

陈昌富,朱世民,毛凤山,等. 2019. 红黏土固结-蠕变特性及其耦合模型[J]. 工程地质学报, 27(4): 723-728. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-330

Chen Changfu, Zhu Shimin, Mao Fengshan, et al. 2019. Characterization and modelling of coupled consolidation-creep behavior of red clay [J]. Journal of Engineering Geology, 27(4): 723-728. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-330

## 红黏土固结-蠕变特性及其耦合模型\*

陈昌富<sup>①②</sup> 朱世民<sup>①②</sup> 毛凤山<sup>①②</sup> 张根宝<sup>①②</sup>

(①湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室 长沙 410082)

(②湖南大学土木工程学院 长沙 410082)

**摘要** 红黏土的蠕变特性直接影响到红土边坡的长期稳定性。为了深入研究红黏土的蠕变特性,设计改制了一套基于杠杆加载原理的三轴蠕变试验装置。采用分级加载,对红黏土试样进行室内排水三轴蠕变试验,获得了不同偏应力水平下的蠕变全过程曲线。采用“陈氏加载法”将分级加载曲线转化成分别加载曲线,并利用等时曲线法得出红黏土蠕变破坏阈值。将固结理论与 Kelvin 蠕变模型相结合以描述红黏土在偏应力作用下的固结-蠕变特性,然后利用一部分偏应力水平下的蠕变试验结果进行回归建模以确定各模型参数,并以此建立出考虑固结-蠕变耦合作用的红黏土元件蠕变模型,最后采用所建蠕变模型对另一部分蠕变试验结果进行预测。结果表明:本文模型无论是拟合还是预测的精准度都很高。

**关键词** 红黏土; 固结; 蠕变; Kelvin 模型; 耦合作用

中图分类号: TU411.5 文献标识码: A doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018-330

## CHARACTERIZATION AND MODELLING OF COUPLED CONSOLIDATION-CREEP BEHAVIOR OF RED CLAY

CHEN Changfu<sup>①②</sup> ZHU Shimin<sup>①②</sup> MAO Fengshan<sup>①②</sup> ZHANG Genbao<sup>①②</sup>

(①Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082)

(②College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082)

**Abstract** The long-term stability of slope in red clay region directly depends on the creep behavior of red clay. A specially designed tri-axial creep testing setup based on leverage loading method is adopted to investigate the creep behavior for red clay. Time history of axial displacement of specimen under drained condition is monitored subjected to stepwise axial load and constant confining stress. The Chen's method is used to transform the axial displacement time history equivalently into a cluster of creep curves for different loaded axial stresses. Furthermore, a threshold value of axial stress corresponding to the creep failure of red clay specimen is determined by using isochronal curve method. A novel element creep model incorporating soil consolidation theory and Kelvin rheological model is established to characterize the coupled consolidation-creep behavior of red clay. The model parameters of this element creep model are correlated reasonably with loaded axial stress by fitting on tested creep curves under part of adopted axial loads. The above correlations are furtherly incorporated into the creep model to predict the creep response of axial displacement of specimens under remaining axial stresses. The predicted axial displacement creep

\* 收稿日期: 2018-10-15; 收到修改稿日期: 2018-11-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572298)资助.

This study is supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.41572298).

第一作者简介: 陈昌富(1963-)男,博士,教授,博士生导师,主要从事边坡工程及支护工程、地基处理等方面的研究. Email: cfchen@163.com

curves are compared with the measured data in tests. The good agreement found in comparison validates the effectiveness and accuracy of the presented element creep model.

**Key words** Red clay; Consolidation; Creep; Kelvin model; Coupled effect

## 0 引言

红黏土广泛分布于我国南方水量充沛的湿润地区,其蠕变特性与长期稳定性直接关系到工程本身以及周边环境的安全,因此开展红黏土蠕变特性研究具有重要的工程意义。

岩土蠕变特性通常采用元件蠕变模型和经验蠕变模型来描述。比较著名的元件模型有: Maxwell 模型、Kelvin 模型、Burgers 模型等; 比较著名的蠕变经验模型有: Singh-Mitchell 模型(Singh et al., 1968)、Mesri 模型(Mesri et al., 1981) 等。詹美礼等(1993)将双屈服面弹塑性模型与软土的流变性相结合,建立了一个带有双屈服面的流变模型; 卢萍珍等(2008)提出了一个新的蠕变经验模型,该模型与试验结果拟合效果良好; 赵明华等(2004)对西原模型进行了改进,并通过室内直剪蠕变试验验证了模型的合理性; 陈昌富等(2008, 2016)还建立了海相软土的改进 BP 神经网络蠕变本构模型和锚-土界面的剪切蠕变经验模型; 此外,刘德方等(2017)依据双曲线模型建立了不同含水率下的 EPS 颗粒轻量土经验蠕变模型; 陈晓雪等(2017)建立了纤维加筋膨胀土的 Mesri 蠕变模型。

作为国内岩土流变学的主要奠基人,陈宗基(1958)最早将流变模型与固结理论结合起来研究土体的变形; 赵维炳(1989)采用广义 Voigt 模型,导出了饱和土一维流变固结问题的普遍理论解; 陈晓平等(2003)将 Duncan 非线性弹性模型与 Kelvin 模型相串联,并将其引入到 Biot 固结理论中,以此建立了固结-蠕变耦合模型; 孙明乾等(2015)对 Singh-Mitchell 模型进行修正,并利用修正后的 Singh-Mitchell 模型建立了考虑软土流变特性的一维及三维固结流变微分方程。

如果能将固结理论与蠕变模型结合起来,这样在分析红黏土受力变形的时间效应时,便能够同时考虑固结和蠕变这两种因素的影响,这对进一步认识红黏土的工程性质是很有意义的。

本文利用设计改制后的三轴蠕变试验装置,对红黏土试样进行室内排水三轴蠕变试验,得到蠕变全过程曲线及其蠕变破坏阈值; 然后根据部分应力

水平下的蠕变试验结果建立出考虑固结-蠕变耦合作用的红黏土元件蠕变模型; 最后利用所建模型对另一部分蠕变试验结果进行预测,以验证模型的精准度。

## 1 红黏土三轴蠕变试验

### 1.1 试验用料及装置

试验所用土料取自湖南省长沙市宁乡县某高速公路段,其主要的物理力学参数如表 1。

表 1 红黏土的基本物理力学参数  
Table 1 Properties of red clay used in testing

液限 $w_L$	塑限 $w_p$	塑性指数 $I_p$	比重 $d_s$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
36.8%	20.9%	15.9	2.687	38.7	24.5

试验装置采用自行设计改制后的 TSZ 应变控制式三轴仪,该装置主要由加载系统和数据采集系统构成,具体构造如图 1。

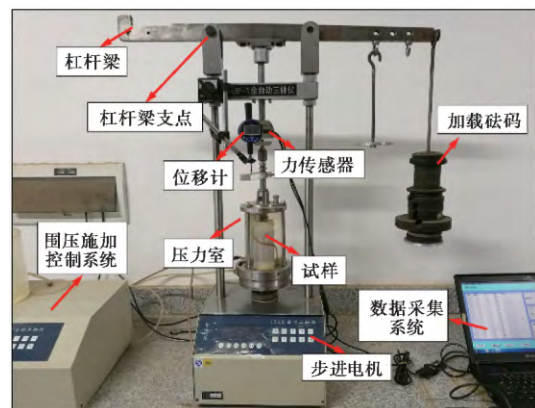


图 1 三轴蠕变试验装置

Fig. 1 Tri-axial creep testing device

### 1.2 试验方法

试验采用的是重塑土试样,其直径为 39.1 mm,高度为 80 mm。试验条件为固结排水。试验的具体步骤依次为: (1) 土料击实,击实后土样的干密度为  $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、含水率为 0.18; (2) 抽气饱和,饱和后土样的饱和度不低于 95%; (3) 等压固结,固结的时间为 24 h,以保证土样中孔隙水压力完全消散;

(4) 蠕变加载, 试样等压固结完成后, 再在排水状态下施加恒定的竖向荷载以模拟偏应力  $\Delta\sigma$ 。

本文试验中的蠕变加载方式为分级加载, 即在同一个试样上逐级施加不同的荷载, 待该级荷载作用下的变形稳定或者达到预定时间后再施加下一级荷载, 直至试样产生破坏(孙钧, 1999)。根据各平行试样固结不排水三轴压缩试验破坏偏应力的大小, 将加载等级分成 6~9 级。选用的蠕变稳定标准为 10 000 s 内变形量小于 0.01 mm(孙钧, 1999)。由于试验用料为红黏土, 击实后的土样受力后变形能在 24 h 内达到稳定标准, 鉴于此, 每级荷载的施加时间为 24 h。

### 1.3 试验结果

对在 200 kPa 围压下固结完成的红黏土试样进行分级加载, 得到分级加载全过程曲线(图 2)。

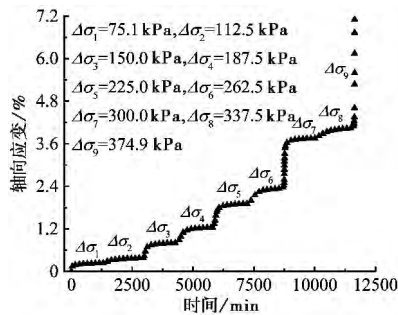


图 2 红黏土三轴蠕变分级加载全过程曲线

Fig. 2 Stepwise loaded full-process creep curve of red clay

采用“陈氏加载法”(陈宗基等, 1991)对分级加载全过程曲线进行处理, 可得到分别加载条件下的轴向应变-时间关系曲线(图 3)。

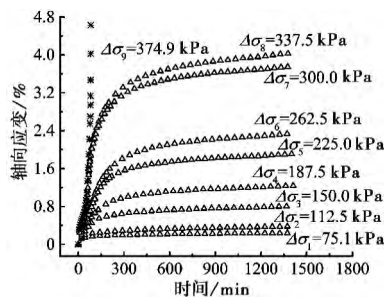


图 3 红黏土三轴蠕变分别加载曲线

Fig. 3 Individual creep curves for varying stress levels

在图 3 中  $t=0.5\text{ h}, 1\text{ h}, 2\text{ h}, 3\text{ h}, 6\text{ h}, 12\text{ h}, 18\text{ h}, 24\text{ h}$  处作平行于纵轴(轴向应变)的直线与各级蠕变曲线相交, 根据各交点的轴向应变和偏应力值绘出偏应力-轴向应变等时曲线(图 4)。将各等时曲

线屈服极限值的连线所组成的水平渐近线在偏应力轴上的截距作为红黏土蠕变破坏阈值, 于是可得该土样的蠕变破坏阈值:  $\Delta\sigma_f=300.0\text{ kPa}$ 。

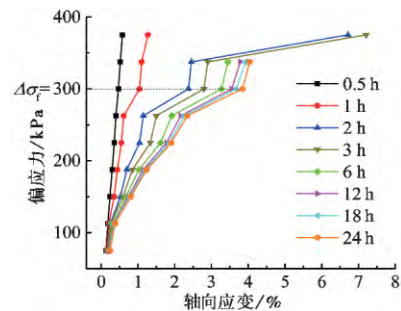


图 4 偏应力-轴向应变等时曲线

Fig. 4 Isochronal curves for deviatoric stress-axial strain

由图 2、图 3 可知, 在偏应力较小时, 蠕变处于衰减阶段, 试样的轴向应变在初期增长很快, 随后应变增长的速率逐渐变小, 最终趋于稳定。此外, 在偏应力较大时, 加载初期一定时间范围内会出现明显的应变增长迟滞的现象, 对应在分别加载曲线上存在两个较为明显的拐点, 这与杨超等(2012)所进行的三轴排水蠕变试验的结果相似, 该文用“Mandel-Cryer”效应解释了这一现象。

## 2 红黏土固结-蠕变模型

### 2.1 分别加载下固结-蠕变模型

红黏土试样在围压  $\sigma_3$  作用下固结完成后, 开始施加偏应力  $\Delta\sigma$  时便同时开始监测试样的竖向变形, 并以此作为本文模型的初始点 ( $t=0$ )。这样, 试样在偏应力  $\Delta\sigma$  作用下产生的竖向变形所对应的应变是瞬时应变  $\varepsilon_d$ 、固结应变(偏压固结产生的应变)  $\varepsilon_c$  以及蠕应变  $\varepsilon_s$  的总和:

$$\varepsilon = \varepsilon_d + \varepsilon_c + \varepsilon_s \quad (1)$$

其中, 瞬时应变  $\varepsilon_d$  在偏应力  $\Delta\sigma$  施加的瞬间便已产生, 固结应变  $\varepsilon_c$  与蠕应变  $\varepsilon_s$  与加载时间有关, 并在初始点  $t=0$  时为 0。

由以上分析可知, 本文模型的边值条件为:  $t=0$  时, 孔隙水压力  $u=0$ ,  $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3$ ,  $\varepsilon|_{t=0} = \varepsilon_d$ 。下面分别对瞬时应变  $\varepsilon_d$ 、固结应变  $\varepsilon_c$  以及蠕应变  $\varepsilon_s$  的计算方法展开讨论。

利用弹簧元件描述土体受力产生的瞬时应变:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta\sigma}{E_0} \quad (2)$$

式中  $E_0$  为初始模量。

假定试样内部的应力分布是均匀的,则固结应变的总量为:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta\sigma}{E_s} \quad (3)$$

式中  $\varepsilon_c$  为固结应变的总量;  $E_s$  为土的压缩模量。

引入曾国熙等(1959)提出的平均固结度统一表达式:

$$\bar{U}(t) = 1 - \alpha \cdot e^{-\beta t} \quad (4)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  为与排水条件相关的待定参数。

土体在某一时刻下固结应变的大小即为土体固结应变的总量与平均固结度的乘积:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c \bar{U}(t) = \frac{\Delta\sigma}{E_s} (1 - \alpha \cdot e^{-\beta t}) \quad (5)$$

蠕变变形可分为衰减蠕变(变形最终趋于稳定)和加速蠕变(最终发生破坏)两个阶段,本文仅讨论衰减蠕变模型的建立。采用由弹簧元件与黏壶元件通过并联组合而成的 Kelvin 模型(图5)来描述红黏土的蠕变特性,即:

$$\Delta\sigma = E_k \varepsilon_s + \eta_k \dot{\varepsilon}_s \quad (6)$$

式中  $\Delta\sigma$  为施工偏应力;  $E_k$  为弹性模量;  $\eta_k$  为黏滞系数;  $\varepsilon_s$  为土体的蠕应变;  $\dot{\varepsilon}_s$  为蠕应变速率。

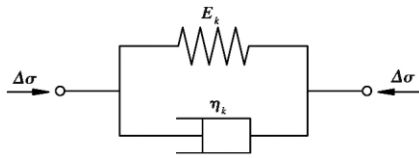


图5 Kelvin 模型  
Fig. 5 Kelvin model

求解式(6)并代入初始条件,即可得到蠕变方程:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta\sigma}{E_k} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_k}{\eta_k} t\right) \right] \quad (7)$$

试验结果(图2、图3)表明:红黏土在受力后产生应变,但是其应变增长存在一定时间的迟滞。鉴于此,引入蠕变迟滞时间  $t_0$  这一参数,即时间  $t = t_0$  时红黏土才开始出现蠕变变形。引入开关函数  $\langle t \rangle$ , 并令:

$$\langle t \rangle = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ 1 & t \geq t_0 \end{cases} \quad (8)$$

然后将蠕变迟滞时间  $t_0$  及开关函数  $\langle t \rangle$  代入式(7),此时蠕变方程变为:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta\sigma}{E_k} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{E_k}{\eta_k} \langle t \rangle (t - t_0)\right] \right\} \quad (9)$$

将式(2)、式(5)和式(9)代入式(1)即可得到考虑固结-蠕变耦合作用的红黏土元件蠕变模型(图6):

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E_0} + \frac{\Delta\sigma}{E_s} (1 - \alpha \cdot e^{-\beta t}) + \frac{\Delta\sigma}{E_k} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{E_k}{\eta_k} \langle t \rangle (t - t_0)\right] \right\} \quad (10)$$

式中,蠕变迟滞时间  $t_0$ 、固结参数  $\alpha$  和  $\beta$ 、初始模量  $E_0$ 、压缩模量  $E_s$ 、弹性模量  $E_k$  以及黏滞系数  $\eta_k$  为7个模型参数,其值均可由试验结果回归得到。

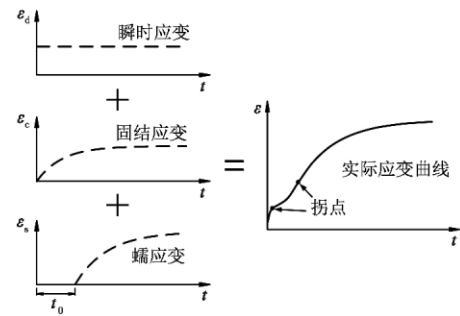


图6 考虑固结-蠕变耦合作用的红黏土元件蠕变模型  
Fig. 6 Element creep model characterizing creep behavior coupled with soil consolidation for red clay

### 2.2 模型参数的确定及模型建立

将偏应力水平分别为  $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ 、 $\Delta\sigma_3$ 、 $\Delta\sigma_4$ 、 $\Delta\sigma_6$  和  $\Delta\sigma_8$  所对应的衰减蠕变曲线用式(10)进行回归建模,拟合结果如图7所示,得到各模型参数值如表2所示。图7表明:本文模型对试验结果的拟合效果良好。

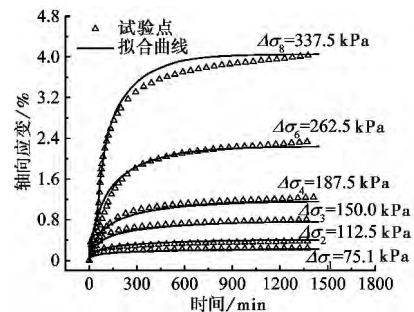


图7 本文模型对蠕变曲线拟合结果  
Fig. 7 Fitted creep curves by using the presented model

由图7和表2可知:模型参数  $t_0$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $E_0$ 、 $E_s$ 、 $E_k$  以及  $\eta_k$  的值与偏应力水平  $\Delta\sigma$  存在一定的函数关系。具体为:固结参数  $\alpha$  与偏应力水平  $\Delta\sigma$  呈线性关系,而蠕变迟滞时间  $t_0$ 、固结参数  $\beta$ 、初始模量  $E_0$ 、压缩模量  $E_s$ 、弹性模量  $E_k$  以及黏滞系数  $\eta_k$  与偏应

表 2 各模型参数值

Table 2 Values of parameters for the presented model

$\Delta\sigma$ /kPa	$t_0$ /min	$E_0$	$E_s$	$\alpha$	$\beta$	$E_k$	$\eta_k$
75.1	0.2	923 223	53 568	0.66	0.001 8	75 471	6 844 002
112.9	1.0	737 626	43 546	0.71	0.002 2	61 790	5 237 207
150.0	1.8	584 565	31 880	0.76	0.002 5	49 345	3 882 793
187.5	2.9	440 002	26 652	0.81	0.002 8	40 842	3 215 375
262.5	10.0	300 972	17 113	0.90	0.003 9	28 843	1 971 642
337.4	49.0	202 390	13 051	0.96	0.005 1	23 668	971 215

力水平  $\Delta\sigma$  呈指数函数的关系。

将 7 个模型参数与偏应力水平  $\Delta\sigma$  的变化关系绘于图 8 中, 同时进行回归分析, 进而得到 7 个模型参数与偏应力水平  $\Delta\sigma$  的回归公式(式(11))。

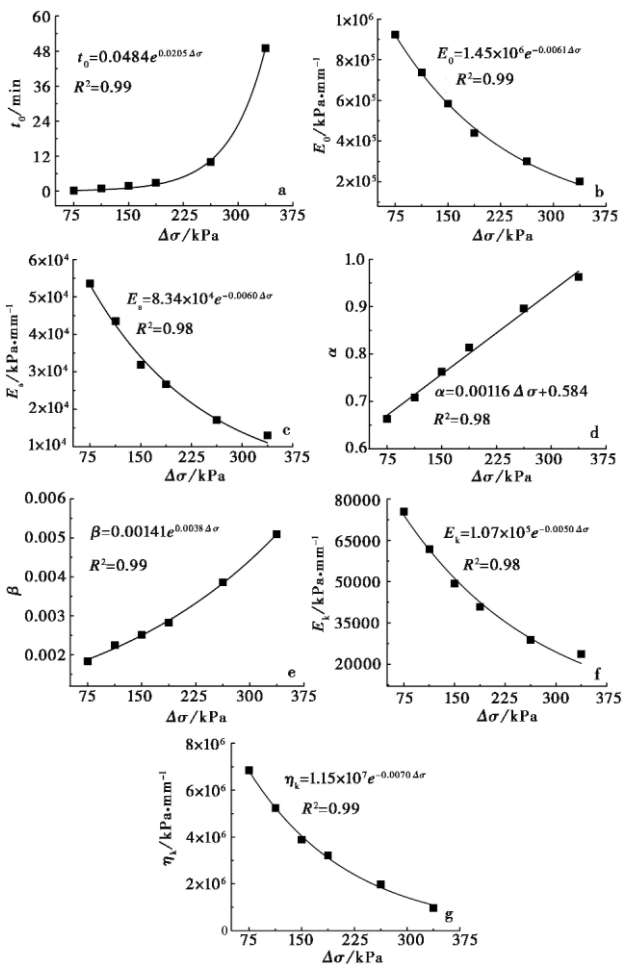


图 8 本文模型参数与偏应力关系曲线

Fig. 8 Correlation between model parameters and deviatoric stress

a.  $t_0$  参数拟合; b.  $E_0$  参数拟合; c.  $E_s$  参数拟合;  
d.  $\alpha$  参数拟合; e.  $\beta$  参数拟合; f.  $E_k$  参数拟合; g.  $\eta_k$  参数拟合

$$\begin{cases} t_0 = 0.0484e^{0.0205\Delta\sigma} \\ E_0 = 1.45 \times 10^6 e^{-0.0061\Delta\sigma} \\ E_s = 8.34 \times 10^4 e^{-0.0060\Delta\sigma} \\ \alpha = 0.00116\Delta\sigma + 0.584 \\ \beta = 0.00141e^{0.0038\Delta\sigma} \\ E_k = 1.07 \times 10^5 e^{-0.0050\Delta\sigma} \\ \eta_k = 1.15 \times 10^7 e^{-0.0070\Delta\sigma} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)即可建立起考虑固结-蠕变耦合作用的红黏土元件蠕变模型。

### 3 预测效果分析

利用本文模型对偏应力水平为  $\Delta\sigma_5$  和  $\Delta\sigma_7$  的蠕变曲线(未参与拟合回归分析)进行预测, 其结果如图 9。

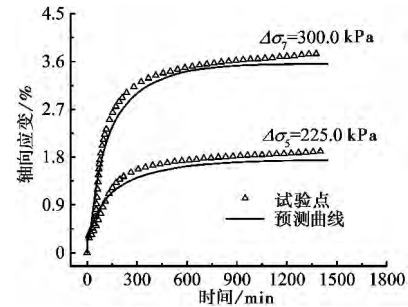


图 9 基于本文模型的蠕变预测

Fig. 9 Predicted creep response by using the presented model

预测结果(图 9)表明: 本文所提出的针对衰减蠕变曲线且考虑固结-蠕变耦合作用的红黏土元件蠕变模型对红黏土蠕变曲线的预测效果良好。高偏应力水平下的蠕变曲线, 其前面部分会存在两个较为明显的拐点, 本文模型也基本能够将这两个拐点的位置预测出来。

### 4 结论

(1) 为深入研究红黏土的蠕变特性, 本文在原有的 TSZ 全自动应变控制式三轴仪的基础上, 设计改制了一套基于杠杆加载原理的红黏土三轴蠕变试验装置, 并对围压为 200 kPa 的红黏土试样采用分级加载进行排水三轴蠕变试验, 得到了不同应力水平下的蠕变全过程曲线及其蠕变破坏阈值。

(2) 通过引入弹簧元件模拟瞬时变形、平均固结度统一表达式模拟固结变形、Kelvin 体模拟蠕变

变形,同时引入蠕变迟滞时间参数,建立了考虑固结-蠕变耦合作用的红黏土元件蠕变模型。结果表明该模型能够较好地拟合及预测红黏土的蠕变曲线。

(3) 红黏土的长期强度和蠕变特性还与固结压力及含水率等因素有关,固结压力及含水率这两个因素对红黏土长期强度和蠕变特性的影响规律将在后期展开进一步的研究。

### 参 考 文 献

- Chen C F, Liu H, Xiao Y. 2008. An based creep constitutive model for marine sediment clay [J]. Journal of Engineering Geology, 16(4): 507-511.
- Chen C F, Liu J B, Xu Y L, et al. 2016. Tests on shearing creep of anchor-soil interface and its empirical model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 38(10): 1762-1768.
- Chen X P, Bai S W. 2003. Research on creep-consolidation characteristics and calculating model of soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 22(5): 728-734.
- Chen X X, Du S S, Zhang D, et al. 2017. Triaxial creep properties of fiber reinforced expansive soil [J]. Journal of Engineering Geology, 25(1): 80-87.
- Liu D F, Hou T S, Sibel P. 2017. Experimental on creep properties of EPS beads light weight soil under different water contents [J]. Journal of Engineering Geology, 25(1): 102-109.
- Lu P Z, Zeng J, Sheng Q. 2008. Creep tests on soft clay and its empirical models [J]. Rock and Soil Mechanics, 29(4): 1041-1044, 1052.
- Mesri G, Febres C E, Shields D R, et al. 1981. Shear stress-strain-time behaviour of clays [J]. Géotechnique, 31(4): 537-552.
- Singh A, Mitchell J K. 1968. General stress-strain-time function for soils [J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 94(1): 21-46.
- Sun J. 1999. Rheological behavior of geomaterials and its engineering applications [M]. Beijing: China Architecture and Building Press.
- Sun M Q, Wang Q, Niu C C, et al. 2015. Rheological consolidation theory of soft soils with Secondary consolidation effect [J]. Journal of Engineering Geology, 23(4): 675-680.
- Tan T K, Kang W F. 1991. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 10(4): 299-312.
- Tan T K. 1958. One dimensional problems of consolidation and secondary time effects [J]. China Civil Engineering Journal, 5(1): 1-10.
- Yang C, Wang R, Meng Q S. 2012. Study of soft soil triaxial shear creep test and model analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 33(S1): 105-111.
- Zeng G X, Yang C L. 1959. Analysis of subsidence of sand [J]. Journal of Zhejiang University, 3: 34-72.
- Zhan M L, Qian J H, Chen X L. 1993. Tests on rheological behavior of soft soil and rheologic model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 15(3): 54-62.
- Zhao M H, Xiao Y, Chen C F. 2004. Laboratory experiment of the rheological property of soft clay and the improved xiyuan model [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 31(1): 48-51.
- Zhao W B. 1989. One-dimensional soil consolidation theory of saturated soil based on generalized Voigt model and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 11(5): 78-85.
- 陈昌富, 刘辉, 肖燕. 2008. 海相沉积软土蠕变 BP 神经网络本构模型 [J]. 工程地质学报, 16(4): 507-511.
- 陈昌富, 刘俊斌, 徐优林, 等. 2016. 锚-土界面剪切蠕变试验及其经验模型研究 [J]. 岩土工程学报, 38(10): 1762-1768.
- 陈晓平, 白世伟. 2003. 软土蠕变-固结特性及计算模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 22(5): 728-734.
- 陈晓雪, 独莎莎, 张丹, 等. 2017. 纤维加筋膨胀土的三轴蠕变特性试验研究 [J]. 工程地质学报, 25(1): 80-87.
- 陈宗基, 康文法. 1991. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程 [J]. 岩石力学与工程学报, 10(4): 299-312.
- 陈宗基. 1958. 固结及时间效应的单维问题 [J]. 土木工程学报, 5(1): 1-10.
- 刘德方, 侯天顺, Sibel P. 2017. 不同含水率条件下 EPS 颗粒轻土蠕变特性试验研究 [J]. 工程地质学报, 25(1): 102-109.
- 卢萍珍, 曾静, 盛谦. 2008. 软黏土蠕变试验及其经验模型研究 [J]. 岩土力学, 29(4): 1041-1044, 1052.
- 孙钧. 1999. 岩土材料流变及其工程应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 孙明乾, 王清, 牛岑岑, 等. 2015. 考虑次固结效应的流变固结理论研究 [J]. 工程地质学报, 23(4): 675-680.
- 杨超, 汪稔, 孟庆山. 2012. 软土三轴剪切蠕变试验研究及模型分析 [J]. 岩土力学, 33(S1): 105-111.
- 曾国熙, 杨锡令. 1959. 砂井地基沉降分析 [J]. 浙江大学学报, 3: 34-72.
- 詹美礼, 钱家欢, 陈绪禄. 1993. 软土流变特性试验及流变模型 [J]. 岩土工程学报, 15(3): 54-62.
- 赵明华, 肖燕, 陈昌富. 2004. 软土流变特性的室内试验与改进的西原模型 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 31(1): 48-51, 70.
- 赵维炳. 1989. 广义 Voigt 模型模拟的饱水土体一维固结理论及其应用 [J]. 岩土工程学报, 11(5): 78-85.