

污泥掺入生活垃圾后的力学特性试验研究

施建勇, 王娟

(河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 填埋是污泥消化处置的方法之一, 由于污泥的工程特性较特殊, 填埋会引发很多环境岩土工程问题。考虑到填埋工程会进行分层碾压铺填, 在标准击实试验的击实功下制备试样, 通过污泥与垃圾土混合后的直接剪切试验、渗透特性试验, 考虑淋滤液和降解产气压力共同影响, 进行边坡稳定分析。结果表明: 污泥和垃圾混合后的强度比垃圾土的强度低, 比污泥的强度高, 改善了污泥的强度特性; 污泥掺入垃圾后的渗透系数与垃圾土的渗透系数相当, 没有劣化垃圾土的渗透特性, 但比污泥的渗透系数有显著提高; 随着污泥掺量的增加, 边坡安全系数会先提高后降低, 因此, 应结合试验和稳定计算结果, 确定实际工程的污泥掺入比; 考虑降解产气对边坡稳定的影响, 安全系数会降低约 15%~20%。

关键词: 污泥; 垃圾填埋; 强度; 渗透; 边坡稳定

中图分类号: X 799.3

文献标识码: A

Mechanical behavior test study of sludge mixed with municipal solid waste

SHI Jian-yong, WANG Juan

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Filling is one of the processing methods for sludge disposal. In landfill of sludge there will be some geoenvironmental problems for sludge has special engineering characteristics. Layered rolling is used in landfill and test samples are prepared under energy of standard compaction test. The test results of shear strength and permeability coefficient for sludge mixed with municipal solid waste (MSW) as well as stability analysis of slope are presented, considering the effects of leachate and pore air pressure from degradation. It is shown that the strength of sludge mixed with MSW is lower than MSW and higher than sludge; strength characteristic of sludge is improved. Permeability coefficient of sludge mixed with MSW is a light different from MSW; permeability is not obviously worse than MSW and is higher than sludge. With the increase of sludge content, slope stability will increase firstly and then decrease. The suitable mixing content of dewatered sludge will be determined by results of test and slope stability analysis. The safety factor of slope stability analysis will decrease about 15%-20% considering the effect of pore air pressure from degradation.

Key words: sludge; filling with MSW; strength; permeability; slope stability

1 引言

随着经济发展和城市化水平的不断提高, 我国生活和工业污水的年产量不断增长, 污水处理后产生的污泥量也在同步增加, 污泥是影响环境的潜在不利因素。污水厂污泥的特点是含水率高、压缩性高、低强度、低渗透性、脱水困难, 而且可能含有污染地下水的各种化学成分和重金属, 这些都增加了污泥处置的难度。另外受“重水轻泥”的影响, 大量污水厂污泥没有得到安全、卫生的处置, 成为污染环境的一大隐患。

由于污泥的力学特性较差, 单独填埋会出现很多难以处理的环境和工程问题^[1-2]; 生活垃圾具有强度高、含水率高、孔隙比高和渗透性较好^[3-6]; 填埋也是生活垃圾主要的处置方法之一; 污泥和垃圾能否同场填埋, 即混合填埋, 相关的研究工作在国内外做得还很少^[2]。

在混合填埋场中, 当污泥与城市生活垃圾混合比例达到 1:10 时, 填埋垃圾的物理、化学稳定过程将明显加快, 所以一般污泥的比例应 $\leq 10\%$, 在该比例下污泥一般不会影响填埋体的稳定^[7]。赵乐军等^[8]系统分析了污泥的土力学性质对污泥填埋方

式的影响, 污泥能否填埋主要取决于两个因素: 一是污泥本身的土力学性质; 二是填埋后对环境可能产生的影响。污泥大多具有较高的含水率, 因此, 进行填埋前必须经过脱水工序。据德国的资料, 当脱水后的污泥和垃圾进行混合填埋时, 污泥的含固率要求应大于 35%, 抗剪强度应大于 25 kPa。一般普通脱水工艺处理后的污泥含水率在 80% 左右, 必须加入添加剂进行后续处理才能进行填埋, 高干度脱水后的污泥含水率在 65% 左右, 一般可直接填埋, 但这增加了技术成本。Irene 等^[9]研究表明: 相对于污泥的单独填埋, 将污泥和其他废弃物一起进行混合填埋在香港也已得到广泛地应用, 而且混合填埋具有压缩性低、沉降小等优点, 不过其渗透系数较高。在美国, 有污泥单独填埋的实例; 污泥单独填埋可以用沟填法、平面填埋法或筑堤法, 具体方法的选择还要参考场地的特性和污泥的含水率^[10]。

基于污泥和生活垃圾力学特性有互补的可能, 将污泥掺入一定比例的生活垃圾, 使其力学特性得到改善, 满足污泥填埋的稳定性要求, 是一种可以尝试的途径。本文重点探讨污泥掺入生活垃圾后的力学性质和填埋边坡稳定分析。

2 污泥与生活垃圾混合后的力学性质

2.1 污泥与垃圾混合后的剪切特性试验

根据国内已有垃圾填埋场分拣资料, 进行人工垃圾土的配制^[11], 具体配置材料和含量见表 1。

表 1 垃圾土成分组成 (干重比)

Table 1 Composition of MSW (dry unit proportion)

名称	土	麦麸	废纸	玻璃	橡胶	塑料	纺织品
含量/%	35	25	15	10	5	5	5

根据生活垃圾填埋场现场取样, 试验得到的垃圾样平均含水率 $\omega=35.1\%$, 密度 $\rho=1.12 \text{ g/cm}^3$, 干密度 $\rho_d=0.84 \text{ g/cm}^3$ 。一般垃圾填埋工程都会进行碾压, 为此, 分别配置不同含水率的垃圾样, 进行室内标准击实试验, 通过得到的击实曲线来求得每个含水率下的干密度, 对比现场实测的干密度及含水率, 选择最接近的一组, 以此模拟现场试样。分别配制含水率为 20%、30%、40%、50%、60% 的垃圾样, 根据《土工试验规程》^[12], 进行室内标准击实试验。试验结果如图 1 所示。

选取与现场含水率相当的击实曲线上的点: $\omega=35.1\%$, 得到试样干密度 $\rho_d=0.69 \text{ g/cm}^3$ 。试验所用污泥取自南京市江心洲污水处理厂, 控制污泥含固率为 30%; 直剪固结不排水强度参数为 $c=1.05 \text{ kPa}$ 和 $\varphi=3.2^\circ$, 固结排水强度参数为 $c=10 \text{ kPa}$

和 $\varphi=8.3^\circ$, 在 50~250 kPa 压力下的渗透系数为 $10^{-9} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ 量级。现有的研究资料没有限制污泥的掺入比例^[13-14], 一般认为, 控制污泥掺入比例不超过 10% 对工程没有明显地不利影响; 在填埋处置中, 与生活垃圾分层铺填时污泥的比例可达 15%~25%; 在进行污泥与垃圾土混合样的生物降解研究时, 污泥比例可增加到 50%。为了研究较大掺入比例对污泥与生活垃圾混合后的抗剪强度影响规律, 试验时将污泥与垃圾的配制干重比值 (即污泥含量) 依次取为 33.2%、41.5%、49.8%、58.1%、66.4%、74.7%。

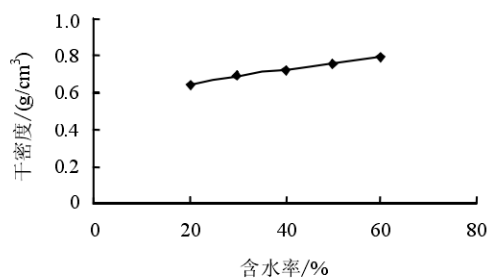


图 1 垃圾样的室内击实曲线

Fig.1 Compaction curve of MSW

本次通过直剪试验研究垃圾和污泥不同混合比例下的强度特性。考虑到垃圾分层填埋时会进行碾压, 直剪试样制备时, 采用标准击实试验进行试样的初始状态控制; 不同配合比例的试样分别控制污泥与垃圾土含水率, 在充分混合后进行击实, 击实功均选取标准击实试验的击实功。直剪试验的垂直压力分别为 100、200、300、400 kPa。由于实际填埋过程比较长, 混合体的渗透系数在 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$ 之间 (请见本文 2.2 节渗透试验), 可以认为, 填埋中产生的孔隙水压力能够消散, 不会产生大的积聚, 试验时采用固结快剪。根据《土工试验规程》^[12], 当剪切位移超过 4 mm 时, 如果强度仍继续增加, 则继续剪切至 6 mm, 垃圾土的应力-应变关系曲线为加工硬化型, 因此, 试验中位移剪至 6 mm 时停止试验。试验结果如图 2 所示。

由图 2 可见, 污泥与垃圾土混合样的直剪试验曲线都是呈硬化型的, 比较接近于垃圾土的剪切性质, 按试验位移量达到 6 mm 时选取强度值。将图 2 进行整理可以得到强度参数与污泥含量的试验关系, 如图 3 所示。当污泥的含量较低, 试验得到的内摩擦角较大, 黏聚力较小; 随着污泥含量增加, 试验得到的内摩擦角减小, 黏聚力增加; 当污泥含量超过某一数量时, 试验得到的内摩擦角减小, 黏聚力减小; 当污泥含量较高时, 试验得到的内摩擦

角和黏聚力均小。即当污泥含量超过某一数量时, 强度特性下降明显, 此时需要重点关注填埋边坡的稳定性。混合体的强度参数比没有掺入污泥垃圾土

的强度参数低^[5-6], 但比污泥的强度参数高。因此, 考虑污泥与垃圾的混合填埋, 可极大地提高污泥填埋的安全性和可行性。

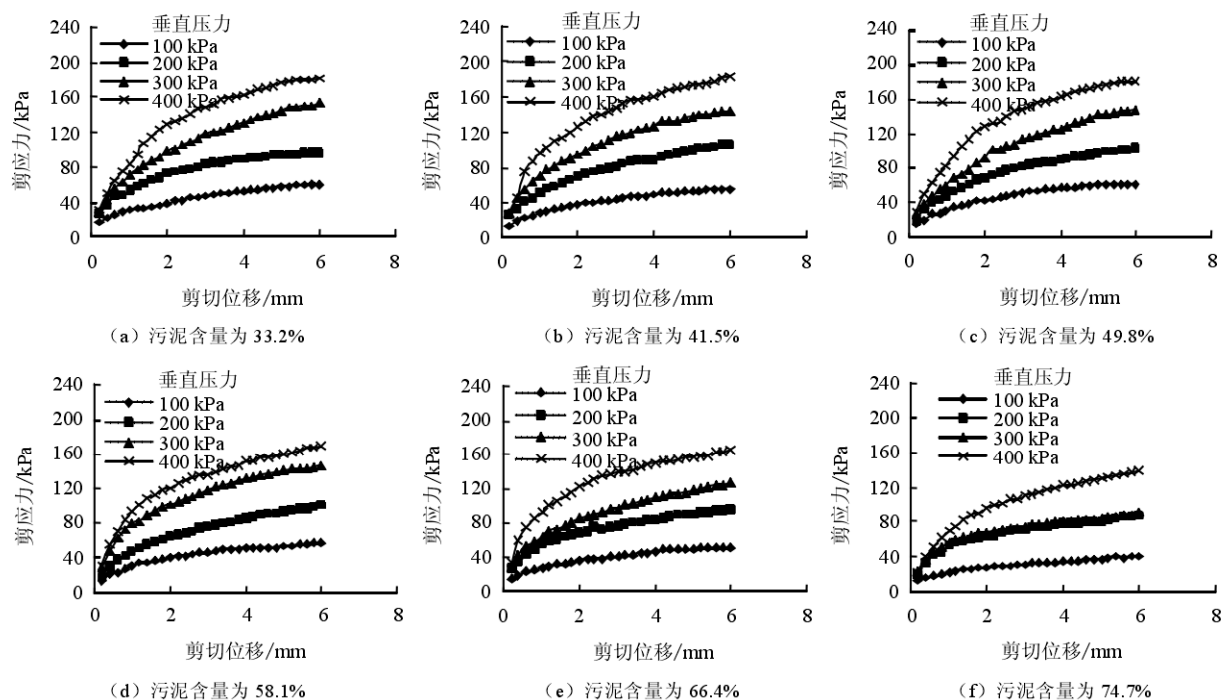


图 2 不同污泥含量时的剪应力-位移关系图

Fig.2 Shear stress-displacement curves under different sludge contents

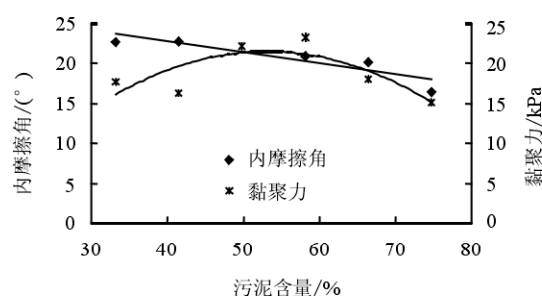


图 3 强度参数与污泥含量的试验关系

Fig.3 Relationships between strength parameters and sludge content

2.2 污泥与垃圾混合后的渗透特性试验

为了防止试样与仪器壁间的渗漏, 采用柔性壁渗透试验方法进行污泥与垃圾混合样的渗透试验。渗透试样的高度为 80 mm, 直径为 39.1 mm, 体积为 96 000 mm³, 分 5 层击实。试样的制备与直剪试验相同, 即采用标准击实试验。试验共 6 组, 污泥与垃圾土的干重比值依次为 0%、8.3%、24.9%、41.5%、58.1%、74.7%。制样时, 污泥与垃圾按一定比例混合后, 分 5 层制样, 将试样安装到柔性壁渗透仪上, 先施加较小的渗水压力进行反压饱和, 至同一时间间隔内固结排水管流出的水量不再变化

为止。然后施加周围压力, 从 50 kPa 开始, 依次增加为 100、150、200、250 kPa。每级压力下固结完成后, 施加渗透水压进行渗透试验。根据某一时间间隔及对应时间间隔内排水管内读数的变化, 根据式(1)求得在此固结压力下试样的渗透系数 $k(\text{m/s})$:

$$k = \frac{QH}{6120A\Delta P\Delta T} \quad (1)$$

式中: ΔT 为渗流历时 (min); Q 为 ΔT 时间间隔的总渗流量 (mm³); H 为试样固结完成后的总轴向高度 (mm); ΔP 为渗透水压力差, $\Delta P = P_2 - P_1$ (1 kPa 相当于 102 mm 水头); A 为渗流流经的平均过流断面 (mm²), $A = (96\,000 - \Delta V) / H$; ΔV 为固结完时试样的体积变化量, 即固结排水量 (mm³)。

图 4 所示为在不同配比条件下, 渗透系数随围压变化而变化的曲线, 明显看出, 围压越高, 渗透系数越小, 且在污泥含量较低时, 这种现象越明显。随着污泥含量的增加, 试样的渗透系数明显减小, 围压越低, 这种现象越明显。围压越高、污泥含量越高, 则渗透系数越小。污泥掺量为 24.9% 时渗透系数比纯垃圾的渗透系数下降约 1/2, 污泥掺量为 41.5% 时渗透系数比纯垃圾的渗透系数下降约 2/3,

垃圾土与污泥混合后没有明显劣化垃圾土的渗透特性。在污泥含量较高时（本次试验 74.7% 以上），污泥和垃圾土的混合体渗透系数与污泥接近；污泥含量不高时（本次试验 58.1% 以下），与污泥的渗透系数相比，掺入垃圾土提高渗透系数 1 个数量级以上，明显改善了污泥的渗透特性。从渗透特性分析，污泥与垃圾土混合也是合理可行的。

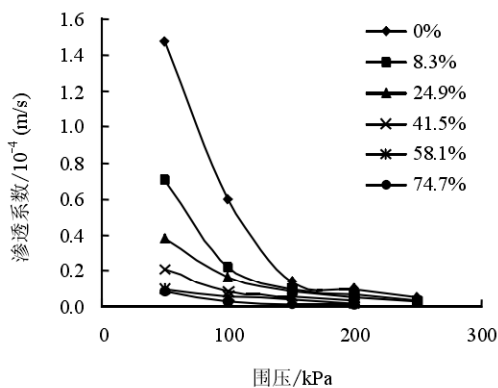


图 4 渗透系数随围压变化曲线

Fig.4 Curves of permeability coefficient versus confined pressure

3 污泥与垃圾混填的边坡稳定分析

某垃圾填埋场填埋过程的典型断面图如图 5 所示。边坡坡角最小为 14.4° ，最大为 17.67° ，平均坡角约为 10° 。共分为 6 个阶段进行填埋。

计算整个边坡的安全稳定系数，将 6 个阶段填埋的垃圾体看成一个整体，计算时认为原地面坡体是稳定的。利用试验得到的不同污泥掺入比例下混合后的强度参数和圆弧滑动法，可以计算得到对应的边坡稳定安全系数。

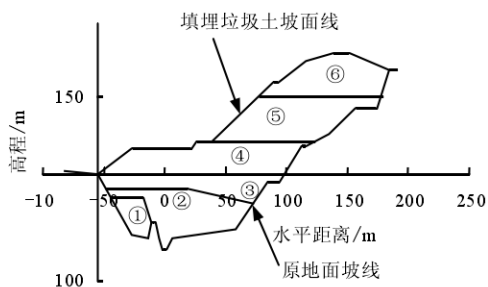


图 5 垃圾填埋场填埋过程的典型断面图

Fig.5 Typical section of MSW landfill

考虑到污泥掺入生活垃圾后的渗透系数在 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$ 之间，在强降雨影响下垃圾体中的淋滤液不能很快下降，其水位位于填埋体的顶面，再考虑填埋工程中的降解产气影响^[11]，这是垃圾填

埋场边坡稳定分析最危险的工况。经计算^[15]，降解产气的气压等值线图如图 6 所示，计算得到的最大孔隙气应力为 32 kPa。

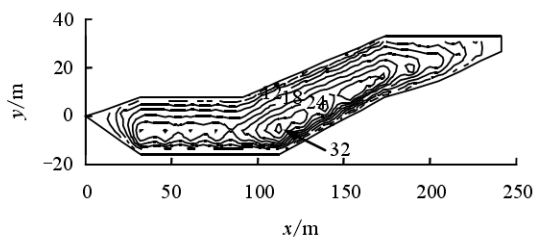


图 6 降解产气的气压等值线图（单位：kPa）

Fig.6 Pore air pressure contours from degradation (unit: kPa)

在计算时，滑动圆弧上的淋滤液压力按水柱高度计算，气压通过等值线图内插得到。经过计算，得到填埋边坡在不同污泥掺入比例最危险工况下的安全系数见表 2。滑动圆弧位置图见图 7。

表 2 不同污泥混合比例边坡稳定安全计算结果

Table 2 Safe factors with different sludge contents

计算 方法	污泥含量 /%	安全系数		计算 方法	安全系数	
		K_L	$K_{L, \kappa}$		K_L	$K_{L, \kappa}$
瑞典法	33.2	1.330	1.118	毕肖普法	1.537	1.246
	41.5	1.407	1.203		1.645	1.363
	49.8	1.587	1.393		1.828	1.571
	58.1	1.594	1.412		1.830	1.592
	66.4	1.492	1.320		1.725	1.500
	74.7	1.292	1.149		1.487	1.306

注：瑞典法与毕肖普法两者污泥百分比完全相同； K_L 为考虑淋滤液水位影响安全系数； $K_{L, \kappa}$ 为考虑淋滤液水平和孔隙气应力影响稳定安全系数。

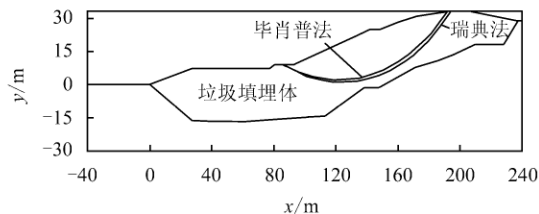


图 7 考虑淋滤液水位和孔隙气应力滑弧位置图

Fig.7 Failure surfaces considering leachate level and pore air pressure

由表 2 可见，随着污泥掺量的增加，边坡稳定安全系数先增大后降低。从强度特性试验结果得到黏聚力有随污泥掺量增加先增大后减小的规律，黏聚力在垃圾填埋场边坡安全系数计算中的影响比较大。因此，应根据污泥与垃圾混合后的强度特性试验，结合边坡稳定计算，确定符合工程安全需要的掺入例，不只是单纯控制污泥的掺入比例。表 2 结

果显示,考虑降解产生孔隙气应力的影响,边坡安全系数下降约15%~20%。因此,在进行垃圾填埋场边坡稳定分析时,应进行考虑降解产气计算条件的复核,防止出现冒进的设计方案。

4 结 论

(1) 污泥与垃圾土混合后,直剪试验的应力-位移曲线与生活垃圾的试验曲线类似,是硬化型的;强度参数比垃圾土的强度参数要低,比污泥的强度参数有很大提高,很好地改善了污泥的强度特性;黏聚力有随污泥掺量增加先增大后减小的规律,内摩擦角随污泥掺量增加降低。

(2) 污泥掺入垃圾土后,渗透系数与垃圾土的渗透系数相当,没有劣化垃圾土的渗透特性;在污泥掺入比较低时很好地改善了污泥的渗透特性,污泥与垃圾混合样的渗透系数比污泥的渗透系数有显著提高。

(3) 随着污泥掺量的增加,计算得到的边坡安全系数随污泥掺量增加先提高后降低;在实际工程中,单纯控制污泥掺入比例是不合理的,应结合污泥与垃圾土混合体的强度特性试验和边坡稳定计算结果,确定符合工程安全需要的掺入比例。

(4) 考虑降解产气影响,边坡稳定安全系数会降低约15%~20%,工程设计中应予以重视。

参 考 文 献

- [1] KOENING A, KAY J N, WAN I M. Physical properties of dewatered wastewater sludge for landfilling[J]. **Water Science Technology**, 1996, 34(3-4): 533-540.
- [2] 张华, 范建军, 赵由才. 基于填埋处置的污水厂脱水污泥土工性质研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 361-365.
ZHANG Hua, FAN Jian-jun, ZHAO You-cai, Geotechnical characterization of dewatered sewage sludge for landfilling[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2008, 36(3): 361-365.
- [3] 陈云敏, 王立忠, 胡亚元, 等. 城市固体垃圾填埋场边坡稳定分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 92-97.
CHEN Yun-min, WANG Li-zhong, HU Ya-yuan, et al. Stability analysis of a solid waste landfill slope[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(3): 92-97.
- [4] 张丙印, 介玉新. 垃圾土的强度变形特性[J]. 工程力学, 2006, 22(增刊 2): 14-22.
ZHANG Bing-yin, JIE YU-xin. Strength and deformation characteristics of municipal solid waste[J]. **Engineering Mechanics**, 2006, 22(Supp.2): 14-22.
- [5] SHI Jian-yong, QIAN Xue-de, ZHU Jun-gao, et al. Application of shear strength of solid waste and multilayer liner in landfills[C]//Proceedings of International Symposium on Geoenvironmental Engineering. Hangzhou: Springer, 2009: 286-294.
- [6] 施建勇, 朱俊高, 刘荣, 等. 垃圾土强度特性试验与双曲线强度包线研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1499-1504.
SHI Jian-yong, ZHU Jun-gao, LIU Rong, et al. Tests on shear strength behavior and envelop of double lines of municipal solid waste[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(10): 1499-1504.
- [7] 杨朝晖, 杨霞. 污水处理厂污泥处置[J]. 环境科学与技术, 1995, (3): 40-42.
YANG Chao-hui, YANG Xia. Sludge settlement of sewage treatment plants[J]. **Environmental Science and Technology**, 1995, (3): 40-42.
- [8] 赵乐军, 戴树桂, 辜显华. 污泥填埋技术应用进展[J]. 中国给水排水, 2004, 20(4): 27-30.
ZHAO Le-jun, DAI Shu-gui, GU Xian-hua. Advantage of sludge landfill technology[J]. **China Water & Wastewater**, 2004, 20(4): 27-30.
- [9] IRENE M C L, ZHOU W W, LEE K M. Geotechnical characterization of dewatered sewage sludge for landfill disposal[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(5): 1139-1149.
- [10] JACK A B, WILLAM J R. Sludge and its ultimate disposal[M]. Woburn: Ann Arbor Science Publishers Inc., 1988.
- [11] 刘晓东, 施建勇, 胡亚东. 考虑城市固体废弃物(MSW)生化降解的力-气耦合一维沉降模型及计算[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 693-699.
LIU Xiao-dong, SHI Jian-yong, HU Ya-dong. Coupled mechanical-gas settlement model and calculation for MSW by considering biodegradation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(5): 693-699.
- [12] 南京水利科学研究院. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [13] 朱英, 张华, 赵由才. 污泥循环卫生填埋技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [14] 单华伦. 污泥和生活垃圾混合填埋及淋滤液回灌对填埋体稳定化影响[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [15] 王娟. 污泥与垃圾土混填的工程特性与应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.