

基于扰动状态概念的结构性软黏土本构模型

于小军^{1,2}, 齐志宏³

(1 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 盐城工学院土木学院, 江苏 盐城 224003;
3. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

摘 要: 在扰动状态概念基础上, 建立了一个考虑土结构性影响的软黏土应力应变本构模型。模型尝试运用电阻率不规则因子来表征和测定土样的扰动变量, 从而克服了传统扰动变量获取方法的不足, 使之简便、快捷、经济、实用。另外, 模型中, 增加了土体应变对土体扰动影响, 且以试验和理论为依据建立扰动函数, 从而使得模型更加符合土体实际工程力学特性。模型形式相对简单, 参数易于确定。三轴排水剪切试验的验证结果表明, 所构建的模型能较为合理地模拟结构性软黏土受荷扰动下的变形过程。

关键词: 软黏土; 扰动状态概念; 电阻率不规则因子; 扰动变量; 扰动函数

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2009)12-1882-06

作者简介: 于小军(1969-), 女, 副教授, 博士后, 主要从事软土本构模型研究。E-mail: flyingfish7101@126.com。

Constitutive model for soft clay based on disturbed state concept

YU Xiao-jun^{1,2}, QI Zhi-hong³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Yancheng Institute of Technology, Civil Engineering, Yancheng 224003, China; 3. College of Architectural & Civil Engineering, Jinling
Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: Based on the disturbed concept theory, a new constitutive model is presented. In this model, electrical resistivity anomaly, which can be obtained conveniently, economically and practicably, is taken to define and measure the disturbed variable. The traditional methods measuring the disturbed variable may thus be optimized. In addition, the volumetric strain disturbance effect is taken into account in this model, and a disturbed function is established by use of the test results. The form of this model is relatively simple, and model parameters can be easily gained. Results from undrained triaxial shear tests show that this model can well describe the stress-strain characteristics of soft clay.

Key words: soft clay; disturbed state concept; electrical resistivity anomaly; disturbed variable; disturbed function

0 引 言

土的结构性是影响天然软黏土变形特性的重要因素之一, 它对土体应力-应变关系、屈服和强度特性都有显著影响, 已成为现代岩土学研究的基本内容之一^[1-2]。传统软黏土应力应变本构模型因未对土体的结构性加以考虑, 导致模型计算结果与工程实际变形状态有较大差距, 从而模型应用与工程的要求相距较远。

近年来, 结构性本构模型研究已取得了一定的进展, 尤其是在凭借连续介质损伤力学方法建立结构性本构模型方面^[1, 3-7]。由于损伤理论难以解释某些土体受力后强化的过程, 特别是土体受到扰动软化后, 又会发生强度增长的现象, 因此, 扰动状态概念模型应运而生。

扰动状态概念是Desai于1974年提出^[8], 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, 能较全面分析材料力学性质的本构模拟方法。Desai (1996, 2001)^[9-10]曾针对重塑土的特性用扰动状态概念模型来描述土体原生结构逐渐破坏、次生结构逐渐产生的变化过程。随后, 扰动状态概念模型相继被一些国外学者应用到无黏性土^[11-12]、黏性土^[13]和不同土体的界面^[14], 并得到了较好的效果。相比而言, 我国在此领域起步较晚, 研究成果不多, 工程应用实例甚少。

在目前的扰动状态本构模型研究成果中, 现有扰

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK2007070)

收稿日期: 2009-04-09

动变量的表征和测定还存在一些缺陷和不足, 有进一步深化研究的必要。具体而言, 在现有扰动变量的表征和测定中, 有的缺乏合适的测试设备探入材料内部进行测量, 有的操作技术难度高, 不够方便快捷, 有的价格昂贵, 难以在实际工程应用中得以普及与推广。鉴于此, 本文尝试运用简便快捷、经济实用、连续无损的电阻率不规则因子来进行扰动变量的表征和测定。

土电阻率是表征土导电性的基本参数, 是土的固有物性参数之一。电阻率测试法有着快速、经济、便捷、无损、连续的显著优势, 故近年来诸多学者采用电阻率法来定量描述土的结构性及变化情况^[15]。Jackson等^[16]提出电阻率不规则因子概念, 将其定义为 $\Delta\rho_i = (\rho_i - \rho_0)/\rho_0$, 其中 $\Delta\rho_i$ 为电阻率不规则因子, ρ_0 , ρ_i 分别为初始电阻率和实时电阻率; 通过历时 18 个月电阻率不规则因子的现场监测, 揭示了路堤中的异常结构。Samouelian等^[17]通过测试黄土地在干湿循环产生裂隙过程中, 不同方向和深度上的电阻率变化, 得到了土块的裂隙发展和发育规律。Samouelian等^[18]采用锯土样的方法, 使土样裂隙在不同阶段不断增加, 并测量相应的电阻率不规则因子变化情况, 从而成功描述了土样的结构变化过程。尽管目前尚未发现电阻率指标应用于土结构性本构模型研究的报道, 但上述工作表明, 电阻率不规则因子能够有效地反映土的结构性及其变化, 具备表征和测定结构性扰动变量的良好研究基础。

另外, 在目前的扰动状态本构模型研究成果中, 一般多只考虑偏应变扰动的影响。而对于受力后会明显发生体应变的土体材料, 忽略其体应变扰动影响是欠妥的。另外, 在现有成果中, 在扰动函数的构建方面, 目前采用的主要途径是通过土力学基本原理或数学演绎手段构建扰动函数, 主观假定较多, 缺乏理论和试验依据, 使得扰动函数及其参数的确定存在一定的困难。

本文通过大量试验, 构建兼顾体应变扰动影响和偏应变扰动影响, 且有试验与理论依据的扰动函数, 模拟结构性软土受荷变形过程中的扰动过程。在以上基础上, 最终建立一个物理基础明确, 参数易于确定, 能较准确模拟天然软黏土实际工程情况的结构性应力-应变本构模型。并通过试验资料对所构建的模型进行验证。

1 模型构建

1.1 相对完整状态

对于相对完整状态下的结构性软黏土, 土的结构基本上没有发生扰动, 考虑参数获取的简易型, 可近似地采用弹性理论模型描述相对完整状态。

根据修正剑桥模型^[19-20], 土弹性增量矩阵形式的本构关系式为

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_v^i \\ d\varepsilon_d^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/K & 0 \\ 0 & 1/3G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp' \\ dq \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, K 为体积模量, G 为剪切模量。

$$K = \frac{v^i p'}{\kappa^i}, \quad (2)$$

$$G = \frac{3(1-2\nu)K}{2(1+\nu)}, \quad (3)$$

$$v^i = 1 + e^i, \quad (4)$$

$$e^i = e_0 - \kappa^i \ln p'. \quad (5)$$

式中 上标 i 表示相对完整状态; κ^i 为相对完整状态土在 $e^i - \ln p'$ 平面中的斜率, 可由未扰动样在 $e - \ln p'$ 平面上初始弹性部份的斜率近似求得; v^i 为相对完整状态土的比容; e^i 为相对完整状态土的孔隙比; e_0 为土初始孔隙比; ν 为泊松比; p' 为有效球应力; q 为剪应力。

1.2 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。本文采用修正剑桥模型来描述完全调整状态。

修正剑桥模型的屈服面方程为

$$F = p'[1 + \frac{q^2}{M^2 p'^2}] - p'_{eq} = 0, \quad (6)$$

即

$$\frac{p'}{p'_{eq}} = \frac{M^2}{M^2 + \eta^2}. \quad (7)$$

式中应力比 $\eta = q/p'$, 对式 (7) 进行微分, 可得

$$\frac{dp'}{p'} + \frac{2\eta}{M^2 + \eta^2} d\eta - \frac{dp'_{eq}}{p'_{eq}} = 0. \quad (8)$$

$$\text{即 } (\frac{M^2 - \eta^2}{M^2 + \eta^2}) \frac{dp'}{p'} + (\frac{2\eta}{M^2 + \eta^2}) \frac{dq}{p'} - \frac{dp'_{eq}}{p'_{eq}} = 0. \quad (9)$$

在剑桥模型中, 假设土体是加工硬化材料, 并服从相关联流动法则, 塑性势函数与屈服面函数相同, 则

$$\frac{d\varepsilon_d^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{\partial F / \partial q}{\partial F / \partial p'} = \frac{2q}{M^2(2p' - p'_{eq})} = \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2}. \quad (10)$$

修正剑桥模型应力应变增量形式为:

体应变

$$d\varepsilon_v^c = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p = \kappa \frac{dp'}{v^c p'} + (\lambda - \kappa) \frac{dp'_{eq}}{v^c p'_{eq}}; \quad (11)$$

偏应变

$$d\varepsilon_d^c = d\varepsilon_d^e + d\varepsilon_d^p = \frac{2(1+\nu)}{9(1-2\nu)} \kappa \frac{dq}{v^c p'} + \left[\frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \right] (\lambda - \kappa) \frac{dp'_{eq}}{v^c p'_{eq}}, \quad (12)$$

$$v^c = 1 + e^c, \quad (13)$$

$$e^c = e_0 - (\lambda - \kappa) \ln p'_{eq} - \kappa \ln p'. \quad (14)$$

式中 c 代表完全调整状态; λ , κ 分别为完全调整状态土的压缩指数、回弹指数; e_0 为土初始孔隙比。

把式(9)代入式(11), (12), 可得剑桥模型的弹塑性应力应变增量矩阵方程, 即完全调整状态的土的应力应变增量形式

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_v^c \\ d\varepsilon_d^c \end{bmatrix} = \frac{1}{v^c (M^2 + \eta^2) p'} \begin{bmatrix} \lambda M^2 + (2\kappa - \lambda) \eta^2 & 2(\lambda - \kappa) \eta \\ 2(\lambda - \kappa) \eta & (\lambda - \kappa) \left[\frac{4\eta^2}{M^2 - \eta^2} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp' \\ dq \end{bmatrix}. \quad (15)$$

1.3 扰动变量的表征和测定

笔者尝试用电阻率不规则因子来表征和测定软黏土受荷变形下的扰动变量。因土体的扰动除包括偏应变扰动外, 还应包括体应变扰动, 故分别定义其体积应变扰动变量和偏应变扰动变量。

体应变扰动变量

$$D_v = \frac{\Delta\rho_{t0} - \Delta\rho_t}{\Delta\rho_{t0} - \Delta\rho_{ta}}, \quad (16)$$

其中, $\Delta\rho_{t0}$, $\Delta\rho_t$, $\Delta\rho_{ta}$ 分别为未扰动土样、扰动样、重塑土样球电阻率不规则因子。其中,

$$\Delta\rho_t = \frac{\rho_t - \rho_{t0}}{\rho_{t0}}, \quad (17)$$

式中, ρ_{t0} , ρ_t 分别为未扰动样和扰动样的球电阻率,

$$\rho_t = \frac{\rho_v + 2\rho_h}{3}, \quad (18)$$

ρ_v , ρ_h 分别为土样的竖向电阻率和水平向电阻率。

偏应变扰动变量

$$D_d = \frac{\Delta\rho_{d0} - \Delta\rho_d}{\Delta\rho_{d0} - \Delta\rho_{da}}, \quad (19)$$

其中, $\Delta\rho_{d0}$, $\Delta\rho_d$, $\Delta\rho_{da}$ 分别为未扰动土样、扰动样、重塑土样偏电阻率不规则因子。其中,

$$\Delta\rho_d = \frac{\rho_d - \rho_{d0}}{\rho_{d0}}, \quad (20)$$

式中, ρ_{d0} , ρ_d 分别为未扰动样和扰动样的偏电阻率,

$$\rho_d = \rho_v - \frac{\rho_t}{3}. \quad (21)$$

由上述公式中可知, 对于未扰动土, 即相对完整状态的土, $D_v=0$, $D_d=0$; 对于重塑土, 即完全调整

状态的土, $D_v=1$, $D_d=1$, 也就是 D_v , D_d 满足小于等于 1 大于等于 0 这个条件。

1.4 扰动函数

扰动函数是描述土样从相对完整状态变为完全调整状态的动态过程, 是反映结构性软黏土受荷扰动中其结构逐渐破坏的动态过程, 是建立结构性软黏土扰动状态应力应变本构模型的关键所在。

土体的扰动除包括偏应变扰动外, 还应考虑体应变扰动。假设土体体积应变扰动只与体积应变相关, 偏应变扰动只与偏应变相关。

为了构建体应变扰动函数和偏应变扰动函数, 进行了三轴排水试验, 并对三轴仪进行了改装, 使得在三轴试验当中能同步测土样的电阻率变化情况^[21]。试验结果表明, 体应变扰动变量 D_v 与体应变, 偏应变扰动变量 D_d 与偏应变有着紧密的相关关系, 相关关系图见图 1, 2 所示。相关关系式为

$$D_v = 1 - \exp[-(a\varepsilon_v^2 + b\varepsilon_v)] \quad (22)$$

$$D_d = 1 - \exp[-(m\varepsilon_d^2 + n\varepsilon_d)] \quad (23)$$

其中, a , b , m , n 为土参数。

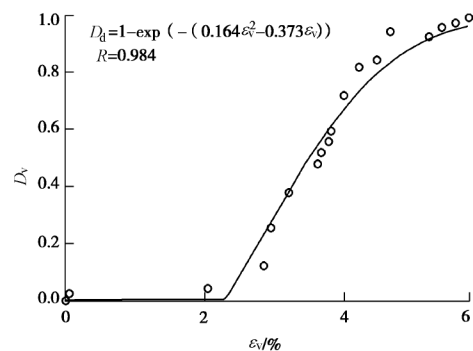


图 1 D_v 与体应变关系图

Fig. 1 Relationship between D_v and volumetric strain

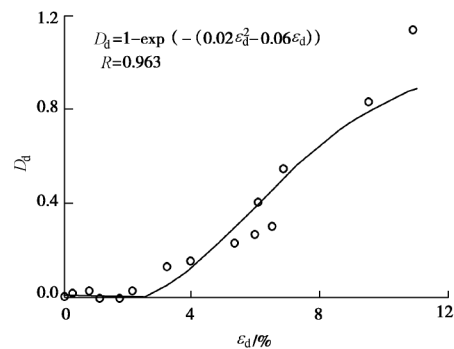


图 2 D_d 与偏应变关系图

Fig. 2 Relationship between D_d and deviatoric strain

从上面公式可知, 当土在未扰动状态, 即相对完

整状态时, $\varepsilon_v = 0$, $\varepsilon_d = 0$, $D_v = 0$, $D_d = 0$; 当土在重塑土状态, 即完全调整状态时, ε_v , ε_d 很大, D_v , D_d 趋于 1。

1.5 扰动状态本构方程

土体的总变形为相对完整状态和完全调整状态的变形叠加, 即^[22]

$$\varepsilon_{ij} = (1 - D_\varepsilon)\varepsilon_{ij}^i + D_\varepsilon\varepsilon_{ij}^c \quad (24)$$

对式 (24) 进行微分得扰动状态概念模型增量方程

$$d\varepsilon_{ij} = (1 - D_\varepsilon)d\varepsilon_{ij}^i + D_\varepsilon d\varepsilon_{ij}^c + dD_\varepsilon(\varepsilon_{ij}^c - \varepsilon_{ij}^i) \quad (25)$$

式中, ε_{ij} 为应变张量, D_ε 为扰动函数。

故, 基于扰动状态概念的应变增量方程为:

体应变增量方程

$$d\varepsilon_v = (1 - D_v)d\varepsilon_v^i + D_v d\varepsilon_v^c + dD_v(\varepsilon_v^c - \varepsilon_v^i) \quad (26)$$

偏应变增量方程

$$d\varepsilon_d = (1 - D_d)d\varepsilon_d^i + D_d d\varepsilon_d^c + dD_d(\varepsilon_d^c - \varepsilon_d^i) \quad (27)$$

将式 (1)、(22)、(15)、(23) 分别代入式 (26)、(27), 可得基于扰动状态概念结构性软黏土应力应变本构关系式。

2 模型参数的确定

模型中共有 10 个参数, 如表 1 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 1 模型参数

Table 1 Model parameters

相对完整状态	完全调整状态	扰动函数参数
e_0, κ^i, ν	λ, κ, M	A, b, m, n

(1) 相对完整状态参数的确定

κ^i 为相对完整状态土在 $e^i - \ln p'$ 平面中的斜率, 可由未扰动样在 $e - \ln p'$ 平面上初始弹性部份的斜率近似求得。

(2) 完全调整状态参数的确定

M, λ, κ 三个模型参数的确定等同于修正剑桥模型部分。

(3) 扰动函数参数的确定

式 (22)、(23) 中的参数 a, b, m, n 可通过常规三轴试验及其同步的电阻率测试数据拟合得到。

表 2 连云港海相软土模型参数

Table 2 Model parameters of Lianyungang soft clay

e_0	κ^i	ν	λ	κ	M	a	b	m	n
1.681	0.005	0.432	0.439	0.032	0.77	0.164	-0.373	0.02	-0.06

3 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及其同步的电阻率测试基础上得到软土样试验参数, 如表 2 所示。把模型参数代入应变偏微分方程式 (1) 和式 (15), 对于常规三轴压缩排水试验, 方程中的 $\eta = q/p' = 3$, 可得相对完整状态体应变和完全调整状态体应变增量方程

$$d\varepsilon_v^i = \frac{dp'}{K} = 0.0019dp' \quad (28)$$

$$d\varepsilon_v^c = \frac{dp'}{(1.548 - 0.439 \ln p') \times 2.277 p'} \quad (29)$$

偏应变增量方程为

$$d\varepsilon_d^i = \frac{0.0117dq}{(2.681 - 0.005 \ln p') p'} \quad (30)$$

$$d\varepsilon_d^c = \frac{0.633dp'}{(1.548 - 0.439 \ln p') \times 9.59 p'} \quad (31)$$

积分并考虑初始条件可得

$$\varepsilon_v^i = 0.0019p' \quad (32)$$

$$\varepsilon_d^i = \frac{0.0117q}{(2.681 - 0.005 \ln p') p'} \quad (33)$$

$$\varepsilon_v^c = -\ln(1.548 - 0.439 \ln p') \quad (34)$$

$$\varepsilon_d^c = -0.7728 \ln(1.548 - 0.439 \ln p') \quad (35)$$

另外, 把模型参数代入扰动函数 (22), (23), 可得

$$D_v = 1 - \exp(-(0.2568\varepsilon_v^2 - 0.6525\varepsilon_v)) \quad (36)$$

$$D_d = 1 - \exp(-(0.01\varepsilon_d^2 - 0.0031\varepsilon_d)) \quad (37)$$

对式 (36), (37) 进行微分, 可得

$$dD_v = \exp(-(0.2568\varepsilon_v^2 - 0.6525\varepsilon_v)) \cdot (0.5136\varepsilon_v - 0.6525) \quad (38)$$

$$dD_d = \exp(-(0.01\varepsilon_d^2 - 0.0031\varepsilon_d)) \cdot (0.02\varepsilon_d - 0.0031) \quad (39)$$

把式 (28) ~ (39) 分别代入式 (26), (27), 可得模型的体应变增量方程和偏应变增量方程, 结合初始条件, 可求出结构性软黏土应力应变本构关系。所求的本构模型计算结果、剑桥模型计算结果与三轴试验的应力应变实测曲线见图 3、图 4 所示。

图 3、4 表明, 扰动状态模型计算值与试验值较为吻合, 而修正剑桥模型计算值与试验值相差较大。

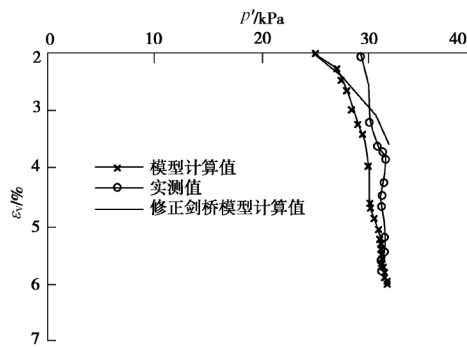


图 3 体应变模型计算值与试验值比较

Fig. 3 Comparison between calculated and test values of volumetric strain

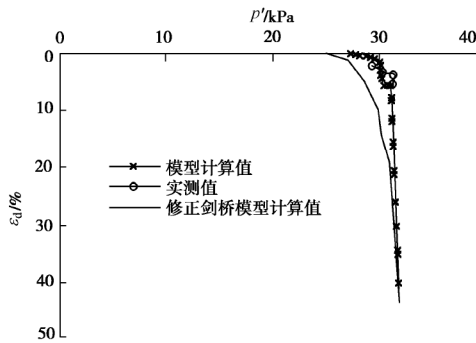


图 4 偏应变模型计算值与试验值比较

Fig. 4 Comparison between calculated and test values of deviatoric strain

4 结 论

(1) 在扰动状态概念的基础上, 建立了一个可以考虑土结构性影响的软黏土应力应变本构模型。模型形式相对简单, 参数易于确定。模型的试验验证表明, 所构建的模型能较为合理地模拟结构性软黏土受荷扰动下的变形过程。

(2) 尝试运用土电阻率不规则因子来表征和测定土样的扰动变量, 优化了扰动变量的获取方法, 使之简便快捷、经济实用, 从而有利于模型在实际工程中的推广应用。

(3) 增加了土体体积应变对土体扰动的影 响, 且以试验和理论为依据, 建立扰动函数, 从而使得模型更加符合土体的实际力学特性, 更加合理化。

(4) 本文的一些试验是探索性试验研究, 试验精

度还有待于进一步提高。

参考文献:

- [1] 沈珠江. 软黏土工程特性和软黏土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100 - 111. (SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 100 - 111. (in Chinese))
- [2] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35 - 41. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. A constitutive law considering soil structural properties[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 35 - 41. (in Chinese))
- [3] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 21 - 28. (SHEN Zhu-jiang. An elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 21 - 28. (in Chinese))
- [4] GENS A, NOVA R. Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks[C]// Proc Int Symp on Geomechanical Engineering of Hard Soils and Soft Rocks. Athens: A A Balkema, 1993: 485 - 494.
- [5] KOSKINEN M, KARSTUNEN M, WHEELER S J. Modelling destructuration and anisotropy of a natural soft clay[C]// Proc 5th European Conf on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2002). Paris: Presses de l'ENPC, 2002: 11 - 20.
- [6] ZENTAR R, KARSTUNEN M, WHEELER S J. Influence of anisotropy and destructuration on undrained shearing of natural clays[C]// Proc 5th European Conf on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2002). Paris: Presses de l'ENPC, 2002: 21 - 26.
- [7] CUDNY M. Simple multi-laminate model for soft soils incorporating structural anisotropy and destructuration[C]// Proc Int Workshop on Geotechnics of Soft Soils: Theory and Practice, Noordwijkerhout, VGE, 2003.
- [8] DESAI C S. A consistent finite element technique for work softening behavior[C]// Proc Int Conf on Computer Methods in Nonlinear Mechanics, University of Texas, Austin, TX, 1974.
- [9] DESAI C S, TOTH J. Disturbed state constitutive modeling based on stress-strain and nondestructive behavior[J].

- International Journal of Solids and Structures, 1996, **33**(11): 1619 - 1650.
- [10] DESAI C S. Mechanics of materials and interfaces: the disturbed state concept[M]. Boca Raton: CRC Press L L C, 2001: 77 - 78.
- [11] ARMALEH S H, DESAI C S. Modeling and testing of cohesionless material using disturbed state concept[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 1994, **5**: 279 - 295.
- [12] SURAJIT P A L, WATHUGALA G Wije. Disturbed state model for sand-geosynthetic interfaces and application to pull-out tests[J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, **23**: 1873 - 1892.
- [13] KATTI D R, DESAI C S. Modeling and testing of cohesive soil using disturbed state concept[J]. J Engng Mech, 1995, **121**(5): 648 - 658.
- [14] FAKHARIAN K, EVGIN E. Elasto-plastic modeling of stress- path-dependent behavior of interfaces[J]. Int J Numer Anal Mech Geomech, 2000, **24**: 183 - 199.
- [15] SAMOUELIAN A B, I. COUSIN A A, TABBAGH C A, BRUAND D G, Richard E. Electrical resistivity survey in soil science: a review[J]. Soil and Tillage Research, 2005, **83**(2): 173 - 193.
- [16] JACKSON P D, NORTHMORE K J, MELDRUM P I, GUNN D A, HALLAM J R, WAMBURA J, WANGUSI B, OGUTU G. Non-invasive moisture monitoring within an earth embankment - a precursor to failure[J]. NDT&E International, 2002, **35**: 107 - 115.
- [17] SAMOUELIAN A, COUSIN I, RICHARD G, TABBAGH A, BRUAND A. Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale[J]. Soil Sci Soc J Am, 2003, **67**: 1319 - 1326.
- [18] SAMOUELIAN A, RICHARD Guy, COUSIN Isabelle. Can electrical resistivity tomography describe soil structure evolution?[C]// 16th Triennial Conference of the ISTRO, Brisbane, Australia, 2003.
- [19] WOOD D M. Soil behavior and critical state soil mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [20] LIU M D, CARTER J P. A structured cam clay model[R]. Sydney: Center for Geotechnical Research, Sydney University, 2002.
- [21] YU Xiao-jun, SHI Jian-yong. Research on the disturbed state concept for soft clay roadbed[C]// GeoHunan International Conference, 2009.
- [22] DESAI C S. Constitutive modeling using the disturbed state concept as microstructure self adjustment concept[M]// Continuum Models of Materials with Microstructure. New York: Wiley, 1995.
- ~~~~~

本期广告索引

彩色广告	封 2	北京金土木软件技术有限公司
	封 3	北京理正软件设计研究院有限公司
	封 4	上海分元土木工程科技有限公司