

文章编号: 1000-7598 (2009) 11-3307-06

考虑各向异性的软黏土扰动状态本构模型

于小军^{1,2}, 施建勇¹, 徐杨斌¹

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 盐城工学院 土木学院, 江苏 盐城 224003)

摘 要: 以大量试验结果为依据, 运用物理意义明确、获取简便快捷、经济实用的土电阻率结构指标进行软黏土扰动变量的表征和测定。以三轴试验与电阻率测试结果为基础, 进行了扰动函数的构建。在软黏土扰动状态描述中, 引入旋转硬化因子, 用以考虑应力诱发各向异性, 进而构建了考虑各向异性的软黏土扰动状态概念本构模型。模型从一定程度上克服了传统扰动变量获取方法的弊端, 克服了传统借用数学演绎手段建立扰动函数的不足, 提高了模型应用的适用性。在模型构建中, 融入初始应力各向异性的影响, 从而使模型能更好地反映软土实际工程情况。三轴排水剪切试验验证结果表明, 该模型可较好地反映软黏土受荷下的结构变化情况和受力特性。

关 键 词: 软黏土; 电阻率指标; 各向异性; 扰动状态概念; 本构模型

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Modelling disturbed state and anisotropy of natural soft clays

YU Xiao-jun^{1,2}, SHI Jian-yong¹, XU Yang-bin¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224003, China)

Abstract: Based on tests, electrical resistivity indexes are taken to reflect the changes in soil structures and define the disturbed variable, which is convenient, continuous, economical and practicable. Meanwhile, disturbed function is built by the results of undrained triaxial shear tests and electrical resistivity tests. Additionally, rotational hardening parameter is taken to describe disturbed state of natural soft clays; accordingly, a disturbed state concept constitutive model taking into account stress-induced anisotropy for soft clays is presented. As a result, the traditional methods measuring disturbed variable and establishing disturbed function may be optimized, and the applicability and accuracy of model may be improved. Results from undrained triaxial shear tests show that the model can describe the stress-strain characteristics fairly well and could be applied to practice.

Key words: soft clay; electrical resistivity index; anisotropy; disturbed state concept; constitutive model

1 引 言

扰动状态概念是 Desai 于 1974 年提出的^[1], 是一种针对材料的受力扰动而发展起来的, 综合了连续介质、损伤力学等理论, 对材料的力学性质进行全面分析的本构模拟方法。扰动对土体性质的影响, 在国外很早就有人做过研究^[2-3], 且土体扰动状态本构模型的研究也比较深入^[4], 而且得到广泛应用。近几年来, 我国一些岩土工程专家、学者们在施工扰动对沉降变形的影响规律方面进行了细致研究, 并取得了一定成果^[5-7]。但关于土扰动状态本构模型的研究, 国内才刚起步^[4, 8-12], 研究成果尚不多,

工程应用实例甚少。在现有成果中, 在软黏土扰动状态描述方面, 现有模型中都未考虑软土各向异性影响, 因而与实际情况有所偏差。在扰动的表征和试验测定方面, 现有的表征和测定方法中, 有的缺乏合适的测试设备探入材料内部进行测量, 有的测试起来不太便捷, 而有些可行的测量扰动的无损检测方法, 如超声波、声发射和 CT 检测法因其或操作技术难度高, 或者不够方便快捷, 或者价格昂贵, 难以在实际工程应用中得以普及与推广。在扰动函数的构建方面, 有的主观假定或简化过多, 有的计算过程比较复杂, 不便于实际工程应用; 有的模型参数获取的可操作性和可重复性不强, 在实际应用

收稿日期: 2009-02-23

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (No. BK2007070)。

第一作者简介: 于小军, 女, 1969 年生, 博士, 副教授, 主要从事软土本构模型研究。E-mail: brier_bird@126.com

推广中受到一定的限制。

本文在软黏土扰动状态概念理论基础上,考虑应力诱发各向异性,以此构建了软黏土扰动状态概念本构模型。以连云港海相软土为试验对象,通过三轴试验对模型进行了验证。

2 扰动状态概念

扰动状态概念^[4]是指材料单元的观测行为可用相对完整 (relative intact state) 和完全调整 (full adjusted state) 的行为来表示。在力作用下导致材料变形过程中,材料单元被认为是由随机地处于相对完整状态部分和完全调整状态部分所组成的混合物。在外界荷载作用之前,材料处于完整状态或无扰动的连续介质状态。由于外界荷载的作用土体变形发生,受外力影响的土颗粒开始改变其结构排列,材料内部的微观结构从最初的相对完整状态,经过一个连续、随机和“自觉”的调整过程,最终达到完全调整状态。

材料从相对完整状态变为完全调整状态的动态过程可以用扰动函数来描述。对于结构性黏土来说,扰动函数反映其结构受到扰动而逐渐破坏的过程,是建立结构性黏土扰动状态本构模型的关键所在。扰动函数取决于材料的塑性变形、初始条件、温度及含水率等,可通过材料的相关参数来描述,如应力-应变关系、波速、孔隙水压力、有效应力、孔隙率等,因此,扰动函数可能具有不同函数形式^[4]。

3 电阻率法

3.1 研究基础

近年来,诸多学者采用电阻率法来定量描述土的结构性大小及其变化情况^[13]。土的电阻率是土的固有物性参数之一,电阻率测试法具有快速、经济、便捷、无损、连续的显著优势,故其在土结构性研究中的应用日趋增多。Thevananyagam^[14]通过测得结构变化中土的竖向、水平向电阻率,找出反映土内部结构特征的 3 个基本的电阻率结构特性参数 $\bar{F}$ 、 $\bar{f}$ 、 A 的变化规律,以此来分析土扰动结构的定量变化情况。其中, $\bar{F}$ 为平均结构因子,反映土的孔隙率和孔隙结构; $\bar{f}$ 为平均形状因子,描述颗粒形状; A 为各向异性系数,反映颗粒的定向排列。Tabbagh 等^[15]应用电阻率测试法对土的结构变化及其特性进行了描述。Samouelian 等^[16]通过测试黄土块在干湿循环产生裂隙的过程中不同方向和深度上电阻率变化,成功监测出土块的裂隙发展和发育情况。查甫生、刘松玉等^[17]通过研究土样吸水膨

胀过程中的土电阻率结构性参数的变化情况,建立了描述膨胀土微结构变化的电阻率评价方法。于小军^[18-19]通过一维固结和常规三轴试验的研究分析,指出由平均结构因子 $\bar{F}$ 、平均形状因子 $\bar{f}$ 和各向异性系数 A 可得到一个能较好地反映土体结构性的综合指标——电阻率综合因子 m , $m = m_c / m_0$, 其中 m_c 为加荷变形下土体的 $\bar{F}^2 A / \bar{f}$, m_0 为未扰动土样的 $\bar{F}^2 A / \bar{f}$ 。基于此,建立了连云港海相软黏土一维固结结构性蠕变模型,并进行了室内试验验证。以上研究成果为土电阻率法应用于扰动状态概念理论提供了良好的前期研究工作基础。

3.2 试验研究方案

试验中的原状土样取自连云港海相软土,其物理力学性质指标见表 1。扰动样通过在三轴标准试样上插入不同根数,不同直径大小的涂有防水防黏层的针的方法获取得到。针孔直径有 2、3 mm 两种。插孔数有 5、9、14、19、25、32、39、55 孔等。

为了探索电阻率结构指标 m_c 表征和测定扰动土样扰动变量的可行性,进行了插针试验、无侧限抗压强度测试和同步的电阻率测试。为了构建扰动变量方程,对三轴应力应变仪器进行了改装,在三轴排水剪切试验中,进行了同步的电阻率测试。

表 1 软土样的物理力学性质指标

Table 1 Index properties of the soft soil

深度 /m	w /%	ρ /(g/cm ³)	G_s	e	w_L /%	w_P /%	c /kPa	φ / (°)
4	65.4	1.68	2.64	1.68	65.2	29.0	2.0	13.4
6	73.0	1.63	2.76	1.93	70.6	28.9	3.0	13.4

注: w 为含水率, ρ 为密度, G_s 为土粒的相对密度, e 为孔隙比, w_L 为液限, w_P 为塑限, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。

3.3 试验结果分析

(1) 用土的电阻率结构参数表征和测定软土样扰动变量 D , 定义:

$$D = (m_0 - m_c) / (m_0 - m_a) \quad (1)$$

式中: D 为扰动变量; m_0 、 m_c 、 m_a 分别为未扰动样、加荷下土样和重塑土样的 $\bar{F}^2 A / \bar{f}$ 。

试验结果表明,由电阻率结构参数表征的扰动变量 D 与 S_i 有着紧密的关系,其中 $S_i = q_{u0} / q_{uc}$, q_{u0} 、 q_{uc} 分别为未扰动样和扰动样的无侧限抗压强度,其关系曲线如图 1 所示,随着 S_i 的增加,扰动变量 D 亦随之增大。

(2) 应力-应变下扰动函数的构建

三轴固结排水剪切试验研究结果表明,由电阻

率结构参数表征的扰动变量 D 随着体应变的增大而增大, 且两者有着较密切的相关关系, 扰动变量 D 随体应变的相关曲线和扰动函数见图 2、3 所示。

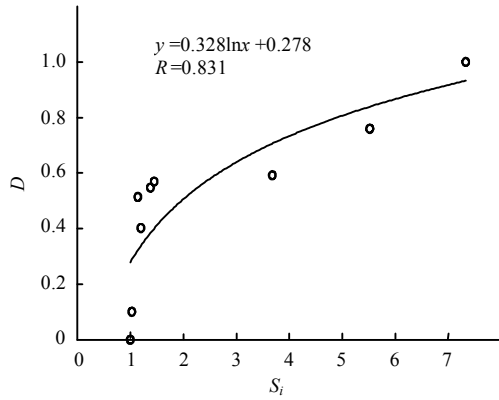


图 1 D 与 S_t 关系图

Fig.1 The relation between D and S_t

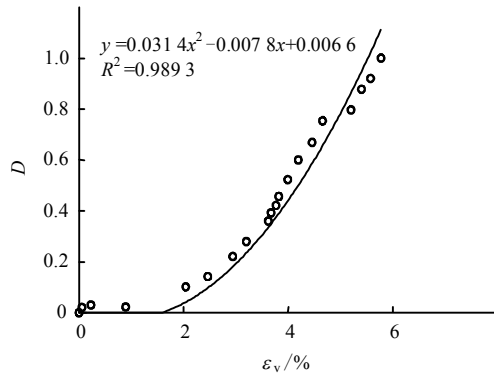


图 2 D 与体应变关系图 (围压 25 kPa)

Fig.2 The relation between D and ε_v ($\sigma_3=25$ kPa)

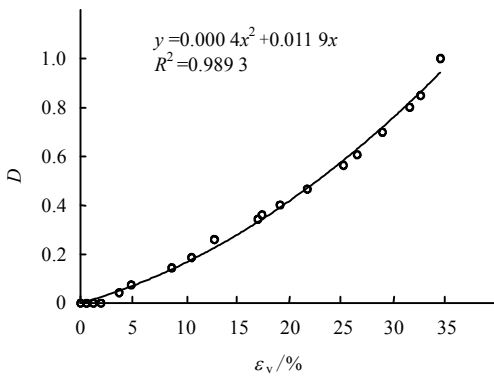


图 3 D 与体应变关系图 (围压 50 kPa)

Fig.3 The relation between D and ε_v ($\sigma_3=50$ kPa)

4 模型构建

4.1 相对完整状态

本文采用弹性理论模型描述相对完整状态。土体弹性变形增量的本构关系式为

$$d\varepsilon_v^i = \frac{1}{K^i} dp' \quad (2)$$

式中: 上标 i 表示相对完整状态; ε_v^i 为弹性体积应变增量; p' 为有效球应力; K^i 表示相对完整状态土的切线体积模量。

4.2 完全调整状态

对于结构性软黏土, 完全调整状态的土力学性质可认为类似于重塑土。兼顾考虑应力诱导各向异性特性, 在大量应力路径试验基础上, 笔者建议采用 Wheeler^[20]提出的在修正剑桥模型中引入旋转硬化变量 α 的旋转硬化模型 (S-CLAY1) 来描述完全调整状态的土。模型中对硬化变量 α 作简化, 仅考虑其初始值, 并没有包含各向异性的演化, 因此, α_0 为常数。

S-CLAY1 模型的屈服面方程为

$$p'_{eq} = p' + \frac{(q - \alpha p')^2}{M^2 - \alpha^2} \frac{1}{p'} \quad (3)$$

故本文描述完全调整状态的模型屈服面方程为

$$F = p' \left[1 + \frac{(q - \alpha_0 p')^2}{(M^2 - \alpha_0^2) p'^2} \right] - p'_{eq} = 0 \quad (4)$$

$$\text{即} \quad \frac{p'}{p'_{eq}} = \frac{M^2 - \alpha_0^2}{(M^2 - \alpha_0^2) + (\eta - \alpha_0)^2} \quad (5)$$

式中: 应力比 $\eta = q/p'$ 。

对式 (5) 进行微分, 可得

$$\frac{dp'}{p'} + \frac{2(\eta - \alpha_0)}{(M^2 - \alpha_0^2) + (\eta - \alpha_0)^2} d\eta - \frac{dp'_{eq}}{p'_{eq}} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{(M^2 - \alpha_0^2) - (\eta - \alpha_0)^2}{(M^2 - \alpha_0^2) + (\eta - \alpha_0)^2} \frac{dp'}{p'} + \\ & \frac{2(\eta - \alpha_0)}{(M^2 - \alpha_0^2) + (\eta - \alpha_0)^2} \frac{dq}{p'} - \frac{dp'_{eq}}{p'_{eq}} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

模型应力-应变增量形式为

$$d\varepsilon_v^c = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p = \kappa \frac{dp'}{v^c p'} + (\lambda - \kappa) \frac{dp'_{eq}}{v^c p'_{eq}} \quad (8)$$

$$v^c = 1 + e^c \quad (9)$$

$$e^c = e_0 - (\lambda - \kappa) \ln p'_{eq} - \kappa \ln p' \quad (10)$$

式中: 上标 c 表示完全调整状态; λ 、 κ 分别为完全调整状态土压缩指数、回弹指数; e_0 为土的初始孔隙比。

把式 (7) 代入式 (8), 可得模型的弹塑性应

力-应变增量方程为

$$d\varepsilon_v^c = \frac{1}{v^c[(M^2 - \alpha_0^2) + (\eta - \alpha_0)^2]p'} \{ [\lambda(M^2 - \alpha_0^2) + (2\kappa - \lambda)(\eta - \alpha_0)^2]dp' + 2(\lambda - \kappa)(\eta - \alpha_0)dq \} \quad (11)$$

4.3 扰动函数

假定土体体积应变的扰动只与体积应变相关。为构建扰动变量 D 与体积应变的关系方程,进行了常规三轴排水试验,并同步测其电阻率结构参数的变化情况。用电阻率结构参数 m_c 来表征和测定三轴过程中扰动变量的变化情况,具体定义见式(1)。

依据前面所述的三轴试验和同步的电阻率测试结果,扰动函数如图 2、3 中的相关关系式所示,同下式:

$$D = a\varepsilon_v^2 + b\varepsilon_v + c \quad (12)$$

式中: D 为扰动变量; ε_v 为体积应变; a 、 b 、 c 均为土样参数,可通过常规三轴试验(同步测其电阻率结构参数,获取 D 的变化情况)拟合得到。

4.4 扰动状态应变方程

土体的总变形为两种状态土体(相对完整状态 and 完全调整状态)变形的叠加,可得

$$\varepsilon_{ij} = (1 - D_\varepsilon)\varepsilon_{ij}^i + D_\varepsilon\varepsilon_{ij}^c \quad (13)$$

$$\varepsilon_v = (1 - D_v)\varepsilon_v^i + D_v\varepsilon_v^c \quad (14)$$

4.5 模型参数的确定

模型中共有 9 个参数,如表 2 所示。所有的参数均可通过单向压缩试验、常规三轴排水剪切试验和土电阻率测试获得。

表 2 模型参数

Table 2 Parameters of model

相对完整状态参数	完全调整状态参数	扰动函数参数
e_0 、 K^i	λ 、 κ 、 M 、 α_0	a 、 b 、 c

(1) 相对完整状态参数的确定

K^i 为相对完整状态土的切线体积模量,可在三轴仪中对未扰动样施加各向相等的压力(即球应力),并逐步增大,测相应的体应变,绘出体应变和球应力的关系曲线, K^i 由曲线初始弹性部分切线斜率求得。

(2) 完全调整状态参数的确定

M 、 λ 、 κ 分别为基于重塑土的 S-CLAY1 模型的 3 个主要参数,这 3 个模型参数的确定等同于

修正剑桥模型部分。参数 M 为 $p'-q$ 平面内临界状态线的斜率,由三轴剪切试验得出:

$$M = \frac{6\sin\varphi}{3 - \sin\varphi} \quad (15)$$

式中: φ 为土的内摩擦角。

参数 λ 、 κ 一般是通过三轴等向压缩和回弹试验确定的,不过考虑到试验的简便性,也可以通过单向压缩试验确定,求取公式如下:

$$\lambda = \frac{C_c}{2.303} \quad (16)$$

$$\kappa = \frac{C_s}{2.303} \quad (17)$$

式中: C_c 、 C_s 分别为重塑土在 $e - \lg p'$ 平面中的压缩指数和回弹指数。

对考虑初始应力各向异性的屈服面形状,根据应力路径试验结果,并参照魏星、黄茂松^[22]、Nakano 等^[23]和王立忠等^[24]的模型,屈服面可由修正剑桥模型椭圆屈服面旋转至椭圆的右切点位于 K_0 线上得到。故 $\alpha_0 = \eta_0 = \frac{3(1-k_0)}{1+2k_0}$, 其中 η_0 为初始应力比。

(3) 扰动函数参数的确定

式(12)中 a 、 b 、 c 可通过常规三轴试验(同步测其电阻率结构参数)的试验数据拟合得到。

5 模型验算

为了检验模型合理性,下面以连云港海相软土为试验对象,进行常规三轴排水剪切试验,对模型加以检验。

在单向压缩试验和常规三轴试验基础上得到软土样试验参数,如表 3 所示。

表 3 连云港海相软土模型参数

Table 3 Model parameters of Lianyungang soft clay

e_0	K^i /kPa	λ	κ	M	α_0	a	b	c
1.681	522	0.439	0.032	0.77	0.45	0.030 0	-0.008 0	0.006 6
						0.000 4	0.011 9	0

把模型参数代入体应变偏微分方程式(2)和式(11),对于常规三轴压缩排水试验,方程中的 $\eta = q/p' = 3$,并对两偏微分方程进行积分并考虑初始条件,可得弹性体应变和塑性体应变分别为

$$\varepsilon_v^i = \frac{p'}{K} = \frac{p'}{522} = 0.0019p' \quad (18)$$

$$\varepsilon_v^c = -1.31 \times \ln(10.41 - 3.025 \ln p') \quad (19)$$

再将式 (18) 和式 (19) 代入式 (14), 最后得到如下本构模型:

$$\begin{aligned} \varepsilon_v = & [1 - (0.03\varepsilon_v^2 - 0.008\varepsilon_v + 0.0066)] \times \\ & 0.0019p' + (0.03\varepsilon_v^2 - 0.008\varepsilon_v + 0.0066) \times \\ & [-1.31 \times \ln(10.41 - 3.025 \ln p')] \end{aligned} \quad (20)$$

所求模型与实测应力-应变曲线如图 4、5 所示。图中结果表明, 模型计算值与实测值比较接近, 模型可较好地反映软黏土受荷下的应力-应变规律。

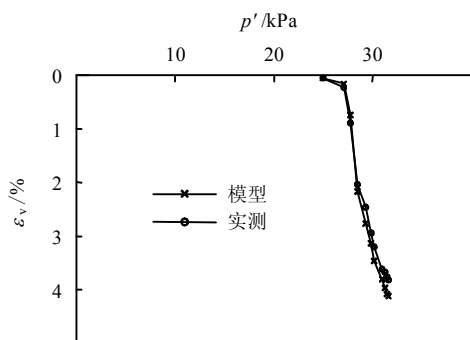


图 4 模型验证曲线 ($\sigma_3=25$ kPa)
Fig.4 Validation of model ($\sigma_3=25$ kPa)

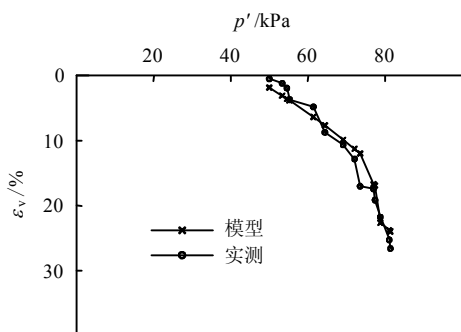


图 5 模型验证曲线 ($\sigma_3=50$ kPa)
Fig.5 Validation of model ($\sigma_3=50$ kPa)

6 结 论

(1) 引入扰动状态概念, 建立了考虑各向异性的软黏土扰动状态概念本构模型。

(2) 模型中尝试运用土的电阻率结构测试法进行扰动变量的表征和测定, 从一定程度上克服了传统扰动变量测试方法的弊端, 较大提高模型工程应用的适用性。

(3) 对所建模型进行了试验验证, 发现该模型可以较好地反映土体在外力作用下的结构变化过程和力学特性。

参 考 文 献

[1] DESAI C S. A consistent finite element technique for

work softening behavior[C]//Proc. Int. Conf. on Computer Methods in Nonlinear Mechanics. Austin: University of Texas, 1974.

[2] CASAGRANDE A. The determination of the preconsolidation load and its practical significance[C]//Proceedings of 1st ICSMFE. [S. l.]: [s. n.], 1936, 3: 60—84.

[3] SCHMERTMANN J H. The undisturbed consolidation behavior of clay[J]. **Transport, ASCE**, 1955, 120: 1201—1227.

[4] 吴刚. 工程材料的扰动状态本构模型(I)——扰动状态概念及其理论基础[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(6): 759—765.

WU Gang. Disturbed state constitution models of engineering material (I)—disturbed state concept and its theory principium[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 759—765.

[5] 孙钧, 周健, 龚晓楠, 等. 受施工扰动影响土体环境稳定理论与变形控制[J]. **同济大学学报(自然科学版)**, 2004, 32(10): 1261—1269.

SUN Jun, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Theory of soil environment stability and deformation control under influence of construction disturbance[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2004, 32(10): 1261—1269.

[6] 王军, 高玉峰. 扰动结构性软土地基的沉降特性分析[J]. **岩土力学**, 2006, 27(8): 1384—1388.

WANG Jun, GAO Yu-feng. Settlement characteristics analysis of disturbed structure soft clay ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1384—1388.

[7] 王立忠, 李玲玲. 结构性土体的施工扰动及其对沉降的影响[J]. **岩土工程学报**, 2007, 29(5): 693—704.

WANG Li-zhong, LI Ling-ling. Field disturbance of structured clay and its effect on settlements of soil foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 693—704.

[8] 王国欣, 肖树芳, 黄宏伟, 等. 基于扰动状态概念的结构性黏土本构模型研究[J]. **固体力学学报**, 2004, 25(2): 191—197.

WANG Guo-xin, XIAO Shu-fang, HUANG Hong-wei, et al. Study of constitutive model of structural clay based on the disturbed state concept[J]. **Acta Mechanica Solida**

- Sinica, 2004, 25(2): 191—197.
- [9] 周成, 沈珠江, 陈生水, 等. 结构性土的次塑性扰动状态模型[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 435—439.
ZHOU Cheng, SHEN Zhu-jiang, CHEN Sheng-shui, et al. A hypoplasticity disturbed state model for structured soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 435—439.
- [10] 张玉洁, 王常明, 王芳, 等. 黏性土基于扰动状态概念的应力-应变关系及压缩变形分析[J]. 世界地质, 2005, 24(2): 200—202.
ZHANG Yu-jie, WANG Chang-ming, WANG Fang, et al. Stress-strain relationship and analysis of compressive deformation of cohesive soil based on DSC[J]. **Global Geology**, 2005, 24(2): 200—202.
- [11] 陈锦剑, 吴刚, 王建华, 等. 基于扰动状态概念模型的饱和软黏土力学特性[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6): 952—955.
CHEN Jin-jian, WU Gang, WANG Jian-hua, et al. Disturbed state concept model for studying on mechanical characteristics of saturated cohesive soils[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2004, 38(6): 952—955.
- [12] 迟世春, 相彪. 基于损伤扰动的土体本构关系研究[J]. 世界地震工程, 2007, 23(2): 139—144.
CHI Shi-chun, XIANG Biao. A soil constitutive model based on disturbed state concept[J]. **World Earthquake Engineering**, 2007, 23(2): 139—144.
- [13] SAMOUELIAN A B I, COUSIN A A, TABBAGH C A, et al. Electrical resistivity survey in soil science: a review[J]. **Soil and Tillage Research**, 2005, 83(2): 173—193.
- [14] THEVANAYAGAM S. Electrical response of two-phase soil: Theory and applications[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 119: 1250—1275.
- [15] TABBAGH A, DABAS M, HESSE A, et al. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horization[J]. **Geoderma**, 2000, 97, 393—404.
- [16] SAMOUELIAN A, COUSIN I, RICHARD G. et al. Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale[J]. **Soil Sci. Soc. J. Am.**, 2003, 67: 1319—1326.
- [17] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 基于电阻率法的膨胀土吸水膨胀过程中结构变化定量研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1832—1839.
ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Quantitative research on micro-structures of expansive soils during swelling using electrical resistivity measurements[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(12): 1832—1839.
- [18] 于小军, 刘松玉. 电阻率指标在膨胀土结构研究中应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 393—396.
YU Xiao-jun, LIU Song-yu. Researches on application of electrical resistivity indices to the microstructure of expansive soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 393—396.
- [19] 于小军. 电阻率结构模型理论的土力学应用研究[博士学位论文D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [20] WHEELER S J, NÄÄTÄNEN A, KARSTUNEN M, et al. An anisotropic elastoplastic model for soft clays[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2003, 40: 403—418.
- [21] DESAI C S. Constitutive modeling using the disturbed state concept as microstructure self-adjustment concept[C]//Continuum Models of Materials with Microstructure, Chapter 8. [S. l.]: Wiley, 1995.
- [22] 魏星, 黄茂松. 软土初始应力各向异性弹塑性模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 43—46.
WEI Xing, HUANG Mao-song. An elastoplastic model for soft clays with initially stress-induced anisotropy[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.2): 43—46.
- [23] NAKANO M, NAKAI K, NODA T, et al. Simulation of shear and one-dimensional compression behavior of naturally deposited clays by super/subloading yield surface Cam-clay model[J]. **Soils and Foundations**, 2005, 45(1): 141—151.
- [24] 王立忠, 叶盛华, 沈恺伦, 等. K_0 固结软黏土不排水抗剪强度[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 970—977.
WANG Li-zhong, YE Sheng-hua, SHEN Kai-lun, et al. Undrained shear strength of K_0 consolidated soft clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(8): 970—977.