

DOI: 10.11779/CJGE201705005

# 排水竖井在垃圾填埋场滑移治理中的应用及效果分析

何海杰<sup>1, 2</sup>, 兰吉武<sup>\*1, 2</sup>, 陈云敏<sup>1, 2</sup>, 邱清文<sup>1, 2</sup>, 史 炜<sup>3</sup>

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310058;

3. 西安市固体废弃物管理处, 陕西 西安 710000)

**摘 要:** 垃圾填埋场滑移会造成严重的人员财产损失和环境污染, 填埋场稳定控制和滑移的治理方法较为缺乏。在国内某失稳填埋场开展竖井排水滑移治理试验, 监测治理前后的表面位移、深层位移、渗滤液水位和渗滤液导排量, 评估滑移治理效果。并进一步利用 Geo-Studio 软件评估排水竖井不同导排时间、导排流量及布置方式时的稳定控制效果。结果表明: 排水竖井使用后, 填埋场最大滑移面积从监测总面积的 68%降为 17%, 深层平均滑移速率从 2.43 mm/d 降为 0.95 mm/d; 10 口排水竖井的最大导排流量 279 m<sup>3</sup>/d, 平均导排流量为 164 m<sup>3</sup>/d; 模拟分析表明, 排水竖井工作时间越长, 导排流量越大, 堆体越快趋于稳定; 在相同导排总量的条件下, 布置 3 排竖井滑移治理效果优于布置 1 排和 2 排的效果, 当布置 2 排时, 排间距为 10 m 的效果优于排间距为 20 m 的效果。排水竖井滑移治理和稳定控制应用效果较好, 可为填埋场堆体稳定控制提供参考。

**关键词:** 填埋场; 堆体滑移; 稳定控制; 排水竖井; 监测

中图分类号: TU475

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)05-0813-09

**作者简介:** 何海杰(1987-), 男, 浙江台州人, 博士研究生, 主要从事环境土工方面的研究。E-mail: he\_haijie@zju.edu.cn。

## Application and analysis of drainage well in landfill slip control

HE Hai-jie<sup>1, 2</sup>, LAN Ji-wu<sup>1, 2</sup>, CHEN Yun-min<sup>1, 2</sup>, QIU Qing-wen<sup>1, 2</sup>, SHI Wei<sup>3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and

Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Xi'an Solid Waste Administration, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Landfill slip will cause losses of lives and properties and serious environmental pollution. At present, the methods for stability of landfills are few. The drainage well to control the stability of the landfill at an instable landfill in China is investigated. The surface horizontal displacement, deep lateral displacement and leachate level are monitored to evaluate the method. The seepage and stability analysis software is used to analyze the effects of stability control of pumping time, pumping rate and arrangement. It is shown that after using this method the maximum slip area is reduced to 17% from the monitoring area of 68%, and the deep average slip rate is reduced to 0.95 mm/d from 2.43 mm/d. The maximum pumping rate of 10 drainage wells is 279 m<sup>3</sup>/d, and the average pumping rate is 164 m<sup>3</sup>/d. The simulation analysis shows that the longer the pumping time and the greater the pumping rate, the faster the landfill tends to be stable. Under the same flow rate, 3 rows are superior to the arrangements of 1 row and 2 rows in terms of slip control. Under the same row number of 2, the effectiveness of row spacing of 10 m is superior to that of 20 m. The proposed method has been proved to be successful in practice, and the application of drainage well may provide a successful example for control of the similar landfill slip.

**Key words:** landfill; slope slip; stability control; drainage well; field monitoring

## 0 引 言

随着中国工业化和城市化高速发展, 随之产生大量固体废弃物, 目前中国每年产生城市生活垃圾 $2.4 \times 10^8$  t, 并且以每年8%~15%的速率增长, 增长率居世界首位<sup>[1-2]</sup>。填埋是目前国内城市固体废弃物(MSW)的主要处置方式, 随着各城市垃圾清运量的快速增长, 各填埋场的填埋高度不断增加, 垃圾填埋场的堆体稳

定问题逐渐凸显出来<sup>[3]</sup>。

填埋场的失稳不仅会引起填埋场渗滤液大量渗漏, 严重污染周边环境, 甚至会造成大规模的人员和

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB719800); 国家自然科学基金青年基金项目(41502276)

**收稿日期:** 2016-02-14

**\*通讯作者** (E-mail: lanjiwu@zju.edu.cn)

财产损失，其后果往往是灾难性的。从20世纪80年代末开始，在美国、法国、南非、土耳其、菲律宾、印度尼西亚等国接连发生多起大型填埋场填埋体的失稳破坏<sup>[4]</sup>。1997年，在南美洲发生了到目前为止世界上最大的填埋场失稳破坏，产生滑移破坏的垃圾体积达 $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，垃圾体在大约20 min之内滑移距离长达1500 m<sup>[5-6]</sup>。近年来，填埋场的失稳现场在国内也时有发生。2009年，国内某填埋场发生渗滤液和污泥的喷涌，散发的恶臭气味影响周围30 km<sup>2</sup>居民的日常生活。为此迫切需要提出填埋场稳定控制及滑移治理方法，保障填埋场安全有效消纳城市固体废弃物。

传统岩土边坡稳定控制及滑移治理的方法主要有支挡类、锚固类、支挡锚固类、排水固结类。支挡类加固方法的常见形式主要有重力式挡墙、土钉挡墙、抗滑桩、桩板挡土墙等。锚固类加固方法的常见形式主要有锚杆、锚索等。支挡锚固类加固方法的常见形式有桩锚体系、锚锭板挡墙、锚杆挡墙、格构锚索等。与传统的岩土材料相比，垃圾土中含有食物残渣、废纸、纤维、塑料等大量有机废物和无机废物<sup>[7-8]</sup>，并且垃圾填埋后在微生物作用下发生强烈生化反应，进而降解产生渗滤液和填埋气<sup>[9-14]</sup>，垃圾的骨架发生变形，孔隙率变化，垃圾的抗剪强度发生变化<sup>[15]</sup>。土钉挡墙、锚杆、锚索、桩锚体系、锚锭板挡墙和锚杆挡墙等方法均需在垃圾堆体内部设置固定端，随着垃圾压缩降解反应的进行，该固定端势必随着垃圾的应变而出现变化，进而导致此类稳定控制及滑移治理方法难以发挥出应有的效果。Korner等<sup>[4]</sup>指出填埋场滑坡的主要诱因因为填埋体内渗滤液水位过高，詹良通等<sup>[16]</sup>发现堆体水位急剧升高是填埋场事故发生的关键因素。通过渗滤液导排降低和控制堆体水位是垃圾堆体稳定控制

的有效手段。由于垃圾土的复杂性和特殊性，目前尚未形成系统的堆体稳定控制方法，迫切需要探索针对垃圾填埋场的稳定控制及滑移治理的手段。

本文在国内某局部滑移填埋场开展堆体稳定控制实践，采用了排水竖井降低和控制渗滤液水位。在填埋场失稳区域布置了10口平均深度34 m的排水竖井，长期记录现场排水竖井的渗滤液导排流量，同时布置了122个表面位移监测点、9口水位监测井和9口深层滑移监测井，分别从堆体表面位移、深层位移和渗滤液水位角度对滑移控制效果进行评估。利用Geo-Studio软件，基于现场实测渗滤液导排流量，在渗流模块模拟获得渗滤液分布信息，在稳定性分析模块中导入渗滤液分布信息，评估分析不同导排时间、导排速率和布置方式对稳定控制效果的影响。

1 场地条件

该填埋场是某市唯一的生活垃圾处理设施，占地1100余亩，总容积超过 $4.9 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。填埋场建设于黄土台塬区的狭长沟谷内，沟谷谷底上下游长度超过1000 m，谷底标高498~546 m；谷底平坦段横向宽度50~100 m。生活垃圾日均处理量从最初的1260 t增加至现在的 $8.0 \times 10^7 \text{ t}$ ，已填埋垃圾超过 $1.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，处理垃圾量超过 $2.0 \times 10^7 \text{ t}$ 。经长期垃圾填埋，下游堆体现有坡高80~90 m，整体坡度1:4左右；每10 m高留8 m宽的缓坡平台；堆体最终设计填埋高度120 m，为国内最高垃圾堆体边坡之一。在2014年4月，填埋场第9层垃圾堆体填埋作业过程中，作业区下游发生多次报警面积超过10000 m<sup>2</sup>的显著滑移，其中最大报警面积达30029 m<sup>2</sup>，表面位移监测点W14最大滑移速率为253 mm/d，滑移体深度可达第7层垃圾层顶部之下17 m，

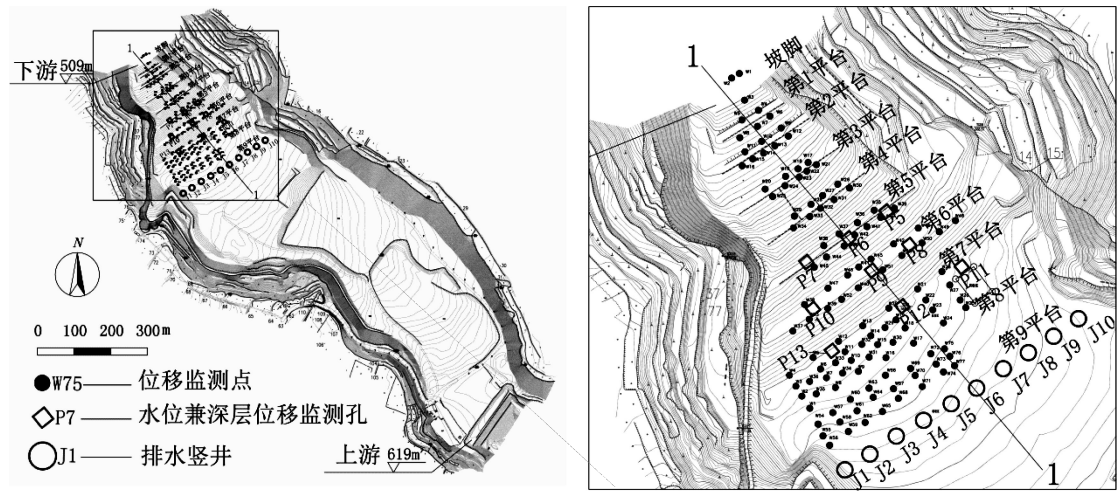


图1 堆体及监测点平面布置图  
Fig. 1 Layout of landfill and monitoring points

滑移面出口位于第 6 平台和第 5 平台之间<sup>[17]</sup>(见图 1, 2)。为降低堆体水位、控制堆体稳定性, 在边坡区域建设了 10 口深度 20~40 m 的排水竖井(见图 1, 3 和表 1)。

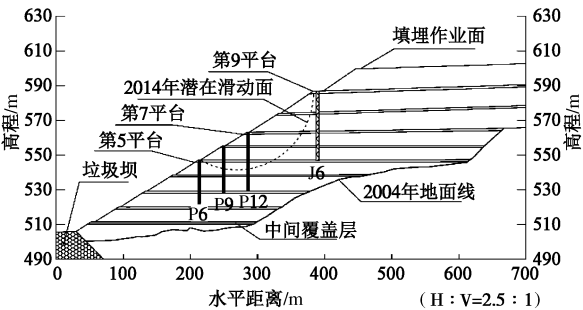


图 2 堆体 1-1 剖面图  
Fig. 2 1-1 Cross-section of landfill



图 3 排水竖井现场布置图  
Fig. 3 Layout of drainage wells

表 1 排水竖井井深表

Table 1 Depths of drainage wells

编号	井深/m	编号	井深/m
J1	20	J6	40
J2	27	J7	40
J3	35	J8	40
J4	40	J9	40
J5	40	J10	25

2 现场监测

2.1 监测项目及方法

监测项目包括表面位移监测、深层侧向位移和渗滤液水位监测、渗滤液导排流量监测。为了确定填埋场堆体边坡的滑移区和滑移面积, 在填埋场边坡区域布置122个表面位移监测点(见图1), 涵盖了下游第1~9平台的所有区域, 通过全站仪测量监测点坐标变化来

实现; 为掌握堆体内部不同填埋深度的滑移程度和堆体不同位置的渗滤液水位, 在填埋区下游上分别布置了9口深层位移兼水位监测孔P5~P13(见图1), 通过测斜仪测量监测管的倾斜度和钢尺水位计测量水位管中的水位深度来实现; 为掌握排水竖井导排渗滤液的能力, 在渗滤液收集管出口处定时测量渗滤液流量。

2.2 监测结果

(1) 深层位移

深层侧向位移监测孔平面布置如图 1 所示, 分别选取第 6 平台的 P6 孔、第 7 平台的 P9 孔和第 8 平台的 P11 孔, 其中 P6 孔和 P9 孔位于该平台中间位置, 第 8 平台的 P12 孔由于前期深层位移过大而发生明显弯折无法测试, 因此选取第 8 平台的 P11 孔进行分析。在 2014 年 4 月进行第 9 层垃圾填埋, 2015 年 4 月进行第 10 层垃圾填埋, 2014 年 12 月在第 9 平台布置 10 口排水竖井, 通过对比两次堆填期间各测斜管的水平位移量评估排水竖井的滑移治理和稳定控制效果。如图 4 所示, 在 2014 年 4 月 27 日, 第 9 层垃圾堆填期间, P6 深层位移监测孔不同深度处均发生了明显水平位移, 分别选取了地面以下 1, 5, 10, 15, 20, 25 m 处监测点进行分析。地面以下 1 m 处的位移速率最大, 达到 3.44 mm/d; 其次为地面以下 10 m 处的 3.2 mm/d; 5, 15 m 处的位移速率分别为 2.89, 2.36 mm/d; 20, 25 m 处的位移速率依次减小, 分别为 2.01, 0.31 mm/d。在第 9 平台安装了 10 口排水竖井并连续 5 个月工作后, 在 2015 年 4 月 9 日, 第 10 层垃圾堆填期间, P6 测斜管地面以下 1, 5, 10, 15, 20 m 处位移速率较 2015 年 4 月小很多, 位移速率分别为 1.17, 0.98, 0.89, 0.84, 0.77 mm/d, 分别为 2014 年 4 月对应深度监测点位移速率的 34%, 33%, 27%, 35%, 38%。对比排水竖井使用前后, 堆填第 10 层垃圾的位移较第 9 层垃圾的位移速率小很多, 排水竖井对堆体的滑移治理和稳定控制起到了效果。

如图 5 所示, 在 2014 年 4 月, 第 9 层垃圾堆填期间, P9 深层位移监测孔出现两次较大的水平位移, 分别发生于 4 月 10 日和 4 月 23 日, 其中 4 月 10 日的位移速率较 4 月 23 日更大。在 2014 年 4 月 10 日, P9 测斜管地面以下 1, 5, 10, 15 m 处监测点均发生了明显水平位移, 位移速率分别为 6.30, 5.90, 4.76, 3.28 mm/d。2014 年 12 月, 在第 9 平台安装并启用了排水竖井。在 2015 年 4 月 9 日, 第 10 层垃圾堆填期间, P9 深层位移监测孔地面以下 1, 5, 10, 15 m 处监测点位移速率分别为 2.23, 2.01, 1.46, 0.38 mm/d, 位移速率较第 9 层垃圾堆填期间小, 分别为 2014 年 4 月 10 日滑移速率的 35%, 34%, 31%, 12%。相同的

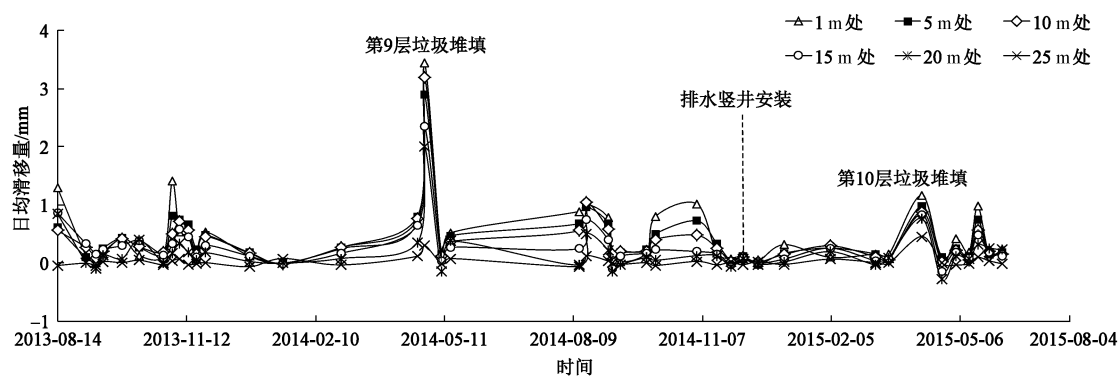


图 4 P6 孔不同深度处侧向位移监测结果

Fig. 4 Monitoring results of slope-direction horizontal displacement in P6 hole at different depths

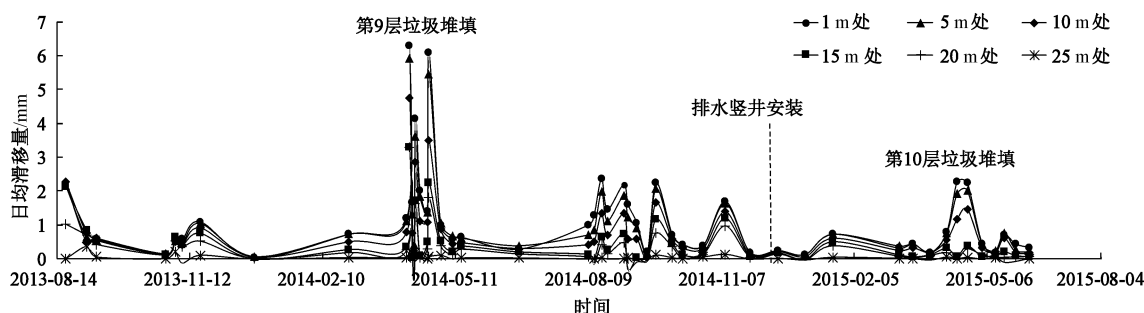


图 5 P9 孔不同深度处侧向位移监测结果

Fig. 5 Monitoring results of slope-direction horizontal displacement in P9 hole at different depths

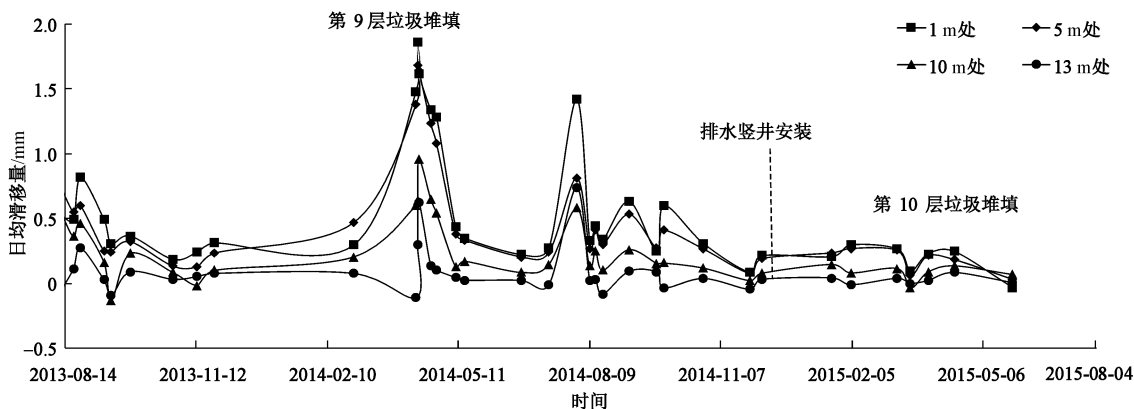


图 6 P11 孔不同深度处侧向位移监测结果

Fig. 6 Monitoring results of slope-direction horizontal displacement in P11 hole at different depths

堆填工况下,排水竖井安装使用后位移速率较安装前明显减小,该措施有利于堆体的稳定。

如图 6 所示,在 2014 年 4 月 26 日,第 9 层垃圾堆填期间,P11 深层位移监测孔地面以下 1,5,10,13 m 处监测点均发生水平位移,位移速率分别为 1.94,1.08,0.54,0.10 mm/d。2014 年 12 月,在第 9 平台安装并启用 10 口排水竖井。在 2015 年 4 月 9 日,第 10 层垃圾堆填期间,P11 深层位移监测孔地面以下 1,5,10,13 m 处监测点的位移速率分别为 0.91,0.18,0.13,0.08 mm/d,位移速率较 2014 年 4 月小,分别为 2014 年 4 月 26 日位移速率的 47%,17%,24%,

80%。随着深度的增加,各监测点日均位移速率逐渐减小。

综合分析图 4~6 可知,上层垃圾的堆填使下游区域不同深度出现不同程度的水平位移,对下游区域稳定产生不利影响。在 2014 年 4 月第 9 层垃圾堆填时,边坡各深层位移监测孔不同深度处均出现位移,位移量随深度增大而减小,主要原因为下层垃圾填埋时间久,基本完成填埋初期的产水产气反应,下层垃圾的抗剪强度较上层垃圾的抗剪强度更大。2014 年 12 月安装并使用排水竖井后堆填第 10 层垃圾,边坡区域深层水平位移得到控制,滑移量较排水竖井安装前小。

取 P6, P9, P11 深层位移监测孔不同深度处滑移速率的平均值对比可知, 安装并使用排水竖井后 P6 孔平均位移速率为安装前的 32%。同理, P9 孔和 P11 孔安装后分别为安装前的 28%, 42%。第 9 层垃圾堆填位置和第 10 层垃圾堆填位置与下游各监测孔距离不同, 产生的效果可能不同。因此, 分别选取 2014 年 4 月 P6 深层位移监测孔的位移速率与 2015 年 4 月 P9 深层位移监测孔的位移速率进行对比。因为在 2014 年 4 月 P6 深层位移监测孔与第 9 层垃圾堆填位置的距离与 2015 年 4 月 P9 深层位移监测孔与第 10 层垃圾堆填位置的距离相等。在相同堆填荷载和距离下进行对比, 发现 2015 年 4 月 P9 深层位移监测孔的位移速率较 2014 年 4 月 P6 深层位移监测孔的位移速率小, 前者平均位移速率为 0.95 mm/d, 约为后者 2.43 mm/d 的 39%, 说明排水竖井对堆体深层滑移治理和稳定控制起到效果。

### (2) 表面位移

如图 7 所示, 在 2014 年 4 月, 即第 9 层垃圾填埋期间, 填埋场发生多次大面积滑移, 其中有 6 次超警戒面积超过 14000 m<sup>2</sup>, 最大超警戒面积达到 30029 m<sup>2</sup>, 最大超警戒面积占到填埋场监测总面积 44122 m<sup>2</sup> 的 68%。2014 年 12 月, 在第 9 平台安装并持续运行 10 口排水竖井, 累计渗滤液导排流量达到 31160 m<sup>3</sup>。在 2015 年 4 月, 即第 10 层垃圾填埋期间, 填埋场发生局部滑移, 最大超警戒面积为 10094 m<sup>2</sup>, 约为 2014 年 4 月第 9 层垃圾填埋期间最大超警戒面积的 1/3, 此时最大超警戒面积占到填埋场表面位移监测总面积 59386 m<sup>2</sup> 的 17%。结合现场表面位移监测点显示的超警戒面积可知, 在 2014 年 4 月发生最大面积滑移时, 滑移区域涵盖了第 6~8 平台所有监测区域; 而在 2015 年 4 月, 现场的滑移区域主要集中在第 8, 9 层平台南侧区域, 该区域为第 10 层垃圾层渗滤液的优势汇流区域, 所有渗滤液均由此收集至下游的导排沟, 该区域垃圾的渗滤液水位与垃圾厚度基本齐平。在排水竖井持续工作期间, 填埋场仍发生表面局部滑移的主要原因是第 8, 9 层平台南侧区域垃圾的渗滤液供给充足, 渗滤液水位居高不下, 附近的排水竖井流量不足以对该区域的渗滤液水位形成有效控制。第 9 层与第 10 层垃圾填埋过程中施工条件均相同, 唯一不同的就是在第 10 层垃圾填埋时现场有排水竖井在工作, 而堆填第 9 层垃圾所产生的位移超标面积远远高于堆填第 10 层垃圾。因此, 排水竖井对堆体表面滑移治理和稳定控制效果明显。

### (3) 渗滤液水位监测

如图 8 所示, 2014 年 12 月 25 日排水竖井工作一周后, 现场部分监测孔的水位出现一定程度的下降,

如 P5 孔的水位埋深从 4.69 m 下降至 5.79 m, P7 孔的水位埋深从 5.48 m 下降至 6.28 m, P9 孔的水位埋深从 6.83 m 下降至 9.08 m, P12 孔的水位埋深从原来 18.07 m 下降至 19.17 m。但是, P12 孔在一个月后水位突然出现较大幅度的上升, 从 2015 年 2 月 4 日的 19.07 m 上升至 3 月 17 日的 14.37 m, 而该时段当地降雨量为 0 mm, 并且在现场监测中发现 P12 孔有气泡冒出, 因此该孔水位上升的主要原因为垃圾生化反应产生填埋气, 持续增大的孔隙气压力抬高孔中的水位。该现象与詹良通等<sup>[16]</sup>在填埋场水位监测过程中观察到填埋气携带渗滤液喷涌造成水位监测结果波动的现象较一致。2015 年 4 月以后, 由于第 10 层垃圾堆载和堆载垃圾渗滤液补给的影响, 大部分水位监测孔的水位有一定的上升, 如 P9 孔从 4 月 8 日的 8.93 m 上升至 4 月 23 日的 7.73 m。该现象与陈云敏等<sup>[18]</sup>在填埋场观察到由于垃圾堆载, 下部垃圾的孔隙率减小, 孔隙中的水受挤压而抬升的现象一致, 同时, 新堆填垃圾带来了大量渗滤液补给, 堆体内部的渗滤液水位出现壅高。但可以推测的是, 若不实施 10 口排水竖井, 在第 10 层堆载过程中, 渗滤液水位抬升将更为明显。

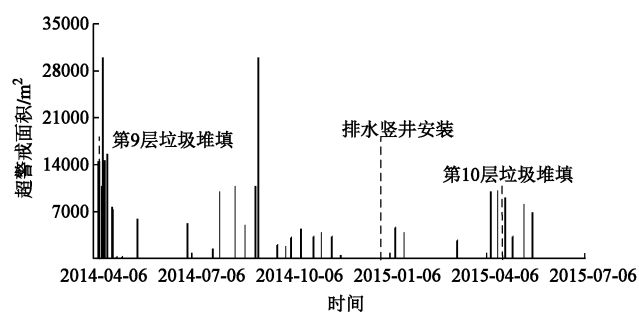


图 7 堆体边坡报警面积

Fig. 7 Alarm areas of landfill

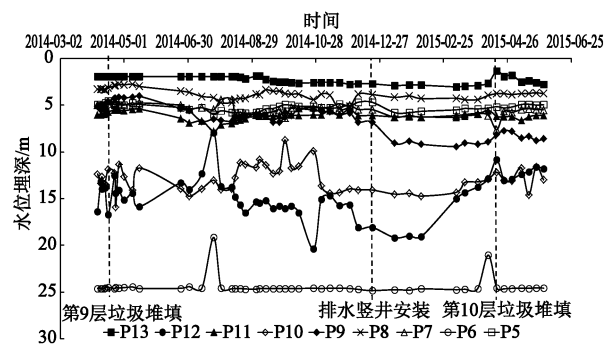


图 8 渗滤液水位埋深监测结果

Fig. 8 Monitoring results of leachate level depth

## 2.3 渗滤液导排量与降雨量

如图 9 所示, 排水导气井于 2014 年 12 月 25 日投入使用, 经过 5 个多月的导排, 累积渗滤液导排量达到 31160 m<sup>3</sup>, 日均导排量为 164.3 m<sup>3</sup>, 每口井平均导

排能力为 16.4 m<sup>3</sup>/d。排水导气井最大导排速率发生在 2015 年 1 月初期, 达到 279.3 m<sup>3</sup>/d。渗滤液导排量与降雨量存在正相关关系, 在 2015 年 3 月 18 至 19 日累计降雨量 22 mm, 3 月 26 日渗滤液导排量从 3 月 17 日的 141.8 m<sup>3</sup>/d 迅速升高至 231.2 m<sup>3</sup>/d, 上升了将近 63%。在 4 月 30 日至 5 月 9 日, 累积降雨量达到 40.1 mm, 渗滤液导排量从 5 月 12 日的 158 m<sup>3</sup>/d 上升到 238 m<sup>3</sup>/d, 上升幅度达到 51%。Benson 等<sup>[19]</sup>认为影响渗滤液产量的主要因素是降雨或降雪, 它们会渗透覆盖层进入垃圾堆体, 形成渗滤液, 该现象与填埋场观察到的现象较一致。随着降雨入渗, 堆体内渗滤液产量增加, 进而导致降水导气井的渗滤液导排量增加。因为垃圾渗透系数较低, 降雨需经过一段时间才能被排水井导排出堆体。同时, 导排量波动的另一个原因是抽排泵维护保养不及时, 如在 2015 年 4 月 8 日, 排水量降低至 35.5 m<sup>3</sup>/d, 现场检查发现 10 口排水导气井只有 2 口井内潜水泵在工作, 其余均已停止, 经维护后系统恢复正常。

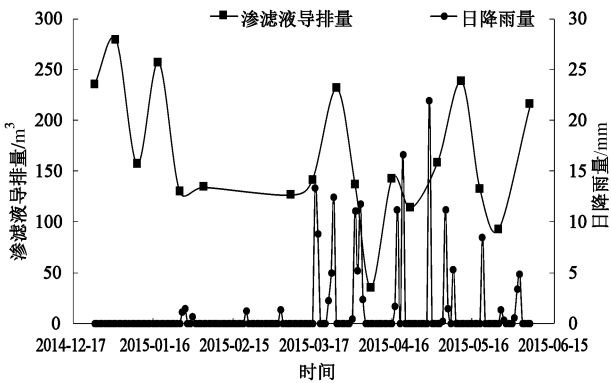


图 9 渗滤液导排量监测结果

Fig. 9 Monitoring results of leachate output

3 滑移治理效果分析

采用加拿大 GEO-SLOPE 公司开发的 Geo-Studio 软件中的 SEEP/W 模块<sup>[20-22]</sup>对排水竖井在不同导排速率、运行时间和布置方式工况下进行饱和-非饱和渗流模拟, 得到相应工况渗滤液分布, 然后在 SLOPE/W 模块<sup>[23-25]</sup>中导入渗滤液分布模拟结果, 利用 Morgenstern-Price 极限平衡法计算失稳区域的稳定安全系数, 对排水竖井的滑移治理效果进行分析。SLOPE/W 不仅具有非圆弧滑动面自动搜索功能, 且能够解决穿过软夹层或界面的滑动面搜索问题。

Geo-Studio 软件是二维计算软件, 因此计算模型需把三维地形转换成二维进行计算, 本文模型 (见图 10) 根据 2015 年 4 月该填埋场的地形剖面图建立。图 10 中排水井的流量根据现场实测流量导入。下游区域

的水位数据来自于水位监测孔, 当某平台含多个水位监测孔时则取水位孔的平均值作为该层垃圾的水位值。上游区域由于缺乏相应的水位监测孔, 选取前期勘察掌握的水位情况进行设置, 认为上游垃圾水位位于填埋场表面以下 3 m 左右。根据浙江大学相关试验, 每 10 t 垃圾填埋后约释放 3 t 的渗滤液, 胞内水会在填埋后较短时间内释放<sup>[4]</sup>。该填埋场日均填埋量为 8000 t, 日均填埋垃圾自身渗滤液产生量取 2400 t, 渗滤液的导排率为 60%, 日均渗滤液入渗量为 960 t, 填埋场的长度为 1300 m, 宽度为 500 m, 则渗滤液的入渗边界取为  $1.5 \times 10^{-3}$  m/d。模型采用三角形和矩形进行网格划分, 单元总数共 8069 个。Zhang 等根据填埋场垃圾降解程度和填埋深度的不同, 将垃圾分为浅层垃圾、中层垃圾和深层垃圾三大类, 对应的土水特征曲线<sup>[26]</sup>和渗透性函数曲线<sup>[26]</sup>见图 11。本文根据现场垃圾填埋情况和 Zhang 等研究成果, 将第 1~3 层垃圾划分为浅层垃圾、第 4~6 层垃圾划分为中层垃圾和第 7~11 层垃圾划分为深层垃圾。本文垃圾强度参数取值主要依据《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》<sup>[27]</sup>, 根据填埋垃圾的龄期和埋深以及综合考虑上文垃圾的分类, 将第 1~3 层垃圾划分为浅层垃圾、第 4~6 层垃圾划分为中层垃圾和第 7~11 层垃圾划分为深层垃圾, 具体强度参数见表 2。

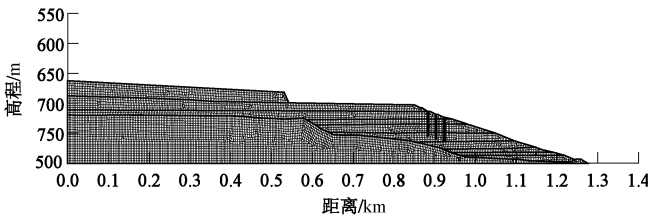


图 10 分析模型

Fig. 10 Analytic model

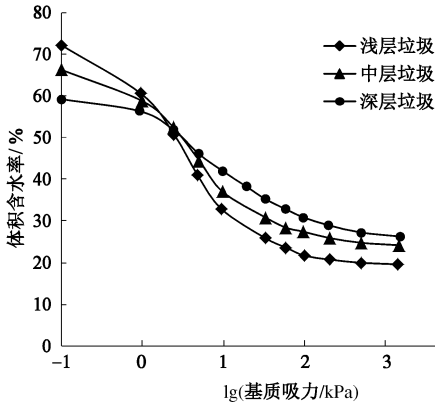


图 11 垃圾的土水特征曲线<sup>[26]</sup>

Fig. 11 SWCCs of MSW<sup>[26]</sup>

结合现场排水竖井实测数据, 取其导排速率平均

值 164 m<sup>3</sup>/d 对堆体进行饱和-非饱和渗流分析, 计算的稳定安全系数结果如表 3 所示。随着排水竖井的运行时间增长, 堆体的安全系数逐步提升。工作 3 个月后, 垃圾堆体的安全系数由安装使用前的 1.009 上升至 1.183, 上升幅度达到 17%。排水竖井连续工作 12 个月, 堆体的稳定安全系数达到 1.615, 达到《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》规定的稳定安全系数, 满足垃圾堆体稳定控制要求。

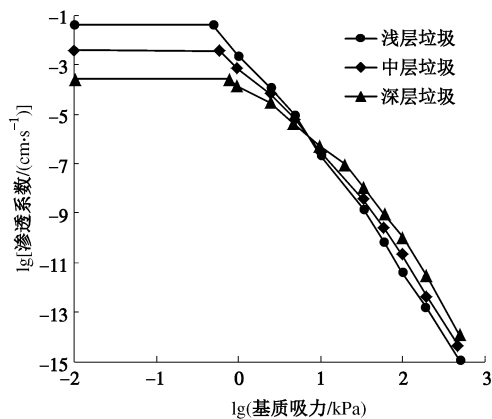


图 12 垃圾的渗透性函数<sup>[26]</sup>

Fig. 12 Hydraulic conductivity function curves of MSW<sup>[26]</sup>

表 2 各材料的抗剪强度参数取值

Table 2 Shear strength parameters for materials

材料	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )
垃圾坝	28	10	19
黄土	22	30	19
浅层垃圾	20	8	12
中层垃圾	28	5	14
深层垃圾	30	0	15

表 3 不同运行时间下的边坡稳定安全系数

Table 3 Factor of safety for waste slope under different running time

运行时间/月	0	1	3	6	12
稳定安全系数	1.009	1.100	1.183	1.312	1.615

表 4 分析了不同导排流量的堆体稳定安全系数, 分别选取了 100, 164, 300, 500 m<sup>3</sup>/d 四种导排流量。结果表明, 堆体安全系数与排水竖井的导排流量存在正相关关系, 导排流量越大, 堆体趋于稳定所需时间越短。当导排流量在 100 m<sup>3</sup>/d 时, 排水竖井连续工作 1 个月后堆体的安全系数上升至 1.078, 较工作前的安全系数 1.009 上升了将近 7%; 导排流量 500 m<sup>3</sup>/d 运行 1 个月后堆体的安全系数上升至 1.206, 较工作前安全系数上升了将近 20%。在导排流量 500 m<sup>3</sup>/d 工作条件下, 排水竖井运行 3 个月可以达到《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》规定的安全系数, 满足垃圾堆体长期稳定要求, 而在导排流量 164 m<sup>3</sup>/d 工作条件下, 排水竖井运行 6 个月满足要求。若是需要在短时

间内使堆体满足长期稳定要求则需要加大排水竖井的导排流量, 充分发挥排水竖井的导水潜力, 实际获得的导排流量越大, 稳定治理所需时间越短; 但排水竖井导排流量同时受到垃圾堆体渗透系数、周边水位和渗滤液补给等因素的影响, 并非可无限增大, 根据类似填埋场经验, 单口竖井最大导排流量在 20~30 m<sup>3</sup>/h, 480~720 m<sup>3</sup>/d, 不同场地差别较大。

表 4 不同导排流量下的边坡稳定安全系数

Table 4 Factor of safety for waste slope under different drainage rates

导排流量 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	排水竖井运行时间/月			
	1	3	6	12
100	1.078	1.137	1.259	1.476
164	1.100	1.183	1.312	1.615
300	1.144	1.263	1.415	1.763
500	1.206	1.380	1.565	1.971

表 5 分别计算了在相同导排量的条件下, 填埋场布置 1 排、2 排排间距为 10 m, 2 排排间距为 20 m 和 3 排排间距为 10 m 的排水竖井的稳定安全系数。堆体安全系数与排水竖井的布置排数存在正相关关系, 布置的排数越多, 堆体趋于稳定的时间越短。在相同导排量的条件下, 布置 3 排竖井滑移治理的效果优于布置 1 排和 2 排的效果, 当布置 2 排时, 排间距为 10 m 的效果优于 20 m 的效果。当在填埋场布置 3 排排水竖井时, 运行 1 个月即达到《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》规定的安全系数, 满足垃圾堆体长期稳定要求; 而在堆体布置 2 排排水竖井时, 则需要工作 3 个月; 若是布置 1 排排水竖井, 需要连续工作 6 个月才能满足要求。

表 5 不同布置方式下的边坡稳定安全系数

Table 5 Factor of safety for waste slope under different arrangements

布置方式	排水竖井的运行时间/月			
	1	3	6	12
1 排	1.100	1.183	1.312	1.615
2 排 (间距 10 m)	1.158	1.266	1.454	1.701
2 排 (间距 20 m)	1.151	1.255	1.449	1.688
3 排 (间距 10 m)	1.241	1.347	1.501	1.741

4 结论与建议

本文对国内某填埋场失稳区域进行治理, 应用了排水竖井控制堆体边坡稳定的方法, 结合现场布置的各类监测项目, 分别从堆体表面位移、深层位移、渗滤液水位和渗滤液导排量角度评估滑移治理效果。利用饱和-非饱和渗流和边坡稳定性分析软件, 分析排水竖井在不同导排时间、导排速率以及布置方式条件下的滑移治理效果, 和到以下 3 点结论。

(1) 10 口排水竖井的最大导排流量达到 279 m<sup>3</sup>/d, 最小导排流量为 36 m<sup>3</sup>/d, 平均导排流量为 164

$\text{m}^3/\text{d}$ , 单口排水竖井日均导排量为  $16.43 \text{ m}^3$ , 累计渗滤液导排量达到  $31160 \text{ m}^3$ 。

(2) 安装排水竖井后, 最大超报警区域面积由  $30029 \text{ m}^2$  降至  $10094 \text{ m}^2$ , 超报警区域面积占监测总面积的比例由 68% 降至 17%; 深层平均位移速度由  $2.43 \text{ mm/d}$  降至  $0.95 \text{ mm/d}$ , 排水竖井起到了良好的稳定控制效果。

(3) 堆体的饱和-非饱和渗流和边坡稳定性分析表明, 优化排水竖井布设数量、间距, 提高排水竖井排水流量, 可以取得更好的稳定控制效果。采用的导排流量越大, 失稳填埋场越快趋于稳定; 在相同导排总量的条件下, 布置 3 排竖井滑移治理的效果优于布置 1 排和 2 排的效果; 当布置 2 排抽排竖井时, 竖井间距为  $10 \text{ m}$  的效果优于  $20 \text{ m}$  的效果。

### 参考文献:

- [1] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 1 - 46. (CHEN Yun-min. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 1 - 46. (in Chinese))
- [2] 刘毓炘, 李琳, 贺怀建. 城市固体废弃物填埋场的岩土工程问题[J]. 岩土力学, 2002, **23**(5): 618 - 621. (LIU Yu-chuan, LI Lin, HE Huai-jian. Investigation on geotechnical problems of municipal solid waste landfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(5): 618 - 621. (in Chinese))
- [3] 詹良通, 管仁秋, 陈云敏, 等. 某填埋场垃圾堆体边坡失稳过程监测与反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(8): 1697 - 1705. (ZHAN Liang-tong, GUAN Ren-qiu, CHEN Yun-ming, et al. Monitoring and back analyses of slope failure process at a landfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(8): 1697 - 1705. (in Chinese))
- [4] KOERNER R M, SOONG T Y. Stability assessment of large landfills failures[C]// Proceedings of Sessions of Geo Denver. Denver, 2000: 1 - 38.
- [5] QIANXue-de, KOERNER R M. Translation failure analysis of solid waste landfills including seismicity and leachate head calculations[R]. Pennsylvania: Geosynthetic Research Institute, Drexel University, 2007.
- [6] QIAN Xue-de, KOERNER R M, GRAY D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction[M]. New Jersey: Prentice Hall Inc, 2002.
- [7] REDDY K R, HETTIARACHCHI H, PARAKALLA NS, et al. Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill[J]. Waste Management 2009, **29**(2): 952 - 959.
- [8] MACHADO S L, KARIMPOUR-FARD M, SHARIATMADARI N, et al. Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills[J]. Waste Management, 2010, **30**(12): 2579 - 2591.
- [9] ARIGALA S G, TSOTSIS T T, WEBSTER I A, et al. Gas generation, transport, and extraction in landfills[J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, **121**(1): 33 - 44.
- [10] NASTEV M, THERRIEN R, LEFEBVRE R. Gas production and migration in landfills and geological materials[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2001, **52**(1/2/3/4): 187 - 211.
- [11] TINET A J, OXARANGO L. Stationary gas flow to a vertical extraction well in MSW landfill considering the effect of mechanical settlement on hydraulic properties[J]. Chemical Engineering Science, 2010, **65**(23): 6229 - 6237.
- [12] TOWNSEND T G, WISE W R, JAIN P. One-dimensional gas flow model for horizontal gas collection systems at municipal solid waste landfills[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, **131**(12): 1716 - 1723.
- [13] ZHAN L T, LING D, ZHANG W J. Hydrogeological characterization of Suzhou landfill of municipal solid wastes[C]// Proceedings of GeoCongress 2008, Geotechnics of Waste Management and Remediation, ASCE. Louisiana, 2008: 48 - 55.
- [14] BREIMEYER R J, BENSON C H. Measurement of unsaturated hydraulic properties of municipal solid waste[C]// Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering, ASCE. Texas, 2011: 1433 - 1442.
- [15] KAVAZANJIAN E, BEECH J F, MATASOVIC N. Municipal solid waste slope failure: I waste and foundation soil properties[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(9): 812 - 813.
- [16] 詹良通, 罗小勇, 陈云敏, 等. 垃圾填埋场边坡稳定安全监测指标及警戒值[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1305 - 1312. (ZHAN Liang-tong, LUO Xiao-yong, CHEN Yun-ming, et al. Field monitoring items and warning values for slope safety of MSW landfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1305 - 1312. (in Chinese))
- [17] 何海杰, 兰吉武, 陈云敏, 等. 西北地区某填埋场堆体滑移过程监测与分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(9): 1721 - 1726. (HE Hai-jie, LAN Ji-wu, CHEN Yun-ming, et al. Monitoring and analysis of slope slip process at a landfill in Northwest China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(9): 1721 - 1726. (in Chinese))
- [18] 陈云敏, 兰吉武, 李育超, 等. 垃圾填埋场渗滤液水位壅高及工程控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **31**(1): 154

- 163. (CHEN Yun-ming, LAN Ji-wu, LI Yu-chao, et al. Development and control of leachate mound in MSW landfills[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(1): 154 - 163. (in Chinese))
- [19] BENSON C H, PLISKA R J. Final covers: HELP needs help from the field[J]. Waste Age, 1996, **27**(3): 89 - 98.
- [20] XU Qi-yong, TOLAYMAT, TOWNSEND T. Impact of pressurized liquids addition on landfill slope stability[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(4): 472 - 480.
- [21] JAIN P, POWELL J, TOWNSEND T G, et al. Estimating the hydraulic conductivity of landfilled municipal solid waste using borehole permeameter test[J]. Journal of Environmental Engineering, 2006, **132**(6): 645 - 653.
- [22] KRAHN J. Seepage modeling with SEEP/W: an engineering methodology[M]. 2nd Ed. Calgary: GEO-SLOPE Int, 2007.
- [23] GASMO J M, RAHARDJO H, LEONG E C. Infiltration effect on stability of a residual soil slope[J]. Computers and Geotechnics, 2000, **26**(2): 145 - 165.
- [24] WAN Y, KWONG J. Shear strength of soils containing amorphous clay-size materials in a slow-moving landslide[J]. Engineering Geology, 2002, **65**(4): 293 - 303.
- [25] CROSTA G B, CHEN H, FRATTINI P. Forecasting hazard scenarios and implications for the evaluation of countermeasure efficiency for large debris avalanches[J]. Engineering Geology, 2006, **83**(1/2/3): 236 - 253.
- [26] ZHANG Wen-jie, ZHANG Gai-ge, CHEN Yun-min. Analyses on a high leachate mound in a landfill of municipal solid waste in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **70**(4): 1747 - 1752.
- [27] CJJ 176—2012 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范[S]. 2012. (CJJ 176—2012 Technical code for geotechnical engineering of municipal solid waste sanitary landfill[S]. 2012. (in Chinese))

#### 第四届GeoShanghai国际会议通知

GeoShanghai is a series of international conferences on geotechnical engineering held in Shanghai every four years. The conference was inaugurated in 2006 and was successfully held in 2010 and 2014, with more than 1200 participants in total. Since the last conference, the geotechnical communities have witnessed many advances both in fundamental understandings and engineering practices. To show the latest developments and promote collaborations in geotechnical engineering and related topics, the organizers of the GeoShanghai International Conference would like to invite you to participate in the 4th GeoShanghai International Conference to be held in Shanghai in May 2018.

**Objective:** Provide a showcase of recent developments and advances and offer an international forum to discuss and explore the future directions for geotechnical engineering.

**Themes:** Soil behavior & geomechanics; Unsaturated soil mechanics; Seepage and porous mechanics; Rock mechanics and rock engineering; Pavement mechanics and engineering; Geohazards; Geosynthetics; Geoinformatics; Geotechnical in-situ testing & monitoring; Environmental geotechnics; Transportation geotechnics; Offshore geotechnics; Mining geotechnics; Energy-related geotechnics; Behavior of biotreated geomaterials and foundations; Geomechanics at macro & micro scales; Ground improvement; Soil dynamics & earthquake engineering; Landfills and contaminated soil; Sustainability in geotechnical engineering; Deep excavations & retaining structures; Shafts & deep foundations; Tunneling and underground constructions; Pavement materials

and structures; New frontiers in geotechnology; Case studies.

**Important Dates:** Abstract due: April 30, 2017; Acceptance of abstract: May 31, 2017; Full paper due: August 31, 2017; Acceptance of full paper: November 30, 2017; Final full paper due: January 31, 2018.

**Paper Submission:** Abstracts and full papers should be submitted only via the web in accordance with the instructions on the conference website at [www.geo-shanghai.org](http://www.geo-shanghai.org).

**Proceeding:** All the accepted papers will be included in a published proceeding to be submitted for citation by EI. Excellent papers will be published in special issues of several international journals to be submitted for citation by SCI based on peer-review.

**Exhibition:** Lab, field testing, instrumentation, geosynthetics, and other geotechnical manufacturers, suppliers, contractors, installers, and consulting firms are welcome to exhibit.

**Conference Website:** Please visit the website at [www.geo-shanghai.org](http://www.geo-shanghai.org) for updates and more detailed information.

**Contacts:** Ming Xiao, Ph.D., P.E., Associate Professor Department of Civil & Environmental Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA Tel: 814-867-0044, Email: [mxiao@engr.psu.edu](mailto:mxiao@engr.psu.edu). Xiaoqiang Gu, Ph.D., Assistant Professor Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China Tel: + 86(21)-6598-4551, Fax: + 86(21)-6598-5210 E-mail: [geoshanghai@tongji.edu.cn](mailto:geoshanghai@tongji.edu.cn).