

垃圾土强度特性试验与双线强度包线研究

施建勇, 朱俊高, 刘 荣, 李玉萍

(教育部岩土力学与堤坝工程重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098)

摘要: 三轴试验和直接剪切试验是研究垃圾土强度特性的主要方法, 通过人工配制垃圾土、标准砂掺纤维土、现场垃圾土重塑样的三轴试验和直接剪切试验, 发现垃圾土的剪切应力应变(或位移)曲线表现为持续硬化型, 在应变达到一定数值后曲线有锯齿状波动; 经过国内相关试验成果的分析, 得到垃圾土的强度参数主要受干密度的影响, 且有较好的相关性。研究结果表明: 垃圾土的强度包线可以用双线强度包线来表达, 黏聚力和内摩擦角取决于是否填埋碾压; 直接剪切试验结果介于三轴固结不排水和固结排水试验结果之间, 且接近于三轴固结不排水试验结果; 直接剪切试验更准确地模拟了垃圾团间的滑动摩擦特性, 用直接剪切试验确定垃圾土的强度参数更合理; 同时建议了三轴试验破坏应变和直接剪切试验破坏位移。

关键词: 生活垃圾; 剪切强度; 三轴试验; 直剪试验; 双线强度包线

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)10-1499-06

作者简介: 施建勇(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事软土特性与加固技术、城市垃圾填埋有关研究工作。

E-mail: soft-ground@hhu.edu.cn。

Tests on shear strength behavior and envelop of double lines of municipal solid waste

SHI Jian-yong, ZHU Jun-gao, LIU Rong, LI Yu-ping

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

Abstract: The triaxial and direct shear tests are the main methods to study strength behavior of municipal solid waste. By use of triaxial tests and direct shear tests on artificial solid waste, standard sand with textile and remolded municipal solid waste from field, the stress strain curves exhibit steady hardening and saw waving after certain strain is reached. Through the analysis of the existing test results in China, it is found that the dry density of solid waste is the key influence factor of strength and has good relation with the strength behavior. The results show that envelop of solid waste can be simulated by double lines, and that the cohesion and friction angle are dependent upon whether or not the solid waste is rolled. The shear strength of solid waste by direct shear tests is between that by CU triaxial tests and that by CD triaxial tests and is closer to that by CU triaxial tests. The direct shear tests are more accurate in simulating friction behavior between blocks of solid waste feasible to determine the strength parameters of solid waste. The failure shear strain in the triaxial tests and the displacement in the direct shear tests are suggested.

Key words: municipal solid waste; shear strength; triaxial test; direct shear test; envelop of double lines

0 引言

垃圾土强度特性是垃圾土重要的工程性质之一, 主要用于垃圾填埋场边坡和相关土工构筑物的稳定分析等。现有的垃圾土强度特性研究方法有直接剪切试验法^[1-3]、常规三轴试验法^[4-9]、大型三轴试验法^[10]、单剪试验法^[7]、现场荷载板试验法及反演分析法^[11]等, 其中常规三轴试验和直接剪切试验是运用较广泛的试验方法。由于试验方法的差异, 确定的垃圾土强度参数各不相同。本文对人工配制垃圾土、标准砂掺纤维土和现场垃圾重塑土进行三轴试验和直接剪切试验,

研究垃圾土的强度特性。

1 垃圾土的强度特性试验

1.1 人工配制垃圾土

根据多个垃圾填埋场现场取样的分拣资料, 统计平均取表1所示配比, 进行干料的人工垃圾土样配制。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879022); 江苏省自然科学基金项目(20082890); 江苏省“六大人才高峰”计划项目(2006276)

收稿日期: 2009-06-01

按表1配比和试验规程制成直径100 mm,高度200 mm的试样,控制初始含水率为69%,初始干密度为0.4 g/cm³,围压采用50,100及200 kPa,分别进行三轴固结排水剪切试验。图1是人工配置垃圾土样的三轴固结排水剪切试验应力应变曲线。

表1 人工配制垃圾土样的配比

Table 1 Proportions of artificial waste

成分	厨余	纸类	纤维	塑料	玻璃	土
含量/%	25.0	21.0	3.0	9.0	8.0	34.0

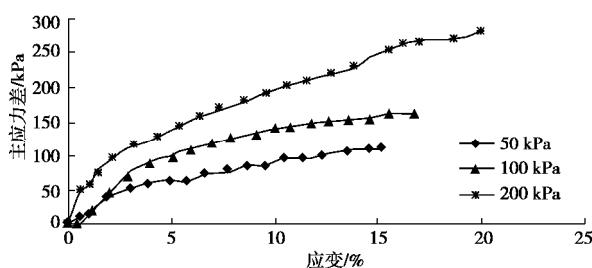


图1 人工配置垃圾土样的三轴固结排水剪切试验应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of artificial waste by CD triaxial tests

1.2 标准砂掺纤维丝土样的三轴试验

利用标准砂和纤维丝按一定重量比例进行混合,再根据孔隙比相同的原则进行几种人工土样的配制。采用标准砂基本物理性质见表2,颗粒试验结果见表3。控制土样的干密度 ρ_{dm} 为1.16 g/cm³,纤维长度为3 mm,含量为30%。试验在普通三轴仪上完成,试样直径39 mm,高度80 mm。图2是标准砂掺纤维丝土样的三轴固结排水剪切试验应力应变曲线。

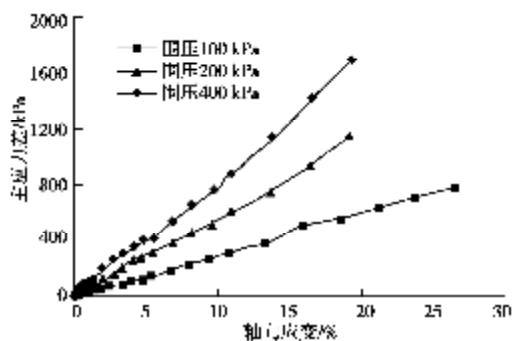


图2 标准砂掺纤维丝土样的三轴固结排水剪切试验应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of sand with textile by CD triaxial tests

1.3 重塑现场垃圾土样的三轴试验

将从现场取得的垃圾土样烘干,其分拣结果见表

表2 标准砂基本物理性质

Table 2 Basic indexes of standard sand

最大干密度 /(g·cm ⁻³)	最小干密度 /(g·cm ⁻³)	比重	最大孔隙比	最小孔隙比	干密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙比	渗透系数 k/(cm·s ⁻¹)
1.87	1.63	2.64	0.621	0.409	1.74	0.515	1.43

4. 将原状垃圾土样拆封风干后,搅拌均匀。分5层击实,控制干密度0.84 g/cm³。试样直径100 mm、高度200 mm。将制备的扰动样抽真空1 h以上,然后注水饱和。图3是重塑现场垃圾土样的三轴固结排水剪切试验应力应变曲线。

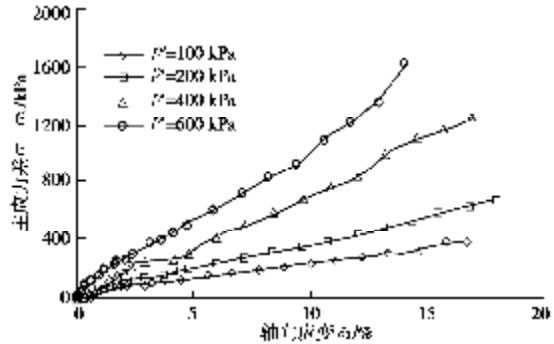


图3 重塑现场垃圾土样的三轴固结排水剪切试验应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of remolded solid waste by CD triaxial tests

1.4 重塑现场垃圾土样的直接剪切试验

垃圾土样同1.3节。将原状垃圾土样拆封风干后,搅拌均匀。分3层击实,控制干密度0.84 g/cm³。试样直径61.8 mm、高度20 mm。试样含水率为18.4%。由于试样相对较小,制样时除了剔除较粗颗粒外,对那些纤维、塑料等非颗粒材料也作了处理,也就是将它们用剪刀剪碎。和搅拌均匀的原状样相比,非颗粒材料的含量是偏少的。图4是重塑现场垃圾土样的直接剪切试验应力应变曲线。

图1~4与很多研究者的试验结果相似^[1-9],应力应变曲线是“持续硬化”型曲线,即在剪切应变或位移很大(超过15%或4 mm)时应力仍有随应变增加的特性。从试验曲线同时看到偶有锯齿状波动,有时甚至会出现“加速强化”现象。这是因为垃圾土中含有一定量的纤维质成分,试样在剪切过程中随机分布系;如调整为与剪切面平行,则应力应变曲线会出现的纤维不断调整其排列方向与剪切的方向的相对关短暂的水平或软化趋势;如调整为与剪切面垂直,则应力应变曲线有“加速强化”现象。综合土体破坏准则分析^[11, 12],垃圾土的强度随破坏应变取值的增加而增加,选取较大的破坏应变对垃圾土本身的稳定分析是合理的;但垃圾填埋场中还有其他重要的土工构筑物,如垃圾坝、水气管线等,且应变或位移超过15%或4

表3 标准砂颗粒试验结果

Table 3 Particle size distribution of standard sand

颗粒直径/mm	>2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	<0.075
含量/%	3.6	15.9	43.3	1.4	35.6	0.1

表4 现场垃圾土样的组成

Table 4 Compositions of waste samples from field

成分	灰土	木材	塑料	织物	玻璃	陶瓷	橡胶
含量/%	57.8	15.3	12.5	4.7	4.3	2.7	2.7

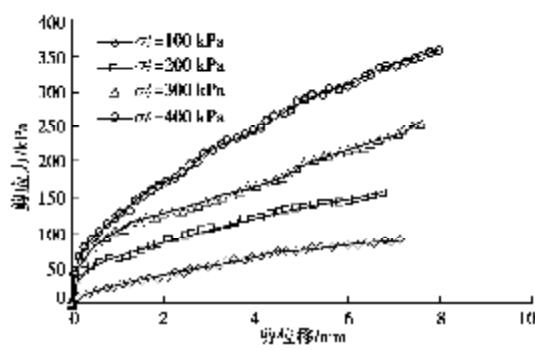


图4 重塑现场垃圾土样的直接剪切试验应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of remolded solid waste by direct shear tests

mm 时, 垃圾土的应力应变曲线锯齿状波动更明显, 表现出强度发挥的不稳定性, “加速强化”现象在试验中没有普遍性, 过多地考虑“持续硬化”和“加速强化”特性会对工程的稳定性判断夹杂不可靠的因素; 据已有的试验资料, 按破坏应变 15% 确定的垃圾土强度参数与其他研究方法得到的参数相当^[11]。建议按土体破坏准则确定垃圾土的强度参数, 富余部分作为垃圾土的强度储备。

2 垃圾土的强度特性参数

垃圾土的强度特性参数受到垃圾土的成分、填埋时间、密实程度、水分含量等因素影响, 不同的试验方法也会得到不同的试验结果。根据国内已经开展的三轴试验, 表 5 列出了试验结果。

由表 5 可见, 虽然试样的初始条件有一定的差异, 固结不排水试验结果基本在一定的范围内。从可以比较的影响因素分析, 垃圾土的干密度是关键的影响因素之一, 将表 5 中的黏聚力和内摩擦角与干密度的关系整理成图 5。由图 5 可见, 黏聚力和内摩擦角都有随干密度增加而增大的规律, 且凝聚力的增幅大于内摩擦角的增幅。我国垃圾填埋场, 经初步碾压(压力参考取 30 kPa) 常见填埋干密度为 0.8~1.0 g/cm³, 建议取 $c_{cu}=20.0$ kPa; 如没有进行碾压堆填, 取 $c_{cu}=0.0$ kPa。即

垃圾土经初步碾压

$$\left. \begin{array}{l} s \leq 30 \text{ kPa}, t_f = 20.0 \text{ kPa}, \\ s \geq 30 \text{ kPa}, t_f = 20.0 + (s - 30) \tan j_{cu}; \end{array} \right\} \quad (1)$$

垃圾土没有碾压,

$$t_f = s \tan j_{cu} \quad (2)$$

式中, t_f 为垃圾土强度, s 为剪切面上的法向应力。

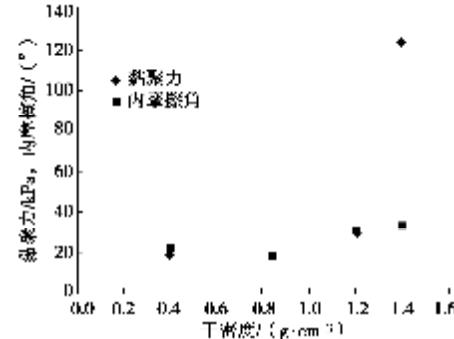


图5 黏聚力和内摩擦角随干密度变化规律

Fig. 5 Cohesion and friction angle versus dry density

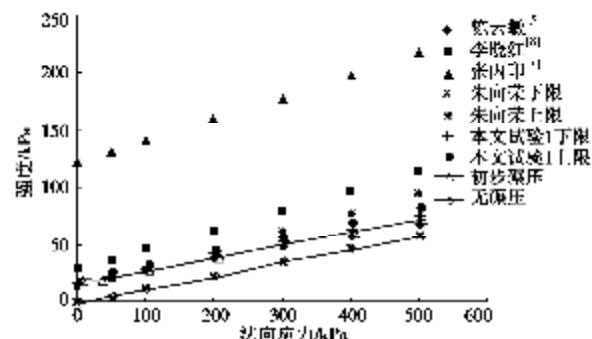


图6 建议固结不排水强度包线

Fig. 6 Suggested envelop of CU tests

图 6 是建议的固结不排水试验双线强度包线, 是现有试验结果的下包络线。

由表 5 同样可以整理得到固结排水试验的强度特性。与固结不排水试验结果相比, 有不同的变化规律; 由图 7 可见, 固结排水试验的凝聚力比固结不排水试验强度参数小。建议经初步碾压取 $c_d=10.0$ kPa; 如没有进行碾压堆填, 取 $c_d=0.0$ kPa。即

表 5 国内垃圾土三轴试验结果
Table 5 Results of triaxial tests on solid waste

参考文献	强度参数试验结果	情况说明
陈云敏等 ^[5]	$c_{cu}=18 \text{ kPa}, j_{cu}=18.0^\circ$	常规三轴和现场静探, 14 m 深度以下垃圾土样; 干密度 0.84 g/cm^3 ; 杭州
李晓红等 ^[8]	$c_u=48.72 \text{ kPa}, j_u=26.82^\circ$ $c_{cu}=29.62 \text{ kPa}, j_{cu}=30.54^\circ$	常规三轴, 试样不饱和; 干密度 $1.0-1.4 \text{ g/cm}^3$; 重庆 固结时间 1.5 h
张丙印等 ^[7]	$c_{cu}=123.9 \text{ kPa}, j_{cu}=33.6^\circ$ $c_d=96 \text{ kPa}, j_d=37.1^\circ$	试样直径 10.1 cm , 高度 20 cm ; 干密度 1.4 g/cm^3 ; 北京
朱向荣等 ^[6]	$c_u=0-10.2 \text{ kPa}, j_u=7.5-19.0^\circ$ $c_{cu}=0-12.8 \text{ kPa}, j_{cu}=21-29.5^\circ$	常规三轴; 杭州
冯世进等 ^[10]	$c_d=20 \text{ kPa}, j_d=22^\circ$	试样直径 30 cm , 高度 60 cm ; 人工配制
本文试验 1	$c_{cu}=17.6-20.0 \text{ kPa}, j_{cu}=21-23^\circ$ $c_d=17-40 \text{ kPa}, j_d=19-27.2^\circ$	试样直径 10 cm , 高度 20 cm ; 干密度 0.4 g/cm^3 ; 人工 配制
本文试验 2	$c_d=2.66-142.91 \text{ kPa}, j_d=34.49-37.33^\circ$	常规三轴; 干密度 1.16 g/cm^3 ; 标准砂掺纤维

表 6 直接剪切试验结果

Table 6 Results of direct shear tests

参考文献	强度参数试验结果	情况说明
张丙印等 ^[7]	$c=50 \text{ kPa}, j=35.4^\circ$	单剪; 干密度 1.4 g/cm^3 ; 北京
张季如等 ^[3]	$c=13 \text{ kPa}, j=31^\circ$	直剪; 干密度 $0.8-1.2 \text{ g/cm}^3$; 垃圾土源不详
河海大学 ^[13]	$c=9.7-23.3 \text{ kPa}, j=15-22.6^\circ$	直剪; 干密度 $0.7-0.9 \text{ g/cm}^3$; 无锡
本文试验 4	$c=4.5 \text{ kPa}, j=30.6^\circ$	直剪; 干密度 0.84 g/cm^3 ; 深圳

垃圾土经初步碾压

$$\left. \begin{array}{l} s \leq 30 \text{ kPa}, t_f = 10.0 \text{ kPa}, \\ s \geq 30 \text{ kPa}, t_f = 10.0 + (s - 30) \tan j_d; \end{array} \right\} \quad (3)$$

垃圾土没有碾压

$$t_f = s \tan j_d \quad . \quad (4)$$

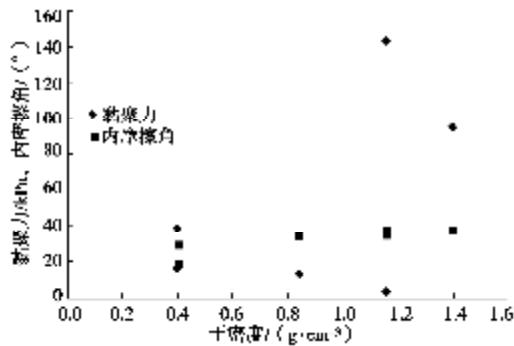


图 7 黏聚力和内摩擦角随干密度变化规律

Fig. 7 Cohesion and friction angle versus dry density

图 8 是建议的固结排水试验双线强度包线, 是现有试验结果的下包络线。

直接剪切试验是土体强度参数测定常选用的试验, 但国内进行垃圾土强度特性直接剪切试验的成果

偏少。表 6 是国内为数不多的直接剪切试验结果。其中无锡桃花山垃圾填埋场垃圾土 1995 年至 2007 年不同填埋龄期、不同深度、不同干密度 96 组试样直剪试验结果也列在表 6 中。

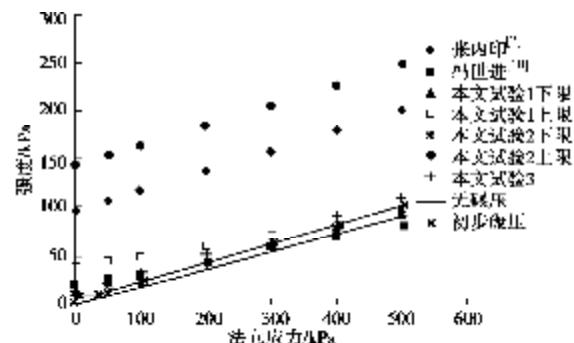


图 8 建议固结排水强度包线

Fig. 8 Suggested envelop of CD tests

由表 6 整理得到垃圾土强度特性参数直接剪切试验结果与干密度的关系如图 9 所示。直剪试验强度参数介于三轴试验的固结不排水和固结排水试验结果之间, 建议经初步碾压取 $c=13.0 \text{ kPa}$; 如没有进行碾压堆填, 取 $c=0.0 \text{ kPa}$ 。即

垃圾土经初步碾压

$$\left. \begin{array}{l} s \leq 30 \text{ kPa}, \quad t_f = 13.0 \text{ kPa}, \\ s \geq 30 \text{ kPa}, \quad t_f = 13.0 + (s - 30) \tan j; \end{array} \right\} \quad (5)$$

垃圾土没有碾压

$$t_f = s \tan j. \quad (6)$$

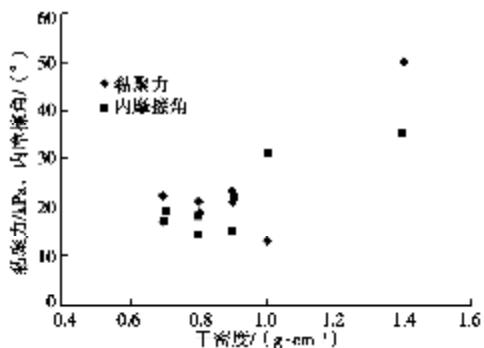


图 9 黏聚力和内摩擦角随干密度变化规律

Fig. 9 Cohesion and friction angle versus dry density

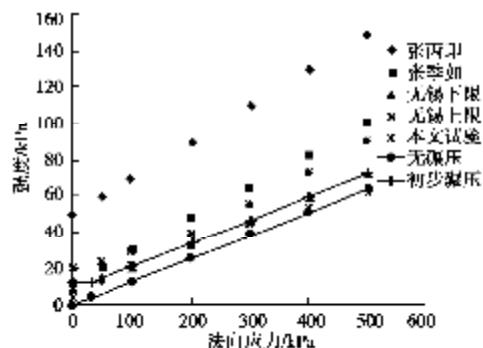


图 10 建议直剪试验强度包线

Fig. 10 Suggested envelop of direct shear tests

图 10 是建议的直接剪切试验双线强度包线, 是现有试验结果的下包络线。

从上述三条建议的强度包线可见, 直接剪切试验结果比较接近于三轴试验的固结不排水剪切试验结果。由于垃圾土的渗透系数较大, 直接剪切试验不能控制排水条件, 直接剪切试验的排水状况接近于三轴排水剪切条件, 但得到的内摩擦角比三轴固结排水剪切得到的内摩擦角小很多, 更接近于三轴试验的固结不排水剪切试验的内摩擦角。

在三轴试验中试样始终在压缩, 即使初始干密度很高, 也不会出现类似密实土体试样那样明显的剪切滑动面; 同时应力应变曲线始终是硬化的。因为在试验制样时, 垃圾土样是分层压实的, 其中的纤维质组分也有优先沿水平向排列的条件; 试样在受剪时, 潜在的剪切滑动面应沿 $45^\circ + j/2$ 方向, 但需穿过试样中的水平向排列占优的有机纤维组分, 而有机纤维组分阻止了潜在的剪切滑动面的产生, 故试验过程中试样

始终保持压缩, 没有形成 $45^\circ + j/2$ 方向的剪切滑动面。

在直接剪切试验中, 垃圾土样的制样方法同三轴试验, 但剪切时可能的滑动面是沿水平方向的, 会发生沿纤维组分间的剪切; 已有的试验表明, 沿纤维面间的抗剪切摩擦比较低, 即使试验过程中不形成高孔隙水压力, 剪切面上的应力接近于有效应力, 得到的抗剪强度也不会高。因此, 直接剪切试验结果比较接近于三轴试验的固结不排水剪切试验结果, 当然原因不相同。

从实际工程来看, 填埋体中存在垃圾团的现象, 纤维在垃圾团内的分布基本均匀, 垃圾团与垃圾团相互之间的差别较大, 可能的滑动面将产生在垃圾团间, 与室内的直接剪切试验条件相当。因此, 在进行垃圾土边坡稳定分析时, 应用直接剪切试验得到的强度参数更符合工程实际情况, 分析结果更合理可靠。

3 结 论

垃圾土与通常情况下的土体有明显的差别, 由于含有较多的纤维组分, 其强度特性与土体的强度特性差别也很大, 表现在:

(1) 垃圾土的应力应变曲线有“持续硬化”现象, 有时甚至会出现“加速硬化”, 但当剪切应变或剪切位移达到一定数值后, 硬化现象有锯齿状波动, 同时考虑到垃圾填埋场内其它土工构筑物的正常工作要求, 建议三轴试验破坏应变取 15% 或直接剪切试验破坏位移取 4 mm。

(2) 试样的干密度是影响垃圾土强度的主要因素之一, 根据现有的三轴试验和直接剪切试验结果, 对是否进行填埋碾压提出了凝聚力和内摩擦角的取值范围和双线强度包线。

(3) 三轴试验和直接剪切均已用于垃圾土强度特性研究, 直接剪切试验结果介于三轴固结不排水和固结排水试验结果之间, 接近于三轴固结不排水试验结果, 考虑到试验的剪切面形成特征, 建议用直接剪切试验确定垃圾土的强度参数。

参考文献:

- [1] 朱俊高, 施建勇, 严蕴. 垃圾填埋场固体废弃物的强度特性试验研究[C]// 第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 192~196. (ZHU Jun-gao, SHI Jian-yong, YAN Yun. Tests of strength properties of solid waste in landfills[C]// Proceedings of 1st Chinese Symposium on Geoenvironment and Geosynthetics. Hangzhou: Zhejiang University Press,

- 2002: 192 - 196. (in Chinese))
- [2] LANDVA A O, CLARK J I. Geotechnical of waste fill, Geotechnics of waste fills-theory and practice[J]. ASTM STP 1070, Arvid Land, David Knowles G, Eds. Philadelphia, PA, 1990: 86 - 103.
- [3] 张季如, 陈超敏. 城市生活垃圾抗剪强度参数的测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 110 - 114. (ZHANG Ji-ru, CHEN Chao-min. Measurement and analysis on shear strength parameters of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 110 - 114. (in Chinese))
- [4] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 35 - 39. (ZHANG Zhen-ying, WU Shi-ming, CHAN Yun-min. Experimental research on the parameter of life rubbish in city[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 35 - 39. (in Chinese))
- [5] 陈云敏, 王立忠, 胡亚元, 等. 城市固体垃圾填埋场边坡稳定性分析[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. (in Chinese))
- [6] 朱向荣, 王朝晖, 方鹏飞. 杭州天子岭垃圾填埋场扩容可行性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 281 - 285. (ZHU Xiang-rong, WANG Chao-hui, FANG Peng-fei. Study on feasibility of enlarging capacity in Tianziling waste landfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 281 - 285. (in Chinese))
- [7] 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 wastes[J]. Engineering Mechanics, 2006, 22(S2): 14 - 22. (in Chinese))
- [8] 李晓红, 梁 峰, 卢义玉, 等. 重庆市垃圾填埋场填埋体的强度特性研究[J]. 重庆大学学报, 2007, 29(8): 6 - 9. (LI Xiao-hong, LIANG Feng, LU Yi-yu, et al. Experimental research on municipal solid waste landfill's strength character in a refuse dump of Chongqing[J]. Journal of Chongqing University, 2007, 29(8): 6 - 9. (in Chinese))
- [9] 刘 荣, 施建勇, 彭功勋. 垃圾土力学性质的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 108 - 112. (LIU Rong, SHI Jian-yong, PENG Gong-xun. Experimental studies on mechanical behavior of refuse samples[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 108 - 112. (in Chinese))
- [10] 冯世进, 周子范, 陈云敏, 等. 城市固体废弃物剪切强度参数的研究[J]. 浙江大学学报, 2005, 39(7): 987 - 991. (FENG Shi-jin, ZHOU Zi-fan, CHEN Yun-min, et al. Study on shear strength parameters of municipal solid waste[J]. Journal of Zhejiang University, 2005, 39(7): 987 - 991. (in Chinese))
- [11] SINGH S, MURPHY B. Evaluation of the stability of sanitary landfills[J]. Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Land, David Knowles G, Eds. Philadelphia, PA, 1990: 240 - 258.
- [12] 李玉萍. 城市固体废弃物强度特性试验研究及边坡稳定性分析[D]. 南京: 河海大学, 2009. (LI Yu-ping. Studies on the strength characteristics of MSW and analysis of the stability of the slope[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [13] 河海大学. 无锡市桃花山垃圾填埋场垃圾堆场岩土工程勘察报告[R]. 2007. (Hohai University. Geotechnical Exploring Report of Taohua Hill's Landfill in Wuxi City[R]. 2007. (in Chinese))