

文章编号:1673-2049(2011)03-0101-05

淤泥质软粘土剪切蠕变方程及流变参数研究

郑传峰¹, 王磊¹, 焦晓磊²

(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 天津市公路局, 天津 300211)

摘要:基于淤泥质软粘土粘弹塑性力学性质,利用粘壶元件、弹簧元件及滑块元件分别表征牛顿流体、虎克弹性体及塑性体,将这 3 类基本元件通过串联和并联的方式组合成软粘土力学模型,根据虎克定律及牛顿内摩擦定律等推导出软粘土本构方程;通过 Laplace 变换和 Laplace 反变换及单位阶梯函数推导出软粘土蠕变方程,采用线性回归确定蠕变方程参数;假定动载为正弦变化剪切力,基于淤泥质软粘土本构方程进一步推导出动载条件下的流变参数。结果表明:所建理论模型力学关系明确,通过推导出的剪切蠕变方程及确定的蠕变参数,可以预估动载条件下该类土的流变特性。

关键词:淤泥质软粘土;本构方程;蠕变方程;线性回归;动载;流变参数

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

Research on Shear Creep Equation and Rheological Parameters of Sludge Soft Clay

ZHENG Chuan-feng¹, WANG Lei¹, JIAO Xiao-lei²

(1. School of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China;

2. Highway Administration of Tianjin, Tianjin 300211, China)

Abstract: Viscosity kettle components, spring components and slippage components were used to denote Newton liquid substance, Hook elastic substance and plastic substance of sludge soft clay according to viscoelasto-plastic mechanical properties. These three basic components were combined into a mechanical model of soft clay through the series and parallel combinations. Constitutive equations were derived by Hook law and Newton inner friction law and so on. Creep equations were deduced by Laplace transform and Laplace inverse transform as well as unit step function. The creep equation parameter was confirmed by adopting linear regression. The dynamic loads were assumed as sine wave shear force, and rheological parameters under the dynamic loads were got based on constitutive equation of sludge soft clay. The results show that mechanics relation of theoretical model is definite, rheological characteristics under dynamic loads can be estimated by shear creep equation and definite of creep parameters.

Key words: sludge soft clay; constitutive equation; creep equation; linear regression; dynamic load; rheological parameter

0 引言

淤泥质软粘土在中国分布较为广泛,该种土类流变效应较为明显,静载条件下变形缓慢增加,即发

生蠕变效应;动载条件下变形快速累积,加速流变效应,从而引发岩土体失稳、边坡滑塌等一系列工程事故。因此研究淤泥质软粘土在静载及动载条件下的变形特性具有较强的工程实际意义。李军世等^[1]采

收稿日期:2011-05-20

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20070545)

作者简介:郑传峰(1981-),男,吉林集安人,讲师,工学博士研究生,E-mail:cfzheng@jlu.edu.cn。

用 Singh-Mitchell 模型对上海淤泥质粉质粘土的蠕变行为进行了研究,证明 Singh-Mitchell 模型具有简单的实用效果。王常明等^[2-3]对 Singh-Mitchell 模型展开进一步研究,认为 Singh-Mitchell 蠕变模型中的应力-应变关系修正为双曲线型是合适的,证明该模型可以用来描述滨海相软土的蠕变行为,并且利用自行改装的三轴蠕变仪对滨海相沉积软土进行剪切蠕变试验,同时对广义的 Kelvin 模型进行研究。Leoni 等^[4-5]和 Vermeer 等^[6]考虑土体各向异性,建立软土蠕变模型,并对软土的蠕变行为进行数值模拟研究。Kelln 等^[7]尝试采用粘弹力学原理揭示软粘土的蠕变行为。袁静等^[8]通过软土的室内流变试验研究了土体的流变特性并建立其本构模型。张敏江等^[9]基于简化非线性流变模型对结构性软土的流变特性进行了研究。李兴照等^[10]和钟辉虹等^[11]对循环荷载作用下软粘土的流变性进行了相关研究。当前对于土体蠕变特性的研究主要采用 3 种途径:基于土力学基本理论建立理论模型、基于试验结果建立经验模型以及基于微观流变学导出微观模型。本文中笔者从理论模型入手,考虑淤泥质软粘土的粘弹塑性状态,对该类土体的剪切蠕变行为及动载条件下的剪切流变参数进行研究。

1 力学模型与本构方程

1.1 力学模型的建立

淤泥质软粘土在荷载作用下达到屈服前不发生流动变形,材料表现出粘弹性。屈服后,淤泥质软粘土表现出粘弹塑性,基于此种淤泥质软粘土粘弹塑性的分析,本文中采用将弹簧与粘壶并联成为组合一,以此表征土体粘弹性质,将滑块与粘壶并联成为组合二,以此表征土体粘塑性质;然后将组合一与组合二串联成为本文采用的淤泥质软粘土粘弹塑性模型,如图 1 所示,其中, E 为弹性系数, η_1 为弹性粘度, η_2 为塑性粘度, τ_b 为初始剪切应力。

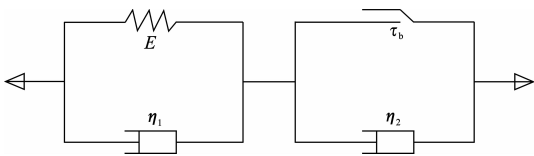


图 1 淤泥质软粘土粘弹塑性力学模型

Fig. 1 Viscoelasto-plastic Mechanical Model of Sludge Soft Clay

1.2 本构方程的推导

当剪切应力小于淤泥质软粘土初始剪切应力即 $\tau < \tau_b$ 时,塑性元件不参与受力,模型此时为 Kelvin

模型,土体为粘弹性体。定义弹性元件剪切应力为 τ_E ,剪切应变为 γ_E ,组合一(粘弹性元件)的剪切应力为 τ_{η_1} ,组合一(粘弹性元件)的剪切应变为 γ_{η_1} ,系统总剪切应变为 γ 。根据 Kelvin 模型的力学特点可知

$$\tau = \tau_E + \tau_{\eta_1}, \quad \gamma_E = \gamma_{\eta_1} \quad (1)$$

$$\tau_E = E\gamma_E, \quad \tau_{\eta_1} = \eta_1 \dot{\gamma} \quad (2)$$

综合式(1)、(2)可得,当 $\tau < \tau_b$ 时,淤泥质软粘土的剪切蠕变本构方程为

$$\tau = E\gamma_E + \eta_1 \dot{\gamma}_{\eta_1} \quad (3)$$

当 $\tau > \tau_b$ 时,整个模型全部参与受力,此时土体为粘弹塑性体。组合一(粘弹性元件)的剪切应变为 γ_1 ,剪切应力为 τ_1 ;组合二(粘塑性元件)的剪切应变为 γ_2 ,剪切应力为 τ_2 。根据整个粘弹塑性模型的受力特点可知

$$\tau = \tau_1 = \tau_2, \quad \gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (4)$$

$$\tau_1 = E\gamma_1 + \eta_1 \dot{\gamma}_1, \quad \tau_2 = \eta_2 \dot{\gamma}_2 \quad (5)$$

对式(4)、(5)同时进行 Laplace 变换,并作相应处理可以得到

$$\bar{\tau}_1(p) = E\bar{\gamma}_1(p) + \eta_1 p \bar{\gamma}_1(p) \quad (6)$$

$$\bar{\tau}_2(p) = \eta_2 p \bar{\gamma}_2(p) \quad (7)$$

$$\bar{\tau}(p)(\eta_2 p + E + \eta_1 p) = \eta_2 p (E + \eta_1 p) \bar{\gamma}(p) \quad (8)$$

式中: p 为转换函数; $\bar{\tau}_1(p)$ 表示对 τ_1 进行 Laplace 变换,以此类推。

对式(8)进行 Laplace 反变换可得

$$E\tau + (\eta_1 + \eta_2) \dot{\tau} = E\eta_2 \dot{\gamma} + \eta_1 \eta_2 \ddot{\gamma} \quad (9)$$

式(9)即为 $\tau > \tau_b$ 时淤泥质软粘土的剪切蠕变本构方程。

2 剪切蠕变方程

2.1 剪切应力小于初始应力的情况

根据已推导出的 $\tau < \tau_b$ 情况下淤泥质软粘土本构方程 $\tau = E\gamma_E + \eta_1 \dot{\gamma}_{\eta_1}$,引入单位阶梯函数 $\Delta(t)$, t 为自变量,将其定义为

$$\Delta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (10)$$

将 $\tau = \tau_b \Delta(t)$ 代入本构方程式(3)中,其中, τ_b 为 $t=0$ 时的瞬时剪应力,并对其进行 Laplace 变换可以得到

$$\frac{\tau_b}{p} = E\bar{\gamma}_E(p) + \eta_1 p \bar{\gamma}_E(p) \quad (11)$$

对式(11)进行整理可以得到

$$\bar{\gamma}_E(p) = \frac{\tau_b}{p(E + \eta_1 p)} \quad (12)$$

对式(12)进行 Laplace 反变换可以得到

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0 E}{\eta_1 \eta_2} (1 - e^{-\frac{E}{\eta_1 t}}) \quad (13)$$

式(13)即为在 $\tau < \tau_b$ 情况下,淤泥质软粘土的蠕变方程。

2.2 剪切应力大于初始应力的情况

根据已推导出的 $\tau > \tau_b$ 情况下淤泥质软粘土本构方程

$$E\tau + (\eta_1 + \eta_2)\dot{\tau} = E\eta_2\dot{\gamma} + \eta_1\eta_2\ddot{\gamma}$$

令 $(\eta_1 + \eta_2)/E = p_1$, $E\eta_2/E = \eta_2 = q_0$, $\eta_1\eta_2/E = q_1$, 则式(9)可以转化为

$$\tau + p_1\dot{\tau} = q_0\dot{\gamma} + q_1\ddot{\gamma} \quad (14)$$

同样引入单位阶梯函数 $\Delta(t)$, 定义方式同式(10)。将 $\tau = \tau_0\Delta(t)$ 代入本构方程式(14)中, 对其进行 Laplace 变换, 并对所得关系进行整理可以得到

$$\bar{\gamma}(p) = \frac{\tau_0}{p^2(q_0 + q_1 p)} + \frac{\tau_0 p_1}{p(q_0 + q_1 p)} \quad (15)$$

对式(15)进行 Laplace 反变换, 可以得到

$$\gamma(t) = \frac{\tau_0 q_1}{q_0^2} (e^{-\frac{q_0}{q_1}t} + \frac{q_0}{q_1}t - 1) + \frac{\tau_0 p_1}{q_0} (1 - e^{-\frac{q_0}{q_1}t}) \quad (16)$$

将 p_1, q_0, q_1 代入式(16), 并对所得关系进行进一步整理, 可以得到在 $\tau > \tau_b$ 情况下淤泥质软粘土蠕变方程

$$\gamma(t) = \tau_0 \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{\eta_2}t - \frac{1}{E}e^{-\frac{E}{\eta_1 t}} \right) \quad (17)$$

2.3 蠕变参数求解

综合分析以上 2 种情况下 ($\tau < \tau_b$ 和 $\tau > \tau_b$) 的淤泥质软粘土蠕变方程, 第 2 种情况下的蠕变方程比第 1 种相对复杂, 含有 3 个蠕变参数, 分别为 E, η_1, η_2 。针对某种淤泥质软粘土研究其静载蠕变规律及动载流变参数, 首先应明确蠕变方程中所包含的蠕变参数。以蠕变方程式(17)为例, 可以按照以下思路求解。式(17)可以改写成如下形式

$$\gamma(t) = a + bt + a(1 - e^{-ct}) \quad (18)$$

式中: a, b, c 为系数。

蠕变方程中参数可以采用下列形式表达

$$E = \tau_0/a, \eta_1 = \tau_0/(ac), \eta_2 = \tau_0/b \quad (19)$$

选取自变量 t 构成以 h 为公差的等差数列, 从而确定函数 $\gamma(t)$ 的试验值。令 $x = \gamma(t+h) - \gamma(t)$, $y = \gamma(t+2h) - \gamma(t)$, 即 x 为相邻 2 个 $\gamma(t)$ 值之差, y 为相间 2 个 $\gamma(t)$ 值之差, 则存在下述线性关系

$$y = mx + n \quad (20)$$

式中: m, n 为系数。

根据剪切蠕变试验结果对式(20)进行线性回归

可以求解 m, n 值, 则 b, c 可以表示成: $b = \frac{n}{h(2-m)}$,

$c = \frac{\ln(m-1)}{-h}$ 。令 $u = \gamma(t) - bt, v = 1 - e^{-ct}$, 则 $u =$

$a(v+1)$, 采用相同的计算思路, 可以求解 a 值。将所求得的 a, b, c 代入式(19)可以反算蠕变方程中的参数 E, η_1, η_2 。当正应力 P_n 分别为 0.1、0.2、0.3 MPa 时的淤泥质软粘土在不同固结压力 P_s 下的剪切蠕变试验结果^[12] 见图 2。采用本文中建立的软粘土粘弹塑性模型, 根据上述计算方法确定黄石淤泥质软粘土的部分剪切蠕变参数, 计算结果见表 1。

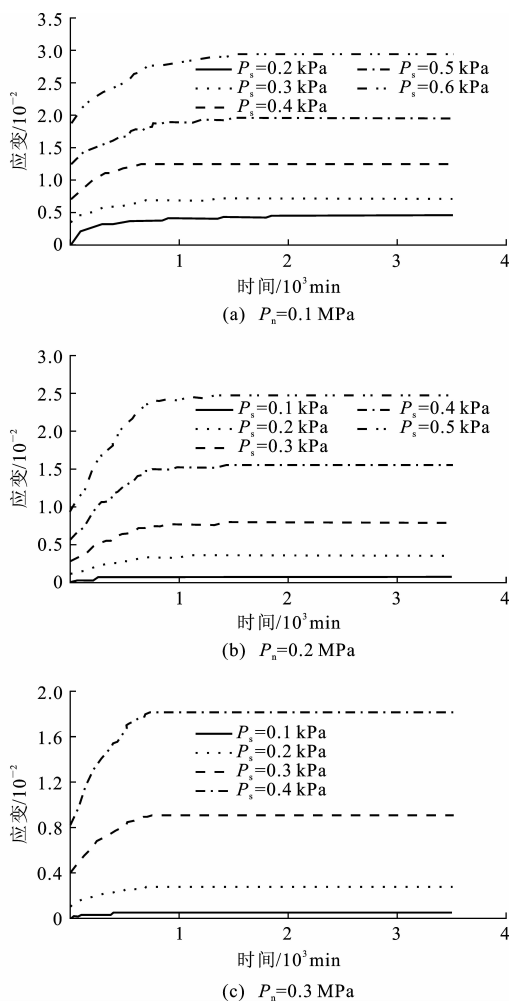


图2 淤泥质软粘土剪切蠕变试验结果

Fig. 2 Test Results of Shear Creep of Sludge Soft Clay

3 动载流变参数

动载剪切应力作用于具有粘弹塑性的淤泥质软粘土时, 所做的功一部分以热的形式耗散掉, 另一部分以弹性变形能储存, 每个周期中输入的能量一部分被储存, 另一部分能量以热的形式耗散掉, 此即为动载下的粘弹特性。特征参数包含储能模量 G' 、损耗模量 G'' 、剪切复数模量 G^* 、周期内弹性储能 W_e 、能量耗散 W_s 及能量耗散比 Z , 其中剪切复数模量

表 1 淤泥质软粘土粘弹塑性模型剪切蠕变参数
Tab. 1 Shear Creep Parameters of Viscoelasto-plastic
Model of Sludge Soft Clay

土样 编号	σ/MPa	τ/MPa	E/MPa	$\eta_1/(10^9\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\eta_2/(10^8\text{Pa}\cdot\text{s})$
1	0.10	0.01	2.357	11.751	58.218
		0.02	1.728	8.290	42.959
		0.03	1.194	10.180	31.785
		0.04	0.875	9.290	45.111
2	0.15	0.01	2.975	13.291	62.594
		0.02	2.318	10.118	78.258
		0.03	1.117	9.252	57.119
		0.04	0.621	11.318	50.382
		0.05	0.588	12.519	65.119
3	0.20	0.02	3.219	15.417	32.519
		0.03	2.122	12.384	43.297
		0.04	1.675	9.587	67.380
		0.05	1.128	10.115	55.119
		0.06	0.675	8.258	71.259

注： σ 为应力。

$G^* = G' + iG''$, G' 为复数模量实部, G'' 为复数模量虚部, 且有 $|G^*|^2 = G'^2 + G''^2$ 。假定动载剪切应力为正弦变化剪切应力, 即 $\tau = \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)}$, 应变则以正弦形式随时间发生变化, 即 $\gamma = \gamma_0 e^{i\omega t}$, 其中 ω 为角频率, δ 为相位角^[13-14]。

(1) 当 $\tau < \tau_b$ 时, 淤泥质软粘土为粘弹性体, 本构方程为 $\tau = E\gamma_E + \eta_1 \dot{\gamma}_{\eta_1}$, 根据 $\gamma = \gamma_0 e^{i\omega t}$ 可知, $\dot{\gamma} = i\omega\gamma_0 e^{i\omega t} = i\omega\gamma$, 代入本构方程得

$$\tau = (E + i\eta_1\omega)\gamma \tag{21}$$

将应力矢量 τ 与应变矢量 γ 之比定义为剪切复数模量 G^* , 则有

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} = G' + iG'' = E + i\eta_1\omega \tag{22}$$

弹性储能为

$$W_t = \frac{1}{2} G' \gamma_0^2 = \frac{1}{2} E \gamma_0^2 \tag{23}$$

能量耗散为

$$W_s = \pi G'' \gamma_0^2 = \pi \eta_1 \omega \gamma_0^2 \tag{24}$$

能量耗散比为

$$Z = \frac{W_s}{W_t} = \frac{2\pi G'' \gamma_0^2}{G' \gamma_0^2} = \frac{2\pi \eta_1 \omega \gamma_0^2}{E \gamma_0^2} = \frac{2\pi \eta_1 \omega}{E} \tag{25}$$

(2) 当 $\tau > \tau_b$ 时, 淤泥质软粘土为粘弹塑性体, 本构方程为 $E\tau + (\eta_1 + \eta_2) \dot{\tau} = E\eta_2 \dot{\gamma} + \eta_1 \eta_2 \ddot{\gamma}$, 根据 $\tau = \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)}$ 和 $\gamma = \gamma_0 e^{i\omega t}$ 可知, $\tau = i\omega\tau$, $\dot{\gamma} = i\omega\gamma$, $\ddot{\gamma} = -\omega^2 \gamma$, 代入本构方程得

$$[1 + i \frac{(\eta_1 + \eta_2)\omega}{E}] \tau = (-\frac{\eta_1 \eta_2 \omega^2}{E} + i\eta_2 \omega) \gamma \tag{26}$$

将此时应力矢量 τ 与应变矢量 γ_y 之比定义为剪切复数模量 G^* , 则有

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma_y} = G' + iG'' = \frac{E\eta_2^2 \omega^2}{E^2 + (\eta_1 + \eta_2)^2 \omega^2} + i \frac{\eta_1 \eta_2 (\eta_1 + \eta_2) \omega^2 + \eta_2 E^2 \omega}{E^2 + (\eta_1 + \eta_2)^2 \omega^2} \tag{27}$$

弹性储能为

$$W_t = \frac{1}{2} G' \gamma_0^2 = \frac{E\eta_2^2 \omega^2 \gamma_0^2}{2[E^2 + (\eta_1 + \eta_2)^2 \omega^2]} \tag{28}$$

能量耗散为

$$W_s = \pi G'' \gamma_0^2 = \frac{\pi[\eta_1 \eta_2 (\eta_1 + \eta_2) \omega^2 + \eta_2 E^2 \omega] \gamma_0^2}{E^2 + (\eta_1 + \eta_2)^2 \omega^2} \tag{29}$$

能量耗散比为

$$Z = \frac{W_s}{W_t} = \frac{2\pi G'' \gamma_0^2}{G' \gamma_0^2} = 2\pi \frac{G''}{G'} = \frac{2\pi \eta_1 \eta_2 (\eta_1 + \eta_2) \omega^2 + \eta_2 E^2 \omega}{E\eta_2^2 \omega^2} = \frac{\eta_1 (\eta_1 + \eta_2) \omega + E^2}{E\eta_2 \omega} \tag{30}$$

4 结 语

(1) 将牛顿流动体、虎克弹性体、塑性滑块通过并联和串联的方式组合成为力学模型, 模型中包含粘弹性组件和粘塑性组件, 以此来表征淤泥质软粘土的粘弹塑性, 该模型力学意义明确, 能充分反映该类土体在剪切外力作用下的受力性能。

(2) 根据虎克定律、牛顿内摩擦定律, 通过 Laplace 变换及 Laplace 反变换推导出 2 种情况下 ($\tau < \tau_b$ 和 $\tau > \tau_b$) 淤泥质软粘土的本构方程。

(3) 借助于单位阶梯函数, 通过 Laplace 变换及 Laplace 反变换推导出淤泥质软粘土的蠕变方程。

(4) 根据剪切蠕变试验结果, 通过线性回归方法, 确定模型参数计算方法, 以黄石淤泥质软粘土剪切蠕变试验为例反算出该类土蠕变方程中各参数。

(5) 假定动载为正弦交变荷载, 通过已推导出的本构方程, 进一步推导出淤泥质软粘土的动载流变参数。

(6) 对于本文中所得本构方程、剪切蠕变方程、动载流变参数, 其应用前提为通过试验确定软粘土的初始剪切应力, 从而确定方程类别。

参考文献:

References:

[1] 李军世, 林咏梅. 上海淤泥质粉质粘土的 Singh-

- Mitchell 蠕变模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 363-366.
- LI Jun-shi, LIN Yong-mei. Singh-Mitchell Creep Model of Shanghai Very Soft Silt Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 363-366.
- [2] 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.
- [3] 王常明, 黄超, 张浩, 等. 营口软土的固结不排水剪切蠕变特性[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(4): 728-733.
- WANG Chang-ming, HUANG Chao, ZHANG Hao, et al. Creep Characteristics for Consolidated-undrained Triaxial Compression of Yingkou Soft Soil[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(4): 728-733.
- [4] LEONI M, VERMEER P, KARSTUNEN M. Validation of Anisotropic Creep Model for Soft Soils[C]// KARSTUNEN M, LEONI M. Geotechnics of Soft Soils: Focus on Ground Improvement. Glasgow: Taylor & Francis, 2008: 165-171.
- [5] LEONI M, KARSTUNEN M, VERMEER P A. Anisotropic Creep Model for Soft Soils[J]. Geotechnique, 2008, 58(3): 215-226.
- [6] VERMEER P A, LEONI M, KARSTUNEN M, et al. Modelling and Numerical Simulation of Creep in Soft Soils[C]//CHAN D H, LAW K T. Soft Soil Engineering. Vancouver: Taylor & Francis, 2007: 57-71.
- [7] KELLN C, SHARMA J, HUGHES D, et al. An Improved Elastic-viscoplastic Soil Model[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(10): 1356-1376.
- [8] 袁静, 龚晓南, 刘兴旺, 等. 软土各向异性三屈服面流变模型[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 88-94.
- YUAN Jing, GONG Xiao-nan, LIU Xing-wang, et al. An Anisotropic Time-dependent Trinal-yield-surface Model for the Stress-strain-time Behavior of Soft Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 88-94.
- [9] 张敏江, 张丽萍, 张树标, 等. 结构性软土非线性流变本构关系模型的研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, 34(2): 242-246.
- ZHANG Min-jiang, ZHANG Li-ping, ZHANG Shu-biao, et al. Study on Rheological Constitutive Relations for Structural Soft Soils[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004, 34(2): 242-246.
- [10] 李兴照, 黄茂松. 循环荷载作用下流变性软粘土的界面模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 249-254.
- LI Xing-zhao, HUANG Mao-song. A Bounding Surface Model for Creeping Soft Clays Under Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 249-254.
- [11] 钟辉虹, 黄茂松, 吴世明, 等. 循环荷载作用下软粘土变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 629-632.
- ZHONG Hui-hong, HUANG Mao-song, WU Shi-ming, et al. On the Deformation of Soft Clay Subjected to Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 629-632.
- [12] 张先伟, 王常明, 王钢城, 等. 黄石淤泥质土的剪切蠕变特性及模型研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(1): 119-125.
- ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming, WANG Gang-cheng, et al. Study on Shearing Creep Characteristics and Constitutive Mode of Huangshi Mucky Soil[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(1): 119-125.
- [13] 胡华, 顾恒星, 俞登荣. 淤泥质软土动态流变特性与流变参数研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 696-700.
- HU Hua, GU Heng-xing, YU Deng-rong. Research on Dynamic Rheological Characteristics and Rheologic Parameters of Sludge Soft Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 696-700.
- [14] 高星林, 任文峰. 高液限粘土路基填筑技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(12): 52-53, 60.
- GAO Xing-lin, REN Wen-feng. Simulation Analysis of Behavior of Stress of High Filling Culvert[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005, 22(12): 52-53, 60.