

DOI: 10.11779/CJGE2021S2032

前海软土蠕变特性试验及模型参数研究

梁荣康¹, 张庆军², 张成³, 李栋⁴, 苏栋^{1, 5}, 李强¹

(1. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 中铁十五局集团有限公司, 上海 200070; 3. 珠海大横琴城市新中心发展有限公司, 广东 珠海 519030; 4. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519000; 5. 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室(深圳大学), 广东 深圳 518060)

摘要: 为研究沿海地区软弱土层的蠕变特性并建立相应的蠕变模型, 对深圳市城市轨道交通12号线海上田园东站处淤泥质黏土进行室内直剪蠕变试验。结果表明, 该软土试样的蠕变特性与所受应力状态有关, 在400 kPa固结压力下, 当试样所受剪应力较小时, 蠕变特性不显著, 随着剪应力的提高, 蠕变特性逐渐显著。根据蠕变速率将软土的蠕变过程区分为减速和稳定两个阶段, 随着剪应力的提高, 该软土在各蠕变阶段的时间均逐渐延长, 相应的应变增量也逐渐增大。采用修正的Singh-Mitchell模型对该软土的蠕变特性进行建模, 该模型参数少, 本构方程简单, 适用性较强。通过采用不同参考时间的试验数据对模型参数进行校核, 发现当参考时间 $t_1=1$ h时模型计算结果与试验数据之间的误差最小, 预测精度较高。

关键词: 软土; 蠕变; 直剪试验; 修正Singh-Mitchell模型

中图分类号: TU447 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0133-04

作者简介: 梁荣康(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事软土的力学特性方面学习研究工作。E-mail: 2060471029@email.szu.edu.cn。

Creep characteristics and model parameters of Qianhai soft soil

LIANG Rong-kang¹, ZHANG Qin-jun², ZHANG Cheng³, LI Dong⁴, SU Dong^{1, 5}, LI Qiang¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. China Railway 15 Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 3. Zhuhai Da Hengqin City New Center Development Co., Ltd., Zhuhai 519030, China; 4. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519000, China; 5. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities (MOE), Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In order to explore the creep characteristics of the soft soil layer in coastal areas and establish the corresponding creep model, a direct shear creep test is conducted on the silty clay at the Haishangtiyuan East Station of Shenzhen Metro Line 12. The results show that the creep characteristics of the soft soil samples are related to the stress state. Under the consolidation pressure of 400 kPa, when the shear stress of the samples is small, the creep characteristics are not significant. With the increase of shear stress, the creep characteristics gradually become more significant. Using the creep rate, the creep process of the soft soil is divided into two stages: deceleration and stability stages. With the increase of shear stress, the elapsed time for each creep stage grows, and the corresponding strain increment increases gradually. The modified Singh-Mitchell model is used to simulate the creep characteristics of the soft soil. This model is widely used because it has fewer parameters and its constitutive equation is simple. The model parameters are calibrated using the test data at different reference time. It is found that the error between the calculated results and the test data is the smallest when the reference time $t_1=1$ h, and the prediction accuracy is higher.

Key words: soft soil; rheology; direct shear test; modified Singh-Mitchell model

0 引言

深圳沿海建筑物大多建造于软弱地层上, 其中软土^[1]以淤泥和淤泥质黏性土为主。软土的蠕变特性会使建筑基础产生不均匀沉降, 可以通过室内蠕变试验来研究软土的蠕变特性, 通过试验结果建立适合该地区的蠕变模型, 真实反映出软土在受力过程中应力、

应变随时间的变化。

李妤妤^[2]通过室内蠕变试验对南沙原状软土的蠕

基金项目: 国家自然科学基金项目(51938008, 52090081); 中铁十五局科研项目(CR15CG-ZH-HQMZSD-2021-00001(KJ))

收稿日期: 2021-08-17

***通信作者** (E-mail: sudong@szu.edu.cn)

变特性进行分析研究, 推导了南沙软土的非线性蠕变本构方程并校核了模型参数, 得到了与剪切蠕变试验对比较好的结果。朱铨雯^[3]对珠海软土进行了室内蠕变试验, 基于半经验半理论的思路, 将体积应变代入 Merchant 模型和五元件广义 Kelvin 模型, 建立了一种适合珠海软土的非线性蠕变本构模型。肖谊^[4]对黄埔地区软土的蠕变规律进行了拟合, 认为五元件广义 Kelvin 模型能较好的描述该地区软土的蠕变特性。

本文对深圳市城市轨道交通 12 号线海上田园东站地层淤泥质黏土进行了固结快剪试验, 获得了该软土的抗剪强度参数, 并对该软土在 400 kPa 的固结压力下进行直剪蠕变试验, 探究了该软土的蠕变特性, 建立了相应的蠕变模型。

1 软土室内试验

本次试验采用深圳市城市轨道交通 12 号线海上田园东站地层淤泥质黏土层软土为研究对象, 该软土的主要物理性质见表 1。

表 1 土样的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soil

含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	孔隙比 e
48	17.2	48.6	31.6	1.28

对现场淤泥质黏土按 48% 含水率配置重塑土, 对配置好的土样先进行密封保存并且静置一晚上, 然后进行抽气饱和, 最后对饱和土样进行固结快剪试验和直剪蠕变试验。

采用应变式直剪仪对该土样进行固结快剪试验, 得到该土样的黏聚力 c 为 5.151 kPa, 内摩擦角 φ 为 22.9° 。考虑到所选试验土样位于地下 17~22 m, 土层压力约为 400 kPa, 取该值作为直剪蠕变试验的固结压力值。根据固结快剪试验可知在 400 kPa 固结压力下, 该土样的抗剪强度为 173 kPa, 依次确定了直剪蠕变试验的分级加载方案如表 2 所示。

表 2 土样施加水平剪应力方案

Table 2 Scheme of applying horizontal shear stress to soil samples

固结压力 /kPa	水平剪应力大小与级数/kPa				
	1	2	3	4	5
400	32	71	103	134	155

蠕变试验在 ZLB-1 型三联流变直剪仪上进行, 仪器设备如图 1 所示, 该仪器通过百分表测量试样应变, 精度为 0.01 mm, 最大量程为 10 mm。直剪蠕变试验前先对试样施加竖向固结压力直至竖向位移小于 0.01 mm/d, 之后逐级施加剪应力, 每级荷载下试样的水平位移小于或等于 0.01 mm/d 方可施加下一级荷载。试验开始后按 0, 1, 15, 30 min, 1, 2, 3, 6, 9, 12, 24 h 记录百分表指针读数, 在此之后每隔 12 h 记录一

次读数^[5]。



图 1 ZLB-1 型三联流变直剪仪

Fig. 1 ZLB-1 triple rheological direct shear apparatus

2 直剪蠕变试验结果分析

各级加载作用下试样剪应变与时间关系如图 2 所示, 可以看出施加各级荷载后的 1 min 内试样发生较大的剪切变形, 若定义 1 min 内的变形为瞬时变形, 则各级荷载下的瞬时变形增量占总应变增量的百分比分别为 94.58%, 83.53%, 71.94%, 65.21%, 52.07%, 说明在较小的剪应力作用下, 土样的蠕变特性不显著, 随着剪应力的增加, 蠕变变形所占比例逐渐增大, 同时试样在该级荷载作用下达到稳定所需要的时间逐渐延长。将蠕变变形分为减速阶段和稳定阶段, 本文中蠕变速率 0.002 mm/h 为分界点区分以上两个阶段, 如图 2 中的实线所示, 可以看出随着剪应力的增大, 各阶段经历的时间也越长。

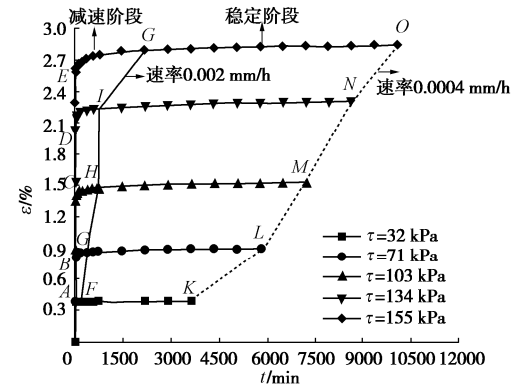


图 2 不同剪切荷载下的应变 - 时间关系的蠕变曲线

Fig. 2 Creep curves of strain-time relationship under different shear loads

各级荷载作用下各的蠕变应变增量如图 3 所示, 可以看出随着剪应力的提高, 减速阶段和稳定阶段产生的应变增量逐渐增大。值得注意的是, 最后一级加载时的剪应力增量 ($\Delta\tau = 21$ kPa) 小于之前各级加载的剪应力增量 ($\Delta\tau = 30\sim 40$ kPa), 但其蠕变应变增量与之前一级加载时相当, 支持了前述的观点。

提取相同蠕变时间下的剪应力和剪应变数据得到等时曲线如图 4 所示, 可以看出随着剪应力的增大, 软土在相同时间段内的应变增量逐渐增大, 即蠕变速

率逐渐增大。同时从剪应力 - 剪应变等时曲线可以看出该软土具有非线性蠕变的特征。

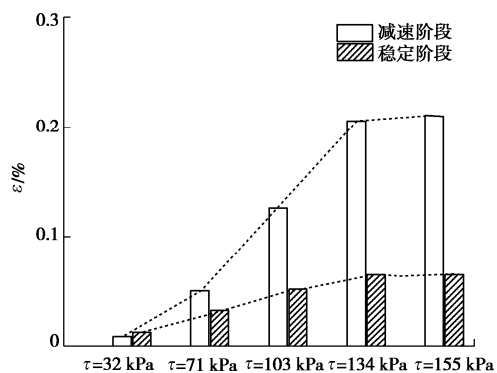


图 3 各级荷载作用下的蠕变应变增量
Fig. 3 Creep strain increments under various shear loads

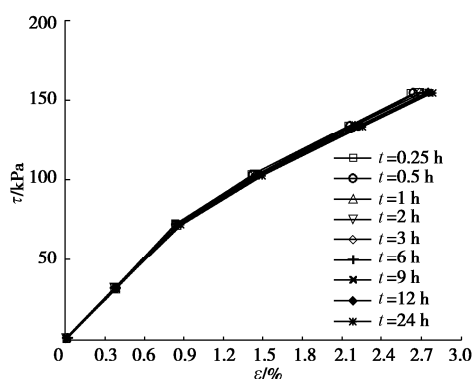


图 4 剪应力 - 剪应变的等时曲线
Fig. 4 Isochronous curves of shear stress-shear strain

3 蠕变模型参数和预测效果分析

3.1 修正的 Singh-Mitchell 蠕变模型

Singh-Mitchell 蠕变模型^[6]公式如下:

$$\dot{\varepsilon} = A e^{a S_1} \left(\frac{t_1}{t} \right)^m, \quad (1)$$

式中, $\dot{\varepsilon}$ 为土样应变率, S_1 为剪应力, t_1 为参考时间, A , a 和 m 均为常量参数。

王常明等^[7]对沿海地区的软土进行了三轴剪切蠕变试验, 通过试验数据对 Singh-Mitchell 蠕变模型进行了修正, 公式如下:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{CS}{\sigma - bS} \left(\frac{t}{t_1} \right)^n, \quad (2)$$

式中, ε_0 为瞬时的弹塑性应变, 在三轴或者直剪蠕变试验中取 0, $\sigma = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$, 为平均应力, $S = \sigma_1 - \sigma_3$, 为应力偏差, C , b 和 n 为常量参数。

式 (2) 适用于三轴剪切蠕变试验结果, 为了采用该经验模型拟合直剪蠕变试验结果, 将三轴直剪蠕变试验中的平均应力 σ 和应力偏差 S 用直剪蠕变试验中的固结压力 P 和 2 倍剪应力 2τ 来代替得到适用于直剪蠕变试验的蠕变模型, 公式如下:

$$\varepsilon = \frac{2C\tau}{P - 2b\tau} \left(\frac{t}{t_1} \right)^n. \quad (3)$$

将式 (3) 左右两边取对数可得

$$\ln \varepsilon = n \ln t + \ln \left(\frac{2c\tau}{p - 2b\tau} \right) - n \ln t_1. \quad (4)$$

因此参数 n 是 $\ln \varepsilon$ 和 $\ln t$ 的拟合直线 (见图 5) 的斜率。在 400 kPa 固结压力下不同剪应力情况下的 n 值列见表 3, 可见 n 值变化不大, 取其平均值 0.0124 作为蠕变模型中的 n 值。

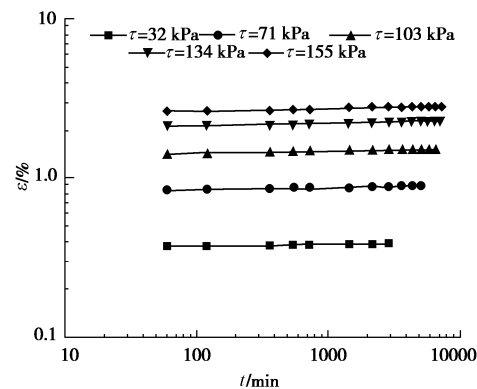


图 5 剪应变 - 时间的双对数曲线
Fig. 5 Double-logarithmic graph of shear strain-time

表 3 不同剪应力的 $\ln \varepsilon - \ln t$ 的拟合直线斜率 n

stresses					
剪应力/kPa	32	71	103	134	155
n 值	0.0098	0.0135	0.0134	0.0112	0.0139
n 平均值	0.0124				

由式 (3) 可知, 参数 b 和 C 可根据取 $t=t_1$ 时的 $(P\varepsilon/2\tau) - \varepsilon$ 关系得到。取不同参考时间 t_1 得到的 b 和 C 值如表 4 所示, 用该表中的所有 b 和 C 值的组合对直剪蠕变试验的结果进行预测, 计算了预测与试验结果的平均误差和最大误差百分比如图 6 所示。可以看出当 $t_1=1$ h 时的预测值与试验值之间的误差最小 (平均误差为 2.54%), 取该时刻对应的参数值得到该试样的蠕变模型为

$$\varepsilon = \frac{4.094\tau}{P - 1.05\tau} t^{0.0124}. \quad (5)$$

表 4 不同的参考时间下模型参数 b 和 C 值

Table 4 Values of model parameters b and C at corresponding time		
参考时间 t_1 /h	b (直线斜率)	C (直线截距)
0.25	0.514	2.040
0.5	0.515	2.054
1	0.519	2.063
2	0.524	2.067
3	0.526	2.072
6	0.531	2.078
9	0.532	2.092
12	0.538	2.107
24	0.531	2.119
36	0.528	2.137
48	0.526	2.147

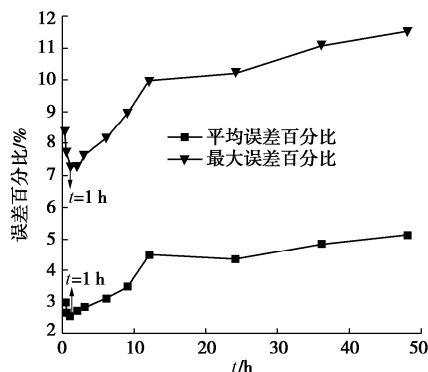


图6 不同参考时间所对应的误差百分比

Fig. 6 Error percentage corresponding to different time

3.2 预测效果分析

采用式(5)对本文的直剪蠕变试验进行预测,与试验结果的对比如图7所示,可以看出预测效果较好。因此修正的 Singh-Mitchell 蠕变模型对该软土在参考时间 $t_1=1$ h 时预测精度较高。

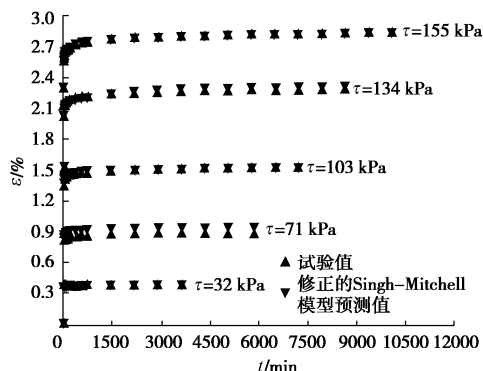


图7 修正的 Singh-Mitchell 模型预测效果

Fig. 7 Fitting effect of modified Singh-Mitchell model

4 结 论

本文通过对深圳市城市轨道交通 12 号线海上田园东站埋深约 20 m 的软土进行了直剪蠕变试验及蠕变模型建模,得到了以下结论:

(1) 该软土具有非线性蠕变特征,在 400 kPa 固结压力下,随着剪应力的提高,试样的蠕变特性变得更为显著。

(2) 根据蠕变速率将软土的蠕变过程区分为减速和稳定两个阶段。随着剪应力的提高,该软土在各蠕变阶段的时间均逐渐延长,相应的应变增量也逐渐增大。

(3) 根据试验结果对修正的 Singh-Mitchell 模型的参数进行了研究,该模型能较好的预测该软土的蠕变过程,预测精度较高。

参考文献:

- [1] 蒙 韵, 周 树. 深圳地区软土的工程特性及软基处理措施探讨[J]. 资源环境与工程, 2016, 30(3): 450 - 452. (MENG Yun, ZHOU Shu. Engineering characteristics of soft soil in Shenzhen area and discussion on soft foundation treatment measures[J]. Resources Environment and Engineering, 2016, 30(3): 450 - 452. (in Chinese))
- [2] 李好好. 南沙软土宏微观蠕变试验及本构模型研究[D]. 广州: 广州大学, 2020. (LI Yu-yu. Macro and Micro Creep Test and Constitutive Model Research of Nansha Soft Soil[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020. (in Chinese))
- [3] 朱铨雯. 珠海软土宏微观蠕变试验及非线性模型研究[D]. 广州: 广州大学, 2020. (ZHU Quan-wen. Research on Macro and Micro Creep Test and Nonlinear Model of Zhuhai Soft Soil[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020. (in Chinese))
- [4] 肖 谊. 广州黄埔地区软土蠕变试验及蠕变模型选择[J]. 现代城市轨道交通, 2017(9): 28 - 31. (XIAO Yi. Creep test of soft soil in Huangpu area of Guangzhou and selection of creep model [J]. Modern Urban Rail Transit, 2017(9): 28 - 31. (in Chinese))
- [5] 刘柱辉. 软土直剪蠕变试验分析与本构模型研究[D]. 广州: 广州大学, 2018. (LIU Zhu-hui. Direct Shear Creep Test Analysis and Constitutive Model Study of Soft Soil[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018. (in Chinese))
- [6] SINGH A, MITCHELL J K. General stress-strain-time function for soils[J]. Journal of the Clay Mechanics and Foundation Division, 1968, 94(SM1): 21 - 46.
- [7] 王常明, 王 清, 张淑华. 滨海软土蠕变特性及蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(2): 227 - 230. (WANG Chang-ming, WANG Qing, ZHANG Shu-hua. Creep characteristics and creep model of coastal soft soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(2): 227 - 230. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)