

不同初始固结度吹填土蠕变特性研究

杨爱武^{1,2}, 张艳¹

(1. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 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, 湖北 武汉 430071)

摘要:通过 TSS10 三轴流变仪, 对不同初始固结度吹填土蠕变特性进行了研究。试验结果表明, 固结度对吹填土蠕变变形影响明显。固结度越小, 蠕变变形越明显; 增大固结度, 能够在一定程度上减小蠕变变形。蠕变变形黏滞系数与固结度和有效固结应力大致呈线性单调增函数关系。蠕变破坏强度随固结度的增大依次增大, 但都小于瞬时强度。不同固结度蠕变应力-应变等时曲线均可用双曲线函数进行拟合。

关键词:固结度; 吹填土; 蠕变; 等时曲线; 黏滞系数

中图分类号: TU447 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S1-0222-05

作者简介:杨爱武(1971-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事软土地基处理及土体微观结构研究。E-mail: tulilab@163.com。

Creep characteristics considering consolidation degree of dredger fill

YANG Ai-wu^{1,2}, ZHANG Yan¹

(1. Key laboratory of soft soil engineering character and engineering environment of Tianjin, Tianjin 300381, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Creep characteristics considering the different initial consolidation degrees of dredger fill are studied by using triaxial rheometer TSS10. The results show that consolidation degree has an obvious influence on creep deformation of dredger fill. The creep deformation is more obvious when the consolidation degree is smaller. The increase of consolidation can reduce the creep deformation in a certain degree. The relationship among viscosity coefficient of the creep deformation, consolidation degree and effective consolidation stress substantially is a linearly increasing function. The creep damage strength increases with the increase of the consolidation degree, but is less than the instantaneous strength. The creep stress-strain isochronous curves under different consolidation degrees can be fitted by means of the hyperbolic function.

Key words: consolidation degree; dredger fill; creep; isochronous curve; viscosity coefficient

0 引言

已有学者研究证实土体固结度影响土体的弹塑性变形与强度特性, 如包伟力等^[1]通过离心模型试验和三轴试验, 对土体固结程度与抗剪强度的关系进行了研究, 唐炫等^[2]探讨了软土的抗剪强度随固结度的变化规律。而关于固结度对土体长期变形影响的报道较少, 陈晓平等^[3]基于软土变形的时效性, 对软土变形机理进行了一系列室内试验, 分析得到了初始固结度对应力-应变关系的影响, 总结了排水蠕变和不排水蠕变的变形特征。目前对不同固结度下的流变特性研究还有很多工作要做。天津滨海新区用友拥有大面积的吹填场地, 经过加固处理后, 其工程性质从上到下可分为三层, 即上部的实效层、中部的过渡层以及下部的无效层^[4]。也就是说从上到下土体固结度逐渐减

小, 物理学性质差异大。为了给吹填场地地基处理及变形控制提供技术支持, 本文对具有不同初始固结度的吹填土体进行了蠕变变形特征研究。

1 试验方案

1.1 试验土样及制备

试验所用土样取自天津滨海新区临港工业区经过真空预压处理的吹填场地, 取样深度为 3~5 m, 地下水位 1 m。土样的基本物理性质指标如表 1。

1.2 试验方案

土体的固结是指在荷载作用下内部孔隙水逐渐渗

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179186); 天津市科技发展计划项目(06YFSZSF04000)
收稿日期: 2013-03-04

表 1 吹填土物理性质

Table 1 Physical properties of dredger fill

湿密度/(g·cm ⁻³)	比重	含水率/%	塑性指数	液性指数	状态	饱和度/%	孔隙比
1.73	2.75	50.1	23.4	1.3	流塑	99.87	1.335

表 2 不同固结度三轴蠕变试验方案

Table 2 Programs of triaxial creep tests under different consolidation degrees

试验序号	固结度 U /%	固结排水量 V /ml	加载方案
A	100	7.870	第 1 级加载: 10 kPa, 第 2 级加载: 20 kPa, 第 3 级加载: 30 kPa 等等; 每级荷载依次增加 10 kPa 直到试样破坏, 以便控制加载级数在 4~6 之间
B	75	3.505	
C	50	2.187	
D	0	0	

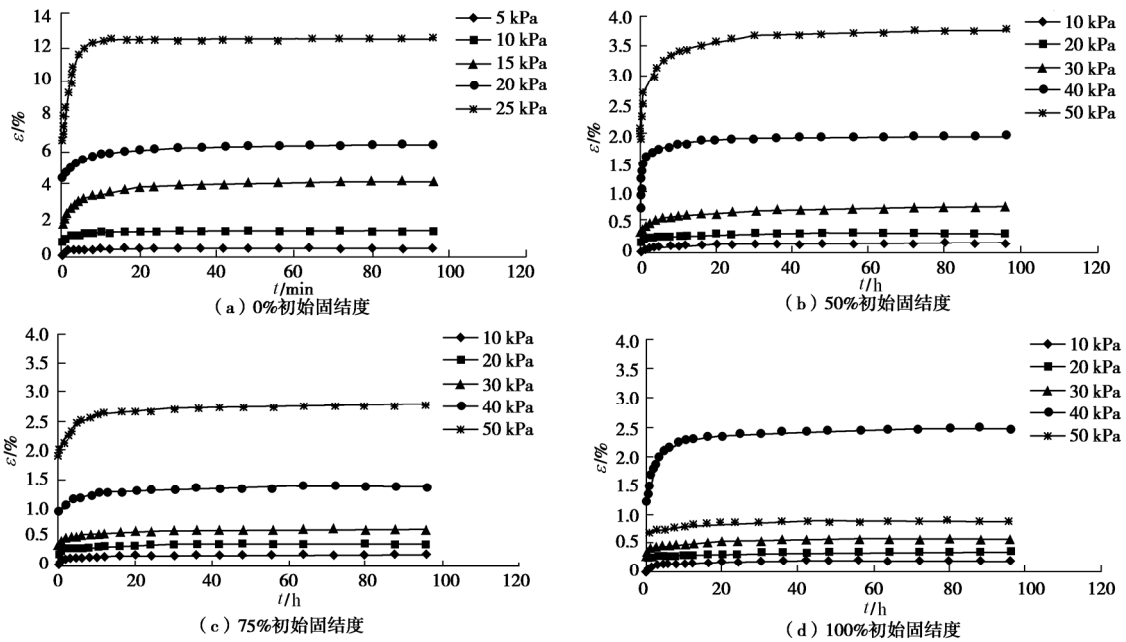


图 1 不同固结度蠕变试验曲线

Fig. 1 Creep curves under different consolidation degrees

出, 体积逐渐减小的现象^[5]。因此, 对试样施加 50 kPa 的周围压力, 并通过控制孔隙水的排出量来控制固结度。本文利用 TSS10 型土体三轴流变试验机对 4 种不同的初始固结度 (0%, 50%, 75%, 100%) 的土样进行了三轴不排水蠕变试验研究。排水量与固结度的关系以及加载方案详见表 2。

2 试验结果与分析

分级加载虽然建立在线性叠加原理的假设上, 但它克服了分别加载的种种局限, 使在试验室内成为可行, 现已为广大工程研究人员采用^[6]。本文亦采用分级加载方式, 应用“陈氏加载法”^[7]处理试验数据。

2.1 变形随时间变化曲线

不同固结度下的蠕变试验成果如下图 1。

由图 1 知, 当施加的偏应力水平较低时, 变形以减速发展, 最后速度趋于零, 即 $d\varepsilon/dt=0$, 变形也趋向于某一稳定值 ε_∞ , 即蠕变第一阶段。当偏差应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 超过 10 kPa 以后, 蠕变曲线出现了两个阶段, 即衰减蠕变阶段和稳定蠕变阶段, 变形速率经过衰减

蠕变阶段之后达到该阶段的最小值, 蠕变曲线近似一倾斜直线, 应变速率恒定为最小值即 $d\varepsilon/dt = \text{const}$ 。在相同的应力水平及蠕变时间下, 固结度为 $U=0$ 的试样变形远大于另外三种。固结度 $U \geq 50\%$ 的三种固结度的土样, 偏应力相等时, 随着固结度的增加, 同样的蠕变时间所对应的蠕变变形逐渐减小, 且随着偏应力的增大, 这种减小量逐渐增大。

2.2 孔压与时间关系曲线

不同固结度蠕变条件下孔隙水压力随时间变化曲线如图 2 所示。

从图 2 可以发现, 不同固结度的试样, 第一级蠕变所对应的起始孔隙水压力大小差别很大, 固结度为 0%, 50%, 75% 和 100% 时对应的起始孔压分别为 50 kPa, 37.5 kPa, 25 kPa 和 0 kPa。这与不同固结度的试样其孔隙水含量不一致有关。固结越充分, 试样中自由水含量越小, 导致孔隙水压力反应较慢, 黏滞性较大, 孔隙水压力滞后现象越明显。相同固结度的试样, 广义剪应力 q 越大, 加载后瞬间孔隙水压力越大, 变形稳定后孔隙水压力仍发生缓慢的变化。同一偏应

力水平下，固结度越大，瞬时孔隙水压力以及变形稳定后的孔隙水压力越小。围压相同时孔隙水压力一般随蠕变偏应力水平的增加而增加，随时间的发展也缓慢增加。

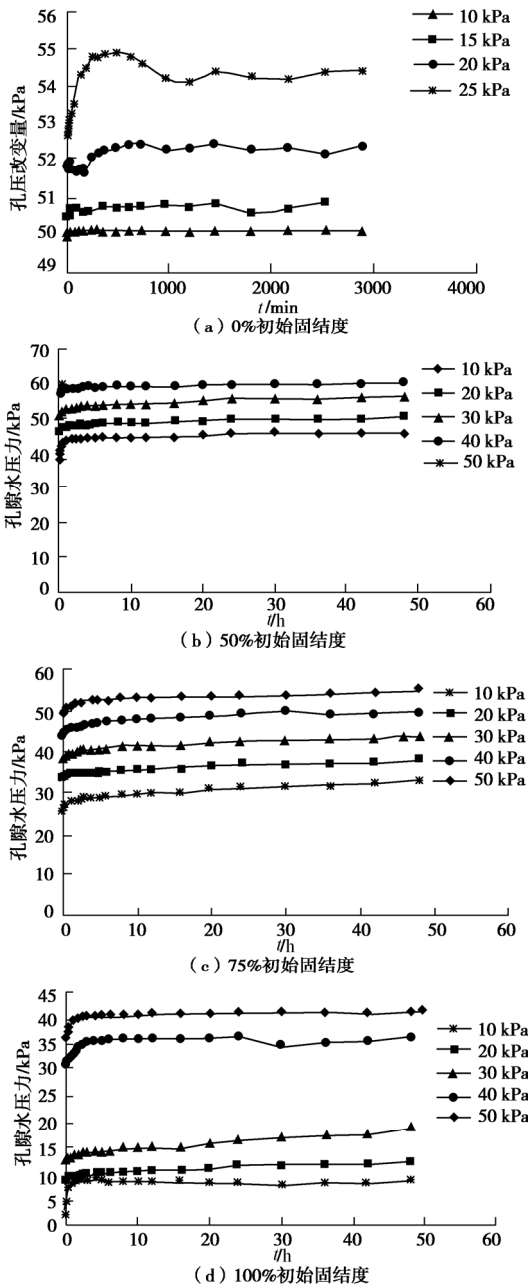


图2 不同初始固结度蠕变孔隙随时间变化曲线

Fig. 2 Curves of creep pore pressure under different initial consolidation degrees

2.3 应力应变等时曲线

根据蠕变与时间的关系曲线，得到不同时刻不同初始固结度的试样的应力-应变等时曲线，如图3所示。

图3表明，不同固结度下蠕变应力-应变曲线形状不同，但均为非线性，表明天津滨海吹填软土流变具有明显的非线性性质。随着时间的增长，曲线愈加弯曲，即流变随着时间的增加而愈发明显，另外，随着时间的增长，强度逐渐降低，也就是说经过蠕变变

形后长期强度弱化。应力水平越大，应力-应变等时曲线越凸向应变轴，表明应力水平越高，非线性程度越大。图3还可以看出，应力-应变等时曲线上存在有一个明显的转折点，此转折点对应为屈服应力点。不同时刻等时曲线的拐点所对应的应力值不同。随着固结度的增加，同一时刻的屈服应力逐渐增大，线性黏弹性变形越明显，线刚度也越大。固结度为0的吹填软土应力-应变等时曲线弯曲程度最显著，即非线性流变特性最为明显，随着时间的推移，等时曲线逐渐靠拢；而固结度为100%的吹填软土等时曲线线性黏弹性变形最明显，线刚度最大，且开始时曲线就近乎靠拢，表现为非线性流变特性。

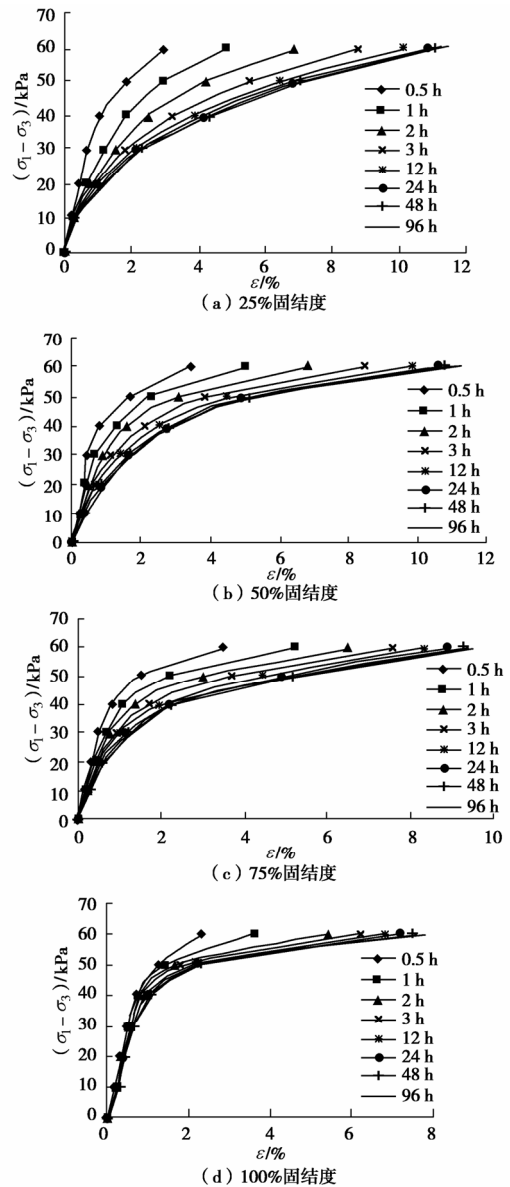


图3 不同固结度蠕变等时曲线

Fig. 3 Isochronous curves of creep under different consolidation degrees

总之，未经充分固结的天津滨海吹填软土屈服应力很小，变形表现为弹黏塑性特性；随着固结度的增加，蠕变变形量减小，即非线性流变特性减弱。

3 模型及参数

土的蠕变形态无法直观地从土蠕变曲线上反映, 根据以往的研究成果^[8-10], 黏土的应力-应变特性可以用等时理论来分析^[11]。应力-应变等时曲线可以很清楚地反映蠕变情况。通过分析图 3 中曲线变化规律, 本文采用双曲线函数拟合不同固结度下蠕变等时曲线, 双曲线函数表达式如下:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (1)$$

式中 σ 为竖向应力 (kPa); ε 为竖向应变 (%); a 、 b 为与固结度及时间等因素有关的参数, 间接反映土体压缩性质。

图 4 为采用双曲线函数计算的几种固结度(以 12 h 为例)时刻的应力-应变等时曲线, 由图知计算曲线接近试验曲线, 且参数少, 易确定。

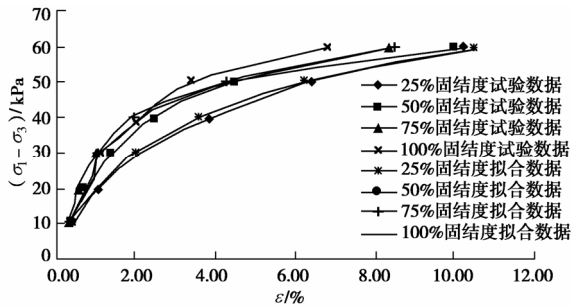


图 4 模型计算的应力-应变等时曲线

Fig. 4 Isochronous curves of stress-strain calculated

对式 (1) 求导可得到切线压缩模量 E_{si} , 对应图 3 中曲线斜率, 其表达式为

$$E_{si} = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon \rightarrow 0} = \frac{1}{a} \quad (2)$$

图 5 为初始切线压缩模量 E_{si} 随固结度变化规律曲线。

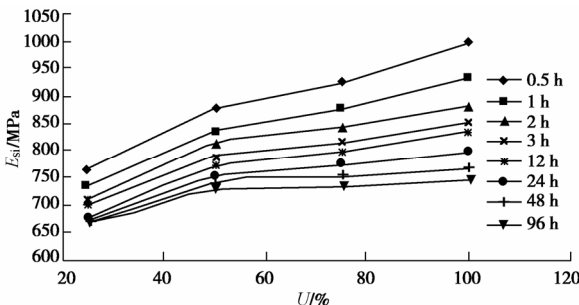


图 5 初始切线压缩模量 E_{si} 随固结度变化曲线

Fig. 5 Variation of initial compressive modulus with consolidation degree

图 5 表明, 切线压缩模量 E_{si} 随固结度的增加而增加, 当土样固结度小于 50% 时, E_{si} 值增速明显, 固结度大于 50% 时减缓。随着时间的推移, 切线压缩模量 E_{si} 逐渐劣化, 最终有向一稳定值发展的趋势。

不同时刻模型参数随固结度变化规律如图 6 所示。图 6 表明, 模型参数 a 、 b 都随固结度的增加而减小。小于 50% 固结度时减速大, 大于 50% 固结度时减速趋缓。随着时间的推移, 模型参数 a 、 b 也都逐渐减小。

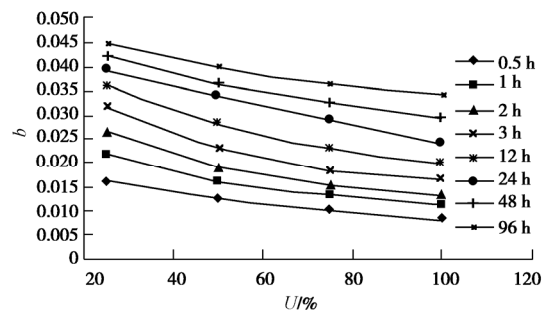
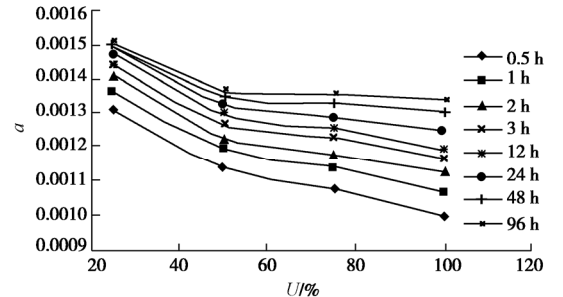


图 6 模型参数随固结度变化曲线

Fig. 6 Variation of model parameters with consolidation degree

4 黏滞系数的确定

黏滞系数是一个标志着物体流动属性的系数。早在牛顿时代, 就用黏滞系数来表示流体(牛顿液体)的黏性。麦克斯威尔(J. Maxwell)对黏滞系数下了一个定义, 即: 两个相距一单位距离的平行平面, 其中充满了黏性物质, 当剪应力作用在其中的一个平面上, 使该平面产生单位速度的移动, 这样的剪应力称之为黏滞系数^[12]。

按照黏滞系数的定义有 $\tau \propto v$ 和 $\tau \propto \frac{1}{a}$, 于是

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} = \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

$\tau - \dot{\gamma}$ 或 $(\sigma - \varepsilon)$ 关系曲线斜率即 η 值。式中 η 为黏滞系数, 单位为泊 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 为广义剪应力 (kPa), $\dot{\varepsilon}$ 为变形速率 (1/s)。

首先计算等速蠕变阶段的应变-时间曲线的斜率 K , 即试样的蠕变速率。再根据等速蠕变阶段的蠕变变形速率和剪应力的关系, 即可求出不同固结度下的黏滞系数。图 7 是应变-时间曲线等速蠕变阶段的应变速率与有效固结度的关系曲线; 图 8 是黏滞系数与有效固结压力的关系曲线。

从图 7, 8 可以看出, 随着固结度与有效固结压力的增大, 黏滞系数随之增大, 大致呈线性关系。原因

是随着压力的增加、固结度的增大，土体中水排出较多，结合水膜厚度变薄，因此黏滞系数增大。

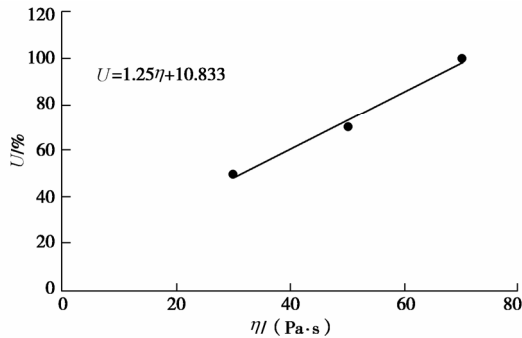


图7 黏滞系数与固结度的关系

Fig. 7 Relationship between viscosity coefficient and consolidation degree

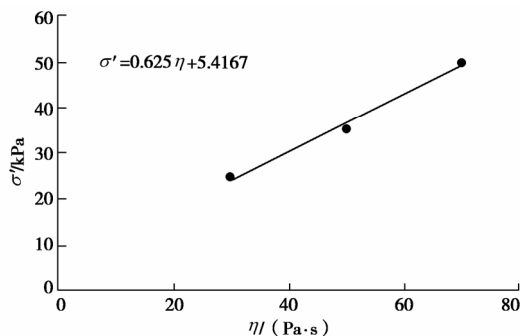


图8 黏滞系数与有效固结压力关系

Fig. 8 Relationship between viscosity coefficient and effective consolidation pressure

5 结论与建议

(1) 天津滨海吹填软土蠕变特性与固结度密切相关。固结度越小，孔隙中结合水黏滞性越大，蠕变变形越明显。固结度的增大，能够在一定程度上减小蠕变变形。

(2) 蠕变变形黏滞系数与固结度和有效固结应力大致呈线性单调增函数关系。

(3) 经过蠕变荷载的长期作用后，破坏时的剪切强度明显降低，但其值随固结度的增大而增大。

(4) 不同固结度蠕变应力-应变等时曲线均可用双曲线函数进行拟合，模型参数少，易于确定。

参考文献：

[1] 包伟力, 周小文. 地基强度随固结度增长规律的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(4): 29-31. (BAO Wei-li, ZHOU Xiao-wen. Experimental study on growth regularity of soil strength with consolidation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(4): 29-31. (in Chinese))

[2] 唐 炫, 魏丽敏, 胡海军. 不同固结度下软土的力学特性

[J]. 铁道勘察, 2009(4): 16-17. (TANG Xuan, WEI Li-min, HU Hai-jun. Mechanical properties of soft soil with different consolidation degrees[J]. Railway Investigation and Surveying, 2009(4): 16-17. (in Chinese))

- [3] 陈晓平, 朱鸿鹄, 张芳枝, 等. 软土变形时效特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2142-2148. (CHEN Xiao-ping, ZHU Hong-hu, ZHANG Fang-zhi, et al. Experimental study on time-dependent deformation of soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2142-2148 (in Chinese))
- [4] 杜东菊, 杨爱武, 刘 举, 等. 天津滨海吹填土[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (DU Dong-ju, YANG Ai-wu, LIU Ju. Dredger fill of Tianjin Binhai area[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Theory and calculation method in geotechnique[M]. Beijing: Chinese Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [6] 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 Jun. Rheology of rock and soil material and its engineering applications[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [7] 陈宗基. 固结及次时间效应的单向问题[J]. 土木工程学报, 1958, 5(1): 1-10. (CHEN Zong-ji. One-dimensional problems of consolidation and secondary time effects[J]. China Civil Engineering Journal, 1958, 5(1): 1-10. (in Chinese))
- [8] ADACHI T, OKA F. Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(4): 57-70.
- [9] ARAI K, HASHIBA S, KITAGAWA K. A unified approach to time effects in anisotropically consolidated clays[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(4): 147-164.
- [10] NAKASE A, KAMEI T. Influence of strain rate on undrained shear characteristics of K_0 -consolidated cohesive soils[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(1): 85-95.
- [11] 范广勤. 岩土工程流变力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. (FAN Guang-qin. Rheological mechanics of geotechnical engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993. (in Chinese))
- [12] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-52. (HUANG Wen-xi. Engineering properties of soil[M]. Beijing: Geological Press, 1992: 1-52. (in Chinese))

(本文责编 明经平)