

文章编号: 1000-7598 (2010) 01-0211-05

垃圾填埋场抽水试验及降水方案设计

张文杰^{1,2}, 陈云敏²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310058)

摘 要: 垃圾填埋场中的渗滤液水位过高会引发一系列环境和稳定问题, 工程上可用竖井抽水降低渗滤液水位。通过在填埋场现场进行抽水试验, 确定垃圾土的渗透系数和抽水影响半径, 在此基础上对填埋场降水的瞬态流问题进行有限元模拟, 分析了抽水井口径和间距对填埋场降水的影响, 提出了降水方案的设计步骤和方法。抽水试验表明, 现场垃圾的渗透系数约为 3.6×10^{-4} cm/s, 抽水影响半径约为 20 m。数值分析表明, 井径的变化对于降水效果影响不大, 而合理选择抽水井间距对降水十分关键。进行抽水方案设计时, 应首先根据工期和降水幅度要求计算井间距, 按井的出水速度选择水泵, 再根据水泵确定井径, 最后根据井径和过滤层形式确定钻孔尺寸并选择钻机。

关 键 词: 垃圾填埋场; 抽水试验; 填埋场降水; 瞬态流分析; 井径; 井距

中图分类号: TU 441.33

文献标识码: A

Pumping tests and leachate drawdown design in a municipal solid waste landfill

ZHANG Wen-jie^{1,2}, CHEN Yum-min²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A number of environmental and stability issues can be caused by a high leachate level in a landfill. Vertical pumping wells can be used to lower the high leachate level. Pumping tests were conducted at a municipal solid waste landfill. Finite element analyses were carried out to simulate the transient flow problem of leachate drawdown. The pumping test gives a hydraulic conductivity of 3.6×10^{-4} cm/s and an influenced radius of about 20m. The numerical analyses show that radius of the pumping well has only a little impact on the pumping efficiency, whereas spacing of the wells is critical to the leachate drawdown. To design a drawdown scheme, spacing of the wells should be determined first considering the demand and time limit of the project. The pump should be selected based on the pumping rate. The radius of the pumping well is then determined by the size of the selected pump. Finally, filter, size of the borehole and type of borer should be determined in sequence.

Key words: solid waste landfill; pumping test; leachate drawdown; transient flow analyses; radius of wells; spacing of wells

1 前 言

现代卫生填埋场较多采用美国环保署^[1]的规定, 限制衬垫上的渗滤液水头在 30 cm 之内, 据此进行导排系统设计, 但实际工程中发现导排系统会发生淤堵, 从而无法实现预期的导排功能。淤堵使填埋场内渗滤液水位达到几米甚至几十米, 从而造成渗滤液渗漏、加剧污染物扩散, 并可能造成填埋边坡失稳, Koerner 和 Soong^[2]调查了北美洲和欧洲发生大规模失稳的十个填埋场, 发现其中 7 例失稳都与填埋场内渗滤液水位过高有关。因此, 对导排

系统发生严重淤堵的填埋场, 当过高的渗滤液水位对周边环境或堆体稳定造成较大威胁时, 应采取措施降低渗滤液水位, 采用竖井抽水具有费用低、见效快等优点, 是常被选用的措施^[3]。应用这一降水技术需要确定垃圾土的渗透性、抽水井的尺寸、数量和日抽水量。

垃圾土的渗透系数可以通过现场取样进行室内试验测定, Chen and Chynoweth^[4], Jang 等^[5]的常水头试验测得垃圾土的饱和渗透系数约为 10^{-3} cm/s。国内张文杰等^[6]通过室内试验, 确定深层、中层和浅层垃圾土渗透系数分别为 3.56×10^{-4} 、 3.50×10^{-3} 、

收稿日期: 2008-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50908140); 上海大学创新基金资助项目; 上海市优秀青年教师科研专项基金资助项目。

第一作者简介: 张文杰, 男, 1978 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: WJZhang2008@gmail.com

$4.81 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。由于垃圾土中含有较多的纤维、塑料等大尺寸成分,现场钻孔取得原状样的难度较大。Oweis 等^[3]在填埋场进行抽水试验,在直径为 510 mm 的钻孔和直径为 153 mm 的多孔钢管之间填充卵石作为过滤层,抽水速度为 $2.7 \text{ m}^3/\text{h}$,抽水时间为 2.5 d,得到垃圾土的渗透系数约为 10^{-3} cm/s ,试验中发现过滤层容易淤堵,且淤堵与过滤层厚度关系不大。目前国内尚无在填埋场进行的抽水试验。

为制定抽水方案需对抽水问题进行分析,Bear^[7]给出了含水土层中竖井的轴向流解析解,但解析解忽略井壁处渗流面的影响,而对于填埋场内的抽水井,忽略渗流面是不合理的,Rowe 和 Nadarajah^[8]的研究表明,仅当井间距很小时忽略渗流面才是合理的。对于抽水降低渗滤液水位的瞬态流问题,考虑渗流面的影响,只能用数值方法求解。

本文介绍了在填埋场进行抽水试验的相关经验,确定了垃圾的渗透系数和抽水影响半径,对填埋场降水的瞬态流问题进行有限元模拟,提出了降水方案设计的步骤和方法。

2 抽水试验概况

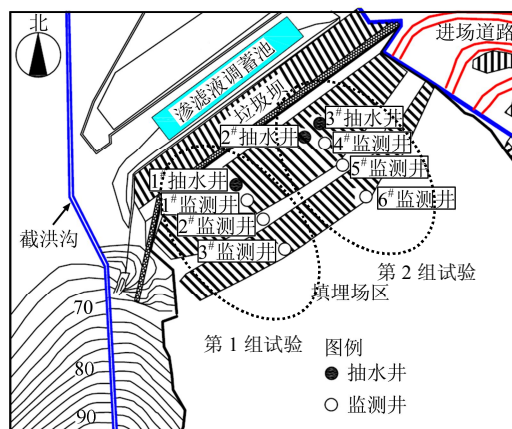
某山谷型垃圾填埋场由于淤堵导致渗滤液水位过高,现场勘测确定渗滤液水位最深达 30 多米,超过 EPA 限制值的 100 倍。过高的渗滤液水位加剧了污染物的渗漏与扩散^[9],并且对填埋堆体稳定构成重大威胁。稳定分析表明^[10],不考虑渗滤液水位时垃圾坝上游堆体的稳定安全系数为 3.08,考虑实测水位时安全系数仅为 1.08,有必要采取降水措施以提高垃圾堆体的稳定性。

抽水试验场地处垃圾土厚约 20 m,填埋龄期约 10 年,垃圾降解程度较高,孔隙比为 1.65~2.35。垃圾土的组分包括塑料、无机废品、纤维类、腐殖质和渣土,此处渗滤液初见水位位于地表下约 7~10 m,渗滤液温度为 30~40 ℃。

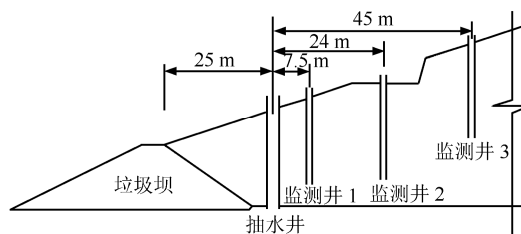
共进行 2 组抽水试验,每组布置 1 个抽水井、3 个监测井。3 个监测井距离抽水井分别为 7.5、24 m 和 45 m,如图 1 所示。为增大抽水速度,在距 2[#]抽水井 1 m 处布置 3[#]抽水井同时抽水。钻孔时边钻边下套管,待达到设计深度放入多孔管及预制过滤层后将套管拔起。抽水井钻孔 $\phi 150 \text{ mm}$,下 $\phi 110 \text{ mm}$ 多孔管至深度 21 m;监测孔 $\phi 110 \text{ mm}$,下 $\phi 60 \text{ mm}$ 多孔管至深度 20 m。多孔管外包裹钢丝网,再包裹三维复合土工排水网作为井壁过滤层。

开始时,使用潜水泵抽水,因为渗滤液中含有的悬浮塑料袋碎片卡住潜水泵叶轮,不得不更换水

泵。因抽水井口径较小,无法使用尺寸较大的潜污泵,所以后来试验使用吸程为 30 m 的自吸泵,额定抽水速度 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$,因填埋场中甲烷含量较高,对泵运行有一定影响,实际抽水速度仅有约为 $0.3 \sim 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。抽水井和监测井水位采用电接点式水位计量测,抽水量用旋翼式水表量测,水表前接过滤器,在抽水初期过滤器发生了堵塞,造成堵塞的主要是钻孔过程中产生的塑料袋碎片,但数量较少,清洗过滤器之后抽水即能顺利进行,这表明用复合土工排水网做井壁过滤层效果良好。



(a) 平面布置图



(b) 剖面布置图

图 1 抽水井和监测井布置

Fig.1 Location of pumping wells and monitoring wells

3 试验结果及分析

第 1 组试验抽水 242 h,抽水井最终降深为 3.08 m,第 2 组试验抽水 450 h,降深 5.00 m,其中 1[#]抽水井的降深-时间曲线如图 2 所示,由于抽水过程中有几次断电(附近施工挖断电缆),抽水不连续,不满足稳定流抽水要求,且抽水井井损无法估计,因此利用抽水数据计算渗透系数误差较大。

抽水后进行水位恢复试验,第 1 组测试了 75 h,第 2 组测试了 165 h。因水位恢复过程中受到的干扰少,可以获得连续数据,故利用恢复水位-时间曲线计算渗透系数更加可靠^[11]。当用恢复水位资料计算渗透系数时,停止抽水前水位已稳定,按下式计

算渗透系数^[12]:

$$k = \frac{2.3Q}{4\pi M m_i} \quad (1)$$

式中: Q 为抽水过程中抽水井水位稳定时的抽水速度; M 为含水层厚度; m_i 为恢复水位 $S - \lg(1+t_k/t_T)$ 曲线斜率; t_k 为从抽水开始算起的时间; t_T 为抽水停止时算起的恢复时间。

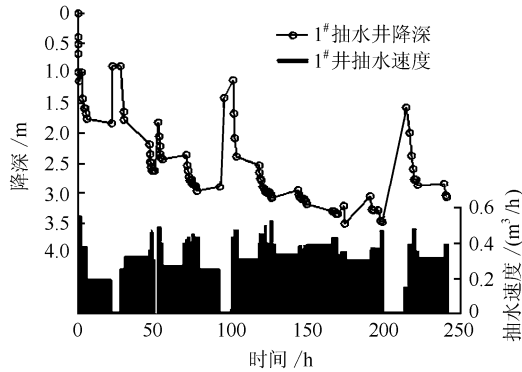


图2 第1组试验抽水井降深和抽水速度随时间变化过程
Fig.2 Leachate level and pumping rate versus time

第2组试验抽水井的 $S - \lg(1+t_k/t_T)$ 曲线如图3所示,可见图中数据点可用直线拟合。按文献[3]和文献[12]的方法,取一个对数周期对应的降深 $\Delta s = 0.67$ 为直线斜率 m_i ,含水层厚度为水位恢复前后该处含水层厚度的平均值 7.1 m,抽水稳定时的抽水速度 $0.33 \text{ m}^3/\text{h}$,由式(1)得到该处垃圾的渗透系数为 $k = 3.53 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

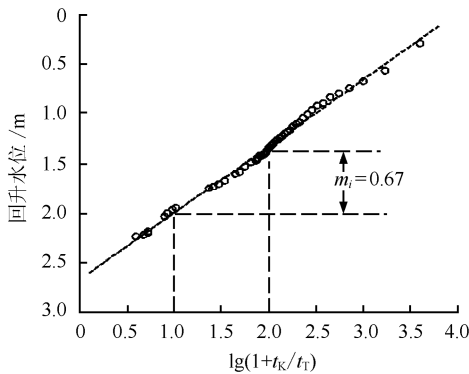


图3 第1组试验抽水井 $S - \lg(1+t_k/t_T)$ 关系曲线
Fig.3 $S - \lg(1+t_k/t_T)$ curve of pumping well (#1)

第2组试验对应2口抽水井,不能直接使用抽水井水位恢复数据,因此采用监测井(4[#]监测井)数据,其 $S - \lg(1+t_k/t_T)$ 曲线及最小二乘拟合如图4所示。取一个对数周期对应的降深 $\Delta s = m_i = 0.80$,停止抽水前的稳定流量 Q 取2个水泵的流量之和为

$0.9 \text{ m}^3/\text{h}$,水位恢复前后该处含水层平均厚度为 15.85 m,代入式(1),求得 $k = 3.61 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

由上述分析知,利用2组试验恢复水位数据计算得到的渗透系数接近,由此确定此处垃圾的渗透系数约为 $3.6 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。求得渗透系数后,利用库萨金公式^[12]概略计算抽水影响半径:

$$R = 600S\sqrt{Hk} \quad (2)$$

式中: S 为水位降深; H 为含水层厚度; k 为渗透系数。由监测数据计算得到第1组试验抽水影响半径 $R_1 = 13.5 \text{ m}$,第2组 $R_2 = 24.5 \text{ m}$ 。

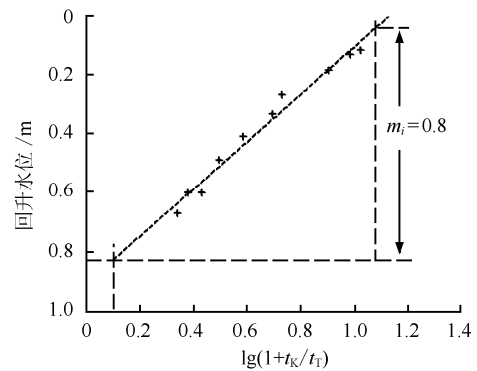


图4 4[#]监测井 $S - \lg(1+t_k/t_T)$ 关系曲线
Fig.4 $S - \lg(1+t_k/t_T)$ curve of monitoring well (#4)

4 抽水井数值模型建立

确定抽水井的口径和间距是进行填埋场中抽水井设计的关键^[8]。假定抽水井井壁不发生淤堵,井中无负压,不考虑抽水过程中垃圾土压缩变形,假定抽水井深 20 m,初始水位位于地面下 5 m,井中水位在 13 d 内由距地表 5 m 降至 18 m 并保持稳定,如图5所示。因属瞬态流问题,故需用数值方法求解,数值模型如图6所示,图中 $R = 20 \text{ m}$ 。井壁节点边界设为随井中水位变化的水头边界,以模拟水向井中的自由流动,其他边界均为不透水边界。

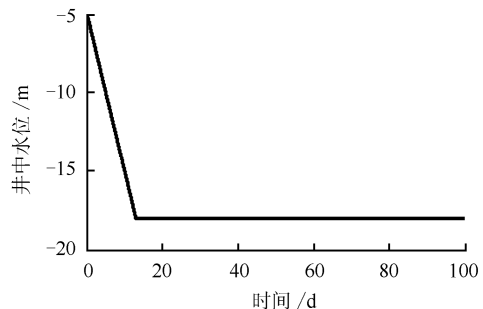


图5 井壁节点水头(井中水位)随时间变化过程
Fig.5 Variation of leachate level in pumping well

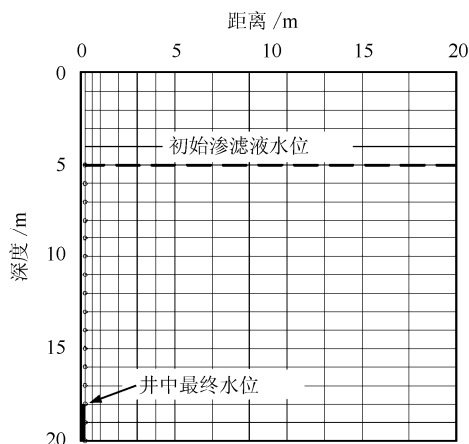


图6 垃圾中抽水井数值模型(轴对称)
Fig.6 Numerical model of pumping (axisymmetric)

5 填埋场中降水方案设计

5.1 抽水井口径分析

取抽水井半径 $r = 10$ cm, 井间距 $2R = 40$ m, 计算得到各时刻水位和各边界节点的流速, 其中抽水 50 d 后填埋场中的压力水头和渗流速度矢量如图 7 所示, 可见离井较远处水位接近水平, 沿井壁出现一定高度的渗流面。以图中离井 5 m 处的 A 点为参照, 抽水 50 d 后该处水位降低了 7.09 m。

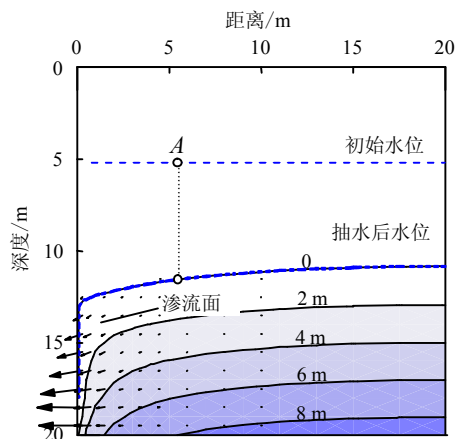


图7 抽水 50 d 后的压力水头等值线和渗流速度矢量
Fig.7 Isolines of pressure head and vector of seepage velocity

另外, 分别取抽水井半径 $r = 5$ cm 和 20 cm 进行模拟, 得到抽水过程中 A 点水位的降低过程, 如图 8 所示。可见各时刻不同井径抽水井周围水位较接近, 井径的差别对降低渗滤液水位影响不大。

将计算得到的各井壁节点的流速求和, 得到渗滤液由井周围流入井中的流速, 即各时刻能抽出的渗滤液水量(下文称“出水速度”)如图 9 所示。可见井径取不同值时最大出水速度在 $35 \sim 39$ m^3/d 之间, 最终出水速度都接近 8 m^3/d 。注意到图 9 中第

13 d 井内水位降到最低时出水速度达到最大, 这与数值模型中设定的边界条件有关。实际上, 开始抽水时抽水速度由水泵最大抽水速度决定, 到井中水位达到最低后抽水速度才由井的出水速度控制, 出水速度随着渗滤液水位降低逐渐减小。在选用水泵时应根据模拟得到的出水速度来确定其规格, 没有必要选用抽水速度过大的水泵, 如本算例中可选择最大抽水速度为 $20 \sim 30$ m^3/d 的水泵。

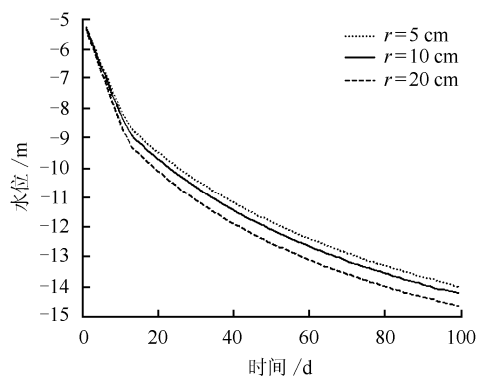


图8 不同口径抽水井对应的 A 点水位变化过程
Fig.8 Leachate level for wells with different radii, point A

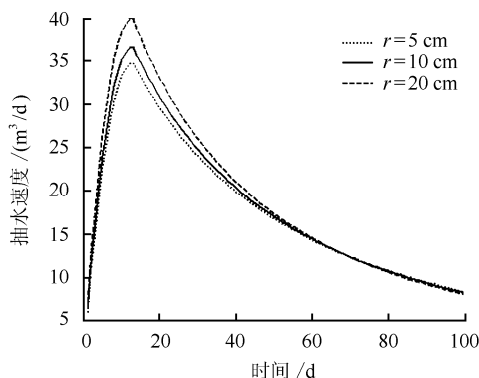


图9 不同井径抽水井的出水速度
Fig.9 Pumping rate for wells with different radii

由此可知, 井半径 5~20 cm 的各井出水速度接近, 降水后浸润线位置接近, 各井降低渗滤液水位的能力接近, 井径变化对填埋场降水影响很小。

5.2 抽水井间距分析

分别取抽水井间距 $2R = 100, 80, 60, 40, 30$ m 和 20 m 进行计算, 得到抽水过程中 A 点水位的降低过程如图 10 所示。由图可见, 抽水井间距对降水影响很大, 井间距为 100 m 时, 抽水 100 d 后水位降了不到 5 m; 井间距为 30 m 时, 100 d 后水位可降低近 11 m, 而井间距 20 m 时水位降到这一深度只需 45 d。另外, 在抽水初期, 水位降低较快, 后来, 水位降低速度减小, 若要将水位降至很低, 则需要较长的抽水时间, 实际上是不经济的。实际工程中应考虑工期和降水幅度要求, 按图选取合理的

抽水井间距。例如,要求100 d内实现较大幅度降水,则选择井间距 $2R = 30 \sim 40$ m较为合理。

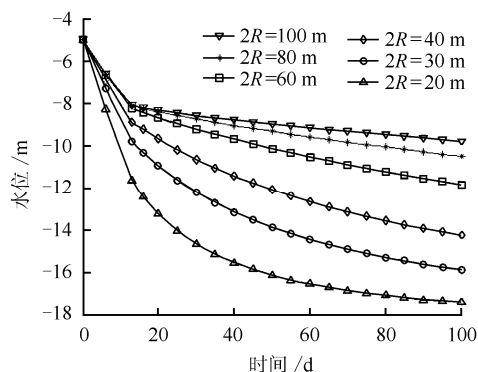


图10 不同间距抽水井对应的A点水位变化过程

Fig.10 Leachate levels of wells at different spacings, point A

计算得到不同井间距对应的出水速度如图11所示,可见井间距较大时出水速度较大;间距小时出水速度较小,且后期出水速度非常小,这实际上是不经济的。在确定抽水井间距后,按图11选择具有合理抽水速度的水泵。例如,井间距 $2R = 30 \sim 40$ m时,选择最大抽水速度 $20 \sim 30 \text{ m}^3/\text{d}$ (额定抽水速度约 $1 \text{ m}^3/\text{h}$)的水泵即可。

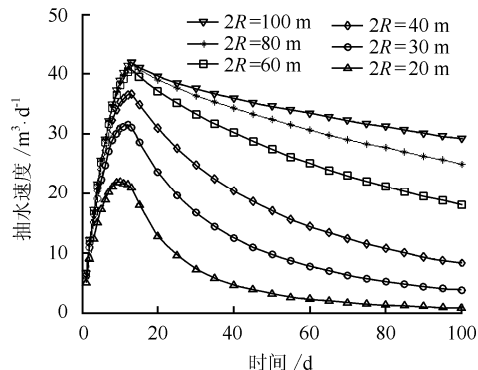


图11 不同间距抽水井的出水速度

Fig.11 Pumping rate for wells at different spacings

由上面的分析可知,不同井径的井抽水能力接近,而井的间距对于填埋场内水位降低极为关键。因此,在进行抽水井设计时,应首先根据工期和降水幅度要求通过计算确定井间距,然后按此间距对应的出水速度选择水泵,再根据水泵的尺寸确定抽水井口径,据抽水井口径和过滤层类型确定钻孔尺寸及钻机型号。

6 结论

(1) 用复合土工排水网作为井壁过滤层效果较好,因渗滤液中含有悬浮碎片和甲烷气体,潜水泵和自吸泵不适合用于填埋场抽水,若抽水井口径较

大,应首先考虑使用潜污泵。

(2) 利用恢复水位数据,计算得到现场垃圾的渗透系数约为 $3.6 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,按《规程》计算抽水影响半径在20 m左右。

(3) 使用数值方法模拟填埋场中降水的暂态流场,发现不同井径的井抽水能力接近,而井的间距对于填埋场内降水十分关键。

(4) 设计填埋场降水方案时,应首先根据降水幅度和工期要求计算井间距,然后按井的出水速度选择水泵,再根据水泵规格确定井径,最后根据井径和过滤层形式确定钻孔尺寸并选择钻机。

参考文献

- [1] USEPA. Seminar publication-requirement for hazardous waste landfill design, construction and closure[S]. U.S.: EPA, Center for Environmental Research Information, Office of Research and Development, 1989.
- [2] KOERNER R M, SOONG T Y. Leachate in landfills: the stability issues[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, 18(2): 293—309.
- [3] OWEIS I S, SMITH D A, ELLWOOD R B, et al. Hydraulic characteristics of municipal refuse[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 116(4): 539—553.
- [4] CHEN T H, CHYNOWETH D P. Hydraulic conductivity of compacted MSW[J]. *Bioresource Technology*, 1995, 51: 205—212.
- [5] JANG Y S, KIM Y W, LEE S I. Hydraulic properties and leachate level analysis of Kimpo metropolitan landfill, Korea[J]. *Journal of Waste Management*, 2002, 22: 261—267.
- [6] 张文杰, 陈云敏, 邱战洪. 垃圾土渗透性和持水性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(11): 3313—3317.
ZHANG Wen-jie, CHEN Yun-min, QIU Zhan-hong. Laboratory and field tests on hydraulic properties of landfilled waste[J]. *Rocks and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3313—3317.
- [7] BEAR J. *Hydraulics of groundwater*[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979.
- [8] ROWE R K, NADARAJAH P. Estimating leachate drawdown due to pumping wells in landfills[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(1): 1—10.
- [9] 张文杰, 陈云敏, 詹良通. 垃圾填埋场渗滤液穿过垂直防渗帷幕的渗漏分析[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 925—929.
ZHANG Wen-jie, CHEN Yun-Min, ZHAN Liang-tong. Transport of leachate through vertical curtain grouting in landfill[J]. *Journal of Environmental Science*, 2008, 28(5): 925—929.
- [10] 张文杰, 陈云敏, 詹良通. 垃圾填埋场内的渗流和稳定分析[C]//第二届全国岩土与工程学术大会论文集. 武汉: [出版社不详], 2006: 881—889.
- [11] 薛禹群. *地下水动力学原理*[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [12] 水利部水利水电规划设计管理局. SL320—2005 水利水电工程钻孔抽水试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

《岩土力学》2009 年第 9 期被 EI 收录论文 (57 篇, 收录率 100 %)

No.	论文题名	作 者	页 码
1	刚度缓变介质中瑞利波特性	柴华友, 韦昌富	2545—2551
2	昆仑山大地震震后形变反映的地壳岩石流变特性	张晁军, 石耀霖, 马 丽	2552—2558
3	岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究	李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等	2559—2563
4	成层土场地地震效应的时程算法研究	范留明, 张镔于	2564—2568
5	落锥法确定粉土液限和塑限的试验研究	郭 莹, 王 琦	2569—2574
6	非饱和土二维固结简化计算的研究	曹雪山, 殷宗泽	2575—2580
7	晶体及矿物颗粒大小对岩土材料力学性质的影响	许尚杰, 尹小涛, 党发宁	2581—2587
8	脆性岩石卸围压强度特性试验研究	刘豆豆, 陈卫忠, 杨建平, 等	2588—2594
9	煤岩蠕变模型与破坏特征试验研究	陈绍杰, 郭惟嘉, 杨永杰	2595—2598
10	工程岩体裂隙渗透性试验方法研究及应用	丁立丰, 郭啟良, 王成虎	2599—2604
11	基于路径的非饱和土抗剪强度指标确定方法	姚攀峰, 祁生文, 张 明	2605—2608
12	桩端岩土强度提高对超长桩桩身总侧阻力的强化效应研究	蒋建平, 高广运, 章杨松	2609—2615
13	超固结黏土单调和耦合循环的剪切特性研究	聂 影, 栾茂田, 唐小微, 等	2616—2622
14	路堤荷载作用下碎石桩复合地基桩土应力比计算及试验研究	赵明华, 邓岳保, 杨明辉	2623—2628
15	基于一维和三维固结挤土桩沉降时效计算分析	赵春彦, 周顺华, 袁建议	2629—2632
16	水平简谐荷载作用下层状饱和土体动力响应	徐满清, 金腊华, 黎剑华, 等	2633—2642
17	软土地基中扩底抗拔中长桩的极限承载力分析	酆建俊, 黄茂松, 王卫东, 等	2643—2650
18	计算边坡安全系数的坡向离心法	王正中, 牟声远, 刘 军	2651—2654
19	锚杆抗滑桩桩侧地层抗力分布模式的试验研究	李寻昌, 门玉明, 何光宇	2655—2659
20	双向增强体复合地基桩土应力比分析	陈昌富, 周志军	2660—2666
21	砂的静力加卸载试验和应力释放模型研究	庄 丽, 周顺华	2667—2673
22	我国 CO ₂ 捕集与封存的技术路线探讨	李小春, 方志明, 魏 宁, 等	2674—3020
23	滨海软土非线性流变模型及其工程应用研究	王元战, 王婷婷, 王 军	2679—2685
24	基于优化技术的权重计算方法在岩体质量评价中的应用	肖云华, 王 清, 陈剑平	2686—2690
25	基于界面元法的向家坝重力坝深层抗滑稳定分析	王义锋, 章 青	2691—2696
26	MC 桩组合支护结构设计与应用研究	黄广龙, 惠 刚, 方 乾, 等	2697—2702
27	基于 WBS-RBS 的地铁基坑故障树风险识别与分析	周红波, 高文杰, 蔡来炳, 等	2703—2707
28	深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究	谢兴华, 王国庆	2708—2713
29	龙游石窟 1~3 号洞室稳定性分析及安全通道路线的选择	高 千, 王 靖, 杨志法, 等	2713—2721
30	浅埋煤层地表厚砂土层“拱梁”结构模型研究	黄庆享, 张 沛, 董爱菊	2722—2726
31	基于 ARMA 模型的隧道位移时间序列分析	尹光志, 岳 顺, 钟 焘, 等	2727—2732
32	地铁施工环境影响定量风险指标研究	李兴高, 孙河川	2733—2736
33	普硅水泥和矿渣水泥加固滨海软土效果对比分析	徐 超, 郭宏峰, 杨晓明, 等	2737—2740
34	多元层状边坡土体风蚀速率与微结构参数关系	崔 凯, 谌文武, 张景科, 等	2741—3088
35	轻型动力触探法与静力触探法检测粗砂相对密实度的相关性研究	田卿燕, 刘仰韶, 吕建兵	2747—2752
36	基于 CPT 资料的土性参数随机场特性研究	汪莹鹤, 王保田, 安彦勇	2753—2758
37	填埋场防渗衬垫等效替代研究	张虎元, 冯 蕾, 吴军荣, 等	2759—2762
38	曲线拟合法对路基小变形情形适用性研究	王星运, 陈善雄, 余 飞, 等	2763—2769
39	爆炸挤淤筑堤沉降的 Verhulst 预测	崔广强, 林从谋, 耿 鹏	2770—2774
40	生石灰处理高含水率疏浚淤泥的含水率变化规律研究	张铁军, 丁建文, 邓东升, 等	2775—2778
41	桩基负摩擦力的下拉荷载与时间关系研究	肖俊华, 袁聚云, 赵锡宏	2779—2782
42	试验模型位移场中的几种光学测量方法比较	白义如	2783—2786
43	极限状态及变形量控制下自平衡试桩承载力分析	马远刚, 杨春和	2787—2791
44	钙质石灰岩中桩基轴向承载特性的有限元分析	彭芳乐, 高 伟, 清住真, 等	2792—2798
45	洞桩法大断面群洞交叉隧道初衬数值模拟	瞿万波, 刘新荣, 傅 晏, 等	2799—2804
46	锚杆对围岩的加固效果和动载响应的数值分析	杨自友, 顾金才, 杨本水, 等	2805—2809
47	隧道衬砌空洞探地雷达图谱正演模拟研究	张鸿飞, 程效军, 高 攀, 等	2810—2814
48	并设小净距隧道爆破振动响应分析及控爆措施研究	姚 勇, 何 川	2815—2822
49	基于颗粒流模型的 TBM 滚刀破岩过程数值模拟研究	苏利军, 孙金山, 卢文波	2823—2829
50	移动荷载下瞬态振动的三维移动坐标有限元分析	翟 伟, 宋二祥	2830—2836
51	非均匀煤岩渗流-应力弹塑性耦合数学模型及数值模拟	张春会, 于永江, 赵全胜	2837—2842
52	渗透压力作用下加锚裂隙岩体围岩稳定性研究	王 刚, 李术才, 王明斌	2843—2849
53	软土中 T 型触探仪贯入阻力的数值模拟	范庆来, 栾茂田, 刘占阁	2850—2854
54	结构面网络模拟结果后处理研究	张宜虎, 周火明, 郭爱清	2855—2861
55	路基填土对桥台桩基影响的试验与数值仿真分析	聂如松, 冷伍明, 杨 奇, 等	2862—2868
56	条形埋置基础固结分析计算图表	张文伟, 孟庆山, 朱国甫, 等	2869—2874
57	偏压连拱隧道施工的动态模拟及最优化分析	庄 宁, 朱苦竹, 李军伟	2875—2880