

# 桐油和糯米汁改良土体防渗性和耐久性的研究

唐晓武<sup>1</sup>, 王艳<sup>1</sup>, 林廷松<sup>2</sup>, 林捷<sup>3</sup>

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学建筑设计研究院岩土工程分院, 浙江 杭州 310012; 3. 中国联合工程公司, 浙江 杭州 310022)

**摘要:** 利用桐油防渗性好、易于氧化成膜的特性和糯米汁黏糊度高的特点, 将桐油和糯米汁按适当比例添加到粉土、黏土和BS土(粉土中添加15%膨润土)中。改良后土体的平均渗透系数均大幅减小, 达1~2个数量级, 说明桐油和糯米汁对多种土类均有效。同时采用渗滤液和柴油进行渗透试验, 渗透系数无明显变化, 表明桐油形成的高分子膜比较稳定, 没有被侵蚀或溶解; 干湿循环作用后改良土的强度衰减得到减缓。总体而言, 在合适配合比下, 桐油和糯米汁能显著提高土体的防渗性和耐久性。

**关键词:** 防渗; 桐油; 糯米汁; 衬垫; 干湿循环; 耐久性

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)03-0351-05

作者简介: 唐晓武(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土工程、软黏土力学及地基处理方面的研究。

E-mail: [tangxiaowu@zju.edu.cn](mailto:tangxiaowu@zju.edu.cn)。

## Permeability and durability of soils improved by tung oil and sticky rice juice

TANG Xiao-wu<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, LIN Ting-song<sup>2</sup>, LIN Jie<sup>3</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Geotechnical Engineering Branch of Architectural Design and Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China; 3. China United Engineering Corporation, Hangzhou 310022, China)

**Abstract:** Tung oil and sticky rice juice are mixed with silt, clay and BS soil (silt mixed with 15% bentonite) in proper proportion. Tung oil, with the characteristic of infiltration prevention and film formation, and sticky rice juice, with high siminess, are selected as additives. The permeabilities of all kinds of improved soils significantly decrease, by 1~2 orders of magnitude, indicating that a variety of soils can be improved by tung oil and sticky rice juice. The permeabilities of leachate and diesel exhibit no obvious changes compared with water permeability, indicating that the polymer film of tung oil is stable. The shear strength of the improved soil is reduced after drying-wetting cycle. On the whole, the improved soil has better anti-seepage property and durability.

**Key words:** anti-seepage; tung oil; sticky rice juice; liner; drying-wetting cycle; durability

## 0 引言

土工膜(HDPE)是填埋场中的主要防渗材料, 具有良好的防渗性能, 但其抗不均匀沉陷能力较差, 耐穿刺能力较差。HDPE也被广泛用于水库或湖泊的防渗, 但随着环保意识增强, 其使用受到了限制。如在圆明园修复过程中, 采用HDPE会完全阻隔膜下土壤呼吸, 危及整个圆明园的生态系统, 国家环保总局下达了拆除防渗膜, 回填黏土和湖底淤泥的命令。如能在黏土中添加某些环境友好材料降低其渗透性, 则可大幅度减少黏土层厚度, 加大水深和库容。

土工合成材料膨润土衬垫(GCL)广泛用作填埋场、水池、污水池、水渠等的防渗层材料。但其长期抗干裂性能较差, 特别是长期使用中GCL会发生横向

收缩引起搭接开裂, 导致失效<sup>[1]</sup>。

桐油是我国的特产, 其主要成分是桐油酸三甘油酯, 即十八碳共轭-9, 11, 13-酸三甘油酯, 碳链上含有多个不饱和碳碳双键, 尤其是其中的共轭双键使其具有化学反应活性较大的特点。桐油具有良好的聚合反应活性和优异的成膜性, 成膜干燥速度快、强度高、附着力强、耐腐蚀性好<sup>[2]</sup>, 是干性最好的天然植物油。糯米汁具有黏性大、吸附强、胀度小、润滑、弱凝沉性等特点<sup>[3]</sup>。我国利用桐油、糯米汁、鸡蛋清等传统

有机材料来改良土体具有非常悠久的历史, 如长城、城墙、福建土楼等。

垃圾填埋场的渗漏会造成对周围土体的污染, 目前加油站的泄漏, 也成为国内外地下水污染的最大污染源之一<sup>[4]</sup>, 这使防渗材料的开发具有重大的意义。黏性土在垃圾填埋场的防渗系统中起着非常重要的作用, 但满足要求的黏性土在填埋场附近常常数量有限, 能否通过添加其它材料改良土体的防渗性能以便就地取材成为很多研究人员关心的问题。James & Peter<sup>[5]</sup>报道了有机处理的膨润土具有  $10^{-8}$  cm/s 数量级的渗透系数。刘长礼等<sup>[6]</sup>研究了在不同级别的砂中加入膨润土, 当含量达到 5% 时, 渗透系数约达  $10^{-9}$  cm/s。唐晓武等<sup>[7]</sup>在萧山黏土中添加桐油和糯米汁, 当萧山黏土、糯米汁和桐油的质量配合比适当时, 渗透系数在  $10^{-9}$  cm/s 附近, 且其阻滞金属离子的能力强。

HDPE 幅与幅搭接是施工过程的薄弱环节, 而 GCL 在长期使用过程中会发生纵向拉伸横向收缩从而导致搭接处出现问题, 桐油改良土不存在施工接缝问题, 施工相对方便。因此, 本文在唐晓武等<sup>[7]</sup>的基础上, 将糯米汁和桐油添加到黏土、粉质黏土和粉土中, 从渗透性和耐久性两方面研究桐油和糯米汁对多种类型土的适用性, 为今后的广泛应用奠定基础。

## 1 试样的基本物理性质

本文所取用的黏土基本物理性质同文献[7], 粉土取自杭州秋涛路地铁站, 并在此粉土中掺入 15% 商品膨润土制备而成混合土(文中用 BS 表示), 基本物理性质见表 1。选择东北糯米和工业用桐油为添加原料, 糯米汁的制备参照文献[7]。制备土样时干土、糯米汁、桐油的质量配合比均为 90:5:5。试验所需土样的制备均以最优含水率作为控制标准。

表 1 土样的基本物理性质

Table 1 Physical properties of soil samples

试样	土粒比重	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最优含水率/%	颗粒组成/%		
				黏粒	粉粒	砂粒
粉土	2.69	1.69	18	5	74.2	20.8
黏土	2.72	1.57	24	57	35.0	8.0
BS 土	2.61	1.65	22	20	62.5	17.5

## 2 改良土体的渗透试验

渗透仪采用南京土壤仪器厂生产的 TST-55A 型渗透仪, 用变水头方法分别对粉土、黏土、BS 土及相应改良土体进行测定, 对各试样均制备两个试样进行平行实验, 渗透系数取平均值, 并换算为标准温度(20 °C)下的渗透系数。

T°C 时渗透系数的计算采用下式:

$$k_T = 2.3 \frac{aL}{At} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

式中  $a$  为变水头管截面积, cm<sup>2</sup>;  $L$  为渗径, 等于试样高度, cm;  $h_1$  为开始时水头, cm;  $h_2$  为终止时水头, cm;  $A$  为试样的断面积, cm<sup>2</sup>;  $t$  为时间, s; 2.3 为 ln 和 lg 的换算系数。

标准温度(20 °C)时渗透系数为

$$k = k_T \frac{h_T}{h_{20}} \quad (2)$$

式中  $h_T$  为 T°C 时液体的动力黏滞系数, kPa·s( $10^{-6}$ );  $h_{20}$  为 20°C 液体的动力黏滞系数, kPa·s( $10^{-6}$ )。

渗透试验中制备的土样均以最优含水率和干密度为控制标准。对于添加了桐油和糯米汁进行改良的土体, 考虑把糯米汁含量作为含水率的一部分, 由于桐油与水不相容, 形成的分子膜具有张性, 混合于土中后, 包裹其表面, 填充颗粒间的孔隙, 故桐油量未算做含水率的组成部分。桐油和糯米汁具有较大的黏性, 很难击实到最大干密度, 故试验中控制土样改良前后的干密度相同。

### 2.1 粉土及其改良土的渗透试验

按照相同的干密度制备粉土及添加了桐油和糯米汁后改良粉土的试样, 含水率均为最优含水率 18%, 干密度为 1.52 g/cm<sup>3</sup>。粉土的渗透系数为  $1.62 \times 10^{-6}$  cm/s, 改良粉土的渗透系数为  $3.76 \times 10^{-7}$  cm/s, 减小了近一个数量级。

### 2.2 改良黏土的渗透试验

由文献[7]已知改良后黏土的渗透系数减小了近两个数量级。本文考虑到在实际工程中土体可能处于饱和与非饱和状态, 应用两组土样进行渗透试验。以黏土的最优含水率 24% 作为控制标准, 土样的干密度均为 1.41 g/cm<sup>3</sup>。土样制备后, 对其中一组抽真空后用无气水饱和即得到饱和土样, 没有进行饱和的另一组土样称为最优含水率情况时的土样。两组土样的渗透系数随时间的变化如图 1 所示。

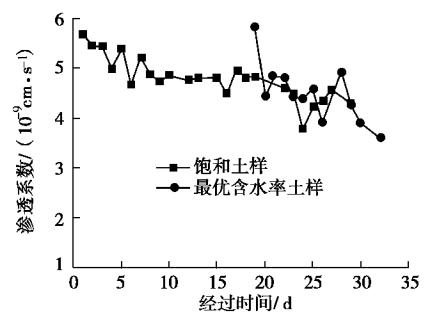


图 1 改良黏土的渗透系数

Fig. 1 Permeability of improved clay

由于改良土的渗透系数非常小, 为检验渗透系数

的稳定性, 渗透试验持续时间很长, 大约一个月左右。饱和试样经过 2 d 出水管就开始出水, 最优含水率土样经过 18 d 后出水管才开始出水, 出水后均处于比较稳定的状态。饱和样的平均渗透系数为  $4.81 \times 10^{-9}$  cm/s, 最优含水率土样为  $4.50 \times 10^{-9}$  cm/s, 两者没有明显差别, 均较改良前降低了两个数量级, 与文献[7]吻合。

### 2.3 BS 土及其改良土的渗透试验

为了解桐油和糯米汁能否使渗透系数已为  $10^{-9}$  cm/s 数量级的土体的渗透系数进一步降低, 在粉土中添加 15% 商品膨润土成分形成 BS 土。按照最优含水率 24% 控制, 制备干密度相同的 BS 土及其改良土样, 干密度均为  $1.44 \text{ g/cm}^3$ 。经过一周的观察, 计算两个土样的渗透系数分别见图 2 和图 3。

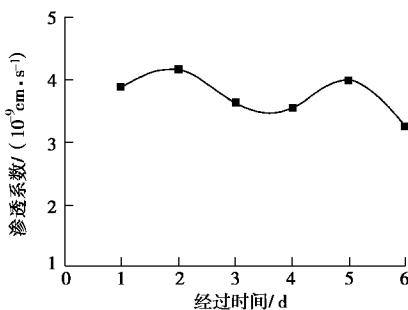


图 2 BS 土的渗透系数

Fig. 2 Permeability of BS soil

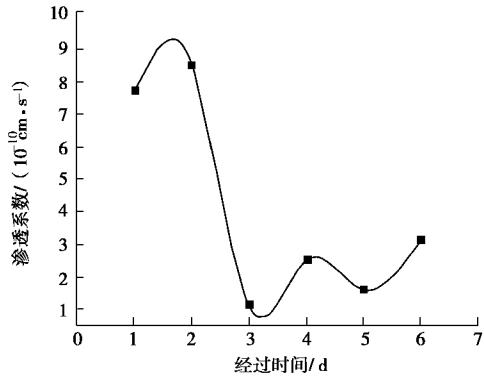


图 3 改良 BS 土的渗透系数

Fig. 3 Permeability of improved BS soil

BS 土的渗透系数平均值为  $3.75 \times 10^{-9}$  cm/s, 改良后为  $4.11 \times 10^{-10}$  cm/s, 下降了一个数量级。可见, 糯米汁、桐油能够使渗透系数很小的 BS 土的渗透系数得到进一步降低。

## 3 改良土的耐久性研究

季节、气候的变化和填埋场中的生物化学反应等会引起填埋场内部温度和湿度的改变 (温度可达到  $55\sim60^\circ\text{C}$ ), 从而发生干湿循环作用; 在加油站和垃圾

填埋场等工程中, 渗透的流体为有机油品和渗滤液, 故本文对经过干湿循环后的土体强度进行了试验研究, 并进一步采用渗滤液和柴油对改良土进行了渗透试验, 从两个角度考察改良土作为衬垫的耐久性能。

### 3.1 改良土体的干湿循环试验

干湿循环作用的方法参照胥书霞等<sup>[8]</sup>并加以改进。以最优含水率作为控制标准, 对萧山黏土及其改良土各制备 4 组环刀试样, 环刀高 2 cm, 直径 6.18 cm。先对土样进行抽真空饱和, 静置 24 h 后放入  $75^\circ\text{C}$  恒温烘箱烘烤 3 h, 然后将其取出放入室温状态下的水中 ( $20^\circ\text{C}$ ) 浸泡 30 min, 此为一次干湿循环。再度将试样放入烘箱, 如此反复, 对 4 组试样分别进行 0 次、5 次、10 次、15 次干湿循环作用。最后将各组的 4 个湿土样分别在垂直压力为 100, 200, 300, 400 kPa 下固结 24 h, 最后在直剪仪上进行剪切试验。经过干湿循环作用后, 测得的萧山黏土及改良黏土的抗剪强度与垂直压力之间的关系曲线见图 4 和图 5 所示, 摩擦角和黏聚力见表 2 所示。

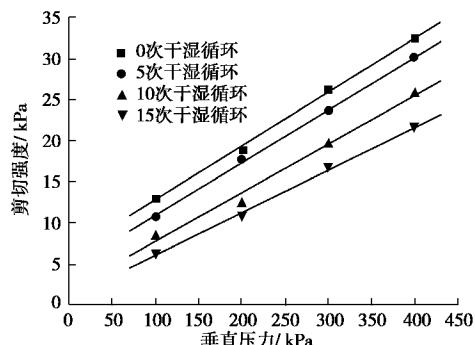


图 4 萧山黏土干湿循环剪切强度与垂直压力的关系

Fig. 4 Relationship between shear strength and vertical pressure of Xiaoshan clay after drying-wetting cycle

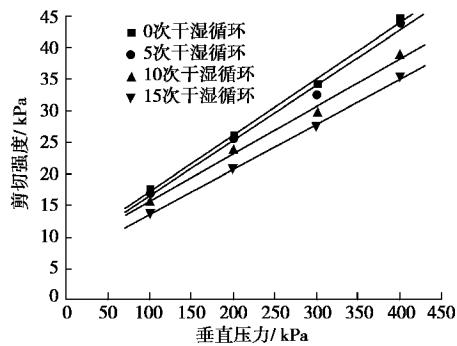


图 5 改良黏土干湿循环剪切强度与垂直压力的关系

Fig. 5 Relationship between shear strength and vertical pressure of improved clay after drying-wetting cycle

由图 4 和 5 的无干湿循环可知, 改良土体的强度指标明显高于萧山黏土对应的强度指标。从表 2 可看出, 改良黏土在经过 5 次干湿循环后黏聚力和内摩擦

角都没有明显变化,表明在干湿循环作用次数较少时,改良土的强度明显优于原土。随着干湿循环次数的增加,萧山黏土和改良黏土的黏聚力都呈逐渐减小的趋势,但内摩擦角变化都非常小,只是略微减小。颗粒之间的黏结由于干湿循环而断开导致黏聚力减小;改良后黏土颗粒变大(文献[7]的电子显微镜照片得到证实),增大了摩擦角,干湿循环作用对颗粒的大小改变很小,因此摩擦角变化很小。对比发现,干湿循环作用后,改良黏土黏聚力的降幅得到减缓。

表2 萧山黏土及其改良黏土干湿循环试验抗剪强度指标

Table 2 Shear strength indices of Xiaoshan clay and improved clay after drying-wetting cycle tests

循环次数		0次	5次	10次	15次
萧山黏土	黏聚力/kPa	12	6	2.8	4.5
	摩擦角/(°)	18	17	16.5	16
改良黏土	黏聚力/kPa	14.5	15	9.5	6
	摩擦角/(°)	30	31	29.5	29

干湿循环会引起黏性土颗粒集聚和排列的变化,从而引起微观结构的改变<sup>[9-10]</sup>。黏粒之间在不可逆的范德华力作用下使黏粒集聚成较大集聚体,其结果是土中黏粒含量减小,比表面积减小,可塑性降低,颗粒定向性变差,孔隙率增大,渗透性增强,土粒之间结构连结减弱,裂隙容易发育,强度降低<sup>[11]</sup>。添加了桐油和糯米汁后,由于糯米汁具有较强的黏性,能和桐油分子膜共同作用,胶结黏土颗粒,填充颗粒间孔隙,形成更大的团聚体,提高了土体的黏聚力和内摩擦角,干湿循环后土体性能也相应得到改善。因此改良土的强度总体而言得到提高,且干湿循环后的强度降幅减少,改良土的耐久性得到明显改善。

### 3.2 油品和渗滤液的渗透

汽油、柴油是加油站的常用油品。由于汽油挥发性强,对很小渗透系数的测量会产生很大的误差,为保证结果的准确性,选用柴油对改良黏土进行渗透试验。垃圾填埋场渗滤液成分复杂且具有腐蚀性。采用从苏州七子山垃圾填埋场中取回的渗滤液(稀释10倍)进行渗透试验以考察改良土的耐腐蚀性能,渗滤液的主要成分及相关参数见表3。

表3 渗滤液的主要参数

Table 3 Parameters of leachate 单位: mg/L

Cu	Pb	Cr	Cd	Zn	COD	BOD	pH
0.16	0.08	0.29	0.004	0.03	20400	8800	8

两组试样的制备方法同前述试验相同,且均为饱和试样。试验持续了半个月的时间,以了解油品和渗滤液对改良土长期渗透性的影响。柴油和渗滤液的渗透系数随时间的变化曲线如图6所示。

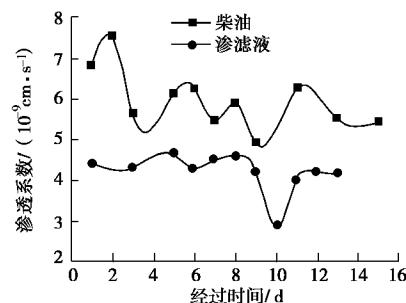


图6 柴油和渗滤液的渗透系数

Fig. 6 Permeability of diesel oil and leachate

从图6得出柴油和渗滤液的平均渗透系数分别为 $5.99 \times 10^{-9}$  cm/s和 $4.20 \times 10^{-9}$  cm/s,与用水渗透时的渗透系数 $4.81 \times 10^{-9}$  cm/s相比没有明显的变化,表明桐油分子形成的膜没有被柴油所溶解,也没有受到渗滤液的侵蚀,由此看来这种高分子膜比较稳定。

## 4 结论

(1) 桐油和糯米汁的改良适合多种土,其中黏土经改良后渗透系数下降了两个数量级,粉土经改良后渗透系数降低了一个数量级,特别是渗透性极小的BS土改良后渗透系数进一步降低。

(2) 经干湿循环作用后,改良黏土的强度衰减得到减缓;在油品和渗滤液的作用下,渗透系数没有发生明显的变化,表明桐油分子形成的膜没有受到渗滤液中各种化学成分的侵蚀,这种高分子膜比较稳定。总体而言,桐油和糯米汁使土体的耐久性得到改善。

## 参考文献:

- [1] 刘长礼. 垃圾卫生填埋处置的理论方法和工程技术[M]. 北京: 地质出版社, 1999. (LIU Chang-li. Theoretical methods and engineering technology of landfill treatment[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. (in Chinese))
- [2] 蒲侠, 张兴华, 童速玲, 薛鹏. 桐油改性的研究进展及应用前景[J]. 林产化工通讯, 2003, 37(6): 41-45. (PU Xia, ZHANG Xing-hua, TONG Su-ling, XUE Peng. Review of Tong oil modification and application prospect[J]. Communication of Forest Industry and Chemical Engineering, 2003, 37(6): 41-45. (in Chinese))
- [3] 赵则胜. 特色稻米及其实用价值[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1992. (ZHAO Ze-sheng. Distinctive rice and the application values[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Press, 1992. (in Chinese))
- [4] 刘海生, 侯胜利, 马万云, 陈瓞延, 程业勋. 土壤与地下水污染的地球物理地球化学勘探[J]. 物探与化探, 2003, 27(4): 307-311. (LIU Hai-sheng, HOU Sheng-li, MA

- Wan-yun, CHEN Die-yan, CHENG Ye-xun. Investigation of soil and groundwater contamination using geophysical and geochemical methods[J]. *Geophysical and Geochmical Exploration*, 2003, **27**(4): 307 – 311. (in Chinese)
- [5] JAMES A S, PETER R J. Benzene transport through landfill lines containing organophilic bentonite[J]. *Journal of Environment Engineering*, 1994, **120**(6): 1559 – 1575.
- [6] 刘长礼, 王秀艳, 张云. 垃圾填埋场砂土衬垫中膨润土添加剂的防渗能力[J]. *地球学报*, 2000, **21**(1): 98 – 103. (LIU Chang-li, WANG Xiu-yan, ZHANG Yun. Penetration-preventing capacity of landfill site liner of sandy soils and bentonite[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2000, **21**(1): 98 – 103. (in Chinese))
- [7] 唐晓武, 林廷松, 罗雪, 应丰, 李振泽. 利用桐油和糯米汁改善黏土的强度及环境土工特性[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(9): 1324 – 1329. (TANG Xiao-wu, LIN Ting-song, LUO Xue, YING Feng, LI Zhen-ze. Strength and geoenvironmental properties of clay improved by Tung oil and sticky rice juice[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(9): 1324 – 1329. (in Chinese))
- [8] 胥书霞, 邵生俊. 贮灰场固化粉煤灰防渗材料试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(18): 3229 – 3235. (XU Shu-xia, SHAO Sheng-jun. Properties of impermeability composite material with solidifying fly-ash in storing site[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(18): 3229 – 3235. (in Chinese))
- [9] ALLAM M M, SRIDHARAM S. Effect of wetting and drying on shear strength[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1981, **107**(4): 421 – 438.
- [10] DAY Robert W. Swell-shrink behavior of compacted clay[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **120**(3): 618 – 623.
- [11] AL-HOMOND A S, BASMA A A, HUSEIN MALKAWI A I, et al. Cyclic swelling behavior of clays[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, **121**(7): 562 – 565.

## 第十届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会 (第一号通知) (2010年, 浙江·温州)

**主办单位:** 中国力学学会岩土力学专业委员会

**承办单位:** 温州大学, 浙江大学

**协办单位:** 温州市建筑设计研究院, 温州市城建设计院, 温州市勘察测绘研究院, 《岩土力学》编辑部, 《浙江大学学报》(工学版) 编辑部

**会议主题:** ①岩土本构模型与参数研究; ②岩土工程重大工程实例; ③岩土试验与测试技术; ④环境岩土工程; ⑤土动力学与工程抗震数值分析方法。

欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人踊跃撰稿、参加会议。

**会议专题:** 岩土力学数值分析与解析新方法

会议期间将组织工程考察和展览。热忱欢迎从事岩土工程领域新材料、新技术、新设备的开发、生产和应用的相关公司及单位踊跃报名参加工程勘察和技术展览。

**会议论文与出版:** 论文格式与要求见《岩土力学》征稿启事。投稿范例模板请登录: <http://ytlx.china-journal.net.cn> 下载。所有投稿稿件请按要求排好版后发至 [wzjgxy@wzu.edu.cn](mailto:wzjgxy@wzu.edu.cn),

[wzjgxy@126.com](mailto:wzjgxy@126.com)。会议挑选部分优秀论文在《岩土力学》增刊、《浙江大学学报》(工学版) 出版, EI 收录; 其余将以《温州大学学报》增刊形式发表。

**重要日期:** 2010年4月30日: 征稿截止日期; 2010年5月31日: 通知修改和退稿意见; 2010年6月30日: 通知录用结果。

**会议时间及地点:** 2010年11月浙江温州 温州大学  
大会秘书处:

秘书长: 孙林柱。副秘书长: 王立忠, 钱欣平。秘书: 王军, 孙宏磊, 余闯, 丁光亚, 刘观仕, 赵凌, 杨为民。

联系人: 孙林柱 (0577-86689616, 13706659656); 王军 (0755-86689687, 15968795938); 孙宏磊 (0751-88208774, 13758217424); 余闯 (0577-86689619, 15868717768); 丁光亚 (0577-86689609, 15058753768)。

**联系地址:** 浙江省温州市茶山高教园区; 温州大学建筑与土木工程学院; 邮政编码: 325035; E-mail: [wzjgxy@wzu.edu.cn](mailto:wzjgxy@wzu.edu.cn), [wzjgxy@126.com](mailto:wzjgxy@126.com)。

(中国力学学会岩土力学专业委员会 供稿)