

## · 地基与基础 ·



# 不同围压条件下淤泥质黏土 蠕变力学特性试验及模拟<sup>\*</sup>

李 春<sup>1</sup>, 谭维佳<sup>2</sup>

(1. 重庆市建筑科学研究院有限公司, 重庆 400016; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 淤泥质黏土是码头工程常见地基土, 其蠕变特性与码头地基稳定性紧密关联。为研究不同围压条件下的淤泥质黏土蠕变力学特性, 对其开展固结排水三轴压缩蠕变试验。基于蠕变试验结果, 引入 Mesri 和 Log-Modified 模型模拟淤泥质黏土的蠕变力学行为, 得到蠕变经验模型, 并对比两个模型的辨识效果。结果表明, 同一围压下, 随着轴压的提升, 轴向应变逐渐递增, 初始和稳态蠕变速率均呈线性递增趋势; 同一加载等级下, 围压和轴压的升高促进轴向应变的增长, 较高轴压和围压条件下初始、稳态蠕变速率均始终大于较低轴压和围压条件; 淤泥质黏土等时轴压-轴向应变曲线近似双曲线, 具有明显的非线性特征; Mesri 蠕变经验模型辨识效果优于 Log-Modified 蠕变经验模型。

**关键词:** 码头地基; 围压; 轴压; 淤泥质黏土; 蠕变; 非线性

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0179-07

## Test and simulation of creep mechanical properties of muddy clay under different confining pressures

LI Chun<sup>1</sup>, TAN Wei-jia<sup>2</sup>

(1. Chongqing Construction Science Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400016, China;

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Muddy clay is common foundation soil in wharf engineering, and its creep properties are closely related to the stability of wharf foundations. To study the creep mechanical properties of muddy clay under different confining pressures, we carry out consolidated drained triaxial compression creep tests. On this basis, we introduce the Mesri and Log-Modified models to simulate the creep mechanical behavior of muddy clay, obtain the empirical creep models, and compare the identification effects of the two models. The results show that with the increase in axial pressure under the same confining pressure, the axial strain increases gradually, and the initial and steady creep rates show a linearly rising trend. With the same loading level, the increase in confining and axial pressure promotes the growth of axial strain, and the initial and steady creep rates under high axial and confining pressure are always greater than those under low axial and confining pressure. The isochronous axial pressure-strain curve of muddy clay is approximately hyperbolic and has prominent nonlinear characteristics. Moreover, the identification effect of the empirical Mesri creep model is better than that of the empirical Log-Modified creep model.

**Keywords:** wharf foundation; confining pressure; axial pressure; muddy clay; creep; nonlinearity

淤泥质黏土是码头常见地基土, 在应力作用下不仅会瞬间发生变形, 还会随着时间推移而累

积蠕变变形, 威胁码头工程的长期稳定和安全<sup>[1-2]</sup>。研究淤泥质黏土蠕变特性, 对控制淤泥质

收稿日期: 2021-04-18

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41790443)

作者简介: 李春(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为地基基础工程及建筑质量检测鉴定、加固。

黏土地基沉降具有重要的工程意义<sup>[3]</sup>。

目前对于淤泥质黏土蠕变特性研究已有一定成果, 李军世等<sup>[4]</sup>以上海淤泥质黏土为研究对象, 选取合理经验参数, 建立具有适用性的 Singh-Mitchell 蠕变经验模型; 朱登峰等<sup>[5]</sup>对淤泥质黏土进行循环蠕变试验, 研究蠕变应变特征和孔压变化规律; Wang 等<sup>[6]</sup>开展天津滨海地区淤泥质软黏土蠕变试验, 基于元件模型建立了非线性蠕变本构模型; 赖华辉<sup>[7]</sup>研究不同干密度下的膨胀土蠕变特性, 分析干密度对蠕变变形、蠕变速率、长期强度的影响; 李硕等<sup>[8]</sup>研究上海淤泥质黏土固结蠕变过程中水和微机构变化规律, 为淤泥质黏土宏观蠕变研究提供微观参考依据。

本文以某遮帘式板桩码头工程淤泥质黏土为研究对象, 制备饱和重塑样, 开展固结排水三轴压缩蠕变试验, 分析淤泥质黏土应变特征、蠕变速率和等时轴压-轴向应变关系, 结合淤泥质黏土的等时轴压-轴向应变双曲线形态特征, 分别引入 Mesri 和 Log-Modified 模型辨识蠕变数据, 给出两者模型参数求解方法, 分别得到适用于本文淤泥质黏土的 Mesri 和 Log-Modified 蠕变经验模型, 对比两者蠕变经验模型辨识效果, 给出本文码头工程淤泥质黏土的推荐蠕变模型。研究成果可为淤泥质黏土蠕变特性研究及码头地基设计、施工及后期运营提供一定参考。

## 1 淤泥质黏土蠕变试验

### 1.1 试验材料及方案

本文淤泥质黏土取自某遮帘式板桩码头工程, 其基本物理力学参数见表 1。蠕变试验之前, 根据取样深度完成先期  $k_0$  不等向固结条件( $k_0$  为土的静止侧压系数), 取  $k_0=0.5$ 。

表 1 淤泥质黏土基本物理力学参数

天然密度/ (t·m <sup>-3</sup> )	土粒相对 密度	含水率/ %	固结快剪指标	
			黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1.79	2.69	44.8	15.4	16.7

根据《土工试验方法标准》<sup>[9]</sup>, 制备直径 39.1 mm、高 80 mm 的饱和重塑样, 蠕变试验采用 SR-6 型土体三轴流变试验机, 蠕变试验方案见表 2。

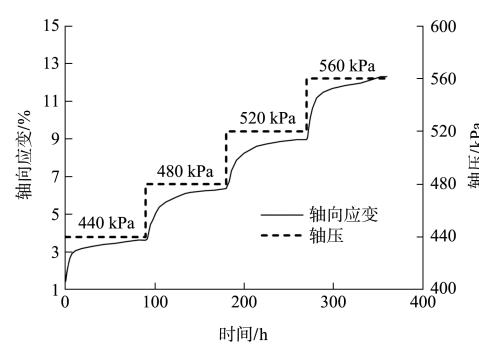
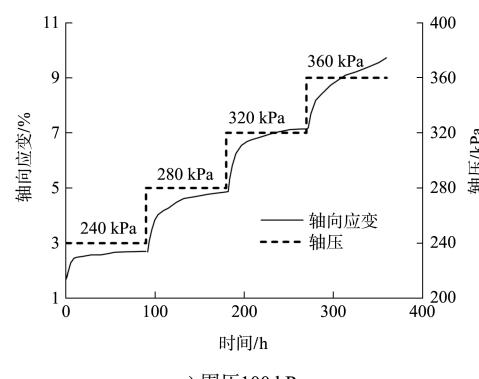
表 2 蠕变试验方案

加载方式	固结压力/kPa		蠕变试验压力/kPa	
	围压	轴压	围压	轴压
轴向加载	100	200	100	240→280→320→360
	200	400	200	440→480→520→560
	300	600	300	640→680→720→760

由表 2 可看出, 本文试验分为两步: 1) 固结。首先对重塑饱和土样施加围压, 完成等向固结后再依据先期  $k_0$  固结条件, 将轴向荷载缓慢加至目标值, 完成  $k_0$  不等向固结。2) 蠕变。依据表 2 的试样方案控制轴压和围压的变化, 蠕变稳定后再施加下一级轴向荷载直至破坏, 每一级加载均维持在 90 h 以上, 本文淤泥质黏土在第 5 级加载时破坏, 3 种围压下的破坏偏应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  分别为 300、400 和 500 kPa。为便于后文蠕变模型辨识及参数求取, 再进行固结排水三轴压缩试验, 确定 3 种围压条件下的剪切强度, 分别为 523、736 和 945 kPa。

### 1.2 试验结果

蠕变试验数据由三轴试验机数据系统采集, 得到分级加载全过程曲线, 如图 1 所示。



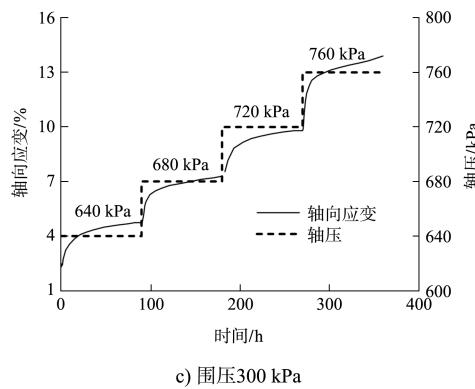


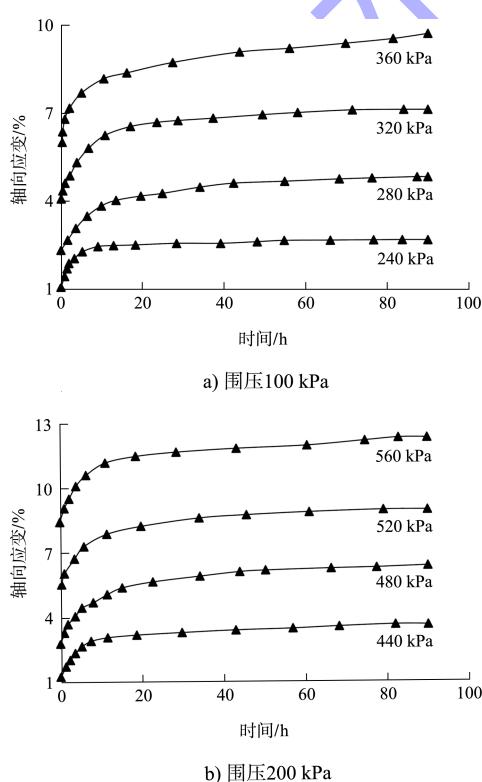
图 1 逐级轴向加载蠕变曲线

由图 1 可看出, 3 种围压下的蠕变曲线轴向应变存在一个初始值, 这是由于淤泥质黏土蠕变试验是完成先期不等向固结后进行的。蠕变试验中, 淤泥质黏土在轴压提升的短暂停时间内, 轴向应变瞬间增大, 这部分轴向应变为瞬时应变。随着加载时间的增长, 土样表现出衰减蠕变行为, 应变率逐渐降低, 应变率趋于稳定后土样便进入了稳定蠕变阶段, 土样在衰减和稳定蠕变阶段的轴向应变为蠕变应变。

## 2 试验结果分析

### 2.1 分别加载蠕变曲线

通过 Boltzmann 线性叠加原理<sup>[10]</sup>处理后的分级加载蠕变曲线如图 2 所示。



c) 围压 300 kPa

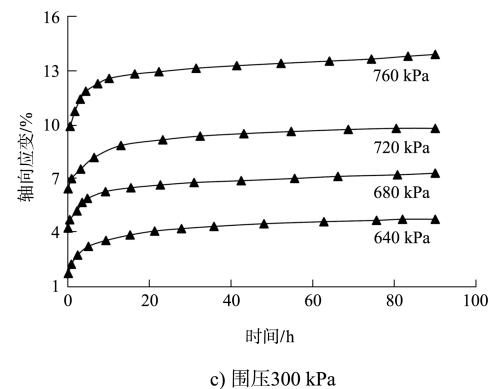


图 2 分级加载蠕变曲线

由图 2 可看出, 淤泥质黏土不同围压不同加载等级下的蠕变曲线形态较相似。同一围压下, 随着轴压的提升, 轴向应变逐渐递增。同一加载等级下, 围压和轴压的升高促进轴向应变的增长。

### 2.2 蠕变速率

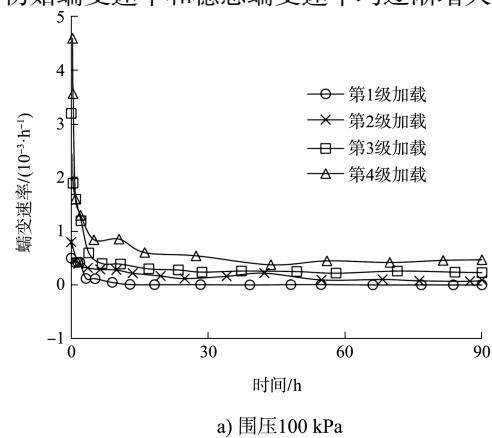
蠕变速率求取引用文献[11]中的计算方法:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2 + \dots + \Delta\varepsilon_{n-1} \\ \Delta\varepsilon_{n-1} = \varepsilon_n - \varepsilon_{n-1} \\ \Delta\varepsilon = (\varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_{n-1}) = \varepsilon_n - \varepsilon_1 \\ v_i = \Delta\varepsilon / \Delta t_i \end{array} \right. \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_n$  为蠕变应变;  $n$  为蠕变试验应变数据个数;  $\Delta\varepsilon$  为蠕变应变差值之和;  $\Delta t_i$  为蠕变时间;  $v_i$  为蠕变速率。

利用式(1)在图 2 的基础上进行计算, 绘制蠕变速率曲线, 如图 3 所示。

由图 3 看出, 蠕变速率曲线分为衰减和稳定蠕变阶段两个部分, 衰减蠕变阶段存在一个较高的初始蠕变速率, 在 10 h 内逐渐衰减, 接着进入稳定蠕变阶段, 10~90 h 蠕变速率基本保持恒定。在同一围压下, 随着加载等级的提升, 衰减和稳定蠕变阶段的初始蠕变速率和稳态蠕变速率均逐渐增大。



a) 围压 100 kPa

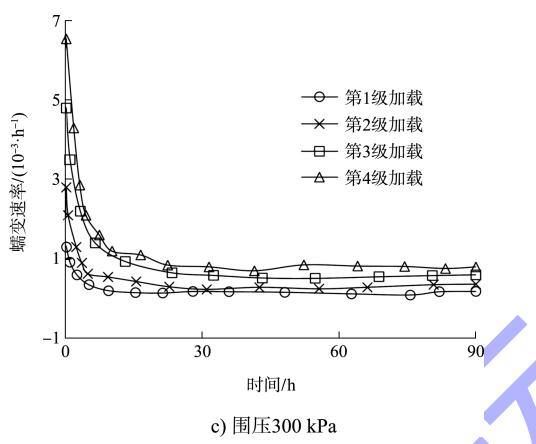
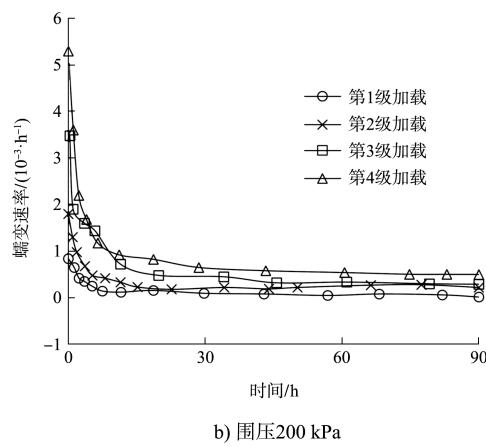


图 3 分别加载蠕变曲线

为研究初始蠕变速率、稳态蠕变速率与围压、轴压之间的关系,选取图 3 中的稳态蠕变速率平均值及初始蠕变速率,绘制相对应的曲线如图 4 所示。

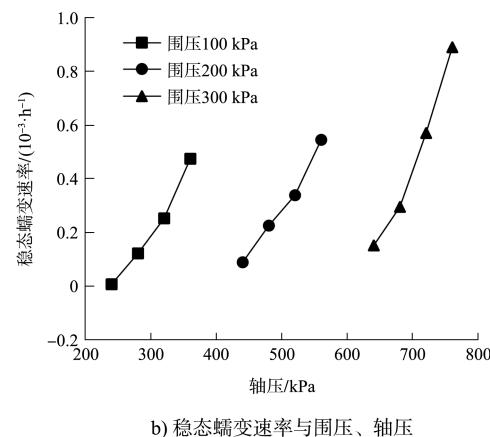
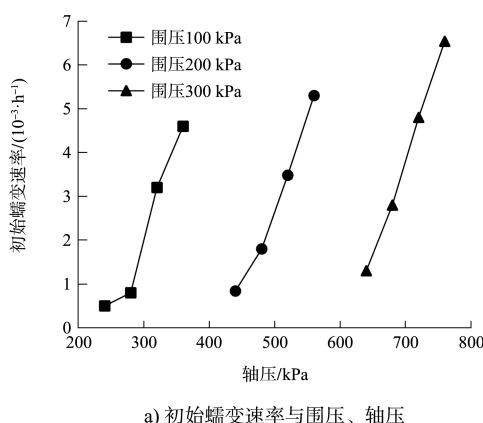


图 4 初始、稳态蠕变速率与围压、轴压关系曲线

由图 4a) 可看出, 在围压 100 kPa、轴压 240 kPa 下, 初始蠕变速率最小, 仅为  $0.502 \times 10^{-3}/\text{h}$ ; 在围压 300 kPa、轴压 760 kPa, 初始蠕变速率最大, 达到  $6.538 \times 10^{-3}/\text{h}$ 。在同一围压下, 初始蠕变速率随着轴压的增大呈线性递增趋势。在同一加载等级下, 较高轴压和围压条件下初始蠕变速率始终大于较低轴压和围压条件, 这说明应力水平的提升会增高初始蠕变速率。由图 4b) 可看出, 稳态蠕变速率与围压、轴压之间的变化规律与初始蠕变速率较为相似, 在围压 100 kPa、轴压 240 kPa 下, 稳态蠕变速率最小, 为  $0.007 \times 10^{-3}/\text{h}$ ; 在围压 300 kPa、轴压 760 kPa, 稳态蠕变速率最大, 达到  $0.890 \times 10^{-3}/\text{h}$ 。在同一加载等级下, 较高轴压和围压条件下稳态蠕变速率始终大于较低轴压和围压条件, 这说明应力水平的增高使稳态蠕变速率增大。

### 2.3 等时刻轴压-轴向应变曲线

在图 2 中选取 0.1、10、20、30、40、50、60、70、80 和 90 h 共 10 个时刻的轴压-轴向应变数据点, 绘制等时轴压-轴向应变曲线, 如图 5 所示, 限于篇幅, 仅以淤泥质黏土围压 100 kPa 为例。选取 3 种围压下 0.1 和 90 h 时刻的轴压-轴向应变数据点, 绘制不同围压下等时轴压-轴向应变曲线, 如图 6 所示。

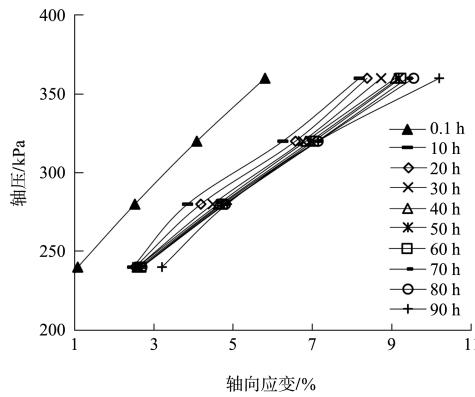


图 5 等时轴压-轴向应变曲线

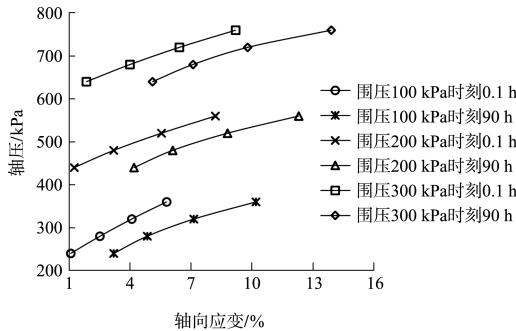


图 6 不同围压下的等时刻轴压-轴向应变曲线

由图 5 看出, 等时轴压-轴向应变曲线由 0.1 h 时刻的曲线和 10~90 h 曲线簇组成, 0.1 h 时刻的曲线近线性, 10~90 h 曲线簇具有明显的非线性特征, 随着轴向应变的增长, 曲线簇表现出逐渐靠拢应变轴的趋势。综合图 5、6 可看出, 等时轴压-轴向应变曲线 0.1 h 时刻曲线近似线性, 10~90 h 时刻曲线簇形态近似双曲线。

### 3 淤泥质黏土蠕变经验模型

#### 3.1 经验模型理论

目前 Singh-Mitchell 和 Mesri 经验模型在土体蠕变分析中应用较广, 文献[12]在 Mesri 模型的基础上改进得到 Log-Modified 经验模型。其中 Mesri 和 Log-Modified 经验模型的应力-应变关系式一致, 均为双曲线型, Singh-Mitchell 经验模型的应力-应变关系式为指类型, 由于 Singh-Mitchell 模型被证明不适用于低应力水平下蠕变行为模拟<sup>[13]</sup>, 而 Mesri 和 Log-Modified 经验模型的应力-应变关系式与本文淤泥质黏土等时轴压-轴向应变较吻合, 故

本文分别引入 Mesri 和 Log-Modified 模型辨识淤泥质黏土的蠕变力学行为, Mesri 和 Log-Modified 模型本构方程分别见式(1)(2):

$$\varepsilon = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{E_u} \cdot \frac{D}{1 - R_f D} \left( \frac{t}{t_1} \right)^m \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{E_u} \cdot \frac{D (a + bt)^c}{1 - R_f D} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon$  为蠕变应变;  $t$  为蠕变时间;  $E_u$  为初始切线弹性模量;  $\sigma_1$  为轴压;  $\sigma_3$  为围压;  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  为蠕变试验中的破坏偏应力;  $D$  为每一级加载轴压与三轴固结排水试验中剪切强度之间的比值;  $R_f$  为破坏比;  $a$ 、 $b$  和  $c$  均为模型参数;  $t_1$  为初始蠕变的参考时间, 本文取  $t_1$  为 1 h;  $m$  为待定参数。

Mesri 和 Log-Modified 模型共同的应力-应变关系式为:

$$\varepsilon_1 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{E_u} \cdot \frac{D}{1 - R_f D} \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_1$  为应力-应变关系中的应变。

Mesri 模型的应变-时间关系式为:

$$\varepsilon_2 = \left( \frac{t}{t_1} \right)^m \quad (5)$$

Log-Modified 模型的应变-时间关系式为:

$$\varepsilon_2 = (a + bt)^c \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon_2$  为应变-时间关系中的应变。

两者模型求取时, 应力-应变关系参数与时间关系参数分别求解, 两者的应力-应变关系参数相同。

#### 3.2 应力-应变关系参数求解

为了便于参数求解, 变形式(4)为:

$$\frac{\varepsilon_1}{D} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{E_u} + \varepsilon_1 R_f \quad (7)$$

式(7)中的  $\varepsilon_1/D$  与  $\varepsilon_1$  线性相关,  $R_f$  为斜率,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/E_u$  为截距。选取 0.1~90 h 共 10 个时刻的蠕变数据, 以围压 100 kPa 为例, 绘制不同时刻下  $\varepsilon_1/D - \varepsilon_1$  的关系曲线, 如图 7 所示, 为观察方便, 省去部分时刻的数据。应力-应变关系参数见表 3, 限于篇幅, 仅给出围压 100 kPa 下的参数取值。

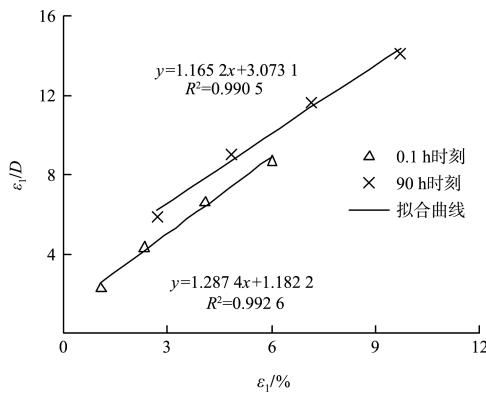
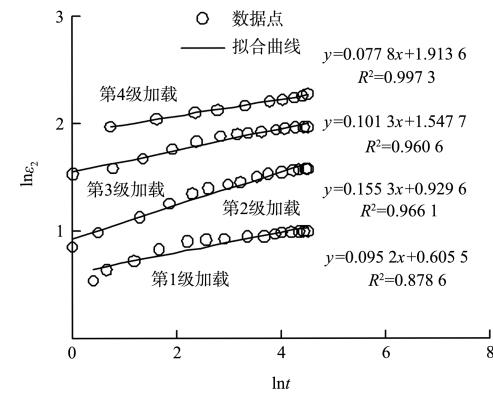
图 7 不同时刻下的  $\varepsilon_1/D$ - $\varepsilon_1$  曲线图 8  $\ln\varepsilon_2$ - $\ln t$  曲线

表 3 应力-应变关系参数

$\sigma_3/kPa$	$t/h$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f/E_u$	$R_f$	$R^2$
100	0.1	1.2874	1.1822	0.9926
	10	1.2631	1.3689	0.9912
	20	1.2308	1.6574	0.9909
	30	1.2245	1.9637	0.9913
	40	1.2133	2.1030	0.9909
	50	1.1957	2.3596	0.9918
	60	1.1905	2.5893	0.9924
	70	1.1846	2.8592	0.9907
	80	1.1788	2.9684	0.9924
	90	1.1652	3.0731	0.9905

由表 3 可看出,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/E_u$  随时间增长呈递减趋势,  $R_f$  随时间增长呈递增趋势。通过式(7)线性拟合求解的方法得到不同时刻下的  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/E_u$  和  $R_f$  的平均值, 见表 4。

表 4 应力-应变关系参数平均值

$\sigma_3/kPa$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f/E_u$ 平均值	$R_f$ 平均值	$E_u/kPa$
100	1.2134	2.2125	247.24
200	1.0283	1.5982	388.99
300	0.8736	1.1634	572.34

由表 4 可知,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/E_u$  和  $R_f$  平均值均随着围压增大而递减,  $E_u$  随着围压增大而递增。

### 3.3 Mesri 模型应变-时间关系参数求解

式(5)等号两边取对数可得:

$$\ln\varepsilon_2 = m \ln t \quad (8)$$

由式(8)可看出,  $\ln\varepsilon_2$  与  $\ln t$  线性相关,  $m$  为该线段的斜率, 于是绘制  $\ln\varepsilon_2$ - $\ln t$  曲线, 以围压 100 kPa 为例, 如图 8 所示, 应变-时间关系参数见表 5。

表 5 Mesri 模型应变-时间关系参数

$\sigma_3/kPa$	加载等级	$D$	$m$	$R^2$
100	1	0.46	0.0952	0.8786
100	2	0.54	0.1553	0.9661
100	3	0.61	0.1013	0.9606
100	4	0.69	0.0778	0.9973

由图 8 可看出,  $\ln\varepsilon_2$ - $\ln t$  线性拟合较好,  $R^2$  的平均值达到 0.9507。通过式(8)线性拟合求解的方法得到不同时刻下的  $m$  的平均值, 见表 6。

表 6 参数  $m$  平均值

$\sigma_3/kPa$	$m$ 平均值	$R^2$ 平均值
100	0.1074	0.9507
200	0.1286	0.9672
300	0.1503	0.9594

分析式(7)(8)发现,  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/E_u$ 、 $R_f$  和  $m$  与轴压和时间无关, 均通过线性拟合求解的方法确定, 故取不同加载等级下  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/E_u$ 、 $R_f$  和  $m$  平均值作为 Mesri 经验模型参数, 将表 4、6 中相关参数代入式(2)可得:

$$\varepsilon = \frac{1.2134D}{1-2.2125D} \cdot t^{0.1074} \quad (9)$$

式(9)即为本文淤泥质黏土在  $\sigma_3 = 100$  kPa 下的 Mesri 蠕变经验模型。

### 3.4 Log-Modified 模型应变-时间关系参数求解

通过数学软件 Origin 对图 2 蠕变数据进行拟合, 算法采用一般的非线性最小二乘法, 取参数  $a$ 、 $b$  和  $c$  的平均值见表 7。

表7 参数a、b和c平均值

$\sigma_3/\text{kPa}$	a	b	c	$R^2$ 平均值
100	0.4895	0.0386	3.2688	0.9875
200	0.4133	0.0508	1.9735	0.9832
300	0.2579	0.0672	1.2071	0.9786

将表7中参数a、b和c的平均值及表4中 $(\sigma_1 - \sigma_3)/E_u$ 和 $R_f$ 平均值代入式(3)可得:

$$\varepsilon = \frac{1.2134D(0.4895 + 0.0386t)^{3.2688}}{1 - 2.2125D} \quad (10)$$

式(10)即为本文淤泥质黏土在 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 下的Log-Modified蠕变经验模型。

#### 4 模型参数求解及验证

以 $\sigma_3$ 为100和300 kPa的试验数据为例,对本文Mesri和Log-Modified蠕变经验模型进行对比模拟验证,经验值与试验值对比曲线如图9所示。

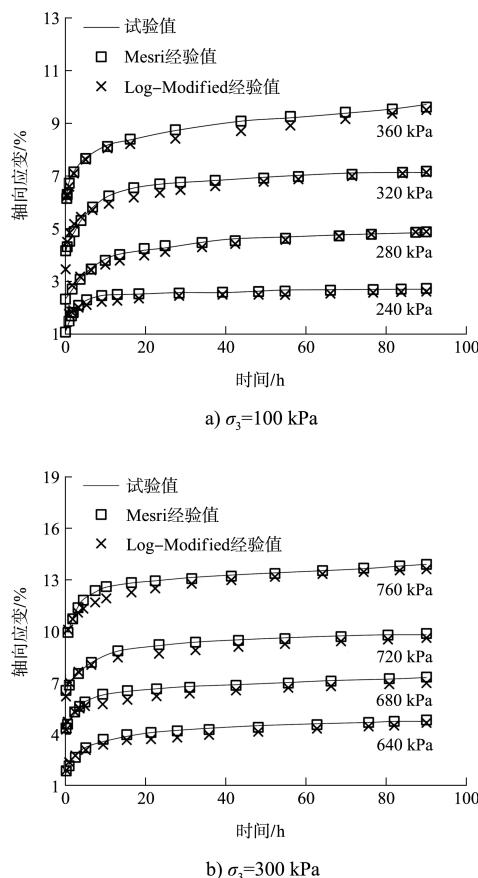


图9 经验值和试验值对比曲线

由图9可看出,Mesri蠕变经验模型辨识能力较强,拟合精度较高, $R^2$ 平均值为0.9905,而Log-Modified蠕变经验模型的经验值总体上低于试

验值,拟合效果一般, $R^2$ 平均值为0.9547。工程实践中,若采用Log-Modified蠕变经验模型预测计算淤泥质黏土地基长期沉降及稳定性,在更长时限范围内,可能会造成较大误差,造成潜在的安全隐患。Mesri蠕变经验模型能较好地描述本文淤泥质黏土蠕变特性,将其作为本文淤泥质黏土的推荐模型。

#### 5 结论

1)本文开展淤泥质黏土固结排水三轴压缩蠕变试验,淤泥质黏土在加载时瞬间弹性变形,随后依次进入衰减、稳定蠕变阶段。同一围压下,随着轴压的提升,轴向应变逐渐递增。同一加载等级下,围压和轴压的升高促进轴向应变的增长。

2)在同一围压下,随着加载等级的提升,淤泥质黏土初始蠕变速率和稳态蠕变速率均呈线性递增趋势。在同一加载等级下,较高轴压和围压条件下初始、稳态蠕变速率均始终大于较低轴压和围压条件。淤泥质黏土等时轴压-轴向应变曲线近似双曲线,具有明显的非线性特征,随着轴向应变的增长,曲线簇表现出逐渐靠拢应变轴的趋势。

3)结合淤泥质黏土的等时轴压-轴向应变双曲线形态特征,分别引入Mesri和Log-Modified模型来辨识蠕变数据,给出两者模型参数求解方法,得到适用于本文淤泥质黏土的Mesri和Log-Modified蠕变经验模型,通过对比发现Mesri蠕变经验模型辨识效果优于Log-Modified蠕变经验模型, $R^2$ 平均值达到0.9905,将Mesri蠕变经验模型作为本文淤泥质黏土的推荐模型。

#### 参考文献:

- [1] 张云,薛禹群,吴吉春,等.江苏太仓浅部淤泥质土层的工程地质特征[J].水文地质工程地质,2010,37(4):43-47.
- [2] 刘现鹏,韩阳.考虑土体蠕变的非对称荷载下高桩码头结构变形与损伤[J].中国港湾建设,2016,36(9):1-6.
- [3] 史旦达,周健,贾敏才,等.考虑蠕变性状的港区软土地基参数反演和长期沉降预测[J].岩土力学,2009,30(3):746-750.

(下转第208页)