段和稳态段。因而,通过对试验数据的回归分析可得到膨胀土的有荷膨胀率与时间的关系,如表1所示。

表1 线胀率的时程性线性回归方程

竖向荷载 /kPa	回归方程	回归系数		拟合度 R
		A	B	
50	$\delta = A \cdot e^{-B/t}$	0.048 91	100.298	0.99
75		0.036 68	76.112 4	0.99
100		0.039 61	39.508 2	0.97

注:土样初始条件为 $W_0=20.5\%$, $\rho_0=1.62 \text{ g/cm}^3$ 。

在本次试验中注意到,当时间超过1500 min时,所有土样均不再继续膨胀,认为达到稳定阶段,见图1所示。

根据表1及图1,可以得到膨胀土的线胀率和时间关系为: $\delta = A \cdot e^{-B/t}$ 。(2)

显然,开始加压时,土样会产生收缩变形,待其变形量小于0.01 mm/h时,认为收缩变形稳定,此刻土样高度即为 H_0 ,再开始加水对其进行膨胀试验。此处提供的公式只是针对膨胀土开始出现正膨胀(δ 从开始吸水膨胀时取值)考虑的。

2.3 无荷膨胀土膨胀的时程特性研究

同样,通过对试验数据进行分析,可以得到无荷膨胀时程特性曲线如图2所示。

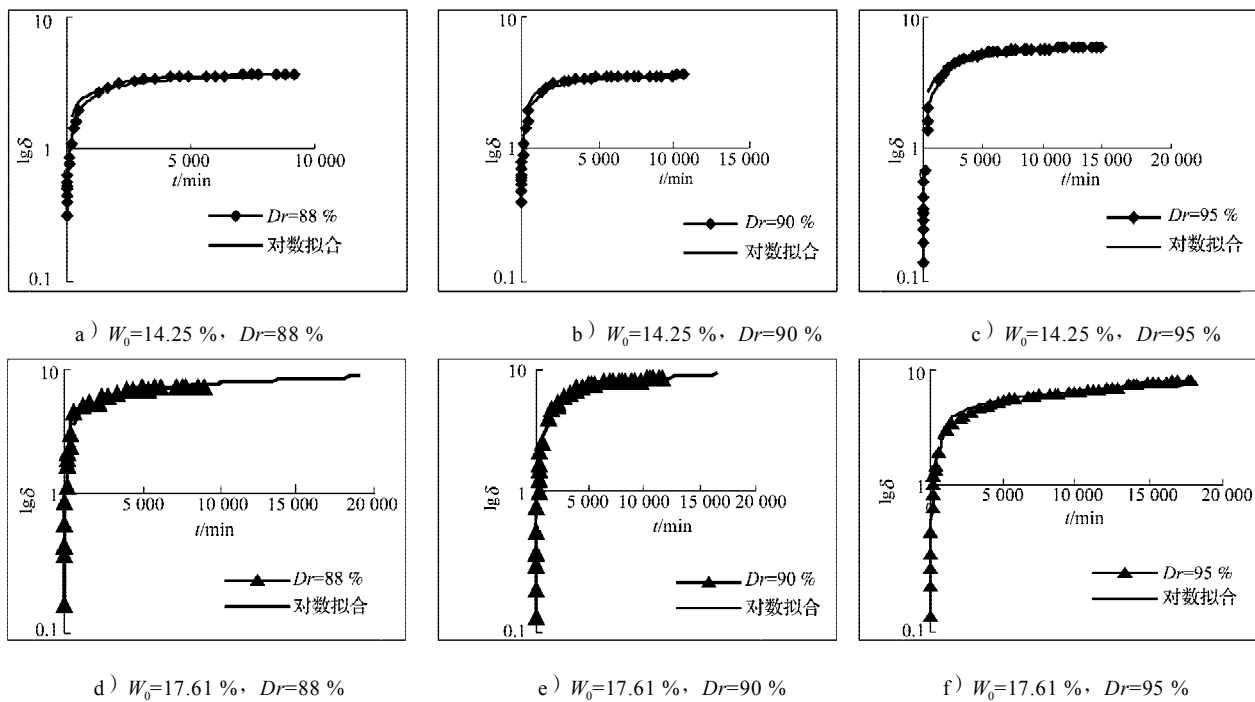


图2 无荷线胀率时程关系

Fig. 2 The time-relations of unloaded linear swelling ratio

如图2所示,在半对数坐标中,通过对数据进行拟合分析发现,无荷膨胀土膨胀曲线可分为3个阶段:迅速膨胀阶段、缓慢膨胀阶段和稳定阶段,这与袁俊平等^[10]得到的试验结果一致。文献^[11]将这3个阶段分

别用线性函数进行了拟合,本文通过数据分析发现,采用对数函数拟合各曲线,结果较为理想。无荷线胀率时程关系的对数拟合表达式为: $\delta = C \ln t - D$,(3) 式中C和D均为回归系数,其取值见表2。

表2 $W_0=14.25\%$ 和 $W_0=20.5\%$ 的土样线胀率的时程性线性回归方程

Table 2 Linear regression of swelling ratio versus time for soil sample $W_0=14.25\%$ and $W_0=20.5\%$

密实度 $D_r/\%$	拟合函数	$W_0=14.25\%$ 时			$W_0=20.5\%$ 时		
		回归系数		拟合度 R	回归系数		拟合度 R
		C	D		C	D	
88	$\delta = C \ln t - D$	0.819 8	2.227 2	0.98	0.715 6	1.967 4	0.98
90		0.807 5	2.138 9	0.98	0.759 3	2.493 3	0.98
95		0.838 5	2.511 2	0.97	0.743 5	2.657 8	0.98

3 桩周膨胀土膨胀变形时程特性研究

3.1 模拟桩基试验设计

模型桩材选用 65 cm 长、Φ 50PVC 管, 桩身用环氧树脂粘上一层细纱, 用来模拟桩身的粗糙。在桩身不同位置粘贴应变片, 用于测定桩身应力的变化情况, 贴片位置如图 3 所示。

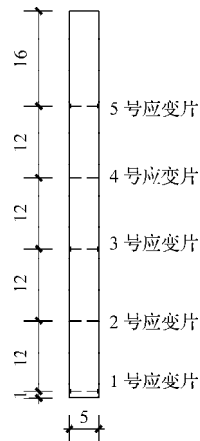


图 3 模型桩及应变片示意图
Fig. 3 Model pile and strain gauges

在模型箱的底部填 12 cm 厚的碎石, 其上填 30 cm 厚中砂, 在中砂上填满膨胀土, 并在膨胀土中设置水平砂层和竖向砂。在模型箱底部设有排水阀, 根据需要可以将排水阀打开或关闭, 用于模拟膨胀土中的渗水和排水。在桩底土中埋设了一个土压力盒, 用于测定桩端荷载大小, 如图 4 所示。

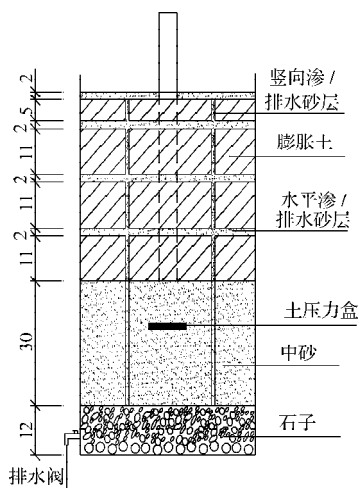


图 4 模型箱内部示意图
Fig. 4 The internal sketch of model box

本试验中所用的土为重塑膨胀土, 按最优含水量 15.8% 预配足够的土样, 分 3 层填入模型箱中, 并用人工方法击实到预定的密实度。

3.2 桩周土变形的时程性分析

为了分析桩-土共同作用的时程性, 有必要先对桩周土的时程性进行分析。采用本次试验得到的数据

进行分析, 得到半对数坐标中 2 个模型试验中桩周土的时程曲线分别如图 5、6。

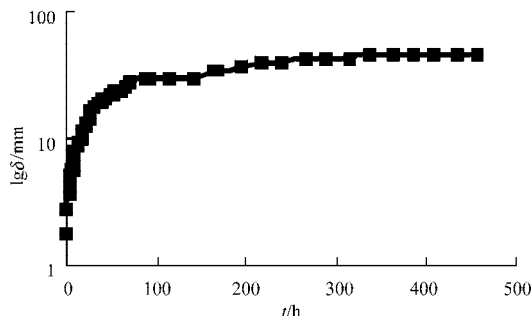


图 5 1# 模型桩周附近土土表位移
Fig. 5 Displacement of soil surface around pile in model 1#

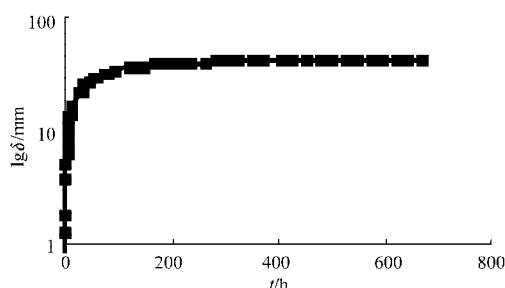


图 6 2# 模型桩周附近土土表位移
Fig. 6 Displacement of soil surface around pile in model 2#

容易看出, 该曲线的发展形式与无荷膨胀土受荷膨胀曲线非常相似, 可以用式 (2) 描述桩周土变形随时间的关系, 于是桩周土的隆起量为:

$$s_0 = A \cdot e^{-Bt}, \tag{4}$$

式中: s_0 为桩周土土表隆起量;

A 和 B 为拟合分析得到的回归系数。

另一方面, Poulos^[11]指出在实际工程计算中, 为简化计算量, 可以假设影响深度内的膨胀土的膨胀量线性变化, 即土表膨胀量最大, 影响深度底部膨胀量假设为 0。所以, 可以假设土的膨胀量与土层深度关系曲线如图 7 所示, 该方程如下:

$$s(z) = \begin{cases} s_0 - \frac{s_0}{h_0} \cdot z, & 0 \leq z \leq h_0, \\ 0, & z > h_0, \end{cases} \tag{5}$$

式中: $s(z)$ 为某时刻不同深度处桩周膨胀土的隆起量; h_0 为膨胀土的膨胀影响深度, 即含水量有变化的土层厚度。

现在引入时间因素, 将式 (4) 代入到式 (5) 得:

$$s(z, t) = \begin{cases} A \cdot e^{-Bt} - \frac{A \cdot e^{-Bt}}{h_0} \cdot z, & 0 \leq z \leq h_0; \\ 0, & z > h_0. \end{cases} \tag{6}$$

式 (6) 即为桩周土各深度处变形随时间的关系表达式。

有了式 (6) 就可以得出任意时刻桩周土的膨胀量与深度的关系。接下来, 只要能从理论上推求膨胀土膨胀作用下桩荷载传递规律的微分方程, 那么就可以

从数值上模拟桩-土共同作用随时间的变化关系了。进一步的研究详见文献[12]。考虑到一般情况下膨胀土的影响深度在3~5 m范围内,所以,为了得到整个影响深度范围内的参数 A 和 B 的平均值,可以通过钻取1.5~2.5 m的原状土进行室内轻荷载(27~36 kPa)下的膨胀试验,再由数据拟合得到两参数值。

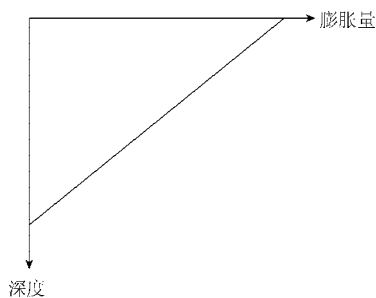


图7 土的膨胀量与土层深度关系曲线

Fig. 7 The relations curve of soil swelling and soil depth

4 结论

1) 在半对数坐标下,有荷载线胀率曲线可分为3个阶段,且该曲线与时间呈双曲线关系;

2) 无荷膨胀土膨胀率与时间的关系在半对数坐标下并非呈比较精确的双曲线关系,而应采用对数函数拟合更为精确;

3) 通过分析试验结果并进行数值拟合,建立了考虑时间因素的桩周土隆起量的计算表达式,为研究桩-土共同作用随时间的变化提供了试验和理论依据及思路。

参考文献:

- [1] 谭罗荣,孔令伟.膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J].岩石力学,2004,25(10):1555-1559.
Tan Luorong, Kong Lingwei. Study on Variation Regularity of Swelling Behavior of Expansive Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1555-1559.
- [2] 杨庆,张慧珍,栾茂田.非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):420-425.
Yang Qing, Zhang Huizhen, Luan Maotian. Testing Study on Shear Streangth of Unsaturated Expansive Soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 420-425.
- [3] 卢再华,陈正汉,孙树国.南阳膨胀土变形与强度特性的三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):717-723.
Lu Zaihua, Chen Zhenghan, Sun Shuguo. Study on Deformation and Strength Characteristic of Expansive Soil with Triaxial Tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2002, 21(5): 717-723.
- [4] 徐永福,史春乐.宁夏膨胀土的膨胀变形规律[J].岩土工程学报,1997,19(3):95-98.
Xu Yongfu, Shi Chunle. The Deformation Law of Ningxia Expansive Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3): 95-98.
- [5] 缪林昌,仲晓晨,殷宗泽.非饱和膨胀土变形规律的试验研究[J].大坝观测与土工测试,1999,23(3):36-39.
Miao Linchang, Zhong Xiaochen, Yin Zongze. Test Research of Unsaturated Expansive Soil Strain Laws[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1999, 23(3): 36-39.
- [6] Amer A, Al Rawas, Ingeborg Guba, et al. Geological and Engineering Characteristics of Expansive Soils and Rocks in Northern Oman[J]. Engineering Geology, 1998, 50: 267-281.
- [7] 王园.膨胀土的变形性能[J].工程勘察,1997(5):14-18.
Wang Yuan. Deformation Behaviour of Expansive Soil[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1997(5): 14-18.
- [8] Miao Linchang, Liu Songyu, Lai Yuanming. Research of Soil-Water Charac-Teristics and Shear Strength Features of Nanyan Expansive Soils[J]. Engineering Geology, 2002, 65: 261-267.
- [9] 李献民,王永和,肖宏彬,等.击实膨胀土胀缩速度特性的对比研究[J].铁道学报,2003,25(4):115-120.
Li Xianmin, Wang Yonghe, Xiao Hongbin, et al. Contrastive Study on the Characteristic of Shrink-Swell Speed for Compacted Expansive Soil[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(4): 115-120.
- [10] 袁俊平,陈剑.膨胀土单向浸水膨胀时程特性试验与研究[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(9):547-551.
Yuan Junping, Chen Jian. Experimental Research on Swelling Characteristics of Expansive Soil under One-Side Immersion and Its Application[J]. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 2003, 31(9): 547-551.
- [11] Poulos H G, Davis E H. Pile Foundation Analysis and Design [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [12] 张春顺.膨胀土地基中桩的荷载传递特性研究[D].株洲:湖南工业大学,2006.
Zhang Chunshun. Research on Load Transfer Character of Pile in Expansive Soil Foundation[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2006.
- [13] 范志强,肖宏彬,张亦静.南宁非饱和膨胀土压缩蠕变特性试验研究[J].湖南工业大学学报,2009,23(1):1-5.
Fan Zhiqiang, Xiao Hongbin, Zhang Yijing. Experimental Study on Compression Creep Characteristics for Nanning Unsaturated Expansive Soils[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(1): 1-5.

(责任编辑:张亦静)