

城市固体废弃物残余变形特性试验研究

邹德高^{1,2}, 赵 阳¹, 徐 炳¹, 孔宪京¹, 王 强¹

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 哥伦比亚大学土木工程与工程力学系, 美国 纽约 10027)

摘要: 利用中型动三轴仪, 对城市固体废弃物 (MSW) 进行了残余变形试验研究, 采用改进的沈珠江模型对 MSW 的残余变形模型参数进行拟合, 在此基础上, 讨论了不同破坏标准下的应力水平对模型参数的影响, 建议了适合 MSW 的残余变形模型应力水平指数。MSW 属于应变硬化型材料, 应力和应变曲线没有明显的峰值, 不同破坏标准条件下, 相同固结比的 MSW 具有不同的应力水平, 因此建议用固结应力比来代替应力水平, 提出了适用于 MSW 的残余变形修改模型, 修改后的模型不必考虑破坏标准对残余变形参数的影响, 应用更加方便。

关键词: 城市固体废弃物; 残余变形; 应力水平; 改进沈珠江模型; 固结应力比

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)04-0554-05

作者简介: 邹德高 (1973-), 男, 博士, 副教授。主要从事计算土力学、岩土材料本构模型、高土石坝和核电厂工程抗震方面的研究工作。E-mail: zoudegao@dlut.edu.cn。

Experimental study on residual deformation behaviors of municipal solid waste

ZOU De-gao^{1,2}, ZHAO Yang¹, XU Bin¹, KONG Xian-jing¹, WANG Qiang¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia University, New York 10027, USA)

Abstract: Medium-scale dynamic triaxial tests are carried out to investigate the residual deformation behaviors of simulated municipal solid waste (MSW). Based on revised Shen Zhu-jiang model, parameters for modeling residual deformation of MSW are derived. Given three typical failure criteria, the effect of stress levels on model parameters is studied, and a stress level index is fitted to model the residual deformation of MSW. As the MSW is a kind of strain-hardening material, no clear peak is shown on stress-strain curve. The MSW with the same consolidation ratio results in varied stress levels in the model if multiple failure criteria are considered. To eliminate the choice of failure criterion and make the model parameter derivation straightforward, the stress level is replaced by the consolidation stress ratio, which leads to a modified and simplified model to estimate residual deformation of MSW. The modified model is verified by using the test results and will be used conveniently regardless of different failure criteria.

Key words: municipal solid waste; residual deformation; stress level; modified Shen Zhujiang's model; consolidation stress ratio

0 引言

随着经济的发展, 城市固体废弃物 (municipal solid waste 或 MSW) 的产生量迅速增长, 卫生填埋法是一种广泛采用的 MSW 处理技术。MSW 填埋场同其他构筑物一样, 也会经历地震荷载的作用, 震后的残余变形将直接影响填埋场的地表沉降与后期开发利用, 影响填埋场侧向及底部衬垫层及土工膜的健康状况, 若衬垫层或土工膜破坏, 渗滤液就会渗入地下水, 对周边环境造成致命的伤害。因此, 对 MSW 填埋场震后残余变形的预估显得十分重要。

目前在岩土工程方面, 地震残余变形的计算模型

主要有水科院模型^[1], 谷口模型^[2], 沈珠江模型^[3]以及改进的沈珠江模型^[4]。其中, 沈珠江模型及其改进模型仅含 5 个参数, 参数处理也较简单, 便于应用。但这些模型均是基于砂土、堆石料等岩土材料提出来的, 对 MSW 的残余变形研究尚不多见^[5]。

本文通过 MSW 循环三轴试验, 研究 MSW 残余变形与动应变、振动次数的关系, 采用改进沈珠江模型来模拟 MSW 的残余剪应变特性, 并针对 MSW 的

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50538080); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (50808032, 50908032); 辽宁省教育厅基金项目 (2008S047)

收稿日期: 2009-12-18

强度特性, 采用固结比代替应力水平对模型进一步改进。

1 试样的制备与仪器

1.1 试样的制备^[6-7]

本文中的实验用料是利用模拟 MSW 来代替真实 MSW, 模拟 MSW 配置方便, 且可较好地模拟真实 MSW 的应力应变特性^[6]。试样的配比方案见表 1。

表 1 MSW 模拟料的配比方案

Table 1 Composition of simulated MSW samples

组成	纸张	白菜	粉细砂	炉渣	塑料
质量百分比/%	14.44	27.79	6.49	30.55	20.73

试验采用了初始孔隙比为 $e_0=2$ 的 MSW (干密度为 0.669 g/cm^3)。试样的尺寸为直径 20 cm, 高度 50 cm。每个试样分 5 层击实, 每层 10 cm, 试样装好后通入二氧化碳气体, 再通入无气水进行饱和, 使试样饱和度达到 95% 以上。

1.2 仪器的介绍^[8]

试验是在大连理工大学抗震研究所的中型三轴仪上进行的 (图 1)。

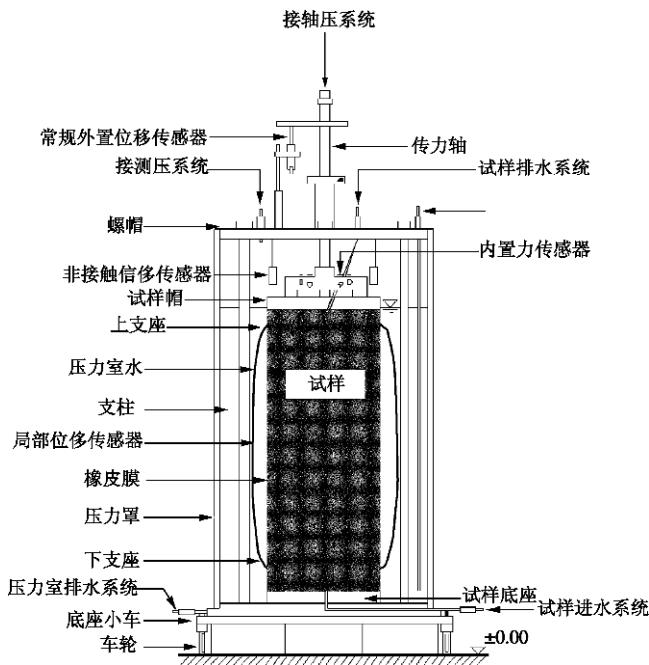


图 1 三轴仪构造简图

Fig. 1 Diagram of triaxial apparatus

2 改进沈珠江模型的介绍

改进沈珠江模型中, 残余剪应变和残余体变可以表示为振次, 动应变和应力水平的函数:

$$e_{vr} = c_{vr} \log(1+N) \quad , \quad (1)$$

$$g_r = c_{dr} \log(1+N) \quad , \quad (2)$$

$$c_{vr} = c_1 g_d^{c_2} \exp(-c_3 S_l^2) \quad , \quad (3)$$

$$c_{dr} = c_4 g_d^{c_5} S_l^n \quad , \quad (4)$$

则, 残余体应变和残余剪应变增量形式为

$$\Delta e_{vr} = c_1 g_d^{c_2} \exp(-c_3 S_l^2) \frac{\Delta N}{1+N} \quad , \quad (5)$$

$$\Delta g_r = c_4 g_d^{c_5} S_l^n \frac{\Delta N}{1+N} \quad , \quad (6)$$

假定 S_l 对 c_{vr} 无影响, 即式(3)中的 $c_3 = 0$ 。式中: Δe_{vr} , Δg_r 为残余体应变、残余剪应变增量; g_d 为动剪应变幅值, 根据第 10 震次的应变幅值确定; S_l 为应力水平, $S_l = (s_1 - s_3)/(s_1 - s_3)_f$; n 为应力水平指数, 对于堆石材料, n 可取 1; N , ΔN 为振动次数及其增量; c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 为试验参数。MSW 的渗透系数较小, 一般为 $10^{-3} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ ^[9], 地震过程中认为其是不排水的, 可以忽略残余体积变形, 因此本文只研究其残余剪应变部分。

3 试验过程和结果分析

本文循环三轴试验采用的固结围压分别是 100, 200, 300 kPa, 固结应力比分别采用 $K_c = s_1/s_3 = 1.5$ 和 $K_c = 2.0$, $K_c = 1.5$ 时对每个试样分别施加轴向动应力为 $s_d = 0.2s_3$ 与 $s_d = 0.4s_3$ 的循环荷载, $K_c = 2.0$ 时对每个试样分别施加轴向动应力为 $s_d = 0.3s_3$ 与 $s_d = 0.6s_3$ 的循环荷载。激振波型采用正弦波, 试验频率为 0.1 Hz, 共 30 振次。

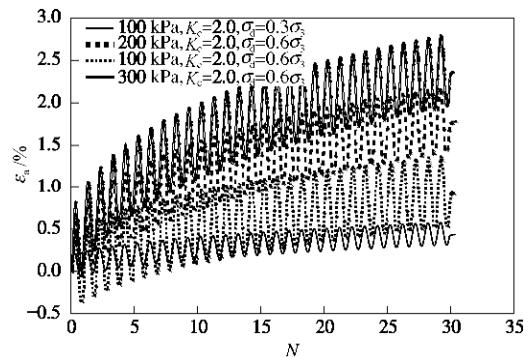


图 2 MSW 轴向应变与振次的关系

Fig. 2 Relationship between axial strain and number of cyclic vibration

图 2 为典型轴向应变与震次的关系曲线, 可以看出: 前几个振次残余轴向应变增长较快, 随着振次的增加增长越来越缓慢, 这与堆石料的残余变形规律是相似的。

图 3 为残余剪应变与 $N+1$ 在半对数坐标上的关系曲线。从图 3 可以看出: 残余剪应变与 $N+1$ 的半对数坐标呈直线关系, 同一固结比情况下, 残余剪应变随着动应力的增大而增大; 同一动应力比情况下, 残余

剪应变随着围压的增大而增大。

沈珠江残余变形模型引入了应力水平 S_1 作为参数, 但 MSW 的应力-应变模型与堆石料不同, 为应变硬化型材料(图 4), 其应力-应变关系没有出现峰值, 不同的破坏标准所对应的强度是不同的, 因此初始固结比所对应的应力水平也是不同的。本文分别采用轴向应变 5%, 10%, 15% 三个破坏标准来确定强度, 根据强度和固结比确定应力水平, 进一步拟合式(4)的应力水平指数。

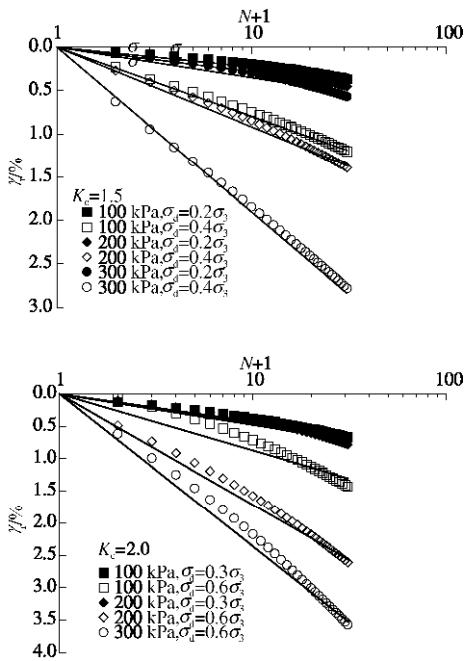


图 3 MSW 残余剪应变与振次的关系

Fig. 3 Relationship between residual shear strain of MSW and number of cyclic vibration

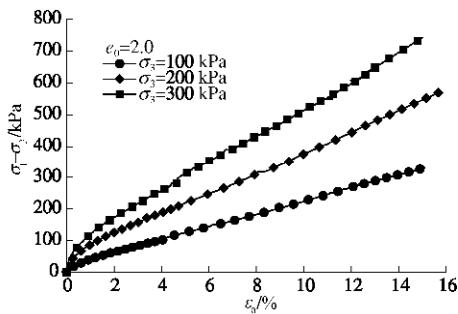


图 4 MSW 应力与应变的关系

Fig. 4 Relationship between stress and strain of MSW

图 5 为应力水平指数 n 与相关系数的关系, 可以看出, 在不同破坏标准下, 应力水平指数的相关系数均在 $n=0.5$ 处达到了最大, 分别为 0.958, 0.964, 0.959, 因此建议应力水平指数取 $n=0.5$ 。

图 6 是应力水平指数 $n=0.5$ 时, 破坏标准为 10% 的 $c_{dr}/S_1^n - g_d$ 在双对数坐标下的直线拟合, 可以看出

试验点的离散程度很小。这表明改进的沈珠江模型能很好地模拟垃圾土的残余变形特性。

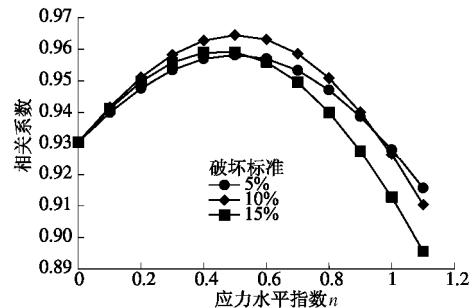


图 5 相关系数与应力水平指数 n 的关系

Fig. 5 Relationship between correlation coefficient and exponential of stress level

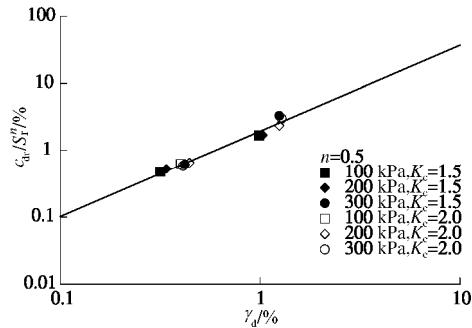


图 6 MSW $c_{dr}/S_1^n - g_d$ 的关系曲线($n=0.5$)

Fig. 6 Relationship between c_{dr}/S_1^n and g_d ($n=0.5$)

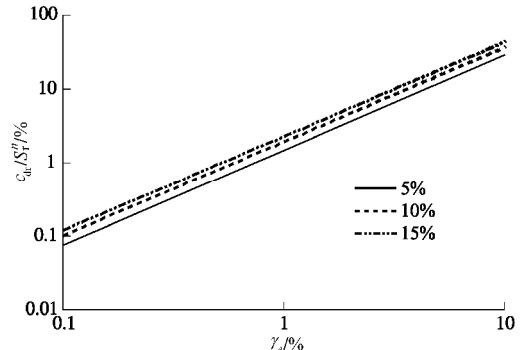


图 7 3 个破坏标准下的 $c_{dr}/S_1^n - g_d$ 拟合曲线 ($n=0.5$)

Fig. 7 Fitting curves of relationship between c_{dr}/S_1^n and g_d in three failure criteria ($n=0.5$)

图 7 为不同破坏标准下, $c_{dr}/S_1^n - g_d$ 拟合曲线, 可以看出 3 条拟合曲线是基本平行的。表 2 汇总了不同破坏标准下的 c_4 , c_5 值, 斜率值 c_5 相差不大, 可取为 3 个破坏标准下的均值, 即 $c_5=1.29$ 。随着破坏标准的增大, 参数 c_4 值逐渐增大。

从图 8 可以看出, c_4 值随着破坏标准的增大而增大并且基本呈线性关系, 根据其拟合曲线得出以下关系:

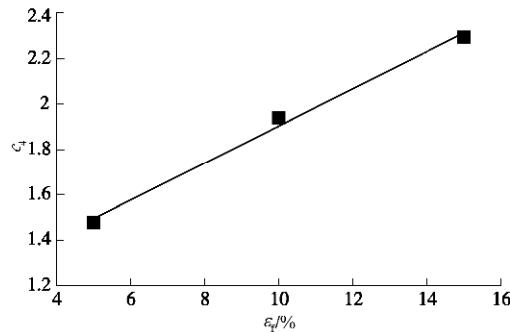
$$c_4 = a + b e_f, \quad (7)$$

其中, $a=1.08$, $b=0.082$, e_f 为破坏应变。

表2 不同破坏标准下的参数值

Table 2 Residual deformation parameters under different failure criteria

破坏标准	$c_4/\%$	c_5
5%	1.476	1.295
10%	1.940	1.282
15%	2.296	1.282

图8 MSW 永久变形参数 c_4 - e_f 的关系Fig. 8 Relationship between c_4 and e_f for MSW

4 引入固结比的 MSW 残余变形模型

上述研究表明, 利用沈珠江模型或其改进模型整理永久变形模型参数时, 需要首先定义其破坏应变, 得出应力水平值, 并且定义的破坏应变不同, 所得的参数也不同, 因此较为繁琐。贾革续等引入固结比对谷口模型进行了改进^[9], 效果较好。因此, 本文尝试用固结应力比 $K_c = s_1/s_3$ 来代替应力水平 $S_1 = (s_1 - s_3)/(s_1 - s_3)_f$, 因此模型中的残余剪应变部分更改为

$$\Delta g_r = c_4 g_d^{c_5} K_c^n \frac{\Delta N}{1+N} \quad (8)$$

固结比指数 n 对相关系数的影响如图9所示。可以看出, 当 n 取 0.8 时, 其相关系数值达到了最大, 为 0.947。当 n 为 0.8 时, c_{dr}/K_c^n 与残余剪应变 g_d 在双对数坐标上的拟合曲线见图 10, 可以看出试验点离散程度很小, 拟合参数为 $c_4=0.710$, $c_5=1.313$ 。

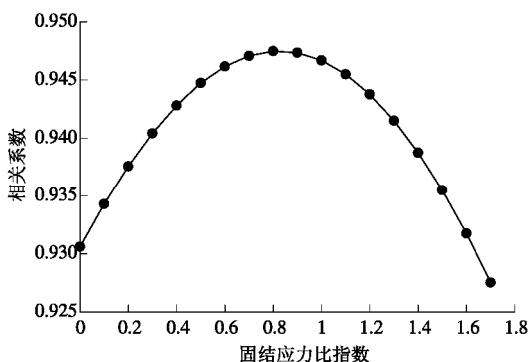
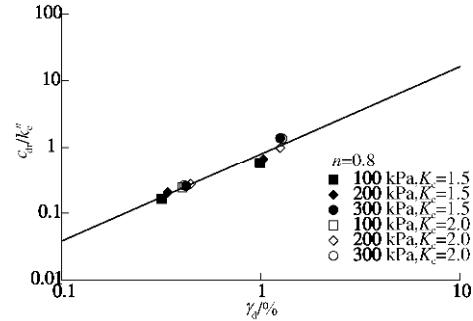


图9 相关系数与固结应力比指数的关系

Fig. 9 Relationship between correlation coefficient and exponential of consolidation stress ratio

利用固结应力比代替应力水平能很好的模拟类似 MSW 这样的应变硬化型材料的残余变形, 消除了定义不同的破坏标准而造成的不便。

图10 MSW c_{dr}/K_c^n - g_d 的关系曲线($n=0.8$)Fig. 10 Relationship between c_{dr}/K_c^n and g_d for MSW ($n=0.8$)

5 结论

本文利用中型三轴仪对城市固体废弃物 (MSW) 进行了循环动荷载下残余变形试验研究, 得到以下结论:

(1) MSW 的残余剪切变形可采用改进的沈珠江模型模拟, 当应力水平指数值为 0.5 时, 试验点离散程度最小。

(2) MSW 改进沈珠江模型参数中, c_4 值随着破坏标准的提高而增加, 并且呈线性关系; c_5 值随着破坏标准的提高变化很小。

(3) 用固结应力比 K_c 代替应力水平 S_1 , c_{dr}/K_c^n 与 g_d 在双对数坐标下同样符合线性关系, 当固结应力比指数为 0.8 时, 相关系数最大, 因此建议 n 取 0.8。

(4) 利用固结应力比代替应力水平后, 不必考虑不同破坏标准对残余变形参数的影响, 应用更加方便。

(5) 本文采用的试验材料主要针对新鲜 MSW 材料进行模拟, 降解后的 MSW 材料残余变形特性需进一步研究。

参考文献:

- [1] 王昆耀, 常亚屏, 陈宁. 往返荷载下粗粒土的残余变形特性[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 48 - 53. (WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Residual deformation characteristics of coarse-grained soils under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 48 - 53. (in Chinese))
- [2] EIICHI TANIGUCHI, ROBERT V Whitman, ALLEN MARR W. Prediction of earthquake-induced deformation of earth dams[J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 126 - 132.
- [3] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学, 1996, 6(2): 143 - 150. (SHEEN Zhu-jiang, XU Gang. (in Chinese))

- Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. Hydro-Science and Engineering, 1996, 6(2): 143 - 150. (in Chinese))
- [4] 邹德高, 孟凡伟, 孔宪京, 等. 堆石料残余变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 807 - 812. (ZOU De-gao, MENG Fan-wei, KONG Xian-jing, et al. Residual deformation behavior of rock-fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 807 - 812. (in Chinese)).
- [5] 周 健, 池毓蔚, TH Triantafylidis, 等. 垃圾土室内动力试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 1 - 5. (ZHOU Jian, CHI Yu-wei, TH Triantafylidis, et al. Stiffness and residual strain of municipal solid waste by cyclic triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 1 - 5. (in Chinese))
- [6] 孙秀丽. 城市固体废弃物变形及强度特性研究[D]. 大连: 大连理工大学. (SUN Xiu-li. Characterization of deformation and strength for municipal solid waste doctoral dissertation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, (in Chinese))
- [7] 孙秀丽, 孔宪京, 邹德高, 等. 城市固体废弃物应力应变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 726 - 731. (SUN Xiu-li, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, et al. Stress-strain model for municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 726 - 731. (in Chinese))
- [8] 孔宪京, 张 涛, 邹德高, 等. 中型动三轴仪的研制及微小应变测试技术的应用[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(1): 79 - 84. (KONG Xian-jing, ZHANG Tao, ZOU De-gao, et al. Design of medium scale dynamic triaxial test apparatus and its application at small strains[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(1): 79 - 84. (in Chinese))
- [9] 介玉新, 旦曾顿珠, 魏戈峰, 等. 垃圾土的渗透特性试验[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(6): 307 - 310. (JIE Yu-xin, DAN ZENGDUNZHU, WEI Ge-feng, et al. Study on the permeability of municipal solid waste[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2005, 19(6): 307 - 310. (in Chinese))
- [10] 贾革续, 孔宪京. 粗粒土动残余变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 26 - 30. (JIA Ge-xu, KONG Xian-jing. Study on residual deformation characteristics of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 26 - 30. (in Chinese))

中国土木工程学会 2011 年度学术活动计划表 (岩土工程及相关主题)

活动名称	主要内容及目的	时间、会期	规模(人)	地点	具体组织单位及联系人	电话	邮箱	地址、邮编	主办单位(是否联合召开)
第十届海峡两岸隧道及地下工程学术及技术研讨会	交流海峡两岸隧道及地下工程技术	2011 年 8 月, 3 天	250 人	乌鲁木齐	中国土木工程学会隧道及地下工程分会, 常翔	0379-62632097	crtgex@163.com	洛阳状元红路 3 号, 471009	中国土木工程学会隧道及地下工程分会协办, 中国岩石力学与工程分会地下空间分会主办(是)
2011 中国城市轨道交通关键技术论坛暨第二十一届地铁学术交流会(学会百年庆典系列学术会议)	展示、交流与推广我国轨道交通规划、设计、施工、运营等方面的技术, 探讨在低碳经济新形势下城市轨道交通领域可持续发展	2011 年 10 月	200 ~ 300 人	西安	中国土木工程学会城市轨道交通技术工作委员会, 叶晓平	010-88336460	Yexiaoping@buedri.com	北京市阜成门北大街 5 号, 100037	中国工程院土木水利与建筑工程学部、中国土木工程学会城市轨道交通技术工作委员会、西安地铁公司(是)
第十一届全国土力学及岩土工程学术会议(学会百年庆典系列学术会议)	以“岩土工程创新与可持续发展”为主题, 广泛交流我国近年来土力学与岩土工程领域的最新研究成果	2011 年 8 月, 4 天	约 1000 人	兰州	中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 张建红	010-62792984	cezhangjh@tsinghua.edu.cn	北京清华大学水利水电工程系岩土所, 100084	中国工程院土木水利与建筑工程学部、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会(是)
第十五届防水排水技术交流会	地铁建设运营中的防水排水设计、施工及管理; 地下空间开发的防水排水设计、施工及管理; 有关地下结构防水排水的标准讨论	2011 年下半年	100 人	昆明	中国土木工程学会隧道及地下工程分会防水排水专业委员会, 陈心茹	021-63178200 转 2809, 13601949896	office@stedi.cn	上海市天目西路 290 号康吉大厦市政楼 1702 室, 200070	中国土木工程学会隧道及地下工程分会防水排水专业委员会, 上海市隧道工程轨道交通设计研究院(是)
2011 隧道及地下工程新发展国际论坛	低碳经济的隧道及地下工程新设备新材料应用	2011 年 7 月 30 ~ 31 日	100 ~ 200 人	成都	中国土木工程学会隧道及地下工程分会新设备新材料应用专业委员会, 章元爱	028-86649339	zyazhang@163.com	成都市西岳城街 118 号, 610031	中国土木工程学会隧道及地下工程分会新设备新材料应用专业委员会