

天津滨海地区两种典型软黏土蠕变特性试验研究

王元战, 黄东旭, 肖 忠

(天津大学建筑工程学院天津市港口与海洋工程重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 通过三轴蠕变试验, 研究了天津滨海地区两种典型淤泥质黏土和粉质黏土的非线性蠕变特性。蠕变试验采用分级加载的方式进行, 利用“陈氏法”对实测数据进行处理后得到两种软黏土在不同应力状态下的蠕变试验曲线。在此基础上, 提取相关数据得到两种软黏土的应力-应变等时曲线, 根据该曲线的变化规律, 采用 Merchant 模型对两种软黏土的蠕变曲线进行拟合, 确定模型参数, 建立了适用于天津滨海地区两种典型软黏土的非线性蠕变模型。最后, 对两种软黏土蠕变模型参数的变化规律进行了对比分析得出: Merchant 模型中虎克弹簧的弹性模量 E_H 随主应力差增大呈负指数规律变化, Kelvin 体的弹性模量 E_K 随主应力差增大呈线性规律变化的经验公式。

关键词: 三轴蠕变试验; Merchant 模型; 非线性蠕变; 天津滨海; 软黏土

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)02-0379-06

作者简介: 王元战(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事港口海岸及近海工程结构设计理论和方法、岩土力学及土与结构相互作用、结构振动分析理论和方法等方面的研究工作。E-mail: yzwang@tju.edu.cn。

Experimental research on creep properties of two typical soft clays in coastal region of Tianjin

WANG Yuan-zhan, HUANG Dong-xu, XIAO Zhong

(Tianjin Key Laboratory of Port and Ocean Engineering, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The non-linear creep characteristics of two typical clays, which are muddy clay and silt clay in the coastal region of Tianjin, are studied by means of triaxial creep tests. The tests are carried out by the step loading method, and the creep curves of the soft clays under different stress states are got from the raw data by Mr. Chen's method. Considering with the change law of the stress-strain isochronal curves, the results of the creep tests are fitted by the Merchant model based on the creep curves. The model parameters are confirmed, and then a non-linear rheological model suitable for these soft clays in the coastal region of Tianjin is established. Based on the comparative analysis of the change law of model parameters, the empirical formulas for the relation of these main parameters with the stress are confirmed finally. It is shown that the modulus of Hooke spring's elasticity with stress difference increases in a negative exponent way; and the modulus of Kelvin component's elasticity with stress difference increases in a linear way at the same time.

Key words: triaxial creep test; Merchant model; non-linear rheology; coastal region of Tianjin; soft clay

0 引 言

在中国经济发展活跃的长江口、珠江口、天津滨海等海岸地区, 广泛分布着软黏土地基, 软黏土不仅强度低, 而且具有蠕变特性。有关研究表明^[1-2], 工程完成后的长时间持续的变形和破坏现象是由土体蠕变引起的。在土体蠕变的过程中, 弹塑性变形的同时还存在黏性作用, 正是土体的这种黏弹塑性导致了地基的持续变形, 所以用一般固结理论和传统的弹塑性模型都无法解释这一现象。软黏土蠕变特性使很多建在软黏土海岸地区上的港口与海岸结构在建成一段时间后仍会发生较大位移, 严重威胁了结构的稳定性。如近年天津港北疆高桩码头多个转角处由于软黏土岸坡

土体蠕变发生了基桩连同桩帽与上部结构之间出现较大相对变位的现象, 导致横梁的搁置长度不足, 有的只剩下了几厘米, 使得码头结构处于危险状态之中^[3]。因此, 开展天津滨海软黏土特性的蠕变试验研究, 建立其合适的蠕变模型, 是亟待开展的工作, 对研究天津滨海地区港口码头和防波堤结构的长期稳定性有着重要意义。

关于长期荷载作用下软黏土的蠕变问题, 学者们

基金项目: 国家自然科学基金项目(50979069); 天津市科技支撑计划重点项目(10JCYBJC03400); 天津市自然科学基金项目(10SYJJC27300)

收稿日期: 2011-01-13

已经开展了大量的试验研究工作。李军世等^[4]采用 Singh-Mitchell 应变速率 - 时间关系方程描述土体的蠕变特性, 结合上海淤泥质黏土室内试验, 给出了上海淤泥质黏土的蠕变形式; 王常明等^[5]的三轴蠕变试验研究表明, 滨海相沉积的软土具有非线性蠕变的特性, 双曲线模型更适合其应力 - 应变关系, 修改了 Singh-Mitchell 模型的应力 - 应变关系, 建议了滨海软土应力 - 应变 - 时间关系模型。周秋娟等^[6]针对广州南沙原状软土进行了系列室内试验研究, 系统探讨了软土的蠕变变形特性。

在国外, Zhen 等^[7]在 Perzyna 超限应力理论的基础上, 建立了一个各向异性的黏弹塑性软黏土模型, 并针对法国 St. Herblain 地区的软土进行了等应变率蠕变试验, 对所建立的模型进行了验证; Benjamin 等^[8]则针对德国布莱梅港区航道疏浚后的吹填土进行了单轴固结试验, 确定了富含有机物的淤泥质黏土的各个参数, 验证了 Terzaghi 理论的适用性。

天津滨海地区的淤泥质、粉质软黏土层多呈灰色, 有机质含量丰富, 厚度有时可达 6~10 m, 具有高含水率、高孔隙比、低强度、高压缩性、低渗透性、高灵敏度等特点^[9]。虽然目前有很多关于土体蠕变模型的研究成果, 其实也不乏对天津滨海地区软黏土蠕变特性的研究^[10], 但由于土体蠕变的复杂性, 这些成果还不能完全诠释天津滨海地区软黏土的蠕变特性。

为了深入了解和掌握天津滨海地区软黏土的蠕变特性, 为港口码头和防波堤结构设计以及岸坡整治工作提供更多的试验数据和技术参考, 本文选取天津滨海地区典型的原状淤泥质黏土和粉质黏土进行室内三轴蠕变试验, 研究天津滨海地区海相沉积软黏土的蠕变特性, 采用 Merchant 蠕变模型对三轴蠕变试验的结果曲线进行拟合, 确定了该模型的基本参数, 建立了适用于天津滨海地区软黏土的土体非线性蠕变模型。

1 蠕变试验

1.1 试样选取

本次试验所采用的试样是现场钻孔取得的原状土, 选取天津滨海地区广泛分布的淤泥质黏土和粉质黏土层, 前期已完成静止侧压力系数试验, 得到土样的侧压力系数 K_0 , 两种典型软黏土的基本性状如下:

(1) 淤泥质黏土, 黑褐色, 内部含大量贝壳, 含天然孔隙, 含有机质, 外有泥浆挂壁, 手搓有滑腻感, 有光泽, 取样深度 5.8 m, 侧压力系数 K_0 为 0.7624。

(2) 粉质黏土, 棕褐色, 表面较粗糙, 取样深度 8.8 m, 侧压力系数 K_0 为 0.857。

1.2 试验方法

本文主要针对工程病害层的原状淤泥质和粉质黏土进行室内三轴压缩蠕变试验。试验设备采用的是 SLB-1 型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪, 该仪器属于多功能柔性控制三轴试验仪, 主要由轴向加载设备、围压控制测量系统、反压控制测量系统、体积变化和孔隙水压力控制测量系统等组成。

本次试验采用分级加载方式在常温、不排水条件下进行室内三轴试验研究, 围压 σ_3 根据取样深度确定。根据一定的围压 σ_3 下土样达到破坏时的轴向偏应力 q_f , 确定本次蠕变试验分四级进行加载^[11], 每级轴向偏应力的增量为 $q_f/4$, 每一级的作用时间定为 48 h, 土样的具体加载方案如表 1 所示。

表 1 土样分级加载方案

Table 1 Schemes of step loading

土质	深度 /m	围压 σ_3 /kPa	主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\text{kPa}$			
			1 级	2 级	3 级	4 级
淤泥质黏土	5.8	25	26	52	78	104
粉质黏土	8.8	100	23	46	69	92

1.3 试验结果

为了更准确的研究土的蠕变特性, 必须将土体视为非线性蠕变体^[12], 采用由陈宗基教授提出并由他的学生所发展的“陈氏法”对分级加载的实验数据进行处理, 图形处理过程如图 1, 2 所示。用“陈氏法”对试验实测数据进行处理后, 得出在分级加载模式下, 淤泥质黏土和粉质黏土在不同应力状态下的轴向应变与加载时间的蠕变关系曲线如图 3, 4 所示。

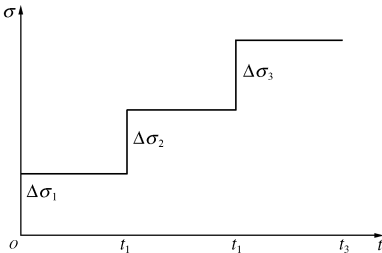


图 1 土样分级加载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of step loading

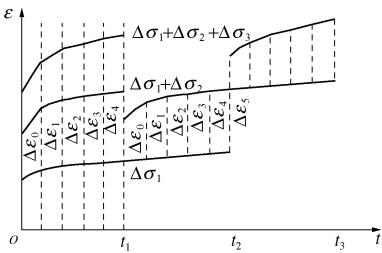


图 2 “陈氏法”原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Mr. Chen's method

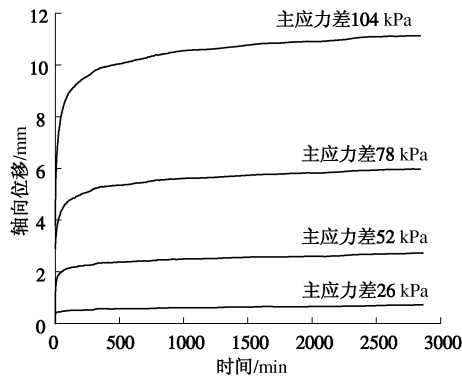


图3 淤泥质黏土蠕变曲线

Fig. 3 Creep curves of muddy clay

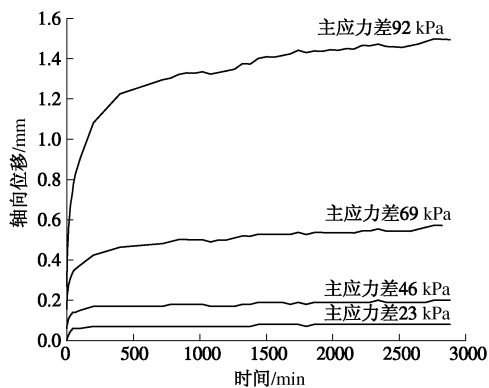


图4 粉质黏土蠕变曲线

Fig. 4 Creep curves of silt clay

由图3、4可看出,天津滨海新区淤泥质和粉质软黏土的蠕变均有以下特性:

(1)在主应力差较低时,试样的轴向变形随时间的增加逐渐趋于稳定,蠕变特性表现为衰减蠕变型;在主应力差较高时,试样蠕变曲线表现为非衰减蠕变型,包括衰减阶段和稳定蠕变阶段,稳定蠕变阶段的蠕变速率随时间增长基本保持为常量。

(2)试样衰减蠕变阶段的斜率和稳定蠕变阶段的斜率都随着主偏应力水平的提高而越来越大,即试样蠕变速率随主偏应力水平的提高而越来越快。

(3)试样的蠕变位移随着主偏应力水平的提高而越来越大,且增加幅度也越来越大。

为了进一步研究天津滨海地区淤泥质和粉质软黏土的蠕变特性,对以上蠕变试验曲线进行处理,取同一时间不同偏应力状态下的应变值绘制在应力应变曲线^[13-14]上,得到两种软黏土的应力-应变等时曲线如图5、6所示。

对以上两种软黏土的应力-应变等时曲线进行对比分析后可知:

(1)不同时刻下,应力-应变曲线是不同的,而且均不是直线,这就表明天津滨海地区的软黏土在不同应力条件下的蠕变具有明显的非线性特征,而且与

加载时间有关。

(2)在同一时刻下,主应力差越高(主应力差越大),应力-应变等时曲线越接近平行于应变轴,说明主应力差越高,土体的非线性蠕变特性也越明显。

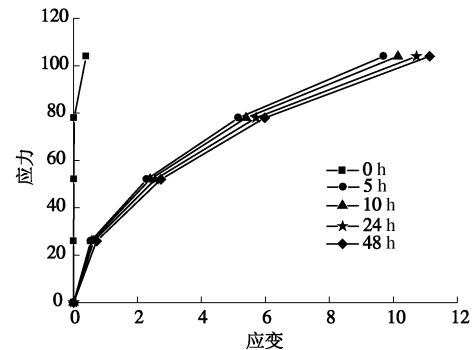


图5 淤泥质黏土应力-应变等时曲线

Fig. 5 Stress-strain isochronal curves of muddy clay

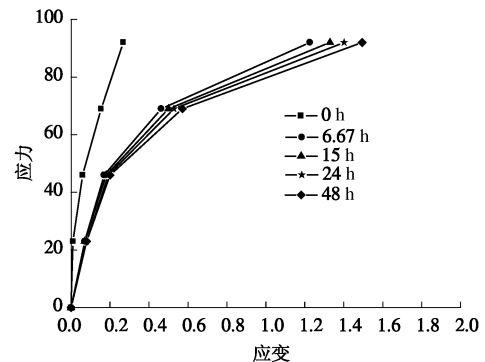


图6 粉质黏土应力-应变等时曲线

Fig. 6 Stress-strain isochronal curves of silt clay

2 土体蠕变模型

天津滨海地区软黏土的蠕变特性是一种非线性蠕变问题,可以用模型理论来研究。在图5、6中坐标原点处作每一条应力应变等时曲线的切线。从其斜率之倒数可以得到线性黏弹性蠕变柔量 $J_{le}(t)$ 随时间的变化规律: $J_{le}(t)$ 在 $t=0$ 处有个初始值,且随时间的增加而增加,但增加的速率是减小的,最后趋于稳定。

这与邓志斌^[15]得到的结论比较一致,所以天津滨海地区软黏土的蠕变也是衰减稳定的,可以采用专门用于描述衰减稳定蠕变的Merchant模型进行拟合,该模型由一个虎克弹簧和一个Kelvin体串联而成的,如图7所示。

其蠕变方程如式(1)、(2)所示:

$$\varepsilon_{le}(t) = J_{le}(t)\sigma, \quad (1)$$

$$J_{le}(t) = \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K} t\right) \right], \quad (2)$$

式中, E_H 表示虎克体的弹簧模量, E_K 和 η_K 分别表示

Kelvin 体的弹性模量和黏滞系数。

需要注意的是, Duncan^[16]指出, 对于某种特定的土壤, 这 3 个参数的取值都是随着应力值的改变呈非线性变化规律的。

对 3 个待定参数 E_H , E_K 和 η_K 可以先设定一个初始值, 再将时间 t 代入公式 (2) 中, 采用高斯 - 牛顿法, 根据最小二乘法原理, 通过对蠕变试验实测的函数曲线进行拟合来确定。

为了充分利用蠕变试验的结果, 更好地分析土体在不同应力状态下的蠕变曲线, Merchant 模型可以改写为

$$\varepsilon_{le}(t) = \frac{2(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{9K_H} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_H} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_K}{\eta_K}t\right) \right], \quad (3)$$

式中, G_H , G_K 分别表示图 7 中虎克弹簧和 Kelvin 体的剪切模量, K_H 为虎克弹簧的体积模量。

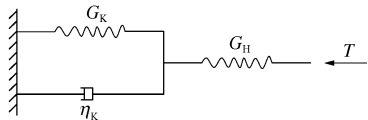


图 7 Merchant 蠕变模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of Merchant model

剪切模量 G_H , G_K 与对应的弹性模量 E_H , E_K 的关系为

$$G_H = \frac{E_H}{2(1 + \mu)}, \quad (4)$$

$$G_K = \frac{E_K}{2(1 + \mu)}, \quad (5)$$

式中, μ 表示土体的泊松比。

此外, 虎克弹簧的体积模量 K_H 与对应的弹性模量 E_H 的关系为

$$K_H = \frac{E_H}{3(1 - 2\mu)}. \quad (6)$$

在以上公式中, 主应力值 σ_1 、围压值 σ_3 、不同测试时间 t 和轴向应变值 $\varepsilon_{le}(t)$ 均为已知, 需要拟合的参数还有 K_H , G_H , G_K , η_K 。

根据有关研究成果可知^[12], 土体的泊松比 μ 对于其它 3 个参数的影响不大, 并且通过常规土工试验可以较容易的得到, μ 与侧压力系数 K_0 的关系为

$$\mu = \frac{K_0}{1 + K_0}. \quad (7)$$

先确定 μ 值之后, Merchant 模型只需要拟合 E_H , E_K 和 η_K 3 个参数。再将式 (3) 左边的前两项进行合并可得

$$\frac{2(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{9K_H} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_H} = \frac{2(\sigma_1 + 2\sigma_3)(1 - 2\mu) + 2(\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \mu)}{3E_H}. \quad (8)$$

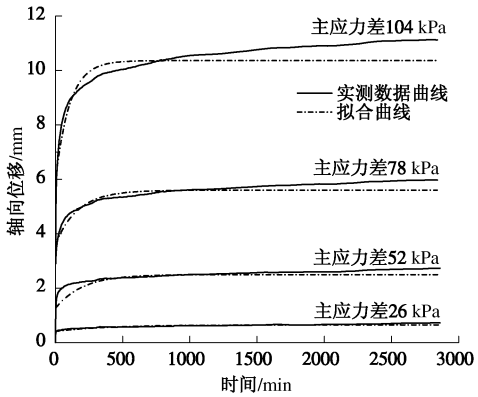


图 8 淤泥质黏土蠕变拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of muddy clay

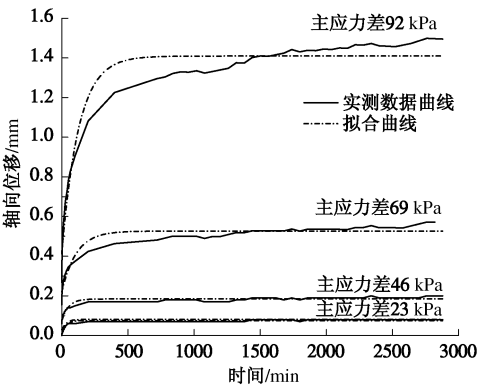


图 9 粉质黏土蠕变拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of silt clay

表 2 试验拟合曲线的控制参数值

Table 2 Values of control parameters for fitting curves

土质	$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$	P_1	P_2	P_3
淤泥质黏土	0.25	0.40600	0.23932	0.00259
	0.50	1.25906	1.23668	0.00500
	0.75	3.62387	1.97293	0.00595
	1.00	6.00480	4.35676	0.00942
粉质黏土	0.25	0.03000	0.05193	0.03013
	0.50	0.07471	0.11018	0.01932
	0.75	0.21907	0.30782	0.00912
	1.00	0.41234	0.99684	0.00786

根据式 (8), 可以把式 (3) 写成式 (9) 的形式用于曲线拟合:

$$\varepsilon_{le}(t) = P_1 + P_2 \left[1 - \exp(P_3 t) \right], \quad (9)$$

式中,

$$P_1 = \frac{2(\sigma_1 + 2\sigma_3)(1 - 2\mu) + 2(\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \mu)}{3E_H}, \quad (10)$$

$$P_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_K}, \quad (11)$$

$$P_3 = -\frac{G_K}{\eta_K}. \quad (12)$$

用式 (9) 对所有的试验数据进行拟合, 分别得到

表 3 蠕变模型的各个参数值
Table 3 Values of parameters for rheological models

土质	$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$	E_H	G_H	K_H	G_K	η_K	E_K
淤泥质黏土	0.25	88.08	30.74	217.81	39.00	15057.68	111.74
	0.50	42.26	14.75	104.50	14.02	2803.20	40.16
	0.75	33.83	11.81	83.65	13.18	2214.85	37.76
	1.00	31.63	11.04	78.21	7.96	844.69	22.80
粉质黏土	0.25	1299.67	444.64	5626.31	147.63	4899.92	431.54
	0.50	837.65	286.57	3626.18	139.17	7203.22	406.78
	0.75	393.35	134.57	1702.81	74.72	8192.87	218.40
	1.00	266.19	91.07	1152.34	30.76	3913.98	89.92

各组试验 P_1 , P_2 和 P_3 的值。再结合式 (4) ~ (6) 可分别求得 K_H , G_H , G_K , η_K , E_H , E_K 的值。这样, Merchant 模型的各参数均由试验数据确定了。

$E_K = -5.275(\sigma_1 - \sigma_3) + 589.97$ (粉质黏土)。(16)

3 模型效果检验

本文所采用的淤泥质黏土和粉质黏土的侧压力系数 K_0 分别为 0.7624 和 0.857, 根据 μ 与 K_0 的关系式(公式 7), 可以计算出淤泥质黏土和粉质黏土的 μ 值分别为 0.4326 和 0.4615。

为了检验 Merchant 模型的效果, 对淤泥质和粉质软黏土分别取 4 种主应力差状态下蠕变试验的实测数据曲线进行拟合, 拟合结果如图 8, 9 所示。

拟合结果表明, 除最高应力状态下拟合结果存在一定误差以外, 其余拟合曲线基本与实测曲线一致, 最高应力状态下误差最大值基本能够控制在 10% 以内, 中低应力状态下误差最大值基本能够控制在 5% 以内, 误差在实际工程的允许范围之内。

根据拟合曲线的数学公式, 得到式 (9) 中的参数值如表 2 所示。

将上面的参数 P_1 , P_2 和 P_3 的值代入式 (10) ~ (12), 再结合式 (4) ~ (6), 即可得到针对天津滨海地区两种软黏土的 Merchant 蠕变模型全部的参数值, 结果如表 3 所示。

比较两种黏性土 Merchant 模型中弹性参数 E_H 和 E_K 的变化规律后可知:

(1) 两种土体模型中虎克弹簧的弹性模量 E_H 都随着主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的增大呈负指数减小规律, 为

$E_H = 967(\sigma_1 - \sigma_3)^{-0.7587}$ (淤泥质黏土), (13)

$E_H = 55393(\sigma_1 - \sigma_3)^{-1.1596}$ (粉质黏土)。(14)

(2) 两种土体模型中 Kelvin 体的弹性模量 E_K 都随着主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的增大呈线性减小规律, 经验公式如下:

$E_K = -1.0355(\sigma_1 - \sigma_3) + 120.42$ (淤泥质黏土), (15)

4 结 论

本文通过室内三轴蠕变试验实测曲线和 Merchant 蠕变模型拟合结果的对比分析, 建立了适用于天津滨海地区典型淤泥质和粉质软黏土的蠕变模型, 该模型物理意义明确, 形式简单直观, 计算结果与试验值吻合较好, 可以应用到实际工程中。

同时, 通过对两种软黏土的蠕变特性进行分析比较后, 可以得出以下结论:

(1) 天津滨海地区淤泥质和粉质黏土的衰减稳定蠕变特性都可用 Merchant 蠕变模型较好地进行描述。

(2) 天津滨海地区淤泥质和粉质软黏土都具有明显的非线性蠕变特性, 而且与加载时间有关。在同一时刻下, 主应力差越高, 土体非线性也越明显。

(3) 分析了软黏土的不同特性, 给出了 Merchant 模型中虎克弹簧的弹性模量 E_H 和 Kelvin 体的弹性模量 E_K 随主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 变化关系的经验公式。

本文得到的天津滨海地区软黏土蠕变规律对天津滨海地区土体的蠕变特性、岸坡变形规律以及岸坡土体蠕变变形对码头结构的危害研究具有十分重要的意义, 也可为其它滨海地区软黏土的蠕变特性分析提供一定的参考。

参考文献:

[1] 于新豹, 刘松玉, 缪林昌. 连云港软土蠕变特性及其工程应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1001 - 1006. (YU Xin-bao, LIU Song-yu, MIAO Lin-chang. Creep properties of Lianyungang soft clay and its engineering application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 1001 - 1006. (in Chinese))

[2] 谭万鹏, 郑颖人, 王 凯. 考虑蠕变特性的滑坡稳定状态分析研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 5 - 8. (TAN

- Wan-peng, ZHENG Ying-ren, WANG Kai. Stable state of landslides considering creep properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 5 - 8. (in Chinese)
- [3] 李越松, 赵冲久, 赵利平, 等. 天津港岸坡土体蠕变对高桩码头的影响[J]. 中国港湾建设, 2009(4): 5 - 8. (LI Yue-song, ZHAO Chong-jiu, ZHAO Li-ping, et al. Influence of bank soil creep deformation on high-piled wharf in Tianjin port[J]. China Harbour Engineering, 2009(4): 5 - 8. (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 Jun-shi, SUN Jun. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 227 - 230. (WANG Chang-ming, WANG Qing, ZHANG Shu-hua. 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] 周秋娟, 陈晓平. 软土蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(5): 626 - 630. (ZHOU Qiu-juan, CHEN Xiao-ping. Experimental study on creep characteristics of soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(5): 626 - 630. (in Chinese))
- [7] YIN Zhen-Yu, CHANG Ching S, MINNA Karstunen, et al. An anisotropic elastic-viscoplastic model for soft clays[J]. International Journal of Solids and Structures, ASCE, 2010, **47**(5): 665 - 677.
- [8] BENJAMIN Friedrich Schlue, STEFAN Kreiter, TOBIAS Moerz. Time-dependent deformation of dredged harbor mud used as backfilling material[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2009, **135**(4): 154 - 163.
- [9] 王元战, 王婷婷, 王 军. 滨海软土非线性蠕变模型及其工程应用研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(9): 2679 - 2685. (WANG Yuan-zhan, WANG Ting-ting, WANG Jun. A nonlinear rheological model of soft clay and its application to Tianjin littoral area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(9): 2679 - 2685. (in Chinese))
- [10] 闫澍旺, 刘克瑾, 李 伟, 等. 天津滨海新区软黏土的蠕变特性及无屈服面模型探究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1431 - 1436. (YAN Shu-wang, LIU Ke-jin, LI Wei, et al. Study of creep properties of soft clay in Tianjin Binhai New Area and no-yield-surface constitutive model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1431 - 1436. (in Chinese))
- [11] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [12] 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. The rheology of geological materials and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [13] 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. Geotechnical principle and calculation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))
- [14] KAVAZANJIAN Jr E, MITCHELL J K. Time-dependent deformation behavior of clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1980, **106**(GT6): 611 - 631.
- [15] 邓志斌. 软黏土蠕变试验与本构模型辨识方法研究及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2007. (DENG Zhi-bin. Creep test on soft clay and the identification of constitutive model study and its application[D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese))
- [16] Duncan. Limitations of conventional analysis of consolidation settlement[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **119**(9): 1331 - 1359.