

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.06.018

透明土及其在岩土工程模型试验中的应用研究进展

陈永辉^{1 2 3}, 齐昌广^{1 2}, 王新泉⁴, 陈 龙^{1 2}

(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. 河海大学岩土工程科学研究所 江苏 南京 210098 ; 3. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心 江苏 南京 210098 ; 4. 浙江大学城市学院 浙江 杭州 310015)

摘要 :介绍人工合成透明土体的发展及其在岩土工程模拟试验、土体连续变形测量方面的应用。结合离心机模型试验和数字图像处理技术在国内的发展 ,对实现由离心机、数字图像技术和透明土模型结合而成的非介入离心机模型试验进行了可行性分析 ,认为目前已具备开展非介入离心机模型试验的条件。

关键词 透明土 ;岩土工程 ;模型试验 ;非介入测量技术

中图分类号 :TU411.93 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2011)06-0069-05

Overview on transparent soil and its application in model tests in geotechnical engineering//CHEN Yong-hui^{1 2 3}, QI Chang-guang^{1,2}, WANG Xin-quan⁴, CHEN Long^{1,2}(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 4. City College, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

Abstract :The development of transparent synthetic soil and its application in model tests and deformation measurements in geotechnical engineering were introduced. Based on the development of the centrifugal model tests and the digital image processing technology in China , the feasibility was analyzed of realizing non-intrusive centrifugal model test by the combination of centrifuge , digital image technique and transparent soil model . The results show that the conditions for the non-intrusive centrifugal model tests have been achieved.

Key words :transparent soil ; geotechnical engineering ; model test ; non-intrusive measuring technology

在岩土工程模型试验中 ,观察和测量土体的受力变形常常需要在土体内植入各种仪器。测量土体在各种应力条件下的内部变形和空间变形时植入仪器的难度较大。传统方法一般是在正常固结和超固结条件下进行三轴压缩、固结和渗透试验以研究土体材料的特性 ,并通过在土体中植入各种压力传感器、位移传感器来观测土体的受力变形 ,但是却无法提供土体连续变形的信息 ,或者只能观测土体边界上的连续变形。另外 ,各类传感器很难展现土体的连续变形特征以及内部土体在变形过程中的变化^[1-2]。随着岩土工程模型试验的发展 ,一种可以测量土体连续变形的非介入式土工模型^[3]无需植入仪器就能观察并计算出土体的变形位移场。然而 ,由于天然土体是不透明的 ,非介入式测量技术发展缓慢。传统的方法主要是使用透明的有机玻璃箱 ,将土体倒入有机玻璃箱内通过透明窗观察土体的外表

面变形。这种方法的缺陷是有机玻璃与土体的摩擦会影响土体的变形性状 ,且只能观察到玻璃与土体接触面处土体的变形移动 ,无法了解内部土体的变形。若假设土体是透明的 ,则可以开展非介入式土工模型试验 ,因而需要一种人工合成透明土(以下简称透明土) ,其岩土力学特性与天然土体的特性相近 ,故能够模拟天然土体的岩土属性 ,同时能够展现其内部的受力变形过程。目前 ,关于透明土的研究在国外开展较早^[4-6] ,不仅对透明土的物理力学特性进行了室内三轴试验、直剪试验、固结试验等 ,还利用透明土进行了岩土工程方面的模型试验 ,而其在国内的发展缓慢^[1,7] ,且主要局限于透明土岩土特性方面的常规室内试验。

1 透明土的发展

关于透明土的发展可追溯到 20 世纪 80 年代 ,

那时主要是国外一些学者开始尝试采用透明材料模拟特定的土料进行模型试验,研究其相应的岩土特性。采用的材料大多是碎玻璃。例如,Allersma^[8]在1982年使用碎玻璃和具有相应折射率的流体制成的透明介质来研究单剪条件下材料的应力分布,其后Konagai等^[9]在1992年利用上述材料研究了地震荷载下饱和堤防的应力变化。试验结果表明,由碎玻璃合成的透明介质与天然土体差别很大,不能精确模拟天然土体的特性,主要表现在碎玻璃不具有吸附液体的能力,使得一部分空气残存在碎玻璃孔隙体间,影响了透明介质的透明性。真正意义上的透明合成土是透明泥浆,1990年Mannheimer^[10]利用透明泥浆模拟研究泥土的非牛顿流动问题。Iskander^[4,6]和Sadek等^[5]在随后的十几年里利用无定型硅石粉末和一种折射率相匹配的混合油(由白矿油和正构烷烃(石蜡)类溶剂按质量比1:1混合而成)在23℃的室内温度下混合成了一种无色透明的介质,并分别进行了一系列的室内试验,研究比较了透明介质与天然土体间的可比拟性,试验结果表明此种透明介质的物理力学性质具备了黏性土的一些特性。同时,也有透明介质能够模拟砂土的特性,Sadek^[11]采用粗细颗粒搭配的硅胶制作了不同颗粒级配的砂土。

在国内,透明土的发展缓慢,只有文献[1]详细研究了人工合成透明砂土的配置过程,介绍了各种原材料的物理化学性质,利用粒径在0.1~1mm的熔融石英砂和氯化钙溶液混合配成了透明介质,熔融石英砂的折射率为1.45843,氯化钙溶液的折射率与其质量分数呈线性关系,即 $n = 0.17K + 1.327$ (n 为折射率, K 为氯化钙溶液的质量分数)。当氯化钙溶液的质量分数为75.524%时,混合体的透明效果最好,并对不同密度和相同密度的透明砂土样和标准砂样进行了三轴试验,结果表明:在相同的围压下,同一应变值时相对密度大的试样其偏应力较大,不同相对密度试样的应力~应变曲线变化趋势几乎一致,相对密度大的试样其径向变形和体积应变随轴向应变的变化更快一些;在相同的相对密度和围压下,人工合成透明砂土与标准砂的应力~应变变化趋势和轴向应变~体积应变(径向应变)的变化趋势基本一致。以上结论表明,人工合成透明砂土完全具有自然砂土的应力应变特征。

透明土的配置及注意事项包括:①无定型硅的选择:无论是无定型硅粉还是无定型硅胶都是颗粒大小不同的无定型二氧化硅(熔融硅石),又可称之为非晶硅或沉淀硅石,其原子间的晶格网络呈无序排列,是硅的一种同素异形体,无定型硅石的原子排

列形式很多,微粒有透明和不透明2种,只有选择透明的微粒才能模拟天然土体的特征;②孔隙溶液的选择:选用的孔隙溶液要无色透明、稳定不易挥发且与孔隙水的性质相近,目前国内外常用的有埃克森美孚公司的产品Norpar12(由正构烷烃(石蜡)类溶剂和白矿油按质量比1:1混和)和氯化钙溶液(质量分数约为75.524%);③残存空气:透明土内残存空气会影响其透明性,因此配好的透明土应采用吸气设备进行吸气处理或放置于真空室进行去气处理;④室内温度:这主要表现在室内温度对孔隙溶液折射率的影响上,因为液体对温度的变化比固体更敏感,液体的折射率一般随温度的升高而降低,当室内温度在20~25℃时Norpar12的折射率与熔融石英的匹配最好,对于氯化钙溶液则宜在22℃左右。以上几个因素也是影响透明土透明度的主要原因,要制造出高质量的透明土就要合理选择原料,并进行排气处理,控制好室内温度和湿度,另外,液体的蒸发也会影响到透明土的透明度。

目前透明土研究还存在以下亟需解决的问题:一是透明土的岩土特性和其在岩土工程模型试验中的应用目前国内研究很少;二是透明土也具有自身的缺陷,如在大模型透明土试验中透明土的透明性弱化问题及配置好的透明土的干化、硬化问题。

2 透明土在岩土工程模拟试验中的应用研究进展

透明土是随着岩土工程试验的发展需求而产生的,国内对透明土所具备的岩土属性及其在具体岩土工程模拟试验中的表现研究较少,而国外则进行了大量的室内试验和模拟试验。Welker等^[12]在透明土中插入直径在10.2~30.0cm之间的预制排水通道,对土体的固结流变特性进行模拟试验,并在透明土中掺入一定量的染色油体,通过追踪染色油体的流动观测土体中孔隙水的消散过程,并进行有限元模拟及数学模型计算,与试验结果进行对比分析,结果表明:用透明土替代天然土体是可行的。Sadek等^[5,11]利用透明砂土替代天然砂土分别进行了相同固结比情况下松散砂土和密实砂土的固结排水三轴试验和不同固结比情况下的排水超固结试验,并进行了透明黏土与伦敦黏土的对比试验。结果表明:松散的透明砂具有应变硬化特性,密实的透明砂具有应变软化特性;固结度高的试样所表现出的负孔压较大,透明黏土的 $e-p$ 曲线与伦敦黏土的大体平行。Liu等^[13]对透明土的渗透和固结的流变特性进行了模型试验,结果表明精制提炼的无定形硅悬浮混合物表现出的岩土特性与黏土和泥炭相似。

Stanier^[3]采用透明土进行十字板剪切模型试验,研究了剪切板竖向插入及旋转时透明土的变形特征,测试结果所表现出的透明土的岩土特性与黏性土的极为相似。Ni等^[14]将模型桩插入到透明土模型中,建立了桩体打入黏土中的物理模型,模拟了桩体打入过程中土体的变形情况,采用数码相机抓拍下桩体打入时透明土的变形照片,并采用 PIC 技术分析图片,得到了桩体打入全过程的透明土的位移场分布状况,与 SSPM 方法计算结果具有良好的一致性。

3 透明土在土体连续变形测量方面的研究进展

透明土的应用方便了土体内部空间的连续变形测量,使得非介入光学可视技术^[3]能够应用到土体连续变形测量上。土体连续变形的观测难度较大,大多采用植入仪器的方式对土体的变形进行离散观测,但植入仪器会影响土体的受力变形,因而所得的数据不能真实反映土体的内部空间变形。

对天然土体的连续变形测量可追溯到 20 世纪六七十年代,Branby 等^[15]和 Kirpatrick 等^[16]首次采用 X 射线测量土体的空间变形和流动。Desrues^[17]和 Orsi 等^[18]在 90 年代引入 X 射线、CAT 扫描技术及核磁共振扫描等先进设备通过追踪土壤中的目标粒子获得了土样的非介入图片,然后采用基于图像的变形分析技术计算出目标粒子的变形轨迹,该方法的缺陷是试验设备价格昂贵,故发展受限。如前所述,透明土可以替代天然土体进行模型试验。加之随着计算机数字图像技术的发展,数字图像测量技术在岩土工程模型试验中得到了迅速的发展,并越来越多地被用于岩土工程变形测试^[2,7,11,14,19]。

根据在模型试验中是否使用物理量测标点,将基于数字照相与图像分析的变形量测法分为标点法和无标点法。无标点法在模型试验观测面上不需要布置量测标点或描画网格。在试验各阶段,利用数码相机或近景数码摄影进行照相和拍摄,然后利用数字图像相关(digital image correlation,简称 DIC)技术,通过对变形前后数字图像进行相关运算可获得土体变形的位移场,此法可以追踪土体试样的渐进性变形与破坏过程,能清晰地捕捉土体试样的变形模式、滑动剪切面的位置形状、变形局部化和剪切带特征。标点法一般通过计算标点质心以及位置变化来获得测点处的位移。相对于图像分析无标点量测法,标点法产生的时间早,在量测分析细观或微观变形方面比较困难,但是由于标点法不受观测对象的变形大小限制,图像处理运算量小,分析速度快,对于大比例模型试验具有一定的优越性^[2]。

国外许多学者结合透明土的模型试验和基于计算机的图像处理技术,使非介入式土体连续变形测量成为可能,如 Iskander 等^[4]对透明土样承受条形基础荷载下的变形进行了观察。将透明土样放置在透明的有机玻璃箱内,激光器和线发生器放在有机玻璃箱一侧,启动激光源,透过线发生器就会在透明土样横截面上形成一色斑面,在色斑面背景下,试验者可以清楚地观察到透明土样的变形过程,色斑面突出了在透明土样中的斑点图案,随着条形基础的压入,每隔一定时间可抓拍土样的变形,压入力的大小和压入量可分别采用荷载箱和线性差动变压器式位移传感器测得。变形过程的图片采用 DIC 技术分析,同时研究建议为了提高斑点图案的清晰度应尽量减少自然光干扰,此外还要最大限度地减少相机在拍摄时的移动。Guler 等^[19]建立了 2 种土体变形的数字图像分析方法:一种是 Match,它是在 Matlab 中创建的一种代码,即通过在一组连续图像中跟踪粒子运动进行图像分析;另一种是 BMAD,将原始图像分解成一系列的观测网格,然后在随后的一系列透明土变形照片中通过相关函数定位每个观测网格的最佳匹配,通过整像素及亚像素运算模拟得出观测网格的移动量,进而建立观测网格的位移场。实践表明 BMAD 效果较好,且划分的网格越密,模拟的效果越接近实际值。Gill 等^[20]采用图像伸长计(videoextensometer)记录下在模型桩打设到透明土的过程中,悬浮在透明土中的目标颗粒(有色颗粒或示踪粒子)的移动过程,同时指出通过增加有色颗粒的数量能够更好地模拟土粒的运动变形情况,但是过多地将有色颗粒掺入到透明土中会破坏透明土的均匀性。随着 DIC 图像分析技术的发展,Liu 等^[13]展示了一种土粒移动的图像输出技术,即在透明土粒变形过程中按一定频率抓拍土粒的移动,待透明土粒变形结束后采用 DIC 图像分析技术建立土粒位移矢量图像。Ni 等^[14]采用 PIV 技术测量了模型桩打入透明土模型过程中周围土体的挤压变形情况,其过程类似于 Iskander 等^[4]的方法。

4 透明土在离心机模型试验研究中的应用可行性

1983 年,南京水利科学研究院与河海大学合作投入运营一台小型离心机,并用于土工问题的研究,同年长江科学院的 300 Gt 岩土和结构两用大型离心机也投入使用,土工离心机在国内正式开始了发展,并在近 30 年内建造了十几台多种型号的离心机,能进行静态模型试验,也能进行动态模型试验^[21-24]。离心机通过高速旋转能够模拟和原型相同的应力水

平,因此与常规模型试验相比离心机模型试验能够更好地反映破坏机理。离心机模型试验的应用领域广泛,包括大坝、边坡、挡土墙、隧洞、地基处理等传统研究领域^[24-26],以及环境岩土工程^[27]、地震工程^[28-31]等新领域。在离心模型试验中,模型变形观测是离心模型试验中的一个重点,已将各种精密轻质的先进科技产品应用到离心模型试验中,如毫米级的压力传感器、加速度传感器、应变片等。但离心放大后植入的仪器质量也相当可观,对机理研究类试验的影响相当显著,且准确获取模型内部的连续变形困难,常采用外部可测点的变形去反分析模型内部的变形,反分析的结果由于所选取的本构模型及物理特性不同差异很大。随着数字图像处理技术^[1,32-38]在国内的发展,可利用透明土制作土工离心模型,并采用数码相机或摄影机抓拍透明土模型在不同受力阶段的图像,采用数字图像三维相关方法^[35]通过对物体变形前后或连续变形的2个相邻状态的内部三维结构的数字图像进行相关运算,以获得三维位移场和应变场,此种方法真正实现了非介入变形连续测量,无需埋设任何仪器便能测出模型连续变形。这种将离心机、数字图像技术和透明土模型结合而成的非介入离心机模型试验目前尚无文献记载,但已具有实现该试验的基础条件。

5 结 语

在岩土工程模型试验中,采用由无定形硅和折射率相匹配的孔隙溶液混合而成的透明土替代天然土体已成为一种趋势,根据无定形硅颗粒的大小不同,又可形成透明黏土、透明粉质黏土和不同级配的透明砂土等。国内外学者通过对透明土的室内试验研究表明,透明土具备砂土和黏土的岩土特性,可替代天然土体应用到岩土工程模型试验中,但是透明土也有其自身的缺陷,如在大模型透明土试验中透明土的透明性弱化问题及配置好的透明土的干化、硬化问题等。透明土在岩土工程模型试验中的应用使非介入变形测量技术和土体的连续变形测试得以实现,随着数码技术的发展,一种利用数字图像处理技术的非介入连续变形测量方法可逐渐应用到岩土工程模型试验中。随着离心机在岩土工程中的成熟运用,可以结合数字图像处理技术实现离心机模型的非介入连续变形测试。

参考文献:

[1] 吴明喜. 人工合成透明砂土及其三轴试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
 [2] 李元海. 数字照相变形量测技术及其在岩土模型实验

中的应用研究[D]. 上海:同济大学,2003.
 [3] STANIER S A. Geotechnical modeling using a transparent synthetic soil[D]. Sheffield:University of Sheffield,2006.
 [4] ISKANDER M G, LAI J, OSWALD C J, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soil[J]. Geotechnical Testing Journal,1994,17(4):425-433.
 [5] SADEK S G, ISKANDER M G, LIU J. Geotechnical properties of transparent silica[J]. Canadian Geotechnical Journal,2002,39(1):111-124.
 [6] ISKANDER M G, LIU J, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2002,128(3):262-273.
 [7] 余跃心. 基于透明介质和颗粒图像技术的土体变形测量研究进展[J]. 勘察科学技术,2005(6):7-11.
 [8] ALLERSMA H G B. Photoelastic stress analysis and strains in simple shear[C]//Proc of IUTAM Symposium on Deformation and Failure of Granular Materials. Rotterdam:Balkema,1982:345-353.
 [9] KONAGAI K, TAMURA C, RANGELOW P, et al. Laser-aided tomography: a tool for visualization of changes in the fabric of granular assemblage[J]. Struct Eng Earthquake Eng,1992,9(3):193-201.
 [10] MANNHEIMER R. Slurries, you can see through[J]. Technology Today,1990(3):2.
 [11] SADEK S G. Soil structure interaction in transparent synthetic soils using digital image correlation[D]. New York:Polytechnic University,2002.
 [12] WELKER A L, BOWDERS J J, GILBERT R B. Applied research using a transparent, material with hydraulic conductivities similar to soil[J]. Geotechnical Testing Journal,1999,22(3):266-270.
 [13] LIU J, ISKANDER M, SADEK S. Consolidation and permeability of transparent amorphous silica[J]. Geotechnical Testing Journal,2003,26(4):390-401.
 [14] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. Geotechnique,2010,60(2):121-132.
 [15] BRANBY P L, MILLIGAN G W E. Soil deformation near cantilever sheet pile[J]. Geotechnique,1975,25(2):175-195.
 [16] KIRPATRICK W M, BELSHAW D J. On interpretation of triaxial test[J]. Geotechnique,1968,18(3):336-350.
 [17] DESRSUES J, MOKNI M, MAZEROLLE F. Tomodensitometry and localization sands[C]//Proceedings of XECSMFE: Deformation of Soils and Displacements of Structures. Florence:ASCE,1991:61-64.
 [18] ORSI T H, ANDERSON A L, LEONARD J N, et al. Use of X-ray computed tomography in the study of marine sediments[C]//Proceedings of the International Conference on Civil Engineering in the Oceans V. College Station,Texas:ASCE,

1992 968-982.

[19] GULER M , TUNCER B E , BOSSCHER P J. Measurement of particle movements in granular soils using image analysis[J]. Journal of Computing in Civil Engineering , ASCE , 1999 , 13 (2) : 116-122.

[20] GILL D R , LEHANE B M. An optical technique for investigating soil displacement patterns[J]. Geotechnical Testing Journal 2001 , 24(3) : 324-329.

[21] 朱维新. 土工离心模型试验研究综述[J]. 岩土工程学报 , 1986 , 8(2) : 82-95.

[22] 包承纲. 我国离心模拟试验技术的现状和展望[J]. 岩土工程学报 , 1991 , 13(6) : 92-97.

[23] 董龙雷 , 闫桂荣 , 廖红建. 岩土工程中动态离心模型试验技术的应用[J]. 岩石力学与工程学报 , 2000 , 19 (6) : 789-793.

[24] 孙锐 , 袁晓铭 , 王永志 , 等. NEES 系统中振动离心机最新进展及国内振动离心机发展设想[J]. 世界地震工程 , 2010 , 26(1) : 31-39.

[25] 黄志全 , 王思敬. 离心模型试验技术在我国的应用概况[J]. 岩石力学与工程学报 , 1998 , 17(2) : 199-202.

[26] 周健 , 刘宁. 离心模型试验技术应用的新进展[J]. 上海地质 , 2003(1) 52-56.

[27] 胡黎明. 离心模型试验技术在环境岩土工程中的应用与展望[J]. 土壤与环境 , 2001 , 10(4) : 327-330.

[28] 陈正发 , 于玉贞. 土工动力离心模型试验研究进展[J]. 岩石力学与工程学报 , 2006 , 25(S2) : 4026-4033.

[29] 于玉贞 , 邓丽军. 抗滑桩加固边坡地震响应离心模型

试验[J]. 岩土工程学报 , 2007 , 29(9) : 1320-1323.

[30] 章为民 , 日下部治. 岩性地层地震反应离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报 , 2001 , 23(1) : 28-31.

[31] 邢建营 , 邢义川 , 梁建辉. 土工离心模型试验研究的进展与思考[J]. 水利与建筑工程学报 , 2005 , 3(1) : 27-31.

[32] 徐福卫 , 陈海玉. 数字网格摄影测量法及其在滑坡模型试验中的应用[J]. 地球科学与环境学报 , 2009 , 31 (2) : 216-220.

[33] 任伟中 , 寇新建 , 凌浩美. 数字化近景摄影测量在模型试验变形测量中的应用[J]. 岩石力学与工程学报 , 2004 , 23(3) : 436-440.

[34] 李元海 , 靖洪文 , 刘刚 , 等. 数字照相量测在岩石隧道模型试验中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2007 , 26(8) : 1684-1690.

[35] 汪敏 , 胡小方 , 伍小平. 物体内部三维位移场分析的图像相关方法[J]. 物理学报 , 2006 , 55(10) : 5135-5139.

[36] 邵龙潭 , 王助贫 , 刘永禄. 三轴土样局部变形的数字图像测量方法[J]. 岩土工程学报 , 2002 , 24(2) : 159-163.

[37] 邵龙潭 , 孙益振 , 王助贫 , 等. 数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究[J]. 岩土力学 , 2006 , 27 (1) : 29-34.

[38] 宋义敏 , 马少鹏 , 杨小彬 , 等. 岩石变形破坏的数字散斑相关方法研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2011 , 30 (1) : 170-175.

(收稿日期 2011-01-24 编辑 骆超)

(上接第 40 页)

[9] 魏红卫 , 喻泽红 , 邹银生. 排水条件对土工合成材料加筋黏性土特性的影响[J]. 水利学报 , 2006 , 37(7) : 838-845.

[10] 唐朝生 , 施斌 , 高玮 , 等. 含砂量对聚丙烯纤维加筋黏性土强度影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2007 , 26 (1) 2968-2973.

[11] YANG Z. Strength and deformation characteristic of reinforced sand[D]. Los Angeles : University of California , 1972.

[12] 喻泽红 , 张起森. 土工网与土相互作用机理的有限元分析[J]. 岩土工程学报 , 1997 , 19(3) : 76-82.

[13] 张兴强 , 闫澍旺 , 邓卫东. 交通荷载作用下加筋道路机理分析[J]. 岩土工程学报 , 2001 , 23(1) 94-98.

[14] 周志刚 , 郑健龙 , 高燕希. 土工格栅加固土抗压强度的极限平衡分析[J]. 长沙交通学院学报 , 1998 , 14(1) 39-43.

[15] 王伟 , 杨尧志. 土工织物与土相互作用的机理[J]. 无锡轻工大学学报 , 1999 , 18(3) : 107-112.

[16] 黄英 , 符必昌 , 金克盛 , 等. 不同排水条件加筋红土三轴试验研究[J]. 昆明理工大学学报 : 理工版 , 2006 , 31(1) : 56-60.

[17] 黄英 , 符必昌 , 金克盛 , 等. 加筋红土的广义等效围压和极限平衡条件[J]. 岩土力学 , 2007 , 28(3) : 533-539.

(收稿日期 2011-05-04 编辑 骆超)

(上接第 65 页)

[9] CHENG Zhu-hua , ZHANG Jia-bao. Introducing fractal dimension to estimation of soil sensitivity to preferential flow [J]. Pedosphere 2002 , 12(3) 201-206.

[10] 吴海毓 , 王桥. 遥感在大型工程生态环境影响评价中的应用[J]. 环境与可持续发展 , 2009(1) 48-49.

[11] MO Deng-kui , LIN Hui , LI Ji-ping , et al. Design and implementation of a high spatial resolution remote sensing image intelligent interpretation system[J]. Data Science Journal 2007 , 4(S) 445-452.

[12] LIU Yu , SUN Wen-bang. Design and implementation of remote sensing mage coordinated interpretation system under web environment[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Computer , Mechatronics , Control and Electronic Engineering. Beijing : IEEE Industrial Electronics Society 2010 248-250.

[13] HAN Lin , LIU Xue-gong , ZHANG Yan-ning. Interpretation of river main-flow from remote sensing images : studying on dynamic transmission cross-correlation method [C]//Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. Los Angeles : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc 2008 2281-2289.

(收稿日期 2010-02-22 编辑 骆超)