

湛江软粘土蠕变特性及经验模型

何利军¹, 孔令伟¹, 张先伟¹, 王小燕¹, 蔡羽²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广州 510230)

摘要: 针对湛江软粘土开展了系统的三轴固结不排水蠕变试验, 得到不同围压、不同应力加载等级下的全过程蠕变曲线, 进而通过线性的 Boltzmann 叠加原理, 采用“坐标平移法”得到分别加载下的蠕变曲线和蠕变等时曲线, 蠕变等时曲线的折线形式说明湛江软粘土具有较为特殊的蠕变特性, 故文中经验模型中的应力-应变关系在通常情况下采用线性函数, 应变-时间关系采用双曲线函数形式, 而在偏应力较低时采用 Mesri 模型。通过分析和对比, 发现该蠕变方程较 Singh-Mitchell 模型、Mesri 模型更适应试验数据, 能够较为全面地反映和预测该软粘土的蠕变特性。

关键词: 软粘土; 蠕变试验; 蠕变等时曲线; 蠕变模型

中图分类号: TU 411.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)01-0059-06

我国沿海地区分布有广泛的海积软粘土。随着道路建设的高速发展, 需要对诸如湛江软粘土的力学性质进行深入的研究, 并将研究成果应用于公路建设, 因此, 如何发展和完善湛江软粘土的变形及变形控制理论显得尤为重要, 而解决这些问题的关键之一是建立恰当的力学本构关系模型。

工程实例表明, 土不仅仅具有弹性、塑性, 还具有流变性。与其它类型土相比, 软粘土的流变变形更为显著。建立合理准确的流变模型始终是土力学研究的重要任务。对于软粘土来说, 描述其蠕变特性的常有模型有以下 3 种: 基于模型理论建立理论模型, 基于试验成果建立经验模型以及基于微观流变学模型。其中以前两种模型应用最为广泛^[1], 但他们也各有缺陷: 基于模型理论的模型无法描述软粘土的非线性蠕变, 模型的辨识和参数的确定也会给建模带来很大困难; 完全通过室内试验研究所建立的经验模型缺乏严密的理论根据, 仅能反映简单加载或特定应力路径情况下的蠕变现象。但经验蠕变模型的优势在于只用少量的参数就能达到较好的拟合效果, 在工程实践中被广泛使用。笔者以湛江软粘土为研究对象, 通过分析常规三轴剪切蠕变试验数据, 发现其具有特殊的蠕变等时

曲线, 以往的经验模型^[2-5]都不足以很好地描述应力-应变关系, 并据此建立了一种新的流变经验模型, 且适用于湛江软粘土。

1 湛江软粘土的基本工程特性

实验土样取自湛江市区某地海岸边沉积层, 埋深为 7.0~10.0m, 试验所用试样天然含水率为 48.6%, 重度为 17.7kN/m³, 孔隙比高达 1.40, 液限 60% 左右, 塑性指数达 38%, <0.005mm 粘粒占 39.0%, 具有一般软土的物理性质, 按土质学分类为软土, 但其力学性质远比一般软土要好, 原状土无侧限抗压强度达 150kPa, 灵敏度多为 5~7, 结构屈服应力高达 400kPa~600kPa, 压缩变形呈现典型结构性粘土的特性, 竖向渗透系数很小, 该土的物理力学性质见表 1^[6]。

表 1 湛江软粘土实验土样基本物理力学性质
Table 1 Physical and mechanical parameters of soft clay from Zhanjiang area

| 含水率 W (%) | 重度 γ (kN·cm ⁻³) | 液限 W _L (%) | 塑限 W _P (%) | 塑限 指数 I _p (%) | 渗透 系数 K ($\times 10^{-8}$ cm· s ⁻¹) | 结构屈 服应力 σ (MPa) |
|--------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------|
| 48.6 | 1.77 | 60.0 | 23.0 | 38.0 | 1.64 | 0.4~0.6 |

2 试验及结果分析

2.1 蠕变曲线特征

试验仪器为 GDS 应力路径三轴仪, 采用分级加载, 实验围压为 0.05、0.1、0.2、0.4MPa。对于围压为 0.05MPa 的情况, 笔者通过湛江软粘土的三轴剪切蠕

收稿日期: 2010-06-23; 修订日期: 2010-09-06

基金项目: 中国科学院武汉岩土力学研究所知识新工程项目 (Q110201)

作者简介: 何利军 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事土力学本构理论方面的研究。

E-mail: hlj818@yahoo.com.cn

变试验,将围压为 0.05MPa 时应变随时间的变化规律绘制了蠕变曲线(图 1)。根据图 1 中蠕变曲线的变化情况,可对该软粘土的流变特性做如下分析:①土样在加载瞬时均有一定量的弹性瞬时应变,其量值随偏应力的增大而不变或略有下降;②瞬时弹性应变后,蠕变试验曲线呈衰减稳定,变形随时间增长而逐渐趋于一稳定值。当偏应力继续增大至破坏强度时,瞬时变形后历时较短即进入加速蠕变阶段并发生破坏,且破坏前出现较明显征兆。取破坏强度 0.16MPa^[7],其蠕变等时曲线如图 2 所示,图 2 中的蠕变等时曲线可视为折线。其它围压下的蠕变等时曲线也可视为折线,如图 3 所示。则围压为 0.05MPa 时,相应的轴向偏应力水平所对应的屈服应力为 $\sigma_s = 0.028\text{MPa}$ 。同样,围压为 0.1MPa 时, $\sigma_s = 0.029\text{MPa}$,围压为 0.2MPa 时, $\sigma_s = 0.05\text{MPa}$,围压为 0.4MPa 时 $\sigma_s = 0.25\text{MPa}$ 。

图 2、图 3 中的曲线均为通过运用线性的 Boltzmann 叠加原理,采用“坐标平移法”分别得到。

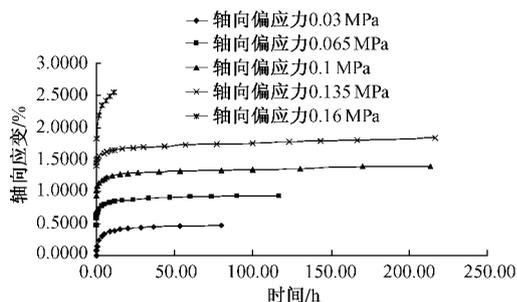


图 1 围压为 0.05MPa 的蠕变试验曲线
Fig. 1 Creep curves under confining pressure of 0.05MPa

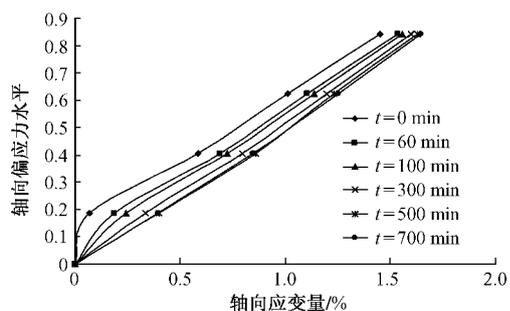
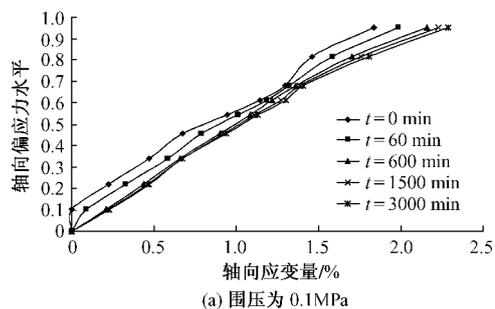


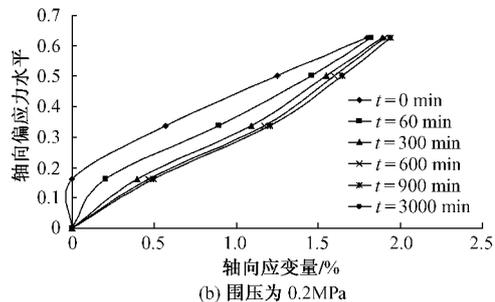
图 2 0.05MPa 下蠕变等时曲线
Fig. 2 Creep equal-time curves under confining pressure of 0.05MPa

2.2 蠕变等时曲线的描述

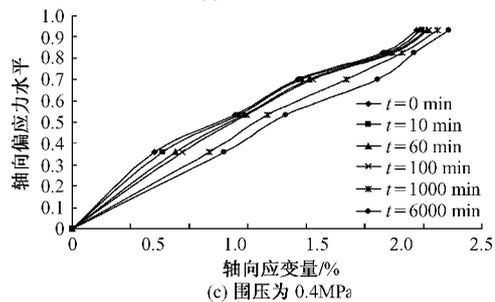
由于蠕变等时曲线近乎为折线,而 Singh-Mitchell 模型所描述的应力-应变关系为幂函数, Mesri 模型所描述的应力-应变关系为双曲线函数,两种函数都



(a) 围压为 0.1MPa



(b) 围压为 0.2MPa



(c) 围压为 0.4MPa

图 3 其它围压下的蠕变等时曲线
Fig. 3 Creep equal-time curves under other confining pressure

不能很好地描述湛江软粘土的蠕变等时曲线,对 0.05MPa 的蠕变等时曲线作如图 4 的归一化处理,从图 4 也可以看出, Singh - Mitchell 模型和 Mesri 模型不太适合描述湛江软粘土的蠕变等时曲线。

若略去第一级偏应力前面的曲线部分,则蠕变等时曲线趋近于直线,如图 5 所示。

3 应力-应变-时间关系

由前面的论述可知,当轴向偏应力大于屈服应力时的蠕变等时曲线为直线,故与其他各种类似的描述表达式^[8]相比,应力-应变-时间关系采用下式描述较合适:

$$\varepsilon = (m\sigma_D + n) \frac{t}{t + T} \quad (1)$$

式中: ε ——轴向应变;

σ_D ——轴向偏应力水平;

t ——时间;

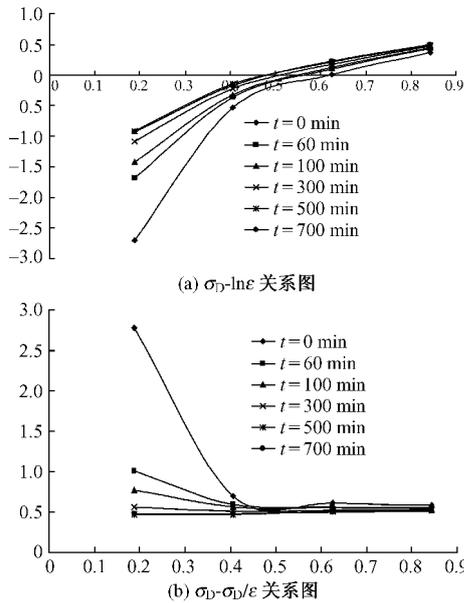


图 4 0.05MPa 围压下蠕变等时曲线的归一化
Fig. 4 Normalization of creep equal-time under confining pressure of 0.05MPa

m, n, T ——拟合参数。

若轴向偏应力不大于屈服应力时,不妨采用 Mesri 模型来描述。通常式(1)已经能够满足实际工程应用的需要。

(1) 参数 T 的确定

围压为 0.05MPa 时,取 $t = \infty$, 则 $\varepsilon_\infty = m\sigma_D + n$ 有:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty \frac{t}{t + T} \quad (2)$$

$$\frac{t}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon_\infty} t + \frac{T}{\varepsilon_\infty} \quad (3)$$

偏应力 0.03MPa 下:

$$\varepsilon_\infty = 0.46955, T = 1.5493$$

偏应力 0.065MPa 下:

$$\varepsilon_\infty = 0.9311, T = 0.6272$$

偏应力 0.1MPa 下:

$$\varepsilon_\infty = 1.3891, T = 1.26698$$

偏应力 0.135MPa 下:

$$\varepsilon_\infty = 1.8162, T = 1.2552$$

除了偏应力 0.065MPa 时, $T = 0.6272$, 其它 3 个 T 值较为接近, 取这 3 个 T 的平均值 1.35716。这主要是由于能得到蠕变曲线的数据处理方法的原因而使得第二条数据拟合曲线明显要“陡”, 其它围压下的蠕变曲线也有相同情况出现, 在不同围压条件下若都略去第二条曲线, 参数 T 和偏应力水平呈良好的线性关系,

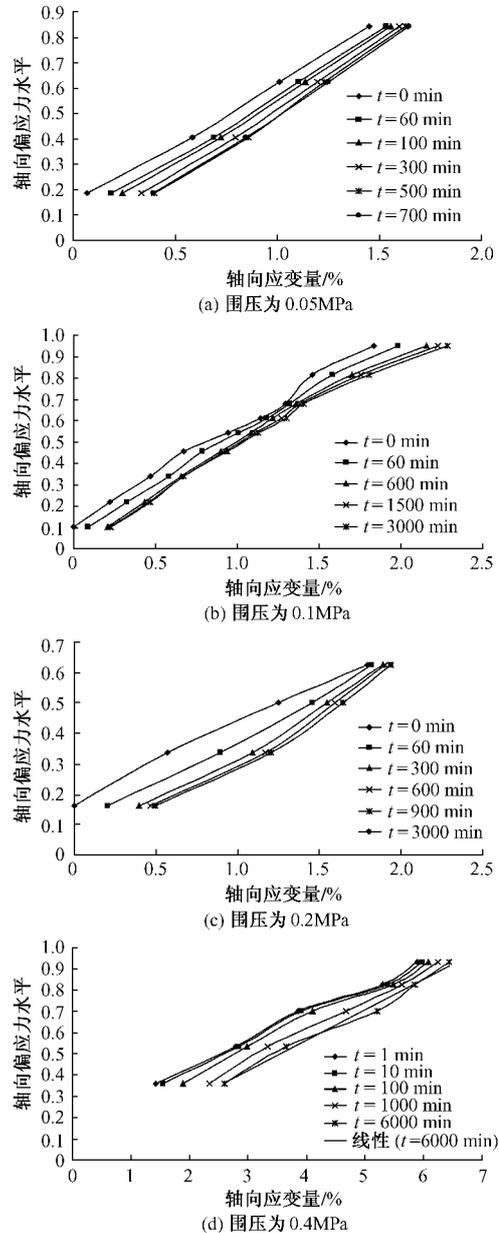


图 5 新的蠕变等时曲线
Fig. 5 New creep equal-time curves under other confining pressure

如图 6 所示(围压为 0.05MPa)。

(2) 参数 m, n 的确定

在图 7 所示的关系曲线图中, $m = 2.0562, n = 0.0913$, 则:

$$\varepsilon = (2.0562\sigma_D + 0.0913) \frac{t}{t + 1.35716}$$

其拟合效果如图 8 所示。

从上文图中可以看出, 当偏应力超过 0.028MPa 时, 可以用式(1)来很好地描述应力-应变-时间关系。当偏应力低于 0.028MPa 时, 用 Mesri 模型来描

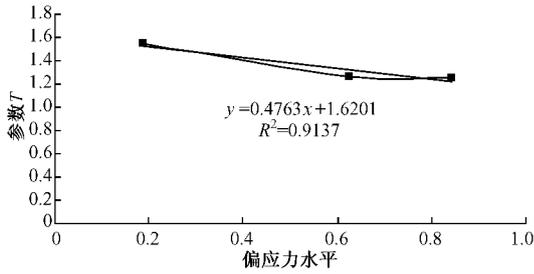


图 6 $\sigma_D - T$ 关系图

Fig. 6 Variation of σ_D and T

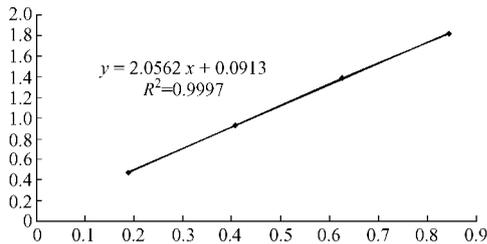


图 7 $\sigma_D - \varepsilon_z$ 关系图

Fig. 7 Variation of σ_D and ε_z

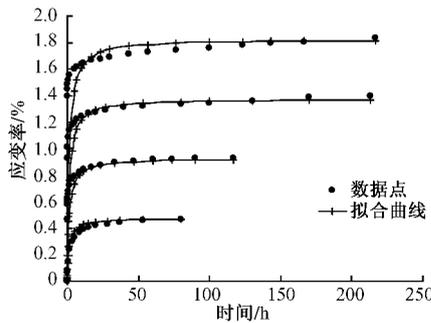


图 8 0.05MPa 围压下蠕变的拟合效果图

Fig. 8 Simulation effects of creep under confining pressure of 0.05MPa

述。故湛江软粘土在 0.05MPa 围压下的应力 - 应变 - 时间关系为:

$$\begin{cases} \varepsilon = (2.0562\sigma_D + 0.0913) \frac{t}{t + 1.35716}, & \Delta\sigma > 0.028\text{MPa} \\ \varepsilon = \left[\frac{0.995\sigma_D}{1 - 0.6319\sigma_D} \right] t^{0.040967}, & \Delta\sigma \leq 0.028\text{MPa} \end{cases}$$

同样 0.1MPa 围压下的应力 - 应变 - 时间关系为:

$$\begin{cases} \varepsilon = (2.4231\sigma_D - 0.1088) \frac{t}{t + 0.5744}, & \Delta\sigma > 0.029\text{MPa} \\ \varepsilon = \left[\frac{1.088\sigma_D}{1 - 0.629\sigma_D} \right] t^{0.033325}, & \Delta\sigma \leq 0.029\text{MPa} \end{cases}$$

其拟合效果如图 9。

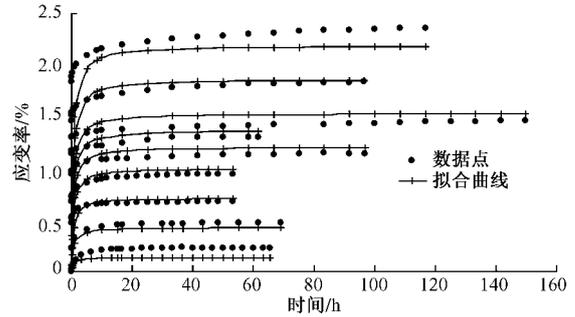


图 9 0.1MPa 围压下蠕变的拟合效果图

Fig. 9 Simulation effects of creep under confining pressure of 0.1MPa

0.2MPa 围压下的应力 - 应变 - 时间关系为:

$$\begin{cases} \varepsilon = (3.1792\sigma_D + 0.1088) \frac{t}{t + 2.515}, & \Delta\sigma > 0.05\text{MPa} \\ \varepsilon = \left[\frac{1.193\sigma_D}{1 - 1.0987\sigma_D} \right] t^{0.038867}, & \Delta\sigma \leq 0.05\text{MPa} \end{cases}$$

其拟合效果如图 10。

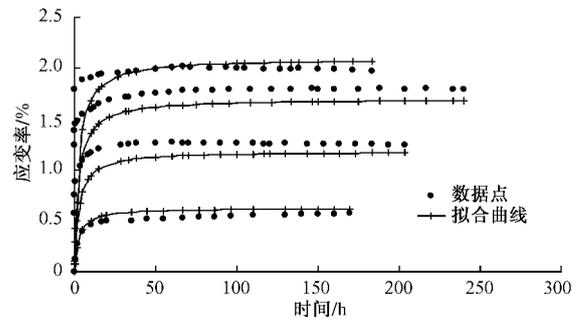


图 10 0.2MPa 围压下蠕变的拟合效果图

Fig. 10 Simulation effects of creep under confining pressure of 0.2MPa

0.4MPa 围压下的应力 - 应变 - 时间关系为:

$$\begin{cases} \varepsilon = (6.8209\sigma_D + 0.2382) \frac{t}{t + 1.066}, & \Delta\sigma > 0.25\text{MPa} \\ \varepsilon = \left[\frac{4.28\sigma_D}{1 - 0.388\sigma_D} \right] t^{0.03616}, & \Delta\sigma \leq 0.25\text{MPa} \end{cases}$$

其拟合效果如图 11。

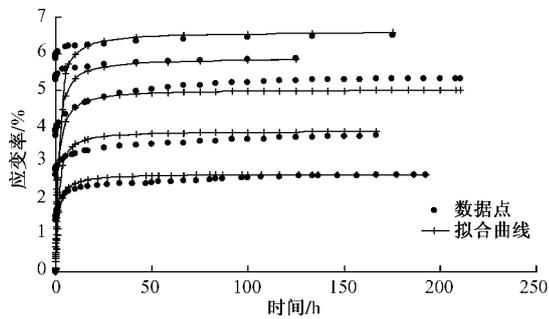


图 11 0.4MPa 围压下蠕变的拟合效果图

Fig. 11 Simulation effects of creep under confining pressure of 0.4MPa

从拟合效果图可看出,文中的经验模型能较好地拟合试验数据,在工程应用中,能通过该经验模型和线性插值方法预测各种围压、偏应力及时间的湛江软粘土的蠕变量,进而为实际工程设计提供参考。文中模型与 Singh-Mitchell 模型和 Mesri 模型的相比,效果也要好一些,限于篇幅,不再列图详述。

4 结论

(1) 湛江软粘土蠕变等时曲线是一种类似于折线的曲线,且随时间的增长,逐渐趋近于直线。

(2) Singh-Mitchell 模型和 Mesri 模型拟合本文试验效果较差,这在对蠕变等时曲线的描述方面尤为突出。因此 Singh-Mitchell 模型和 Mesri 模型并不太完全适合本文试验。

(3) 采用新的形式建立应力-应变关系,与试验曲线的对比分析可知,该模型更符合文中实验数据,能够更好地反映和预测湛江地区软粘土的蠕变特性。

参考文献:

[1] 袁静,龚晓南,益德清. 岩土流变模型比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 772-779. [YUAN J, GONG X N, YI D Q. Comparison study on rheological constitutive models [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 772-779. (in Chinese)]

[2] 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 H H, CHEN X P, CHENG X J, 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)]

[3] 王琛,刘浩吾,许强. 三峡泄滩滑坡滑动带土的改进 Mesri 蠕变模型[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(1): 15-19. [WANG C, LIU H W, XU Q. Modified Mesri's creep model for soils in sliding zone of Xietan landslide in Three Gorges [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(1): 15-19. (in Chinese)]

[4] 李军世,孙钧. 上海淤泥质黏土的 Mesri 蠕变模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 74-79. [LI J S, SUN J. Mesri's creep model for Shanghai silt-clay [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 74-79. (in Chinese)]

[5] 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 C M, WANG Q, ZHANG S H. Creep characteristics and creep model of marine soft soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 227-230. (in Chinese)]

[6] 蔡羽. 湛江强结构性粘土力学性状的时间效应研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院武汉岩土力学研究所, 2006. [CAI Y. Research on Time-dependent Mechanical Behavior of Strong Structured Clay in Zhanjiang Area [D]. Wuhan: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)]

[7] 孙钧. 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 J. The Rheological of Geomaterial and its Application to Engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese)]

[8] C C 维亚诺夫. 土力学的流变原理[M]. 杜余培,译. 北京: 科学出版社, 1987. [Вюлов С С. The Principles of Rheology of Soil Mechanics [M]. Translated by Dun Y P. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)]

Creep properties and empirical model of soft clay in Zhanjiang

HE Li-jun¹, KONG Ling-wei¹, ZHANG Xian-wei¹, WANG Xiao-yan¹, CAI Yu²

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;*
2. *CCCC-FHDI Engineering Co. Ltd, Guangzhou 510230, China*)

Abstract: Triaxial creep test with non-drainage of soft clay in Zhanjiang area was systematically carried out, the complete creep curves were achieved under different confining pressures and different stress states, both creep curves of staged loading and creep equal-time curves were established by linear Boltzmann overlapping principle as well as Coordinate Translation. Broken line form of creep equal-time curves showed specific creep properties of soft-soil in Zhanjiang, the stress-strain relationship of the empirical model in this paper was approximated by a linear function generally, and the strain-time relationship was represented by a hyperbolic function, while Mesri model is still applicable with low deviatoric stress. Analysis showed that this empirical creep equation was more suitable for simulating the test data comparing to Singh-Mitchell model and Mesri model, describing and predicting the creep properties of the soft clay in Zhanjiang comprehensively.

Key words: soft clay; creep test; creep equal-time curve; creep model

责任编辑:张明霞

(上接第 45 页)

A study on the characteristics of deep overburden in Qizong segment of Jinsha River and its engineering effects

WANG Yun-sheng¹, DENG Xi¹, LUO Yong-hong¹, WANG Zi-gao², GAO Jian², WU Jun-feng¹, SUN Gang¹

(1. *State Key Lab of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;* 2. *HydroChina Kunming Engineering Corporation, Kunming 650051, China*)

Abstract: Overburden of 60 ~ 120m deep is developed in the Qizong segment of Jinsha River. The deep overburden can be divided into three layers upward. Pebble and gravel intercalated with minor fine sand or silty clay with the thickness of 11.1 ~ 33m at the bottom of the riverbed; a layer of fine sand, silty clay, pebble and gravel which with the thickness of 10.04 ~ 35m in the middle of the riverbed; coarse lenses of the drift (blocks), pebble (broken) and gravel layer with the thickness of 9.5 ~ 59m in the upper part. Sand lens are widely distributed in the deep overburden. The maximum buried depth is 83.1m, the maximum thickness is 29.4m, and the minimum thickness is only 0.5m. The thickness of the sand lens is generally within 5m. Studies show that the sand lens is not formed by the accumulation of lacustrine, but is formed by accumulation of the relatively still water environment and the normal river floodplain. By indoor sampling tests, it shows that coarse-grained soil (boulder-pebbles accumulation, etc.) in the overburden of the river bed is relatively strong and hard, fine-grained soil in the lower place is excess consolidated, but non-liquefaction. Fine sand lens at the upper are relatively weak, so it is possible to be liquefied under an earthquake. The engineering effects can be concluded that because of the bad geological conditions it is only suitable for rock-fill dam, the excavated volume is huge, the sand layer treatment depth is large and impermeable treatment is quite difficult.

Key words: deep overburden; development characteristics; engineering effects; Jinsha River

责任编辑:张明霞