



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.023

王艳芳,周治刚,蔡燕燕.基于 $k_0$ 固结条件的淤泥土排水蠕变特性试验研究[J].南水北调与水利科技,2017,15(3):139-144. WANG Yarr fang, ZHOU Zhi gang, CAI Yarr yan. Drained creep characteristic of silt soil based on  $k_0$  consolidation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 139-144. (in Chinese)

# 基于 $k_0$ 固结条件的淤泥土排水蠕变特性试验研究

王艳芳<sup>1</sup>, 周治刚<sup>2</sup>, 蔡燕燕<sup>3</sup>

(1. 南京大学 金陵学院, 南京 210093; 2. 江苏省水利工程科技咨询有限公司, 南京 210029;  
3. 华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 通过  $k_0$  固结蠕变试验探讨饱和淤泥土在轴向加载和侧向减载条件下的蠕变特性。由试验数据知: 排水条件下, 两种应力路径的轴向蠕变规律基本一致, 体积应变明显小于轴向应变, 且随时间的延长呈现一定程度的剪缩与剪胀交替性。Merchant 和 Burgers 蠕变模型对淤泥土都有较好拟合精度。二者的蠕变参数  $E_K$ 、 $\eta_K$ 、 $\eta_M$  均呈现随应力水平的增大而减小的变化规律,  $E_M$  随应力水平的变化则较为平稳, 无明显增大或减小趋势, 说明淤泥土的蠕变变形受黏弹模量影响较小, 受土体黏滞系数及弹性模量影响较大。

**关键词:** 淤泥土;  $k_0$  固结; 蠕变试验; Merchant 模型; Burgers 模型

**中图分类号:** TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0139-06

## Drained creep characteristic of silt soil based on $k_0$ consolidation

WANG Yarr fang<sup>1</sup>, ZHOU Zhi gang<sup>2</sup>, CAI Yarr yan<sup>3</sup>

(1. Jinling College, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Jiangsu Province Water Engineering Sci-tech Consulting Co. LTD, Nanjing 210029, China; 3. Fujian engineering technology research center for tunnel and underground space, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The creep characteristic of saturated silt soil was studied through  $k_0$  consolidation creep tests under the conditions of axial loading and lateral lightening. The following results were found. First, the axial creep patterns of the two stress paths were basically consistent under the drainage conditions. The volume strains were much smaller than the axial strains. The volume strains showed an alternation between shear shrinkage and shear dilatancy with the passage of time. The Merchant and Burgers creep models both had good fitting accuracy. The creep parameter  $E_M$  showed no significant increasing or decreasing trend with the increase of deviatoric stress level, but the other creep parameters  $E_K$ ,  $\eta_K$ ,  $\eta_M$  of the two creep models decreased with the increase of deviatoric stress level. These findings suggested that the creep strain of silt soil is mildly influenced by viscoelastic modulus, but largely influenced by the viscous coefficient and elastic modulus.

**Key words:** silt soil;  $k_0$  consolidation; creep test; Merchant model; Burgers model

近年来,随着软土工程的迅速发展,关于软黏土的蠕变特性研究取得了许多的成果<sup>[1-6]</sup>。目前对土体蠕变特性的试验研究多数基于常规的等向固结三

轴试验进行,而没有考虑土体  $k_0$  固结情况对其蠕变特性的影响。随着对天然状态  $k_0$  固结土的研究不断深入,人们逐渐认识到各向异性对土体的蠕变性

收稿日期: 2016-01-09 修回日期: 2016-03-28 网络出版时间: 2017-05-06  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1118.015.html>  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51308234)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China(51308234)

**作者简介:** 王艳芳(1983-),女,副教授,博士,主要从事岩土室内试验、本构理论、软基处理与试验检测、地下工程等方面工作。E-mail: wyf\_02@163.com

状有较大影响<sup>[7-9]</sup>。有些学者对  $k_0$  固结软土的流变模型进行了探讨,但都仅考虑初始应力诱发各向异性的影响,而没有考虑土体剪切变形过程中各向异性的演化<sup>[10-12]</sup>。本文旨在通过三轴试验研究饱和土体在完成  $k_0$  固结后且排水条件下的蠕变规律,并探讨在轴向加载条件下和侧向减载条件下土样的蠕变特性有何差异。

### 1 三轴蠕变试验

#### 1.1 试验方案

本文淤泥土取自于天津港码头遮帘式板桩码头工程项目区域,土样的物理力学性质参数如表 1 所示。由于码头工程区域土体变形主要受到轴向压缩和侧向卸荷两种应力路径的作用<sup>[13]</sup>,故本文取一定数量的淤泥土进行饱和重塑土的轴向加载和侧向减载的三轴排水蠕变试验。试验之前先根据淤泥土的取样深度完成土体的先期  $k_0$  固结条件。本文淤泥土样  $k_0$  值取为 0.45。

表 1 淤泥土基本物理力学参数

天然重度 $\gamma$ / (kN · m <sup>-3</sup> )	土粒相对 密度 $G_s$	含水率 $\omega$ (%)	固结快剪指标	
			$C_q$ /kPa	$\phi_q$ (°)
17.6	2.71	43.1	16.0	17.1

试验在改装后的应力控制式三轴仪上进行,试样直径为 39.1 mm,高度为 80 mm。试验过程共分三步骤,以轴向加载条件下围压 50 kPa 土样为例,第一步土样在 50 kPa 围压荷载下完成等向固结;第二步依据  $k_0 = 0.45$ ,缓慢增加轴压至 111 kPa 并完成  $k_0$  固结;第三步为蠕变加载,每级荷载为缓慢增加轴压 20~40 kPa 不等,如第一级为轴压由 111 kPa 增至 130 kPa 后并保持轴压不变,测定该级荷载下,土样轴向变形及体积变形随时间的变化量,待轴向变形达到蠕变稳定标准后,进入下一级蠕变荷载。具体蠕变试验方案见表 2。

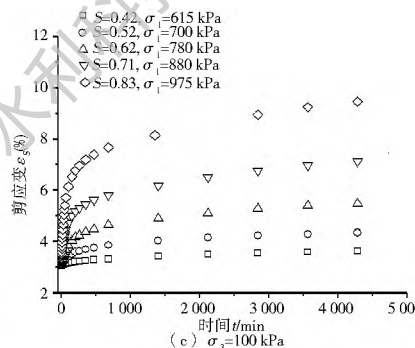
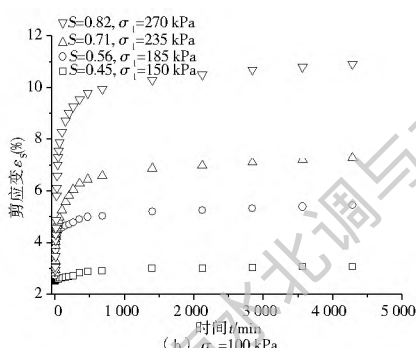
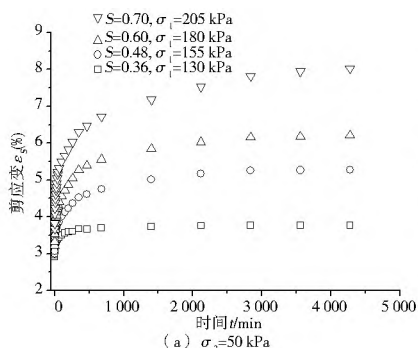


图 1 轴向加载条件下淤泥土剪应变蠕变曲线

Fig. 1 Creep curves of shear strain of silt soil under axial loading

表 2 土样蠕变试验加载方案

加载方式	固结压力 / kPa		蠕变试验荷载分级 / kPa				
	围压	轴压	围压	轴压			
轴向加载	50	111	50	130	155	185	205
	100	222	100	250	285	335	370
	250	555	250	615	700	780	880
侧向减载	50	111	40	30	20	15	111
	100	222	80	60	45	35	222
	250	555	210	170	150	130	555

由于目前为止,还没有关于蠕变试验的规范,对蠕变的稳定标准也没有统一的说法,一般认为在 10 000 s 内变形量小于 0.01 mm,则认为已达到稳定<sup>[14]</sup>。如实际上观察土样在 24 h 内变形量小于 0.01 mm,则可以进入下一级应力水平试验<sup>[15-17]</sup>。此次蠕变试验稳定标准为:每一级蠕变荷载施加的同时开始记录,当时间为 0.25 min、1.25 min、4 min、9 min、16 min、25 min、36 min、49 min、64 min、100 min、150 min、200 min、260 min、350 min、470 min、650 min 时记录百分表读数及体变管读数,接下来一天内进行 2~4 次读数。试样连续 24 h 内土样轴向变形小于 0.025 mm 时,认为蠕变变形已稳定,可以继续下一级荷载的施加或结束试验。

#### 1.2 试验结果分析

##### 1.2.1 剪切蠕变

根据实验结果,采用线性叠加原理将分级荷载下的应变-时间关系曲线转换为分别荷载下的蠕变曲线,并依据  $\epsilon_s = \epsilon_e - 1/3\epsilon_v$  求解出各级荷载作用下剪应变蠕变曲线<sup>[18]</sup>,见图 1、图 2。由于土体进行排水蠕变试验之前,先完成三轴  $k_0$  固结试验,故土体在第一级蠕变之前就存在初始的剪应变和体积应变,且变形量随围压的增大而增加,土体先期  $k_0$  固结变形值相较蠕变变形不可忽略,说明还原土体先期  $k_0$  固结条件的必要性。

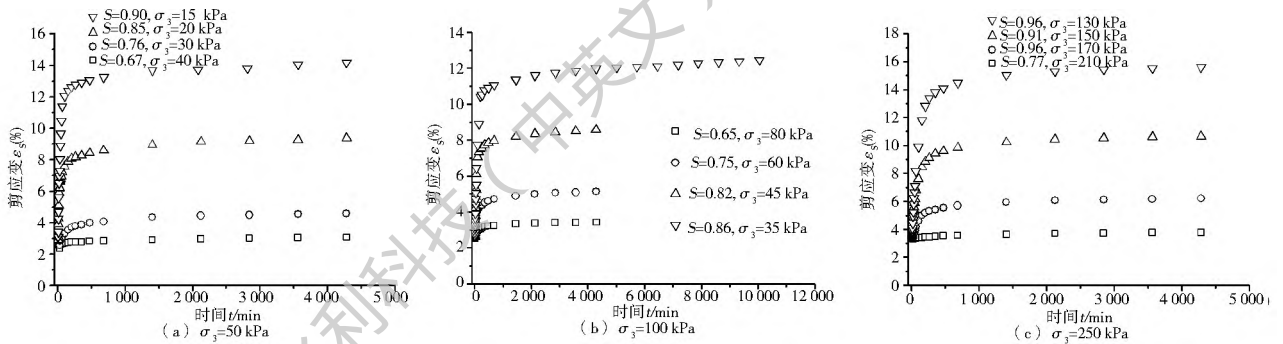


图 2 侧向减载条件下淤泥土剪应变蠕变曲线

Fig. 2 Creep curves of shear strain of silt soil under lateral lightening

由图 1、图 2 可看出,轴向加载和侧向减载条件下,二者剪切蠕变趋势基本一致,不管应力水平地高低,均为稳定衰减型,没有出现等速蠕变或加速蠕变。轴向加载条件下,土样破坏前蠕变分级的最大偏应力水平为 0.83,而侧向减载条件下可达到更高偏应力水平,最大值可达 0.96。从图 1、图 2 的对比分析可知,在较低偏应力水平下,土体在分级加载时的瞬时变形值和蠕变变形值都不大,而较高偏应力水平下,土样分级加载时瞬时变形值和蠕变值均增大,且蠕变

进入衰减状态需要时间也越长见图 2(b),说明偏应力水平越高,蠕变变形越不易达到稳定。

### 1.2.2 体积蠕变

不论是轴向加载条件还是侧向减载条件,体积变形的蠕变增量随偏应力水平的增加而增加,体积蠕变未出现加速蠕变,见图 3、图 4。体应变随围压的减小,表现出先剪缩后剪胀的交替趋势,且侧向减载条件下比轴向加载条件下土体更易剪胀,说明土体在低围压下易剪胀。

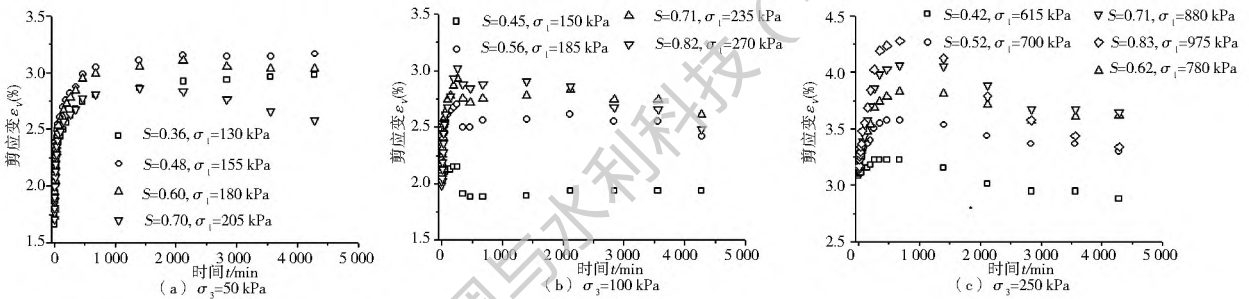


图 3 轴向加载条件下淤泥土体应变蠕变曲线

Fig. 3 Creep curves of volume strain of silt soil under axial loading

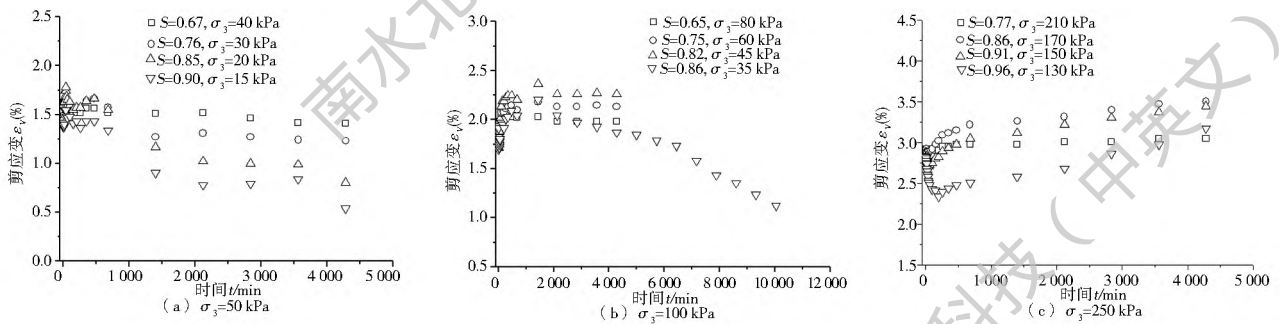


图 4 侧向减载条件下淤泥土体应变蠕变曲线

Fig. 4 Creep curves of volume strain of silt soil under lateral lightening

体积变形在加卸载初期变化并不大,进入蠕变阶段后保持一个相对稳定的蠕变速率,且这种稳定蠕变的速率很难减小,说明淤泥土的体变相较于荷载的施加,存在滞后现象,且体积蠕变不像剪切蠕变,能较快进入衰减蠕变阶段,反而会保持相对较长的稳定蠕变阶段。本文由于时间原因,未制定体积蠕变稳定标准,试验荷载的分级加载以土体轴向变形速率作为稳定控制标准。故从体积蠕变曲线上看体

积蠕变速率相较于剪切蠕变速率较难达到蠕变稳定标准。若体积存在剪胀趋势,则体积蠕变变形更不易达到稳定。

## 2 蠕变模型

### 2.1 蠕变模型介绍

采用理论模型三单元的 Merchant 和四单元的 Burgers 模型进行淤泥土蠕变特性的模拟<sup>[19-20]</sup>(图

5), Merchant 模型由胡克弹簧和 Kelvin 体串联而成, 其应力应变本构关系式为

$$\eta_k \dot{\varepsilon} + E_M \varepsilon = \frac{E_K + E_M}{E_K} \sigma + \frac{\eta_k}{E_K} \dot{\sigma} \quad (1)$$

式中:  $E_K$  为弹性变形模型, 即刚施加  $\sigma$  时的变形模量;  $E_M$  为蠕变阶段的变形模量;  $\eta_k$  为蠕变过程中的黏性系数。

常应力  $\sigma_0$  作用下, 利用初始条件  $\varepsilon_0 = \sigma_0/E_K$ , 由 Laplace 变换可得:

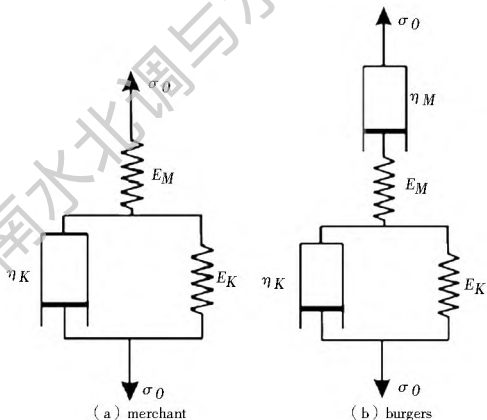


图 5 Merchant 和 Burgers 蠕变模型

Fig. 5 Creep models of Merchant and Burgers

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_K} + \frac{\sigma_0}{E_M} \left( 1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_k} t} \right) \quad (2)$$

Burgers 模型是由 Maxwell 体和 Kelvin 体串联组合成的蠕变模型, 其本构关系式为

$$\eta_M \dot{\varepsilon} + \frac{E_K E_M}{\eta_k} \dot{\varepsilon} = \ddot{\sigma} + \left( \frac{E_M}{\eta_k} + \frac{E_M}{\eta_M} + \frac{E_K}{\eta_k} \right) \dot{\sigma} + \frac{E_M E_K}{\eta_M \eta_k} \sigma \quad (3)$$

在常应力  $\sigma_0$  作用下, 亦由 Laplace 变换得:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} t + \frac{\sigma_0}{E_K} \left( 1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_k} t} \right) \quad (4)$$

式中: 下标  $M$  表示 Maxwell 体,  $K$  表示 Kelvin 体。

对于 Merchant 模型, 在应力  $\sigma$ , 加载时间  $t$  和应

变  $\varepsilon(t)$  均已知情况下, 需要确定的参数为  $E_M$ 、 $E_K$ 、 $\eta_k$ , 而对于 Burgers 模型有参数  $E_M$ 、 $\eta_M$ 、 $E_K$ 、 $\eta_k$ 。

## 2.2 蠕变参数的反演

根据实验结果, 采用线性叠加原理将分级荷载下的应变-时间关系曲线转换为分别荷载下的蠕变曲线, 并根据式(2)和式(4), 利用 Levenberg-Marquart (麦夸特) 迭代方法, 寻求方程组最优解, 反演得相关蠕变参数。列出淤泥土在  $\sigma_3 = 100$  kPa 轴向加载条件下两种蠕变模型各参数的反演结果见表 2。

表 2 Merchant 模型和 Burgers 模型的参数反演值

Tab. 2 Parametric inversion values of the creep models of Merchant and Burgers

	$E_M$ /MPa	$\eta_M$ /(MPa·s)	$E_K$ /MPa	$\eta_k$ /(MPa·s)	相关系 数 R
Merchant 模型	0.077		0.56	4.71	0.99
	0.078		0.13	0.05	0.95
	0.077		0.10	0.18	0.97
	0.097		0.05	0.04	0.98
Burgers 模型	0.077	99.2	0.773	3.68	1
	0.082	22.7	0.137	0.03	0.98
	0.083	17.2	0.112	0.10	0.97
	0.102	14.2	0.056	0.04	0.98

从表 2 数据和图 6 计算曲线的拟合精度对比可看出, Merchant 和 Burgers 模型对淤泥土有较好的适应性。单从相关系数  $R$  来评价拟合精度时, Burgers 模型要比 Merchant 模型好。从图 6 可看出低应力水平时,  $S < 0.8$  时, 两个模型均能达到较好拟合效果,  $S > 0.8$  时, Merchant 模型蠕变速率过早减慢, 而 Burgers 模型蠕变速率则随时间几乎稳定不变, 不太符合土体的衰减蠕变特征。故二者在高应力水平时, 拟合效果均存在不足。

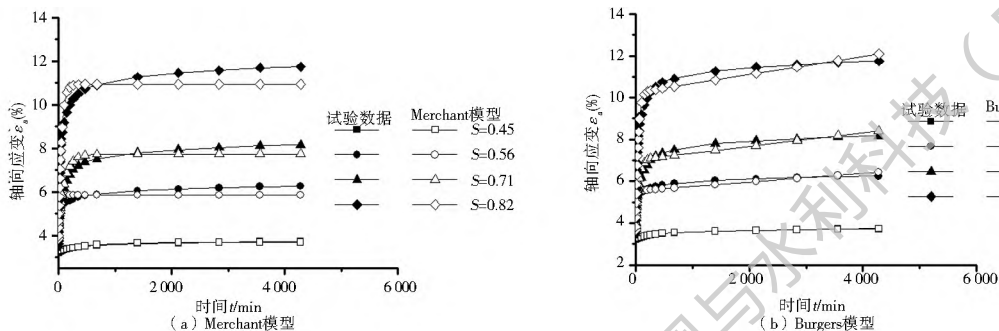


图 6 蠕变模型拟合结果与试验数据对比

Fig. 6 Comparison between fitting results and test data of creep models

## 2.3 蠕变参数分析

图 7 和图 8 描述了淤泥土 Merchant 和 Burgers 模型蠕变参数随应力水平的关系图。由图可知两个

模型的蠕变参数参数  $E_K$ 、 $\eta_k$ 、 $\eta_M$  均呈现随应力水平的增大而减小的变化规律,  $E_M$  随应力水平的变化则较为平稳, 无明显增大或减小趋势。说明淤泥土的蠕变

变形受粘弹模量影响较小,受土体黏滞系数及弹性模量影响较大。这种影响效应随应力水平增大而减弱。

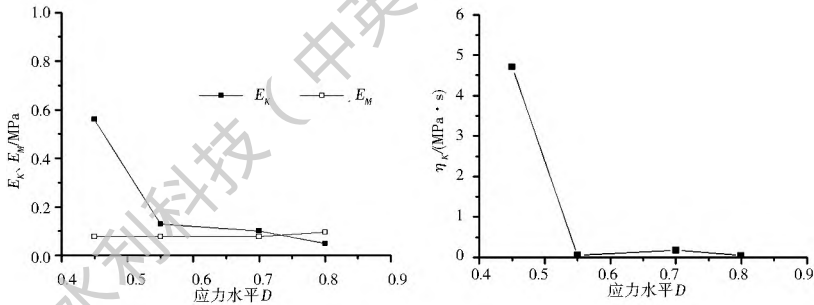


图7 Merchant 模型蠕变参数随应力水平的关系

Fig. 7 The relationships between the creep parameters of Merchant model and deviatoric stress level

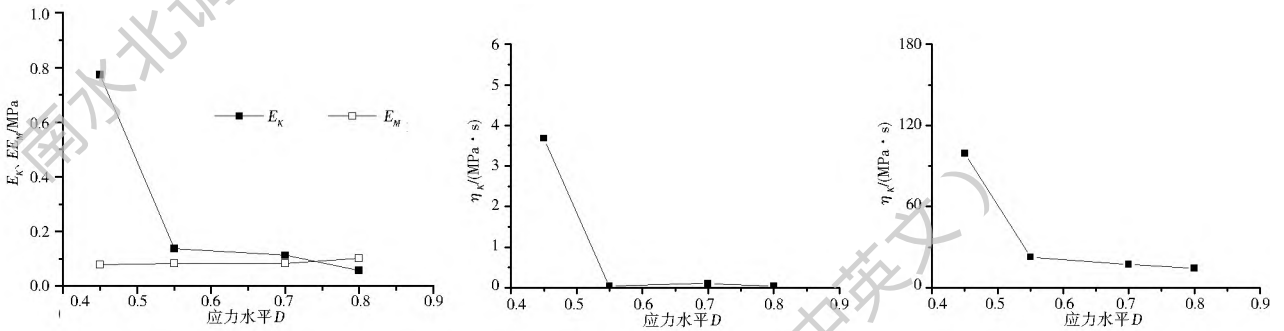


图8 Burgers 模型蠕变参数随应力水平的关系

Fig. 8 The relationships between the creep parameters of Burgers model and deviatoric stress level

### 3 结论

关于淤泥土蠕变特性的研究成果较多,本文在还原土体先期固结条件基础上研究淤泥土的排水蠕变特性。将试验成果与已有的蠕变理论相结合做相关蠕变特性分析。由试验结果及相关分析可得以下结论。

(1) 针对两种应力路径的排水蠕变试验,不论轴向加载还是侧向减载蠕变规律基本一致,即在应力水平较低时,蠕变变形很小,随着应力水平的提高,蠕变变形亦随之增加。

(2) 土体体应变明显小于剪应变,且随时间增加呈现一定程度的剪缩与剪胀交替性。侧向减载条件下,土体更易发生剪胀。从体变随时间关系曲线可以看出,当没有发生剪胀时,体积变形较容易稳定,一旦发生剪胀现象,体应变较难稳定。

(3) 低应力水平下,Merchant 和 Burgers 蠕变模型对淤泥土都有较好拟合精度。蠕变参数  $E_K$ 、 $\eta_K$ 、 $\eta_w$  均呈现随应力水平的增大而减小的变化规律, $E_M$  随应力水平的变化则较为平稳,无明显增大或减小趋势,说明淤泥土的蠕变变形受黏弹模量影响较小,受土体黏滞系数及弹性模量影响较大。

#### 参考文献(References):

[1] 周秋娟,陈晓平. 软土蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报,

2005, 28(5): 626-630. (ZHOU Qiujuan, CHEN Xiaoping. Experimental study on creep characteristics of soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 626-630. (in Chinese))

[2] 于新豹,刘松玉,缪林昌. 连云港软土蠕变特性及其工程应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1001-1007. (YU Xinbao, LIU Songyu, MIAO Lirong. Creep properties of Lianyungang soft clay and its engineering application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 1001-1007. (in Chinese))

[3] 杜雅峰,夏欢欢,刘会平,等. 广州地区海积软土蠕变特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 12-17. (DU Yafeng, XIA Huanhuan, LIU Huiping, et al. Experimental study on creep behaviors of marine soft soil in Guangzhou [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(2): 12-17. (in Chinese))

[4] 胡琦,罗耀武. 软土蠕变特性对地下结构长期竖向变形的影响分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S1): 85-89. (HU Qi, LUO Yaowu. Study on the influence of soft soil creep on long term vertical deformation of underground structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2011(S1): 85-89. (in Chinese))

[5] 谈炎培,叶冠林,王建华,等. 苏州软土蠕变特性的参数研究及其有限元应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 80-83. (TAN Yanpei, YE Guannlin, WANG Jianhua, et al. Study on Parameter of constitutive model for creep characteristics of Suzhou soft soil and its application in finite element analysis [J]. Chinese Journal of underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 80-83. (in Chinese))

[6] 李惠,陈金光,乔卫国. 深圳湾海积软土的蠕变特性与本构模型

- 研究[J]. 水运工程, 2011(10): 141-144. (LI Hui, CHEN Jirguang, QIAO Weirguo. On creep behavior and model of marine clay in Shenzhen area [J]. Port & Waterway Engineering, 2011(10): 141-144. (in Chinese))
- [7] 袁杰, 房莹光, 谷任国等. 流变物质含量及其分布对软土蠕变特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2924-2929. (YUAN Jie, FANG Yingguang, GU Ren guo, HU Guixian. Experimental Study For Influence of Content and Distribution of Rheological Material on Soft soil Creep properties. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2924-2929. (in Chinese))
- [8] 袁聚云, 赵锡宏, 杨熙章, 等.  $k_0$  固结条件对上海软土强度和变形影响的试验研究[J]. 勘察科学技术, 1995(6): 22-25. (YUAN Juyun, ZHAO Xihong, YANG Xizhang, et al. Experimental study of the strength and deformation effect of  $k_0$  consolidation condition to Shanghai soft soils [J]. Site Investigation Science and Technology, 1995(6): 22-25. (in Chinese))
- [9] 王立忠, 但汉波.  $k_0$  固结软黏土的弹黏塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2009, 29(9): 1344-1354. (WANG Lizhong, DAN Hanbo Elastic viscoplastic constitutive model for  $k_0$  consolidated soft clays [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 29(9): 1344-1354. (in Chinese))
- [10] 赵晓东, 周国庆, 田秋红. 深部土  $k_0$  试验方法及对卸载力学特性的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(5): 702-706. (ZHAO Xiaodong, ZHOU Guoqing, TIAN Qiuhong. Influences of test method for earth pressure coefficient at rest to unloading properties of deep clay [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(5): 702-706. (in Chinese))
- [11] 王常明, 王清, 张淑华. 滨海软土蠕变特性及蠕变模型. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 227-230. (WANG Changming, WANG Qing, ZHANG Shuhua. Creep characteristics and creep model of marine soft soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 227-230. (in Chinese))
- [12] 朱鸿鹄, 陈晓平, 程小俊, 等. 考虑排水条件的软土蠕变特性及模型研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 694-698. (ZHU Honghu, CHEN Xiaoping, CHENG Xiaojun, et al. Study on creep characteristics and model of soft soil considering drainage condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 694-698. (in Chinese))
- [13] 崔冠辰. 遮帘式板桩码头工作机理初探[硕士学位论文][D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011. (CUI Guanchen. Preliminary investigation on the working mechanism of covered sheet-pile wharf [Master's Thesis][D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2011. (in Chinese))
- [14] 孙均. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SUN Jun. Rheology of Geomaterials and Its Engineering Application [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [15] 谢新宇, 李金柱, 王文军, 等. 宁波软土流变试验及经验模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(1): 64-71. (XIE Xinyu, LI Jinzhu, WANG Wenjun, et al. Rheological test and empirical model of Ningbo soft soil [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(1): 64-71. (in Chinese))
- [16] 金文婷, 肖宏彬. 南宁膨胀土剪切蠕变特性及流变模型研究[J]. 公路工程, 2011, 36(6): 64-77. (JIN Wenting, XIAO Hongbin. Experimental study on shear creep characteristic and rheological model of Nanning expansive soils [J]. Highway Engineering, 2011, 36(6): 64-77. (in Chinese))
- [17] 张先伟, 王常明. 饱和软土的经验型蠕变模型[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(3): 791-796. (ZHANG Xiawei, WANG Changming. Empirical creep model for saturated soft soil [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(3): 791-796. (in Chinese))
- [18] 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(2): 239-249. (HE Lijun, KONG Lingwei, WU Wenjun, et al. A description of creep model for soft soil with fractional derivative [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 239-249. (in Chinese))
- [19] 施小清, 薛禹群, 吴吉春, 等. 饱和砂性土流变模型的试验研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(02): 212-216. (SHI Xiaqing, XU Yuqun, WU Jichun, et al. Uniaxial compression tests for creep model of saturated sand in Changzhou [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(02): 212-216. (in Chinese))
- [20] 杨奇, 冷伍明, 聂如松, 等. 砂土蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4282-4286. (YANG Qi, LENG Wuming, NIE Rusong, et al. Laboratory test study of creep behavior of sandy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4282-4286. (in Chinese))