

上海粉质粘土的三轴 CT 实时细观试验

孙 红^{1, 2}, 葛修润^{1, 2}, 牛富俊¹, 蒲毅彬¹, 马 巍¹

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑学院, 上海 200030)

摘要: 采用 CT 实时试验对上海粘性土的三轴应力条件下的特性进行系统的试验研究。研究表明, 上海灰色粉质粘土在三轴应力下细观变形基本上分为 4 个阶段, 即微裂纹压密阶段, 初期损伤阶段, 损伤快速发展阶段和软化破坏阶段。粉质粘土初始状态为不均一的和初始损伤, 受力过程中以局部变形为主, 灰色粉质粘土的破坏是由于产生局部变形, 形成剪切带造成的, 裂纹在峰值强度及峰值强度后完全形成的。

关键词: 土力学; 结构性土; CT 试验; 损伤; 局部变形; 细观试验

中图分类号: TU 442

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)24 - 4559 - 06

REAL-TIME CT MESO-TESTING ON SHANGHAI SILTY CLAY SUBJECTED TO TRIAXIAL LOADING

SUN Hong^{1, 2}, GE Xiu-run^{1, 2}, NIU Fu-jun¹, PU Yi-bin¹, MA Wei¹

(1. *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;* 2. *School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

Abstract: Studies on silty clay subjected to triaxial loading by using real-time computed tomography(CT) scanning experiment are carried out. Based on the CT-number and CT images, it is shown that the stress-strain curve of soil can be divided into four stages—micro-defects closing stage, initial damage stage, rapid damage development stage, and softening failure stage. Silty clay is a typically nonuniform and original damaged material. During loading process, local deformation is formed; and the failure of soil is caused by local deformation and formation of shear band. Macro-fissure will be completely generated at the peak and post-peak of strength.

Key words: soil mechanics; structured soil; computed tomography(CT) test; damage; local deformation; meso-testing

1 引 言

结构性土体的细观试验研究是一项基础性前沿课题, CT 实时检测试验可以为岩土体破坏机理的研究提供可靠的试验手段。20 世纪 90 年代, 计算机扫描技术(CT)在岩土介质细观结构研究中开始发挥

越来越重要的作用。文[1]用立体摄像测量技术研究松砂试样在不排水和排水条件下剪切带的发展。文[2, 3]用 CT 研究砂土。文[4]用工业 X 射线 CT 扫描机研究无侧限压缩土的破坏。但以上的研究中都是在卸载后把试样放到 CT 机上进行扫描, 此方法无法消除循环加卸载对试验结果的影响, 没有达到实时 CT 扫描的目的。文[5, 6]开展了岩石全过程

收稿日期: 2004 - 07 - 06; **修回日期:** 2004 - 10 - 08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10172057); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室资助项目

作者简介: 孙 红(1970 -), 女, 博士, 1999 年于同济大学岩土工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事土力学与基础工程方面的教学与研究工作。E-mail: sunhong@sjtu.edu.cn。

的 CT 实时试验; 文[7~10]对土体进行实时扫描细观研究, 均取得重要成果。

利用 CT 对结构性土的细观特性和损伤扩展机理进行研究, 可为结构性土的宏观性质研究提供重要的试验基础。

2 CT 实时细观三轴试验概况

2.1 试验设备

本文试验所采用的是中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室的 SIEMENS SOMATOM plus 型 X 射线螺旋 CT 机, 其空间分辨率是 $0.35\text{ mm}\times 0.35\text{ mm}$, 识别的最小体积为 0.12 mm^3 (层厚 1 mm), 密度对比分辨率为 0.3% (3 Hu)。三轴试验采用多功能中低压三轴试验设备, 压力室主要由非金属材料制作, 满足 CT 扫描要求。

2.2 试验方法

试验为三轴固结不排水剪试验。试样固结约 24 h 后, 进行不排水剪试验。剪切轴向应变速率为 0.2 mm/min 。固结压力分别为 100, 300 和 500 kPa , 为了避免漏气, 预加给试样的轴向力为 100 N 。采用间断定位扫描方法进行扫描。根据轴向位移确定扫描时间, 并对断面进行跟踪扫描。试样的扫描层从上到下分 4 个层次。

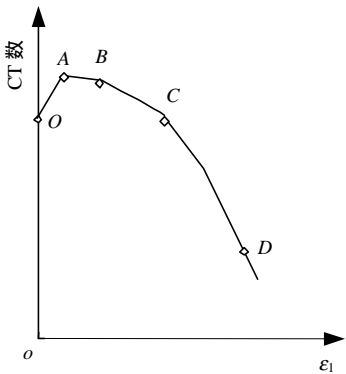
2.3 试验土样及制备

土样取自金山金玉良苑工地, 埋深为 $-16\sim -18\text{ m}$ 。原状土土样为 $\phi 125\text{ mm}\times 61.8\text{ mm}$ 的圆柱体。各试样的物理力学指标见表 1。

3 粉质粘土的 CT 实时细观三轴试验

通过固结不排水剪切的 CT 实时试验, 可得到受荷时上海灰色粉质粘土中微孔洞被压密, 微裂纹萌生、分叉、剪切带破坏和卸载等各个阶段清晰的 CT 图像。上海灰色粉质粘土在三轴应力下细观变形

基本上分为 4 个阶段, 即微裂纹压密阶段, 损伤开始阶段, 损伤发展和软化破坏阶段, 见图 1。



OA—微裂纹压密; AB—损伤开始; BC—损伤快速发展; CD—软化破坏
图 1 粉质粘土在三轴应力下细观变形全过程示意图
Fig.1 Schematic plan of the whole meso process for silty clay subjected to triaxial loading

试样的三轴不排水剪切试验的应力 - 应变关系见图 2。整个试样的 CT 数均值与应变的关系见图 3, 扫描照片见图 4~6, 扫描照片中黑色为高密度区, 白色为低密度区。各土样的各层在不同应变水平的 CT 数均值和方差见图 7~11。现在对三轴试验的土的细观特征进行描述。

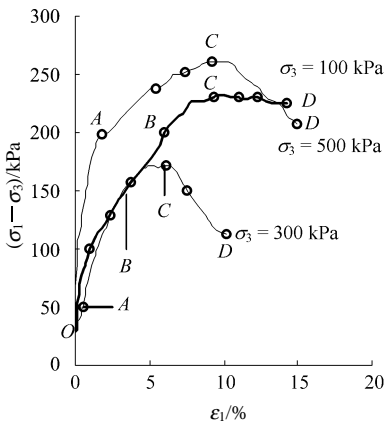


图 2 粉质粘土不排水剪切试验的应力 - 应变关系
Fig.2 Curves of stress versus axial strain of silty clay

表 1 试验土样的基本参数
Table 1 Basic parameters of specimens

土样 编号	土样名称	容重 γ / $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	含水量 w /%	比重 G_s	孔隙比 e	饱和度 S_r /%	液性 指数 I_L /%	塑性 指数 I_P /%	固结压力 σ_3 /kPa
ST-1	灰色粉质粘土	18.0	41.87	2.73	1.152	99.2	1.88	13.64	100
ST-2	灰色粉质粘土	18.4	37.72	2.73	1.043	98.7	1.39	14.31	300
ST-3	灰色粉质粘土	18.4	37.72	2.73	1.043	98.7	1.39	14.31	500

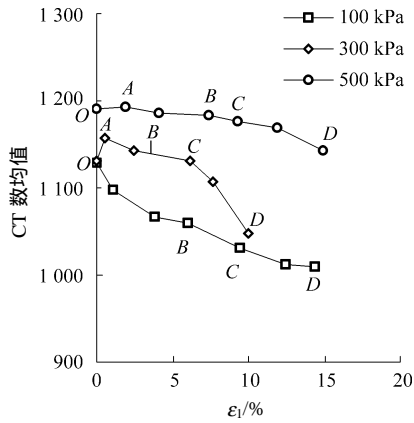


图 3 粉质粘土的整体 CT 数均值与应变的关系

Fig.3 Global average of CT-number versus axial strain of silty clay

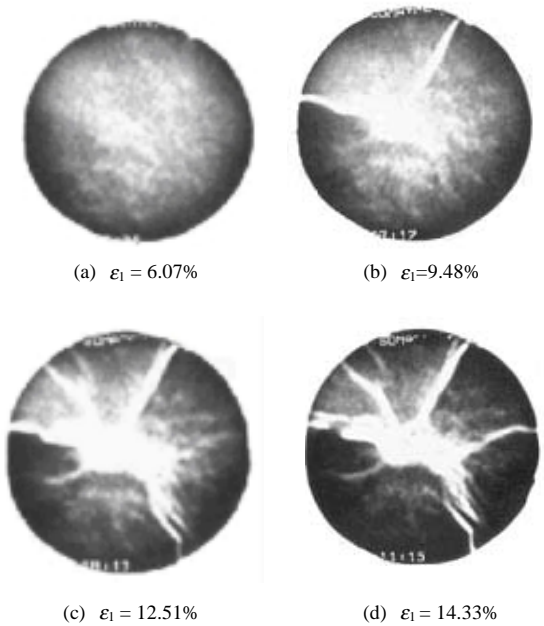


图 4 不同应变水平下 ST - 1 的第 2 层 CT 扫描照片

Fig.4 CT photographs of the second scanning slice at the different strain levels for ST - 1

土的初始状态特征,从照片上看,试样内部有许多微孔隙、微裂纹、空洞等,就是扫描层面上局部部位出现亮点的区域,见图 5(a)。同一试件的不同层面 CT 数均值不同,即各层面密度不同,土样初始状态为不均匀性的,见图 7, 9, 11。

微裂纹压密阶段(OA)。有轻微压密现象,整体的 CT 数均值轻微上升。ST - 2 和 ST - 3 都有此阶段,分别见图 9, 11。ST - 2 应变为 0.53%时,第 1, 2, 3 层有轻微压密现象,第 3 层 CT 数方差增大,新微裂纹在增多,同一土样各个部位的变形是不同的。

损伤开始阶段(AB)。整体的 CT 数均值降低,

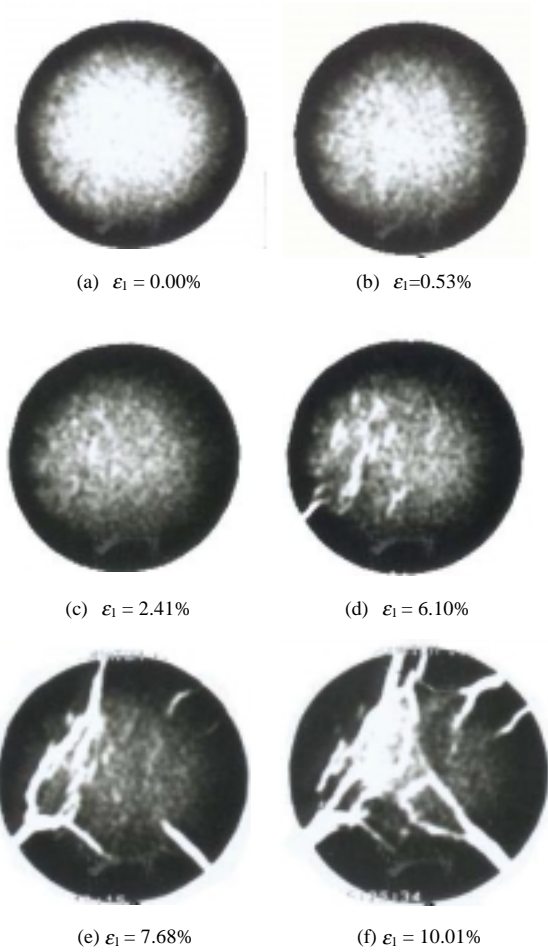


图 5 不同应变水平下 ST - 2 的第 2 扫描层的 CT 照片

Fig.5 CT photographs of the second scanning slice at the different strain levels for ST - 2

旧的微裂隙和空洞等逐渐扩展、增大,新的微孔隙、微裂隙产生,损伤开始发生。从局部看,试样 ST - 2 在 $\epsilon_1 = 2.41\%$ 时,第 1, 2 层仍有压密现象,CT 数均值上升;从照片看第 2 层局部微孔隙有增大、扩展和伸长现象。ST - 3 第 1 层在轴向应变为 4.10%时 CT 数均值仍有上升的趋势,即存在压密现象。土样在同一荷载作用下,各部位变形不相同,局部压密和微裂纹扩展同时存在。

损伤快速发展阶段(BC)。整体的 CT 数均值降低,微裂纹和空洞扩展,并且微裂纹有连接现象,损伤快速发展。ST - 1 应变为 6.07%时,微裂纹和空洞扩展,并且微裂纹有连接现象,整体的 CT 数均值在下降。第 2 层在应变 6.07%~9.48%阶段,CT 数均值下降很快,方差快速增大。应变为 9.48%时,接近峰值强度,剪切带完全形成。微裂纹扩展,彻底连接并形成大的裂纹。第 2 层明显出现白的宽裂纹,呈“V”型,试样的微裂纹发展、连接和贯通是在峰值强度(应变为 9.48%)完成的。

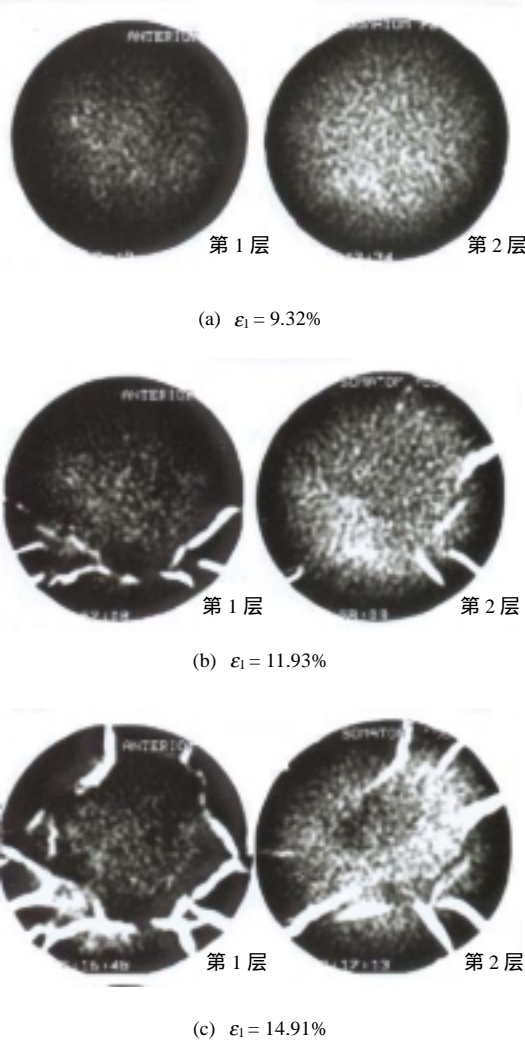


图6 不同应变水平下ST-3的第1和2层的CT照片
Fig.6 CT photographs of the first and second scanning slices at the different strain levels for ST-3

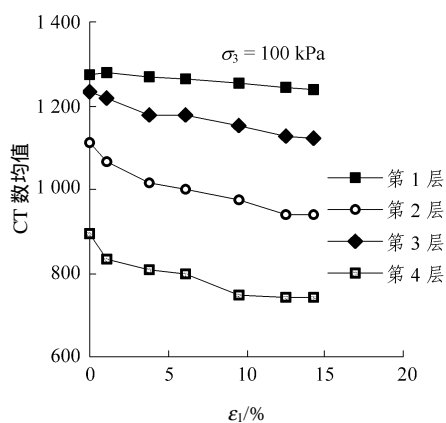


图7 ST-1的各层CT数均值与应变的关系
Fig.7 Average of CT-number versus axial strain of ST-1

ST-2, 当应变为 2.41%时, 第2层微裂隙已经有连接现象; 当应变为 6.10%时, 微孔隙伸长、连接, 已成为大的裂纹。对 ST-3, 当应变为 9.32%时,

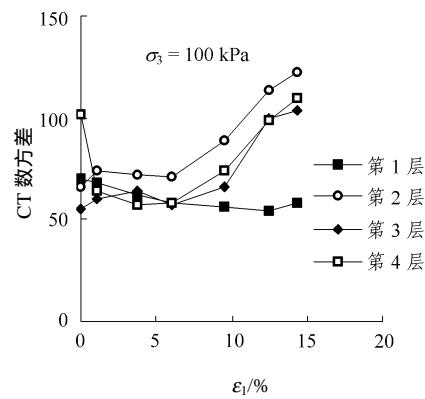


图8 ST-1的各层CT数方差与应变的关系
Fig.8 Variance of CT-number versus axial strain of ST-1

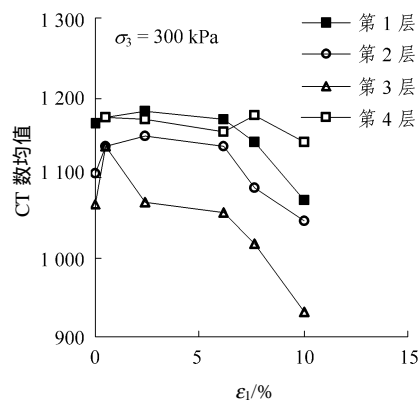


图9 ST-2的各层CT数均值与应变的关系
Fig.9 Average of CT-number versus axial strain of ST-2

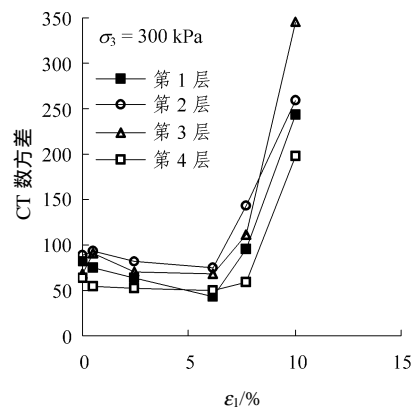


图10 ST-2的各层CT数方差与应变的关系
Fig.10 Variance of CT-number versus axial strain of ST-2

有微裂纹连接和贯通现象, 但程度不大。

软化破坏阶段(CD)。峰值后损伤快速发展, 微裂隙连接、横纵向贯通, 宏观裂纹继续扩展变宽, 整体的CT数均值迅速下降, CT数方差快速上升。ST-1, 当应变为 12.51%, 14.33%时, 裂纹继续扩展变宽, 第2层出现多分叉宽的裂纹。ST-2, 当应变为 7.68%时, 各层出现明显的宽的裂纹, 当第2

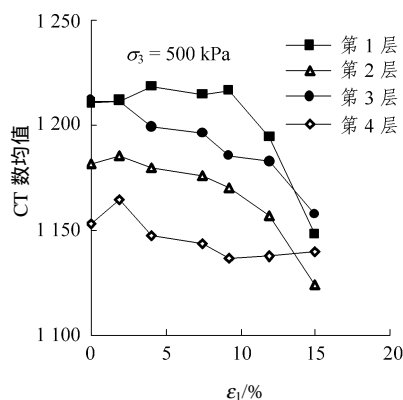


图 11 ST-3 的各层 CT 数均值与应变的关系

Fig.11 Average of CT-number versus axial strain of ST-3

层裂纹呈三角形；当应变为 10.01% 时，裂纹继续发展、连接和贯通，CT 数方差增大到 201.17。

ST-3，当应变为 11.93% 时，第 1, 2 层出现宽的多分支裂纹，从边缘开始的，然后扩展；当应变为 14.91% 时，微裂纹进一步连接贯通，并生成更多新的宽裂纹。

从试验中可知，粉质粘土在受荷过程中，首先在各个层位不同的低密度区形成微小裂纹，在外力的作用下，微小裂纹逐渐发生水平向和竖直向的贯通。对比 4 个层位的不同加载阶段，可以发现土样变形或破坏首先从低密度区开始。ST-1 宏观裂纹从土样内部微小裂纹开始发生的，而没有从试样边缘缺陷开始的。估计是固结压力小，土样的约束力小，土的内部联结较弱，所以宏观裂纹从土样内部出现。ST-2 和 ST-3 宏观裂纹先从边缘开始，再与内部微裂纹连接、贯通。估计大的固结压力引起土的颗粒排列致密，联结加强，所以破坏从边缘开始。

宏观裂纹发展、连接、贯通在峰值强度及峰值强度后完成的。从细观尺度看，灰色粉质粘土的破坏是由于产生局部变形，形成剪切带造成的，峰值点前已出现微裂纹轻微连接及贯通，即局部变形快速发展，峰值点及其以后裂纹强烈连接与贯通，即发生完全破坏。其中，对于 ST-3，宏观裂纹出现前，没有出现明显的宽长的微裂纹，是因为土样富含腐殖质的原因，整体密度是缓慢地下降，但局部层 CT 数均值下降较快。土样的卸荷软化，可以认为是局部变形及宏观裂纹的产生引起的，应属于结构软化。

上海灰色粉质粘土在三轴应力下细观变形基本

上可分为 4 个阶段，但由于土样的离散性，某些土样的细观变形只分 3 个阶段，如 ST-1 细观变形为 3 个阶段，即损伤开始(OB)、损伤发展(BC)和软化破坏阶段(CD)。ST-3 细观变形也为 3 阶段，即微裂纹压密(OA)、损伤发展(AC)和软化破坏阶段(CD)，见图 2, 3。

4 结 语

(1) 粉质粘土的各层面的 CT 数不同，密度不同，初始状态是不均匀性的，在变形过程中各个层面的 CT 数方差呈不规则波动，粉质粘土在受力过程中的变形也是不均匀变化的。

(2) 变形或破坏应当首先从低密度区开始，宏观裂纹的生成、贯通是从土样内部或边缘发展的，并在同一应力水平完成的。

(3) 在围压为 100~500 kPa，在三轴不排水剪切情况下，从细观尺度看，灰色粉质粘土的破坏是由于产生局部变形，形成剪切带造成的。宏观裂纹发展、连接、贯通在峰值强度及峰值强度后完成的。土样的卸荷软化，可认为是局部变形及宏观裂纹的产生引起的。

(4) 上海灰色粉质粘土在三轴应力下细观变形基本上分为四个阶段，即微裂纹压密阶段，损伤开始阶段，损伤快速发展阶段和软化破坏阶段。

(5) 土样开始处于被压密状态，密度有所增加，然后开始发生本质性变化，明显发生裂纹的伸长、分叉及有较多数量的新的微裂纹的萌生。可以这样推测：从细观力学得出的发生裂纹扩展、分叉及萌生的转折等是与破坏的门槛值的机制有内在的联系，这次试验试件数量还不多，扫描层数较少，许多工作有待深化。

参考文献(References):

- [1] Finno R J, Harris W W, Mooney M A, et al. Shear bands in plane strain compression of loose sand[J]. Geotechnique, 1997, 47(1): 149 - 165.
- [2] Desrues J, Chambon R, Mokni M, et al. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography[J]. Geotechnique, 1996, 46(3): 529 - 546.
- [3] Tani K. X-ray computed tomography technique to observe shear

- banding in dense sands[A]. In: Proc. of Int. Symp. on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics[C]. Nagoya: [s. n.], 1997. 315 - 320.
- [4] Otani J, Mukunoki T, Obara Y. Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils[J]. Soils and Foundations, 2000, 40(2): 111 - 118.
- [5] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩石三轴细观损伤演化规律的 CT 动态试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497 - 502.(Ge Xiurun, Ren Jianxi, Pu Yibin, et al. A real-time CT triaxial testing study of meso-damage evolution law of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497 - 502.(in Chinese))
- [6] Ding W, Wu Y. A real-time X-ray CT detecting of density damage increment of rock under compression condition[A]. In: Computer Methods and Advances in Geomechanics[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 2001. 993 - 996.
- [7] 李晓军, 张登良. 路基填土单轴受压细观结构 CT 监测分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(20): 205 - 209.(Li Xiaojun, Zhang Dengliang. Monitoring change of structure of road foundation soil in uniaxial compression test with CT[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(20): 205 - 209.
- [8] 蒲毅彬, 陈万业, 廖全荣. 陇东黄土湿陷过程的 CT 结构变化研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 49 - 54.(Pu Yibin, Chen Wanye, Liao Quanrong. Research on CT structure changing for damping process of loess in Longdong[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 49 - 54.(in Chinese))
- [9] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 原状膨胀土损伤演化的三轴 CT 试验研究[J]. 水利学报, 2002, (6): 106 - 112.(Lu Zaihua, Chen Zhenghan, Pu Yibin. Study on damage evolution of natural expansive soil with computerized tomography during triaxial shear test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (6): 106 - 112.(in Chinese))
- [10] 施 斌, 姜洪涛. 在外力作用下土体内部裂隙发育过程中 CT 研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 537 - 541.(Shi Bin, Jiang Hongtao. CT studies on inner fissure evolution of soil subjected to loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 537 - 541.(in Chinese))

书 讯

由中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会组织、赵维炳教授主编的《排水固结加固软基技术指南》一书已于 2005 年 10 月由人民交通出版社出版。该书共 20 万字, 由国内长期从事排水固结工作的科研、设计、施工、检(监)测及生产的有关专家经过多次研讨, 分工编写而成。该书共分排水固结加固地基设计、塑料排水产品、塑料排水产品质量检测和排水固结施工与验收四篇内容, 系统总结了排水固结法的设计方法、产品选用标准、产品质量检测及施工与验收等方面的技术成果, 体现了本项技术的目前发展现状与水平。该书在编写时注重内容的实用性, 强调为工程设计、施工服务, 具有较强的实用价值, 可供工程设计、施工人员在重点解决排水固结加固软基的技术问题时参考使用。同时工程排水与加固专业委员会还有部分《第六届全国工程排水与加固技术研讨会论文集》(人民交通出版社出版, 45 万字), 有需要以上书籍者(两书共计人民币 60 元)可与工程排水与加固专业委员会联系(联系电话: 025 - 85829527; 联系人: 高长胜)。

(中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会供稿)