

# 降雨条件下含软弱夹层土坡的离心模型试验研究

王 睿, 张 嘎, 张建民

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 进行了降雨条件下含软弱夹层黏性土坡的离心模型试验。试验主要研究了降雨条件下坡体的吸力和变形规律, 重点分析了软弱夹层对坡体的影响。测量了含软弱夹层黏性土坡的位移和土坡内一点的吸力。试验结果表明由于软弱夹层的遇水软化和高渗透特性, 降雨后含软弱夹层黏性土坡在软弱夹层发生滑出。降雨条件下含软弱夹层黏性土坡的变形可以分为均匀变形、错动阶段和滑坡 3 个阶段。对降雨过程中的吸力变化与坡体应变变化进行了分析, 表明可以通过坡体中各点应变的发展反推出降雨入渗时刻和分布。软弱夹层的存在造成了降雨入渗分布的变化, 导致了坡体错动带在该处不再连续, 并降低了边坡的稳定性。

**关键词:** 黏性土坡; 降雨; 软弱夹层; 离心模型试验

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2010)10-1582-06

**作者简介:** 王 睿(1987-), 男, 清华大学博士研究生, 现主要从事岩土工程抗震和土体渐进破坏等方面研究。E-mail: wr05@mails.tsinghua.edu.cn.

## Centrifuge modeling of rainfall-induced deformation of slopes with weak layers

WANG Rui, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Centrifugal model tests are conducted to investigate the behaviors of cohesive soil slopes with weak layers under rainfall condition. This study mainly focuses on the soil suction change and deformation process of the slopes. The centrifugal model tests show that failure occurs in the soil slope with a horizontal weak layer, with the slip surface passing through the weak layer. The analysis of displacement and strain of the slope shows that the deformation process of cohesive soil slopes with weak layers under rainfall consists of three stages: uniform stage, dislocation stage and failure stage. During the precipitation process, the pattern of rainfall infiltration can be determined through the strain development of specific points in the slope. The existence of the weak layer, which exhibits significant softening due to saturation and high permeability, causes change in the infiltration distribution and deformation and increases the instability of the slope.

**Key words:** soil slope; rainfall; weak layer; centrifugal model test

## 0 引 言

降雨是引起滑坡的主要原因之一。例如,“中国地质灾害数据库”记录的 1949 年至 1995 年期间我国的滑坡灾害中 68.5%是由降雨引起的<sup>[1-2]</sup>。需要指出,降雨诱发的滑坡案例中,很多坡体并非均质边坡,如约旦 Amman-Irbid 高速公路滑坡为较强结构中黏性层诱发的坡体破坏<sup>[3]</sup>。实际的大多数土质边坡均成层分布,含有软弱夹层的边坡的安全性更需加以关注。

针对降雨条件下均质土边坡的变形与破坏,已经通过现场试验、模型试验、数值模拟等途径进行了较多研究,普遍认为降雨可显著降低边坡的稳定性。李爱国等基于土质边坡内部的含水率和吸力现场测量结果指出降雨入渗可以引起吸力的降低从而导致土体强度降低<sup>[4]</sup>。Tohari 等采用模型试验分析了降雨引起的

土壤含水率变化及地下水位上升引起的边坡破坏,并探讨了基于含水率变化的滑坡预警系统<sup>[5]</sup>。钱纪芸等进行了均质土坡降雨的离心模型试验,认为降雨引起的土坡中一点的变形可以分为小位移、迅速增大和缓慢增大等 3 个阶段<sup>[6]</sup>。不过,针对降雨条件下更接近实际的成层土边坡、尤其是含有软弱夹层的土质边坡的变形破坏特性,尚少有研究。

离心模型试验能够得到与原型相同的应力状态、位移变化和相似的变形破坏过程,在研究边坡等问题中已经得到了广泛应用。本文采用离心模型试验,对降雨条件下含软弱夹层的黏性土边坡的变形破坏过程

基金项目: 973 课题项目 (2007CB714108); 国家自然科学基金项目 (50828901)

收稿日期: 2009-05-08

以及吸力变化进行了研究, 初步揭示了降雨条件下含软弱夹层黏性土边坡变形破坏的基本规律。

1 试验设备与模型

1.1 试验设备

本文的离心模型试验采用清华大学土工离心机进行。该离心机的有效半径为 2 m, 最大加载能力为 50 g·t, 最大离心加速度为 250g。

降雨采用清华大学研制的离心场降雨模拟系统来实现。该系统由供水系统、分散系统和防风系统组成<sup>[6]</sup>。供水系统利用固定在离心机滑环上的水箱提供降雨用水, 通过电磁阀控制管道中供水。降雨器盒及铺设在其底部的防水布可有效均匀分散来水并使其形成较细雨水下落。为了消除离心机高速旋转形成的高速气流对降雨的影响, 模型箱外侧安装了防风布构成的防风系统。

本试验所用的模型箱内部尺寸为 495 mm×200 mm×500 mm, 主要由铝合金制成, 两侧均为厚度 40 mm 的有机玻璃。

坡体的位移采用离心场图像采集与位移测量系统进行测量。该系统通过固定的摄像头记录模型侧面的图像信息, 再采用相关分析软件分析得出坡体的位移及位移场, 从而能够在不干扰试验坡体的条件下完成高精度、多时刻测量<sup>[7]</sup>。其测量精度达到亚像素量级, 在本文试验中可约为 0.03 mm

采用使用 UMS T5 张力计测量土壤吸力。该张力计尺寸较小, 测量范围为 0~85 kPa。

1.2 试验模型<sup>[8-9]</sup>

边坡用土为北京地铁农业展览馆站黏土。软弱夹层采用蒙脱石粉与滤纸片混合而成。蒙脱石具有遇水明显软化的性质, 是模拟软弱夹层的良好材料, 但由于其渗透率较低, 需将其与滤纸片拌合以在不影响其强度的前提下提高其渗透率, 从而达到模拟软弱夹层所要求的高渗透性、遇水强度显著降低两个重要性质。试验中采用的黏土土粒比重为 2.71, 塑限为 15, 液限为 28, 最优含水率为 16%。软弱夹层塑限为 30, 液限为 54。

试验中, 黏性土的含水率为 18.2%, 饱和度为 60%, 干密度为 1.50 g/cm<sup>3</sup>; 软弱夹层的含水率为 45.2%, 干密度为 1.10 g/cm<sup>3</sup>。

试验边坡坡高 300 mm, 宽 200 mm, 坡度为 1:1。通过在模型箱侧壁涂抹少量硅油, 可以减小侧壁摩擦, 达到平面应变的模拟目的。为了消除模型箱底对边坡变形的约束, 在坡底制备一层土质地基, 地基厚 60 mm。含软弱夹层边坡制样时先击实底部 4 层 (包括

地基), 厚度均为 60 mm, 接着将 20 mm 厚的蒙脱石粉和滤纸片的掺混物铺至其上模拟水平软弱夹层, 最后在之上分别击实 40 mm 和 60 mm 的两层黏性土。击实完成后, 拆卸模型箱侧面的玻璃板, 削去多余土体形成土坡。在土坡试样观测一侧均匀地嵌入白色水磨石颗粒以采用非接触位移测量系统分析坡体变形。由于非接触位移测量系统需通过色差进行位移分析, 因此测量范围如图 2 所示。在坡体另一侧面选定位置埋设张力计, 埋设位置见图 2。本文以坡顶延长线与坡脚竖直向上方向交点为原点建立坐标系, x 轴以向右为正, y 轴以下为正, 单位为 mm。

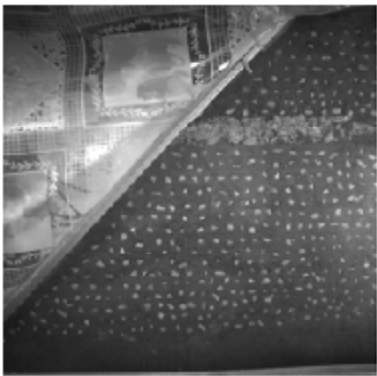


图 1 试验模型照片  
Fig. 1 Photograph of test model

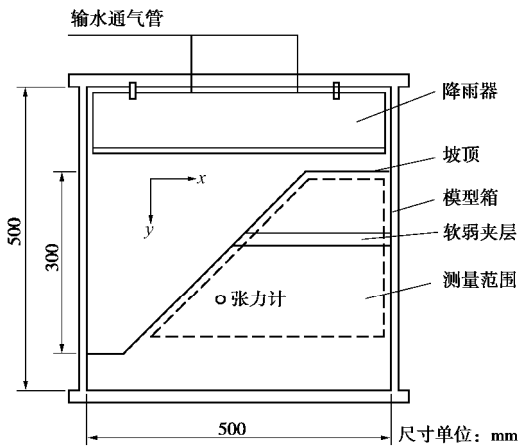


图 2 试验模型示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of test model

1.3 加载条件

试验开始后, 利用离心机将模型以 5g 为间隔逐级加载至 50g, 当离心加速度达 50g 且变形稳定后开始降雨。试验中降雨强度约为 1.17 mm/min, 持续至滑坡结束, 总降雨量 33 mm。

2 试验观察

照片记录显示, 降雨过程中坡表和坡顶土体首先



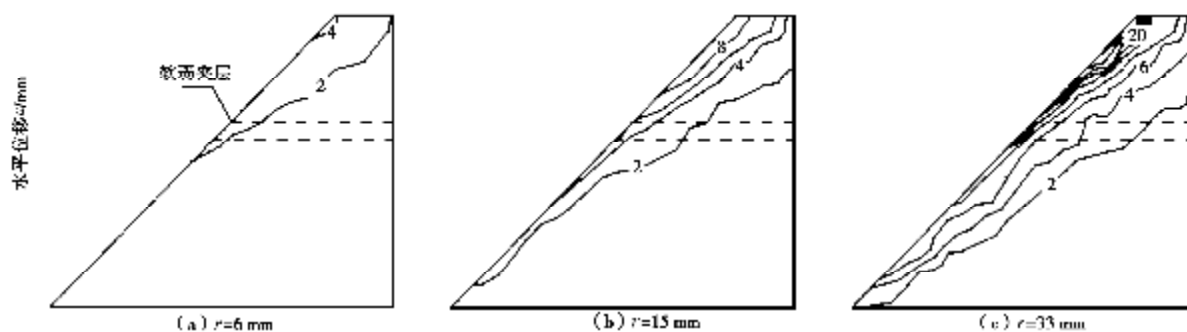


图3 不同降雨量时水平位移等值线

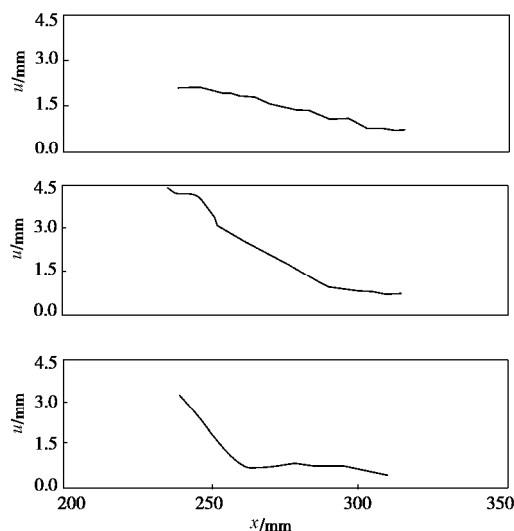
Fig. 3 Horizontal displacement fields at different rainfall levels

发生明显错动,当变形累积至一定程度后,错动带表面开始发生浅层滑坡,直至降雨结束。

图3分别为降雨量 $r$ 分别为6,15和33 mm时坡体的水平向位移等值线。从位移等值线可以看出,6 mm降雨时水平位移均在4 mm以内,坡顶处等值线表明土体开始沿坡表发生轻度错动,但整体变形较为均匀;降雨达到15 mm时坡顶累计发生了8 mm以上的水平变形,坡表至软弱夹层表面出现密集的与坡表近乎平行的等值线,坡体开始出现明显错动;15~33 mm降雨之间,随着错动的发展,从照片记录可明显看出软弱夹层以上坡表下深10~20 mm内出现了明显的滑坡,滑坡体从软弱夹层滑出,这一点从图3(c)中该区域极为密集的等值线中也可以看出。

突变区域内外均有位移梯度较小段,在这两段中土体错动较小。15~33 mm降雨阶段中,坡表发生了浅层滑坡,这一点可从曲线中的位移迅速变化段中得到反映。

上述分析表明,降雨条件下含软弱夹层黏性土坡的变形可以分为3个阶段:均匀变形阶段、错动阶段和滑坡阶段。在降雨初期,边坡开始发生变形,但变形较均匀。随着进一步的降雨,雨水向坡体内部入渗,致使坡体沿坡表向内逐步形成错动带。持续的降雨使变形不断发展,直至坡体开始失稳,这时上部坡体坡表由于变形过大开始发生浅层滑坡。由于在前一阶段中,软弱夹层已发生较大的集中变形,因此滑坡体在该层滑出。

图4  $y=92$  mm 水平线上水平位移分布Fig. 4 Distribution of horizontal displacements at  $y=92$  mm

对 $y=92$  mm(坐标系如图2所示)水平线上的各点在0~6 mm、6~15 mm和15~33 mm降雨时进行位移测量,得到图4中各时段位移增量分布。不难看出,在降雨为0~6 mm时,曲线中并未出现明显拐点,变形较为均匀。6~15 mm降雨阶段,软弱夹层以上水平线的位移分布曲线中出现了斜率突变区域,表明该区域内土体发生了显著的错动。这一阶段中,斜率

### 3 吸力变化与土体变形的关系

试验中,在降雨达到10 mm之前,张力计测得的吸力变化较小,基本稳定在15 kPa左右。当降雨达到10 mm时,测点处吸力值迅速下降。这一下降过程仅持续了5~6 min,当降雨量达到17 mm后,吸力值再次达到稳定,约为3~4 kPa(图5)。由于吸力与土壤含水率有密切的负相关性,吸力值下降表明土壤含水率增大,可以推测吸力开始明显下降时降雨入渗至测量点。

为了揭示吸力变化与土质边坡变形的关系,对试验中张力计埋设点处土体水平应变进行分析。选取张力计埋设点处边长为5 mm的单元进行分析。定义水平应变为

$$e_x = \frac{1}{2a}(u_2 + u_3 - u_1 - u_4) \quad (1)$$

式中, $e_x$ 为水平应变, $u_i$ 为各结点水平位移,顺时针方向编号,水平应变以压缩为正。将试验中测得的吸力和应变随降雨量增大的关系进行对比(图5)可以看出,应变的发展与吸力的降低紧密相关。最初降雨造成上部土体增重,应变略有增加。应变曲线拐点在9 mm降雨时出现,与吸力曲线拐点相吻合。这意味

着降雨入渗至坡体内某点时, 该点的应变将开始显著增大。因此, 可以通过坡体中某点应变出现突变来反推出降雨入渗至该点的时刻。试验中可以测量出降雨过程中整个边坡的位移场变化并进而求得应变场变化, 从而可以得出降雨过程中的入渗锋面变化。

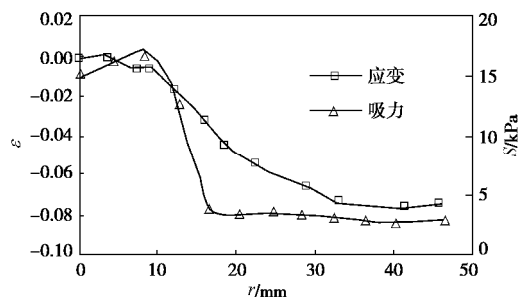


图 5 测点应变曲线和吸力变化曲线

Fig. 5 Strain curve in comparison with tension curve at test points

4 降雨入渗规律分析

基于上文分析, 可以通过对边坡进行应变分析得到该处雨水到达的时刻以及降雨入渗引起的变形。由于降雨量达到 15 mm 后坡体已发生破坏, 因此本文分析仅考虑降雨量达到 15 mm 之前的情形。

选取边坡内平行坡表、深度为 20 mm 的 3 点进行应变分析, 其中 *b* 点位于软弱夹层内。图 6 给出了各点应变在降雨过程中的变化, 可以发现这 3 点的应变发展过程表现出不同的规律。位于黏性土坡上的 *a*, *c* 两点当降雨量大约达到 6~7 mm 降雨时均出现明显的拐点, 这意味着此时降雨已经入渗至此。而位于软弱夹层的 *b* 点则在降雨量为 2 mm 时就已经表现出显著的应变突变。可以推断, 由于软弱夹层的高渗透性, 软弱夹层降雨入渗远早于处于同一深度的黏性土层。而且, *a*, *c* 两点在降雨量为 15 mm 时应变发展至 -0.05 左右, 但由于软弱夹层遇水显著软化, 同时刻 *b* 点的应变已经达到 -0.26。

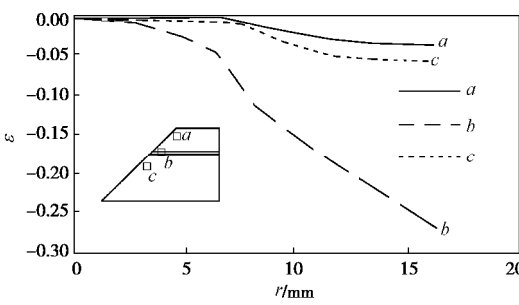


图 6 典型点的应变发展曲线

Fig. 6 Strain development curves at typical points

上述分析表明, 软弱夹层的存在造成了边坡降雨

入渗分布的变化。由于土性相同, 雨水在软弱夹层上下的黏性土坡体中的入渗规律基本一致, 但软弱夹层处入渗快得多; 而且在相同时刻, 软弱夹层附近雨水可以入渗到更深的位置<sup>[10]</sup>。

5 变形规律分析

为了深入分析降雨条件下含软弱夹层边坡的变形规律, 选取破坏前变形明显的错动阶段进行分析。在降雨量为 6~15 mm 的错动阶段中, 降雨已入渗至坡体内部, 尽管边坡尚未发生破坏, 但坡体已经表现出明显的变形。图 7 给出了该降雨阶段坡内不同高程水平线上的水平位移分布, 分别包括软弱夹层上侧黏性土体、软弱夹层以及软弱夹层下侧黏性土体。可以看出, 每条水平线上的水平位移分布都存在着一段位移梯度较大段。这表明该段内土体变形明显, 本文记作坡体错动带, 可通过将坡体内位移梯度明显的拐点相连得到, 如图 7 中的虚线所示。从图 7 可以看出, 上部坡体错动带具有外边界 (W 面) 和内边界 (N 面); 下部坡体错动带仅有内部边界。上部坡体错动带的外边界 (W 面) 可能是由于坡表应力较小造成的; 内边界 (N 面) 则主要由降雨入渗控制。

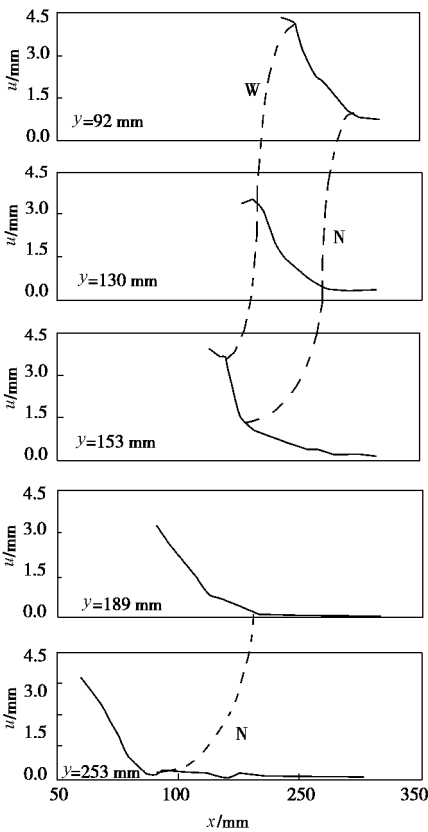


图 7 降雨量为 15 mm 时水平位移分布

Fig. 7 Distribution of horizontal displacements with rainfall of 15 mm

图 8 进一步给出了错动带在坡体中的位置。可以

看出以软弱夹层为界上下坡体的错动带形出现了明显的不连续。

由于降雨是一个动态过程,因此可利用相同的方法对其他时刻的错动带分布进行分析。图8还给出了降雨量为11 mm时的错动带。可以看出错动带的内边界(N面)随着降雨入渗向边坡深部发展;外边界(W面)并未有明显变化。

## 6 软弱夹层对变形的影响

图8表明,坡体错动带在软弱夹层附近出现了明显的不连续:上部坡体错动带在软弱夹层附近迅速向坡表发展;下部坡体错动带在接近软弱夹层处较深,越向坡下发展越浅。结合坡内典型点的应变分析和入渗分布(图6),可以进一步探讨软弱夹层对边坡变形的影响规律。

入渗后软弱夹层坡表附近的水平应变达到-0.26,远超过相同条件下的软弱夹层以外的其他点,表现出显著的变形。坡表附近软弱夹层的急剧变形带动并促进了上部坡体发生错动,并使得上部坡体错动带在软弱夹层附近迅速向坡表发展。这一部分变形不断累积,从而最终诱发了滑坡。

软弱夹层的存在使得雨水在该层入渗较快,部分降雨可以通过软弱夹层向下部坡体渗透。选取软弱夹层下位于 $x=185\text{ mm}$ ,  $y=155\text{ mm}$ (在图6中 $a$ ,  $b$ ,  $c$ 沿线上)的应变进行分析,可以发现该点应变在降雨量为3.5 mm时出现拐点(图9),表明雨水渗至该点。该点与图6中 $a$ ,  $c$ 两点相比更早(6~7 mm降雨),证明紧邻软弱夹层的下部坡体雨水入渗较快,因而下部坡体错动带在接近软弱夹层处较深。

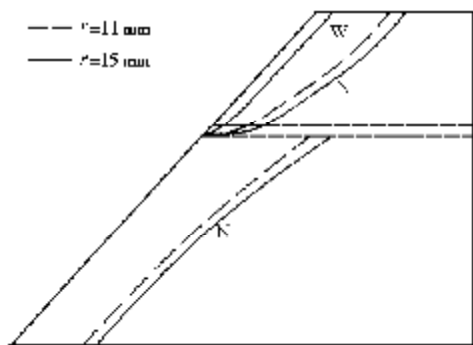


图8 6~15 mm降雨过程中错动区域

Fig. 8 Dislocation section with rainfall of 6~15 mm

## 7 结 论

本文进行了降雨条件下含软弱夹层黏性土坡的离心模型试验,测量了试验过程中边坡的位移和吸力。基于试验结果可以得到以下主要结论:

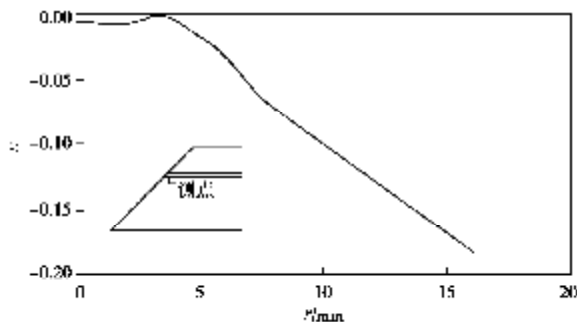


图9 软弱夹层下部某点的应变发展曲线

Fig. 9 Strain curve at a point below weak layer

(1) 根据坡体变形的不同规律,降雨条件下含软弱夹层黏性土坡的变形可以分为均匀变形、错动阶段和滑坡3个阶段。

(2) 降雨入渗至坡体内某点时,可使该处土壤吸力下降,吸力的下降与该点应变的增加在时间上对应。因而可以通过坡体中各点应变的发展反推出降雨入渗的时刻和分布。

(3) 软弱夹层的存在造成了降雨入渗分布的变化,雨水在软弱夹层上下坡体中入渗速率基本一致,但软弱夹层处入渗较快。在相同时刻,软弱夹层附近入渗较深。

(4) 降雨条件下含软弱夹层土坡中错动带随着降雨向坡内发展,但错动带在软弱夹层出现不连续现象。

(5) 软弱夹层的遇水显著软化特征和高渗透性使的上部坡体错动带在软弱夹层附近迅速向坡表发展,下部坡体错动带在接近软弱夹层处发展较深。

## 参考文献:

- [1] 黄润秋. 降雨及水库诱发滑坡的评价与预测[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 337. (HUANG Run-qiu. Evaluation and prediction of landslides caused by rainfall and reservoir[M]. Beijing: Science Press, 2007: 337. (in Chinese))
- [2] 王恭先. 滑坡防治100例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 527. (WANG Gong-xian. 100 landslide control cases[M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 527. (in Chinese))
- [3] AL-HOMOUD A S, TUBEILEH T K. Analysis and remedies of landslides of cut slopes due to the presence of weak cohesive layers within stronger formations[J]. Environmental Geology, 1998, 33(4): 299 - 311.
- [4] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 土体含水率和吸力量测及其对边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 278 - 281. (LI A G, YUE Z Q, THAM L G, LEE C F, et al. Soil moisture and suction measurement and its effect on slope stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 2003, **25**(3): 278 - 281. (in Chinese))
- [5] TOHARI A, NISHIGAKI M, KOMATSU M. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(5): 575 - 587.
- [6] 钱纪芸, 张 嘎, 张建民, 等. 黏性土边坡降雨的离心模型试验[J]. *清华大学学报*, 2009, **49**(6): 829 - 833. (QIAN Ji-yun, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, et al. Rainfall centrifuge model tests of cohesive soil slopes[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2009, **49**(6): 829 - 833. (in Chinese))
- [7] ZHANG G, HU Y, ZHANG J M. New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests[J]. *Measurement*, 2009, **42**(1): 87 - 96.
- [8] AL-HOMOUD A S, PRIOR G, AWAD A. Modelling the effect of rainfall on instabilities of slopes along highways[J]. *Environmental Geology*, 1999, **37**(4): 317 - 325.
- [9] 刘翠容, 孔德惠. 离心模型技术在土质边坡稳定中的应用[J]. *路基工程*, 2006(4): 21 - 23. (LIU Cui-rong, KONG De-hui. Application of centrifuge model technologe on soil slope stability[J]. *Subgrade Engineering*, 2006(4): 21 - 23. (in Chinese))
- [10] 肖衡林, 王继华, 单孝仲. 降雨入渗条件下边坡稳定性研究现状及展望[J]. *资源与产业*, 2007, **9**(4): 117 - 120. (XIAO Heng-lin, WANG Ji-hua, SHAN Xiao-zhong. Comprehensive evaluation of slope stability under rain infiltrating[J]. *Resources & Industries*, 2007, **9**(4): 117 - 120. (in Chinese))

## 第一届 Geo-Engineering 信息技术国际会议 (ICITG)

### 在同济大学召开

2010年9月16日至17日, 由JTC2(国际土力学与岩土工程学会 ISSMGE, 国际工程地质学会 IAEG, 国际岩石力学学会 ISRM 组成的联合机构)委员会主办, 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系承办的第一届 Geo-Engineering 信息技术国际会议在同济大学中法中心举行。来自中国、日本、韩国、英国、奥地利、美国、荷兰等 22 个国家和地区的 150 多名高校、科研机构 and 企业的代表出席了本次会议。本次会议的主题是 Information Technology in Geo-Engineering, 论文集由国际 IOS Press 出版社出版发行。

本次大会由英国杜伦大学 David G. Toll 博士和同济大学朱合华教授联合出任会议主席, 同济大学副校长董琦教授出席开幕式并致辞。

会议期间, 与会人员围绕人工智能与数据挖掘, 数据采集、监视与标准化, 地质建模和与数值模型的集成, 信息系统与应用, 新计算技术与数值方法, 数值分析, 模拟与可视化等会议主题展开了热烈讨论。来自 University of Cambridge(英国剑桥大学)、同济大学、University of Twente(荷兰特文特大学)、Graz

University of Technology (奥地利格拉茨技术大学)、Sungkyunkwan University (韩国水原成均馆大学)、Nagaoka University of Technology (日本长崎技术科学大学)、Georgia Institute of Technology (美国佐治亚理工学院)、University of Minho (葡萄牙米尼奥大学)、University of Salerno (意大利萨雷勒诺大学)、Cracow University of Technology (波兰克拉科夫工业大学)、Faculty of Civil Engineering Belgrade University (贝尔格莱德大学) 等众多国外知名院校的研究人员应邀做了报告。

本次大会的目的是为科研工作者、开发商和工程技术人员提供一个展示 Geo-Engineering 信息技术最新进展的平台, 同时作为一个论坛来讨论未来的发展方向。大会得到了国家自然科学基金委员会(NSFC)、上海城建集团公司、ESRI 中国(北京)有限公司、中国土木工程学会、中国岩石力学与工程学会、上海市土木工程学会等单位的大力支持。会议决定第二届 Geo-Engineering 信息技术国际会议将于 2012 年 7 月在英国杜伦大学召开。

(同济大学土木工程学院 供稿)