

文章编号: 1000-7598-(2007)08-1705-06

# 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤 边坡稳定性研究

刘新喜<sup>1</sup>, 夏元友<sup>1</sup>, 蔡俊杰<sup>2</sup>, 宁齐元<sup>3</sup>, 陈向阳<sup>4</sup>

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 湘潭市规划局, 湖南 湘潭 411100; 3. 湖南理工职业技术学院, 湖南 湘潭 411100; 4. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

**摘 要:** 降雨入渗是影响边坡稳定性、导致边坡失稳的最主要和最普遍的环境因素。强风化软岩用于高填方路堤填土边坡时, 填土的压实度直接影响路堤土的渗透性和强度。利用饱和与非饱和渗流有限元模拟降雨入渗时高填方路堤的暂态渗流场, 将计算得到的暂态孔隙水压力分布用于边坡的极限平衡分析, 并考虑基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响。探讨降雨强度、持时和压实度对边坡稳定性的影响。研究表明, 强风化软岩用于高填方路堤压实度不能低于 90 %; 当暴雨强度为 200 mm/d 时, 边坡就会失稳。其成果将为高填方路堤边坡防护设计提供科学依据。

**关 键 词:** 降雨; 高填方路堤; 非饱和土; 边坡稳定性

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

## Study on stability of high-filled embankment slope of highly weathered soft rock under rainfall infiltration

LIU Xin-xi<sup>1</sup>, XIA Yuan-you<sup>1</sup>, CAI Jun-jie<sup>2</sup>, NING Qi-yuan<sup>3</sup>, CHEN Xiang-yang<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Xiangtan Municipal planning Bureau, Xiangtan 411100, China; 3. Hunan Vocational College of Technology, Xiangtan 411100, China; 4. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

**Abstract** It is evident that the rainfall has a remarkable effect on slope stability. When the highly weathered soft rock is used for high-filled embankment slope, compacting factor directly effects on permeability and intensity of embankment soil. Transient seepage due to the rainstorm infiltration is computed using the finite element method. The computed transient pore water pressures are then used for limit equilibrium analyses of landslides. And effects of matrix suction on shear strength of unsaturated soils are considered. Effects of the compacting factor and intensity and duration of rainfall events are discussed. The results show that when rainfall intensity reaches 200 mm/d, the slope is instable. And the compacting factor of strong weathered soft rock used for high-filled embankment should not be less than 90 %; which is provided scientific basis for the treatment of high-filled embankment slopes.

**Key words:** rainfall; high-filled embankment; unsaturated soil; slope stability

## 1 前 言

湖南湘潭市昭山大道系 107 国道 6 km 一段(原为 18 m 宽)扩建为 60 m 宽的高等级公路, 在路堤填筑时遇到较为突出的问题: 一是挖方遇到两座山

包为强风化泥质页岩和强风化砂质页岩, 这种岩石单轴抗压强度小于 30 MPa, 故称为强风化软岩。由于风化程度的差异, 这种填料的压实质量难以控制; 二是沿线部分地段路堤填方高达 12 m, 特别是该路段 1 km 路堤一侧为仰天湖, 沿线填方最高达 12~

收稿日期: 2005-11-16

修改稿收到日期: 2006-01-12

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (No. NECT040723); 湖北省青年杰出人才基金 (No. 2005ABB022); 湖北省自然科学基金 (No. 2004ABA058)。湖南省建设厅资助项目 (No. 200508)

作者简介: 刘新喜, 男, 1963 年生, 博士, 现为武汉理工大学在站博士后, 主要从岩土工程方面的研究。E-mail: liuxinxi1963@126.com。

16 m, 路堤一部分被水浸泡, 当降雨入渗时地下水位容易被抬升, 因此对强风化软岩高填方路堤边坡的稳定性的研究显得尤为重要。众多的事实表明, 降雨是影响边坡稳定性, 导致边坡失稳的最主要和最普遍的环境因素。降雨对边坡稳定性的影响研究国内外已进行了许多研究, 并取得了许多的研究成果<sup>[1-3]</sup>。然而, 对于边坡在降雨过程中基质吸力的变化目前还少见深入定量的研究成果, 特别对强风化软岩作路堤填土时边坡填土各向异性及其湿化后的土的抗剪强度变化规律研究甚少。本文着重研究强风化软岩路堤边坡填土降雨入渗时不同压实度下的渗透性及强度变化规律, 模拟降雨条件下边坡的暂态渗流场, 建立基于基质吸力的边坡稳定性评价方法, 并考虑降雨强度、降雨持时、填土的压实度对边坡稳定性的影响, 为强风化软岩路堤边坡防护设计提供科学依据。

## 2 高填方路堤的基本特征

昭山大道是按高等级公路标准修筑, 路面宽 60 m, 部分路段高填方路堤高 12 m, 坡比为 1: 1.5, 考虑强风化软岩的压实特性和湿化变形特性, 为了防止路面开裂和地表水入渗, 路床 0~80 cm (95 区) 采取换土, 选用性能较好的黏性土, 压实度为 95 %, 上路堤 80~150 cm 填料为强风化软岩, 压实度为 93 %, 下路堤 150 cm 以下填料为强风化软岩, 压实度为 90 %。地下水位离路堤底面 1 m。公路路堤填土边坡的主要特点是: 路堤经碾压密实, 属于非饱和土的范畴, 且沿水平方向的渗透性大于垂直方向的渗透性, 由于压实度的不同, 渗透性差异较大。

## 3 降雨入渗时高填方路堤饱和与非饱和和渗流数值模拟

### 3.1 路堤边坡饱和与非饱和和渗流数学模型

在高填方路堤边坡稳定性分析中, 由于地下水埋藏较浅, 降雨条件下非饱和区边坡中水的运动与饱和区的地下水的运动是互相联系的将二者统一起来即所谓饱和与非饱和问题。当采用水头  $h$  作为控制方程的因变量, 对于各向异性的二维饱和一非饱和和渗流控制方程为<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = m_w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $k_x$ 、 $k_y$  分别为水平和垂直方向的饱和渗透系数;  $\rho_w$  为水的密度;  $g$  为重力加速度;  $m_w$  为比水容量, 定义为体积含水量  $\theta_w$  对基质吸力  $(u_a - u_w)$  偏

导数的负值:

$$m_w = - \frac{\partial \theta_w}{\partial (u_a - u_w)} \quad (2)$$

边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \text{水头边界: } k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} &= h(x, y, t); \\ \text{流量边界: } k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} &= q(x, y, t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

### 3.2 渗流计算模型

强风化软岩高填方路堤剖面为轴对称, 故选取路堤一半为研究对象, 将路堤 95 区、93 区、90 区的填料视为 3 种不同材料, 采用 Geo-slope 软件 SEEP/W 进行模拟。渗流边界:  $AB$ 、 $AD$ 、 $DC$  为不透水边界即 0 流量边界, 初始水头为 11 m。二维有限元网格剖分共剖分 7 830 网格单元, 7 989 个节点, 如图 1 所示。

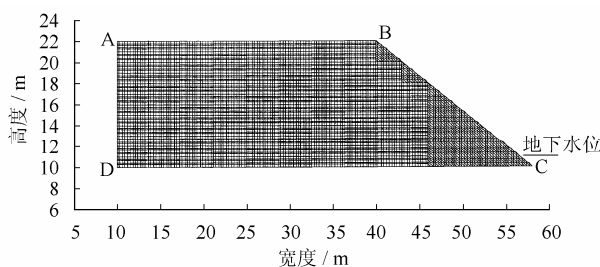


图 1 高填方路堤边坡渗流计算网格剖分

Fig.1 Finite element mesh for the analysis of seepage of high-filled embankment slope

非饱和和渗流计算要求的土水特征曲线根据强风化软岩碾压后的粒径分布特性采用工程类比法确定, 经试验得出 95 区、93 区和 90 区饱和渗透性系数分别为  $1.3 \times 10^{-3}$ ,  $5.5 \times 10^{-3}$ ,  $8.3 \times 10^{-3}$  m/d, 并假定  $k_x/k_y$  的比值为 4。根据土水特征曲线和饱和渗透性系数采用 VG 模型可以推求渗透性函数, 如图 2 所示。限于篇幅, 仅列出 90 区路堤土水特征曲线和渗透函数曲线。如图 3 所示。

### 3.3 数值模拟结果

根据当地历年来的气象资料 (考虑极端降雨情况), 日降雨量分别为 100, 200 mm/d, 降雨持续时间为 24 h, 并假定路面不发生开裂。通过饱和与非饱和和渗流数值模拟, 得出降雨前后路堤边坡的孔隙水压力分布见图 3。可以看出, 降雨入渗使得路堤边坡地下水位抬高, 降雨强度越大, 地下水位抬升越高。

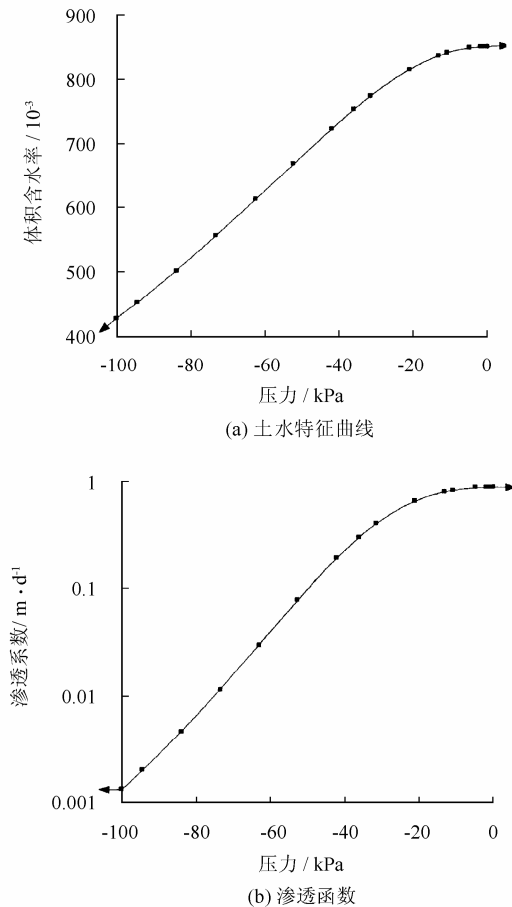


图 2 土水特征曲线和渗透函数曲线 (压实度 90 %)

Fig.2 Soil-water characteristic curve and permeability function for compacting factor of 90 %

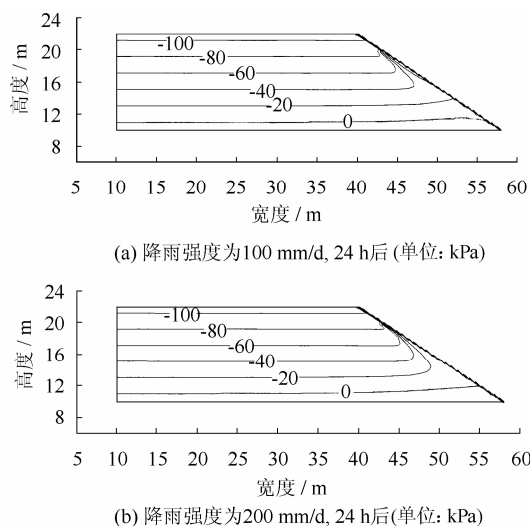


图 3 不同降雨强度下边坡孔隙水压力等值线

Fig.3 Contours of pore water pressures for different rainfall intensities

## 4 考虑降雨下的高填方路堤边坡稳定性分析方法

迄今为止, 岩土工程界对土质边坡稳定性计算

仍广泛采用极限平衡条分法, 并已积累了丰富的应用经验, 但对残积土、膨胀土、黄土人工边坡这类降雨影响明显的边坡, 由于常规方法如 Janbu 法、Bishop 法、Spencer 法、Sarma 法、Morgenstern-Price 法等, 均难以准确反映降雨作用导致土体发生软化, 使土体强度降低这一现象。从上面强风化软岩高填方路堤填土边坡在降雨作用下瞬态渗流场数值模拟可见, 在渗流浸润线以上的土的孔隙水压力为负值 (即基质吸力), 且随着降雨量和降雨持时的增加将使边坡含水量增大, 从而降低了孔隙中的基质吸力大小。基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响国内外进行了许多研究<sup>[5,6]</sup>, 这里采用岩土界广泛认可的 Fredlund 等 (1978 年) 提出的非饱和土强度公式来表达。已经证明在抗剪强度公式中采用两个应力状态变量即净法向应力 ( $\sigma - u_a$ ) 和基质吸力 ( $u_a - u_w$ ) 是实际应用中最有力的组合, 其抗剪强度表达如下:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (3)$$

式中:  $c'$  和  $\phi'$  为常规意义下的有效应力强度参数;  $\sigma$  为法向总应力;  $u_a$  为孔隙气压力, 在本文稳定性分析时, 认为孔隙气压力为大气压力, 即  $u_a = 0$ ;  $u_w$  为孔隙水压力;  $\phi^b$  为基质吸力增加引起抗剪强度增加的曲线的倾角, 它也是基质吸力的函数, 本文假设为常数。并由类比法确定。

基于基质吸力的边坡稳定性评价采用规范认可的极限平衡方法, 这里采用 Janbu 法评价降雨对边坡稳定性的影响, 通过考虑降雨时饱和与非饱和和渗流数值模拟得到的边坡中暂态孔隙水压力分布用于边坡极限平衡分析。

### 4.1 降雨入渗下高填方路堤填土抗剪强度参数

降雨入渗对路堤边坡土的软化, 导致土的抗剪强度降低, 高填方路堤填土边坡的强度参数的变化可以通过对强风化软岩的湿化变形试验得到, 本次湿化变形试验是模拟路堤实际加载过程 (50, 100, 200 kPa), 采用干、湿双线法和复杂应力作用下并分别对路堤在不同压实度下 (95 %, 93 %, 90 %) 进行湿化变形试验。限于篇幅, 仅列出采用干、湿双线法压力为 90 % 的湿化变形试验, 见图 4。

昭山大道按高等级公路标准, 不允许路堤产生大的变形, 从干、湿双线法成果 (0.90, 0.93 和 0.95 三种压实度下和不同围压下的应力控制三轴剪切试验应力应变)  $-\varepsilon_a$  曲线 (共 9 组 18 条干、湿对比曲线) 可以发现, 所有曲线的陡升段向大变形的缓升段或平滑段的转变都是在  $\varepsilon_a$  小变形情况

下完成的,大致在 $\varepsilon_a = 2\%$ 左右。根据 $\varepsilon_a = 2\%$ 临界值计算相应的剪切强度见表 1。

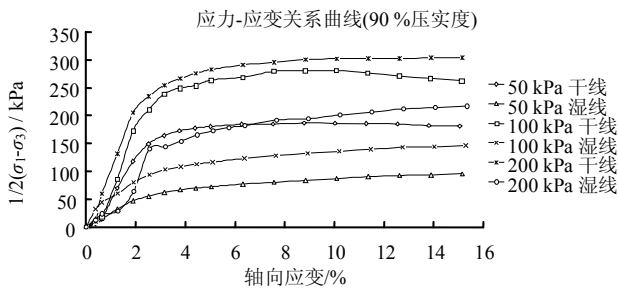


图 4 主应力差-轴向应变曲线

Fig.4 Curves of principal stresses difference and axial strain

表 1 不同压实度下填土的抗剪强度

Table 1 Shear intensity of soil under different compacting factors

| 参数                   | 不同压实度下 $\lambda$ 值 |      |      |      |      |      |
|----------------------|--------------------|------|------|------|------|------|
|                      | 0.95               |      | 0.93 |      | 0.90 |      |
|                      | 干                  | 湿    | 干    | 湿    | 干    | 湿    |
| $c / \text{kPa}$     | 49.4               | 27.2 | 40.0 | 18.1 | 32.1 | 14.8 |
| $\varphi / (^\circ)$ | 27.1               | 23.2 | 25.8 | 20.1 | 20.7 | 19.0 |

#### 4.2 降雨强度对高填方路堤边坡稳定性的影响

根据湘潭市历年来降雨资料,考虑极端降雨情况,分别考察降雨强度为 100, 200, 300 mm/d 时,降雨持续第 24 h 的边坡稳定性系数,见表 2,根据《公路路基设计规范》<sup>[7]</sup>对于黏性土路堤安全系数不低于 1.35,从表 2 可以看出,高填方路堤在无雨时路堤边坡安全储备大;当降雨强度达到 200 mm/d 时,路堤边坡处于欠稳定。

表 2 降雨强度对边坡稳定性的影响

Table 2 Effects of rainfall intensity on stability of slope

| 降雨强度<br>/ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ | 无雨    | 100   | 200   | 300   |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 安全系数                                      | 1.862 | 1.358 | 1.236 | 1.225 |

#### 4.3 降雨持时对高填方路堤边坡稳定性的影响

通过对降雨入渗边坡瞬态渗流场数值模拟,可以看出,随着降雨时间的增长,路堤边坡的地下水位也不断上升,从而使基质吸力下降,导致边坡的稳定性下降。表 3 列出了降雨强度为 100, 200, 300 mm/d,持续时间为 24, 48, 72, 96 h 的边坡稳定性。从表 3 可以看出,降雨强度越大,边坡稳定性降低越大。

表 3 降雨持时对滑坡稳定性的影响

Table 3 Effects of rainfall duration on stability of slope

| 时间/h | 不同降雨强度 (mm/d) 的安全系数 |       |       |       |
|------|---------------------|-------|-------|-------|
|      | 无雨                  | 100   | 200   | 300   |
| 24   | 1.862               | 1.358 | 1.237 | 1.225 |
| 48   | 1.862               | 1.339 | 1.191 | 1.113 |
| 72   | 1.862               | 1.317 | 1.123 | 1.065 |
| 96   | 1.862               | 1.305 | 1.109 | 1.056 |

#### 4.4 压实度对高填方路堤边坡稳定性的影响

对于强风化软岩用于高填方路堤填料时,压实度不但影响着路堤的湿化变形,而且影响高填方路堤边坡的稳定性。从路堤边坡的稳定性角度来看,提高压实度一方面可使边坡水平方向的渗透性与垂直方向的渗透性的比值增大,可以减小降雨入渗时地下水位的抬高,有利于边坡的稳定性。同时,增大压实度可以提高边坡土体的抗剪强度,同样起到提高路堤边坡稳定性的作用。试验中发现,该强风化软岩用于下路堤(150 cm 以下)、压实度为 87% 时其湿化后强度大大降低,有效凝聚力为 10 kPa,有效内摩擦角为  $14^\circ$ ,降雨强度为 100 mm/d 时路堤边坡的瞬态安全系数见表 4。可见强风化软岩用于高填方路堤时,下路堤填土压实度为 87%,路堤边坡易于失稳,可见压实度是影响边坡稳定性的重要因素。

表 4 压实度对滑坡稳定性的影响

Table 4 Effects of compacting factor on stability of slope

| 压实度<br>/% | 时间/h  |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
|           | 24    | 48    | 72    | 96    |
| 90        | 1.358 | 1.339 | 1.317 | 1.305 |
| 87        | 1.106 | 1.054 | 0.954 | 0.939 |

## 5 结 论

降雨导致边坡失稳已是公认的事实,由于非饱和和土参数研究较为困难,以致目前量化研究尚少。利用饱和与非饱和渗流理论通过工程类比法确定了强风化软岩土水特征曲线,由此确定土的非饱和和渗透函数,进行降雨作用下高填方边坡暂态饱和与非饱和滑坡渗流的有限元分析,应用非饱和土抗剪强度理论,建立了降雨入渗边坡稳定性分析数学模型,采用 Janbu 法分析降雨时边坡的瞬态安全系数,通过研究得出如下结论:

(1) 在边坡地下水位较浅时,暴雨入渗容易使边坡地下水位上升,同时暴雨入渗使边坡中基质吸力减小,因此随着暴雨强度的增加,滑坡的稳定

性降低。通过对昭山大道强风化软岩路堤边坡的渗流数值模拟表明, 在极端暴雨强度为 200 mm/d 时, 降雨持时 24 h 以后边坡就欠稳定。

(2) 强风化软岩用于高填方路堤时, 提高填土的压实度, 一方面可以增大水平方向的渗透系数与垂直方向渗透系数的比值, 有利于边坡的稳定。另一方面从湿化变形试验来看, 可以减小降雨入渗对边坡土的软化。稳定性评价表明, 强风化软岩用于高填方路堤填土时, 填土的压实度必须大于 90 %, 这样才能有利于边坡的稳定。

运用饱和与非饱渗流理论研究降雨入渗对高填方路堤边坡稳定性的影响是一种新的尝试。今后需要加强对不同压实度填土的各向异性研究, 探讨压实度与饱和渗透性系数、 $k_x/k_y$  之间的关系, 以及对强风化软岩土水特性曲线实验研究, 这样才能对降雨入渗时高填方路堤边坡稳定性作出较为科学的评价。

### 参考文献

- [1] 黄润秋, 戚国庆. 非饱和渗流基质吸力对边坡稳定性的影响[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 343—348.  
HUANG Run-qiu, QI Guo-qing. The effect of unsaturated soil suction on slope stability[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(4): 343—348.
- [2] 殷坤龙, 汪洋, 唐中华. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21 (1): 75—78.
- [3] 包承钢. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定性问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1—15.  
BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 1—15.
- [4] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1—14.  
WU Hong-wei, CHEN Shou-yi, PANG Yu-wei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(1): 1—14.
- [5] 陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 447—450.  
CHEN Shan-xiong, CHEN Shou-yi. Analysis of stability of unsaturated soil slope due to permeation of rainwater[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(4): 447—450.
- [6] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [7] 中华人民共和国交通部. JTG D30—2004, 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

### 会 讯

#### 第六届全国青年岩土力学与工程会议暨岩土工程系列学术研讨会之十 2007年9月15~17日

由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会、中国力学学会岩土力学专业委员会、中国水利学会岩土力学专业委员会、中国建筑学会地基基础分会、《岩土工程师》编辑部主办, 同济大学承办的“第六届全国青年岩土力学与工程会议暨岩土工程系列学术研讨会之十”定于 2007 年 9 月 15~17 日在上海召开。会议将围绕区域性土与环境岩土工程问题、岩土工程物理模拟技术新进展、岩土力学性质试验与测试技术、地下空间开发与利用、岩土与地下工程设计计算新技术新方法、岩土与地下工程施工新技术新工艺、岩土工程质量检定与标准判据技术、岩土介质与结构物的相互作用、地基处理与加固技术、岩土工程数值分析、岩石和土的动力学理论与实验研究、环境岩土工程的新进展、工程地质灾害与典型事故实录等主题展开广泛的交流、讨论与论文征集, 并由同济大学出版社正式编辑出版论文集。

主办方与承办方热忱欢迎岩土工程界的同仁踊跃与会参加研究讨论。

会议征文截止时间为 2007 年 7 月 1 日, 篇幅宜控制在 5 页内(按《岩土工程学报》出版样式排版), 录用论文每篇收取版面费人民币 500 元(超出 5 页部分, 按 150 元/页加收)。

征文投寄地址: 上海市四平路 1239 号同济大学地下建筑与工程系《岩土工程师》编辑部(200092)或 edoge@mail.tongji.edu.cn & tjgenetb@online.sh.cn, 文稿右上角请加注“会议征文”字样, 同时请附寄第一作者的简介。

会议的详细信息可到 <http://geotec.tongji.edu.cn> 进行查阅。

有关会议事务请与同济大学地下建筑与工程系李国老师联系(200092, 上海市四平路 1239 号), 电话 021-65982774, 传真 021-65985210, 电子邮件 edoge@mail.tongji.edu.cn & tjgenetb@online.sh.cn。