

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2011. 01. 014

垃圾土地基灌浆处理试验

高海¹ ,施建勇¹ ,陈继东² ,艾英钵¹ ,张坤勇¹

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室 ,江苏 南京 210098 ;
2. 深圳玉龙坑固体废弃物处理中心 ,广东 深圳 518000)

摘要 通过现场灌浆试验 ,钻取灌浆处理后的水泥垃圾土样进行水泥质量分数的分析试验 ,得到一次灌浆能使水泥浆在垃圾土地基中较均匀分布 ,水泥质量分数达到约 10% ,二次灌浆能增加水泥质量分数约 25% 的结果。经过室内水泥垃圾土样 28 d 养护强度试验 ,发现即使水泥掺入量达到 25%、养护 60 d ,得到的应力应变曲线仍呈硬化型 ,水泥垃圾土仍是松散体 ,没有形成固结体。灌浆前后垃圾土地基的静载荷试验表明 ,灌浆能明显改善垃圾土地基的承载特性 ,提高地基的承载力 ,但由于垃圾填埋场现场养护条件限制 ,二次灌浆后垃圾土地基的破坏表现为脆性特征。

关键词 水泥灌浆 城市固体废弃物 垃圾土地基 垃圾土强度 承载力

中图分类号 :TU753 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2011)01-0058-04

Grouting improvement of foundation of municipal solid waste//GAO Hai¹ , Shi Jian-yong¹ , CHEN Ji-dong² , AI Ying-bo¹ , ZHANG Kun-yong¹ (1. Key Laboratory of MOE of Geomechanics and Dam Engineering , Hohai University , Nanjing , 210098 , China ; 2. Shenzhen Yulongkeng Municipal Solid Waste Treatment Center , Shenzhen 518000 , China)

Abstract :Based on the in-situ grouting tests , the mass fraction of cement was analyzed by boring samples of municipal solid waste after cement grouting. The cement was uniformly distributed over the foundation of municipal solid waste , and the mass fraction of cement reached 10% after the first grouting and increased to 25% after the second grouting. Through the strength tests on laboratory cement-waste samples after curing of 28 days , the stress-strain relation of the cement-waste samples exhibited hardening characteristics even when the dosage of cement reached 25% and the curing age was 60 days , and the cement-waste samples were loose and not consolidated. The static load tests on the foundation of municipal solid waste before and after grouting indicated that the bearing properties of the foundation of municipal solid waste could be improved by grouting , and the bearing capacity was obviously raised. However , the failure mode of the foundation of municipal solid waste after the second grouting was brittle because of the restricted in-situ curing conditions.

Key words :cement grouting ; MSW ; foundation of MSW ; strength of MSW ; bearing capacity

随着我国城市化进程的推进 ,城市范围逐渐扩大 ,原先位于城郊结合部的部分垃圾填埋场将成为新的地基 ,规划建设中的基础设施或其他建筑物将不得不在类似的地基上兴建 ,垃圾土地基处理成为工程技术人员需要面对的问题之一^[1-3]。1988 年韩国奥运会的部分场馆就修建在垃圾填埋场上 ,且利用填埋场产生的垃圾气发电作为建筑物的空调动力。对垃圾土地基处理可采用强夯、挤密、桩基础等方法 ,利用水泥灌浆改变垃圾土性质也是可以尝试的方法之一^[4-10]。为此 ,笔者曾进行水泥垃圾土的固化强度试验 ,探讨水泥对不同降解阶段垃圾土的强度特性影响规律 ,得到初步的研究结果^[11]。

深圳市玉龙坑垃圾填埋场是深圳最早的垃圾填

埋场之一。自 1983 年启用相继进行了 6 次扩建 , 1998 年 2 月停止垃圾进场。经过 11 年的生化反应 ,垃圾填埋场已经达到稳定状态。该填埋场的最大垃圾填埋深度超过 30 m ,在我国垃圾填埋场工程建设中具有比较典型的特征。其上将要修建高尔夫球场和配套设施 ,为了进行地基处理方案论证 ,将对灌浆等有关问题进行试验与分析研究。

1 灌浆后垃圾土中水泥质量分数与特性试验

1.1 降解稳定垃圾土的成分

根据全场地质勘察分析 ,场地的垃圾分 3 层 ,各层的分拣结果见表 1。

由表 1 可见 ,塑料和纤维的质量分数之和超过

表 1 玉龙坑垃圾填埋场 3 层垃圾主要成分分布 %

垃圾层号	塑料	木屑	玻璃	金属	纤维布	石头	动物骨头	降解产物
1	19.61	6.68	1.38	2.16	20.80	6.65	0.40	42.41
2	14.28	6.70	1.87	0.68	1.46	22.10	0.06	52.85
3	26.82	8.62	0.63	3.54	3.26	5.52	0	51.61

15% ,降解产物主要由绿化垃圾、厨余垃圾等易降解有机物经过多年的生化反应和淋滤液浸润 ,生成黑色、带腥臭味淤泥状残渣 ,其中含有大量有机质 ,因此降解稳定的垃圾土中总的有机物质量分数仍处于较高的状态。垃圾土是一种高度不均质材料 ,结构松散 ,原状垃圾土样难以成型 ,不便于直接试验。垃圾填埋场在填埋历史中往往采取分层填埋作业、压实黏土分隔等措施 ,并且相同年代的垃圾成分也具有一定相似性 ,因此该填埋场垃圾土呈现成层性分布的特点 ,本试验垃圾土试样是按各层垃圾组分和原状垃圾土物理指标的平均值经人工配制而成。

1.2 灌浆后垃圾土中水泥质量分数试验

垃圾土地基孔隙率高 ,渗透性好 ,可以采用常规灌浆施工工艺 ,主要通过灌浆压力、灌浆量以及施工工艺来控制垃圾土中的水泥质量分数和跑浆、冒浆问题。经过试探性灌浆 ,确定采用袖阀管灌浆工艺 ,取灌浆孔间距为 2 m ,灌浆区 1 进行一次灌浆 ,灌浆区 2 进行二次灌浆。单点灌浆压力控制在 0.45 ~ 0.50 MPa ,灌浆时间为 2 min ,灌浆量为 30 ~ 60 L ,灌浆水灰比为 1:0.5 ,没有外加剂。在灌浆后的垃圾土地基中取样 ,测定其中的水泥质量分数。灌浆试验区平面图见图 1。

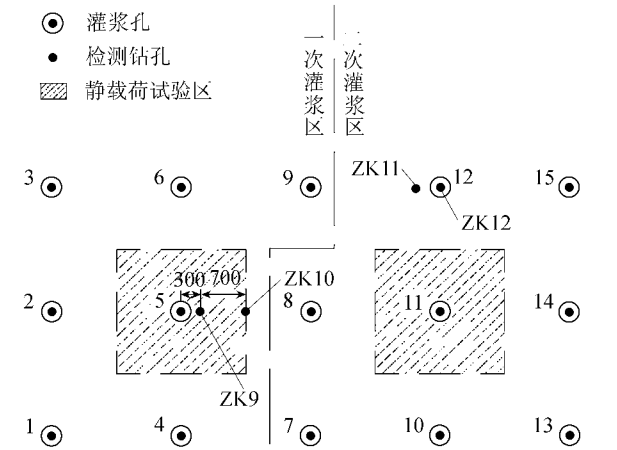


图 1 灌浆试验区平面图(单位 mm)

在灌浆区 1 ,距灌浆点不同距离取样 ,利用 EDTA 滴定法进行水泥成分分析 ,灌浆区 2 只做 1 孔取样水泥成分分析试验 ,结果见表 2。

由表 2 可见 ,在灌浆区 1 ,距灌浆点不同距离钻孔取样 (图 1 和表 2 中 ZK9 和 ZK10) ,3 层垃圾土中的水泥质量分数试验结果基本接近。因为垃圾土有

表 2 灌浆后取样水泥质量分数分析结果 %

垃圾层号	灌浆区 1-ZK9	灌浆区 1-ZK10	灌浆区 2-ZK11
1	10.6	9.9	24.31
2	10.7	11.9	25.82
3	9.1	9.5	20.01

较大的孔隙和较好的渗透特性 ,垃圾土地基有较好的可灌特性 ,水泥浆液较容易在垃圾土中移动 ,浆液在垃圾土层中分布比较均匀 ,垃圾土地基可以很好地进行灌浆处理 ,灌浆在垃圾土地基处理中是可备选的方案之一。与灌浆区 1 相比 ,灌浆区 2 二次灌浆的水泥质量分数有显著提高。

1.3 水泥垃圾土的强度试验

根据现场灌浆取样水泥质量分数试验结果 ,从现场钻取垃圾土样 ,分别进行不掺、掺入水泥的固化强度试验 ,垃圾土试验尚无现成的规范可遵循 ,参照《土工试验规程》 ,在垃圾土样中分别加入 10% 和 25% 的水泥 ,搅拌均匀后再进行制样 ,制样所用的三开模直径为 61.8 mm ,高度为 125 mm ,将试样放置于恒温恒湿箱内 ,湿度为 90% ~ 100% ,温度为 20 ℃ ± 2 ℃。养护 24 h 后拆模 ,拆模后 ,将试样继续置于恒温恒湿箱中养护 28 d 后进行固结不排水三轴强度试验 ,同时进行室内人工配置水泥垃圾土的强度试验。三轴试验结果见图 2 (图中 σ_3 为试验围压)。

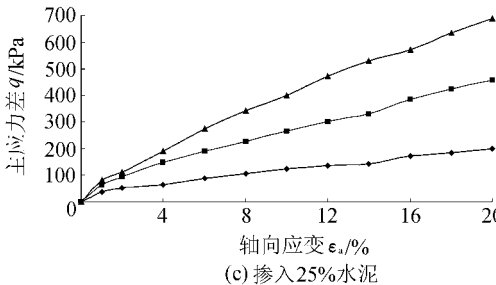
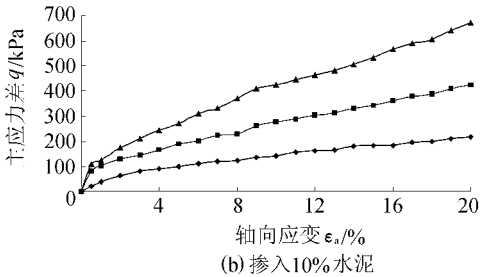
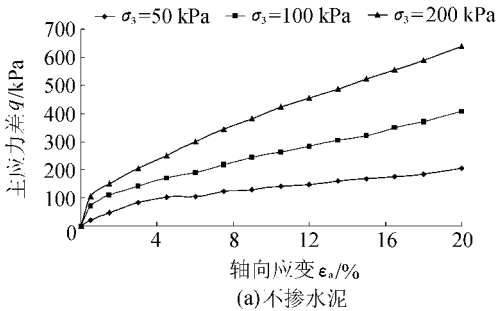


图 2 不同水泥质量分数的垃圾土三轴试验曲线

由图 χ (a) 可见, 不掺水泥的垃圾土样的应力应变曲线是硬化型曲线, 没有出现峰值和软化性状, 这是目前关于垃圾土强度试验的共同结果^[12-16]。对于掺入 10% 以上普通水泥土样的强度试验曲线都会表现出脆性破坏和明显的软化性质, 但图 χ (b) 及 (c) 的强度曲线并未显现任何软化特征, 而是与不掺水泥的垃圾土样的应力应变曲线相似, 是硬化型曲线。

表 3 是不同水泥掺入量的强度试验结果汇总。由于现场垃圾土样的均匀性不好控制, 试验结果有些离散, 总体表现为: 随着水泥掺入量的增加, 水泥垃圾土的强度增加, 掺入 10% 的水泥可使垃圾土的强度提高约 6%, 掺入 25% 的水泥可提高约 10% 的强度, 随着围压的增加, 水泥垃圾土的强度也在增加。

表 3 垃圾土和水泥垃圾土强度试验结果 kPa			
水泥掺量/%	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa
0	204.4	409.1	639.8
10	218.0	424.0	672.0
25	198.1	457.2	687.6

由三轴试验得到的垃圾土、水泥垃圾土的总应力强度参数列在表 4。由表 4 可见, 水泥掺入量的增加可在一定范围内提高垃圾土的内摩擦角指标, 而黏聚力指标变化不明显。

表 4 垃圾土、水泥垃圾土强度参数		
水泥掺量/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	21.44	36.04
10	21.44	36.50
25	17.36	38.11

将现场得到的垃圾土样进行室内不同养护龄期的无侧限抗压强度试验(掺入 25% 水泥)。试验结果如图 3 所示。

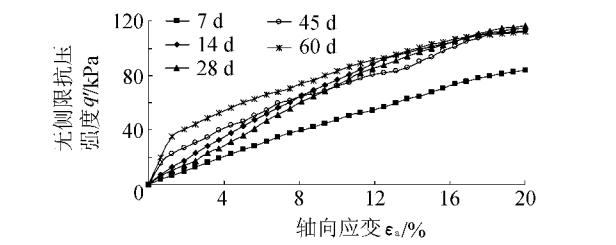


图 3 掺入 25% 水泥的垃圾土不同龄期无侧限抗压试验曲线

由图 3 可见, 随龄期增加水泥垃圾土的强度增加(除 14 d 龄期以外), 不同龄期试样的应力应变曲线均表现为硬化特性。

图 2~3 中的试验曲线均为硬化型曲线, 其原因是垃圾土与一般的软黏土有明显的区别, 前者的干密度很低, 大概只有后者的 1/2, 即使水泥垃圾土中水泥质量分数达到 25%, 掺入水泥的绝对量与同体积水泥土中水泥掺入量 10%~15% 相当, 此时并没

有形成高强度的水泥垃圾土, 而只是比垃圾土性质有一定改善的松散体; 同时高有机质质量分数影响水泥垃圾土的强度形成, 即使再增加水泥质量分数, 水泥垃圾土的应力应变曲线仍为硬化型的^[17]; 再者, 水泥垃圾土中的纤维等成分对试样有加筋作用, 在应力作用下, 试样表现为塑性破坏, 破坏时的应变延伸量也比较大, 即使试验达到 20% 的应变, 仍表现为硬化特征, 没有发生像普通水泥土那样的脆性破坏现象。

2 灌浆处理前后的承载特性试验

分 2 次共做 5 组平板静载试验, 检测前对检测面进行清理, 挖除垃圾填埋场封场绿化层、素填土约 2 m, 再铺约 50 mm 中粗沙层找平。载荷检测利用混凝土预制块、钢梁组成反力系统, 由置于荷载板和反力系统之间的油压千斤顶进行加荷, 检测点受荷后产生的沉降量由荷载板四角竖向安装的百分表观测获得, 荷载板为 2.0 m×2.0 m 方形钢板, 试验现场情况见图 4~5。



图 4 平板静载试验前现场情况



图 5 平板静载试验进行中现场情况

灌浆处理前后地基承载力的静载试验结果如图 6 所示。根据规范确定的地基承载力结果: 未经灌浆处理的垃圾土地基的承载力为 225.0 kPa; 经一次灌浆处理的垃圾土地基承载力分别为 300.0 kPa 和 337.5 kPa; 经二次灌浆处理的垃圾土地基承载力分别为 360.0 kPa 和 320.0 kPa。灌浆能提高垃圾土地基的承载力, 一次灌浆使地基的承载力平均提高约 41.7%, 二次灌浆使地基的承载力平均提高约 51.1%。

由图 6 可见, 灌浆能明显改善垃圾土地基的承

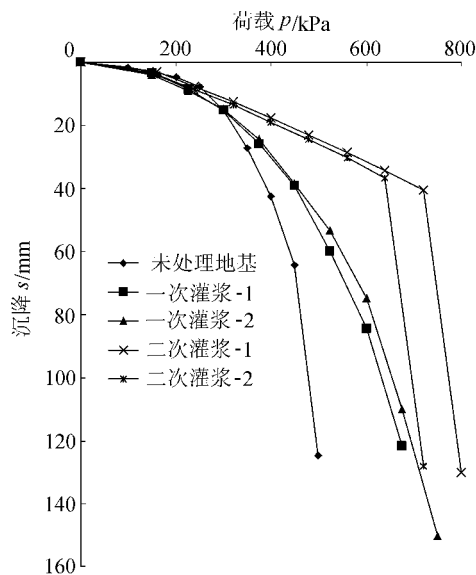


图6 静载试验的荷载~沉降曲线

载性状,一次灌浆后地基的荷载沉降曲线下较不处理时要平缓,承载力也有较大提高;二次灌浆地基的静载荷试验结果发现,荷载沉降曲线在达到极限状态前有较长的近似直线段,但接近极限状态时荷载沉降曲线突然下降,表现为脆性破坏性质。一次灌浆后有约10%的水泥掺入垃圾土地基,灌浆的浆液将在垃圾土地基的孔隙中形成一定的固结体,但水泥的掺入量较小,水泥和垃圾土仍是松散的混合土,无论是掺水泥的垃圾土三轴试验还是现场的静载荷试验,试验曲线均为缓变型。二次灌浆能使地基的水泥质量分数达到25%左右,虽然室内的掺水泥垃圾土三轴试验得到的应力~应变曲线表现为硬化特征,但现场静载荷试验的荷载~沉降曲线在接近极限状态时表现为脆性破坏,这是因为室内试验时能够均匀地拌和试样,饱和条件下养护,而现场灌浆时水泥浆只能沿着垃圾土中的孔隙移动,充填其中的部分大孔隙,此外封场的垃圾填埋场现场垃圾土中的淋滤液液面埋深较深,难以具备饱和的成型条件,水泥浆固结体所带来的承载力提高不能均匀分配到垃圾土地基中。总体上,灌浆处理垃圾土地基能明显提高地基的承载力,但要防止高灌浆量时地基出现脆性破坏带来的不利影响,在地基处理方案设计时应引起重视。

水泥浆液进入垃圾体后,事实上,水泥浆液与垃圾土发生较为复杂的相互作用,既有加固作用,又有负面影响,并最终决定了注浆垃圾土的强度和承载特性。

笔者认为主要的相互作用是:①水泥发生水化反应,胶凝硬化,出现增量固体颗粒,对垃圾土起“硬化”作用,如果水泥质量分数相当高,大量的水化热能通过膨胀、催化降解反应等产生“软化”趋势。

②水泥浆液占据了部分孔隙体积,挤密、“硬化”了原先的垃圾土。③纤维状或“加筋相”物质得到了更好的摩擦、包裹或锚固,导致抗拉能力增强的“硬化”。④注浆压力造成垃圾土内部结构的某种破坏,导致原先垃圾土出现“软化”。⑤垃圾土中有机质降解引起固体体积减小,导致骨架“软化”。⑥淋滤液对水泥材料的腐蚀性“软化”。

3 结 论

a. 灌浆加固垃圾土地基时浆液能比较均匀地分布在垃圾土地基内,垃圾土地基具有较好的可灌性,灌浆是垃圾土地基加固的可选方案之一。

b. 一次灌浆能使垃圾土地基吸收约10%的水泥量,二次灌浆能增加到约25%的水泥量,与一般软黏土地基加固10%~15%水泥掺入量相当,总体上水泥灌入量不是很高。

c. 对室内掺入10%和25%水泥的垃圾土,强度试验得到的应力~应变曲线表现为硬化型曲线,强度有明显的提高,表明水泥对垃圾土地基有加固效果,但尚未形成完整的水泥固结体,水泥垃圾混合体仍是松散体。

d. 根据现场静载荷试验结果,灌浆加固后垃圾土地基的承载力有明显提高,由于现场实际条件与室内试验有较大的差异,二次灌浆后地基载荷试验的荷载~沉降曲线出现脆性破坏特征,在地基处理设计时应关注。

e. 水泥浆液进入垃圾体后,既有加固作用,又有负面影响,即使对于降解稳定期垃圾土而言,也存在影响改良后垃圾土强度稳定性的潜在因素。

参考文献:

- [1] 杨明亮, 骆行文, 喻晓, 等. 金口垃圾填埋场内大型建筑物地基基础及安全性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 628-637.
- [2] 衡涛, 米海珍, 杨文侠, 等. 兰州地区某工程垃圾地基土处理方法研究[J]. 甘肃科学学报, 2007, 19(1): 140-145.
- [3] 张永军. 生活垃圾杂填土对地基基础的危害及工程措施[J]. 天津建设科技, 2001(1): 45-46.
- [4] 王立彬, 燕乔, 毕明亮, 等. 深厚覆盖层防渗中墙幕结合关键技术[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(2): 63-66.
- [5] 虞万霞, 牢文科, 王锦国. 猴岩岩微型地表地下联合水库成库条件分析[J]. 水资源保护, 2009, 25(2): 69-71.
- [6] 郭敏丽, 王金生, 刘立才, 等. 非正规垃圾填埋场地下水污染控制技术比较[J]. 水资源保护, 2009, 25(4): 28-36.

(下转第78页)

左侧沟槽宽度对填土变形的影响,即随着沟槽宽度的增大,涵洞对左侧填土变形的影响范围也增大。

4 结 语

a. 试验证明,在刚性涵洞顶部铺设 EPS 柔性材料板具有显著的减荷效果,在本次试验条件下约减小了1/2~2/3的垂直土压力;在涵洞两侧铺设 EPS 板也有明显的减荷效果,在本次试验中约减小了1/2的侧向土压力;随着 EPS 板厚度的增加,减荷效果逐渐增加,但增幅渐小。

b. 在本涵洞试验条件下(如涵洞的高宽比、地基与涵侧回填砂卵石层的压缩性等),洞顶 EPS 板的厚度为 7~8 cm 即可;涵洞侧面铺设厚度为 4~5 cm 的 EPS 板就足够了,再增加厚度所取得的减荷效果增加值并不大,而且不经济。

c. 试验结果表明,涵洞顶部所铺设的 EPS 板在起到减荷作用的同时还可消除涵洞在路堤纵向引起的沉降差,以确保路面平整。

d. 涵洞垂直土压力的有限元计算结果与实测值比较接近,进一步验证了洞顶有无 EPS 板及 EPS 板厚度对洞顶垂直土压力的影响情况,这与测试结果也是一致的。从变形云图中可以看出洞顶有无减荷材料 EPS 板、减荷材料厚度、地形条件等因素对洞顶平面内外土柱间沉降差的影响情况。

以上现场试验与计算分析结果表明,EPS 减荷材料能够有效地减小涵洞顶的垂直土压力以及涵侧的侧向土压力值,并且能够消除涵洞在路堤纵向引起的沉降差,是上埋式涵洞土压力的有效减荷材料,具有较广泛的应用前景,值得进一步深入研究与推广应用。

参考文献:

[1] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究 [J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 4-14.

[2] 王晓谋, 顾安全. 上埋式管道垂直土压力减荷措施 [J]. 岩土工程学报, 1990, 12(3): 84-89.

[3] 白冰. 减荷条件下上埋式圆形结构物周边土压力分析 [J]. 长江科学院院报, 1998(2): 14-17.

[4] 顾安全, 金滨, 冯瑞玲. 减荷措施在高填土涵洞中的应用研究 [C] // 中国岩石力学与工程学会. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京: 科学技术出版社, 2002: 503-506.

[5] 郭婷婷. 涵洞土压力与变形及其减荷措施的试验研究 [D]. 西安: 西北农林科技大学, 2004.

[6] 杜骋, 杨军. 聚苯乙烯泡沫(EPS) 的特性及应用分析 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(3): 138-142.

[7] 王武祥. EPS 颗粒-粉煤灰复合屋面保温材料的研究与应用 [J]. 新型建筑材料, 2005(11): 56-58.

[8] 任建民, 李劲遐, 张海斌. EPS 板粘贴外墙外保温施工中新技术的应用 [J]. 新型建筑材料, 2006(1): 51-52.

[9] 刘文白, 周健, 郝万喜, 等. EPS 板在多年冻土地区道路工程中的应用试验 [J]. 新型建筑材料, 2003(1): 30-32.

[10] 高洪梅, 刘汉龙, 刘金元. EPS 颗粒轻质混合土蠕变特性试验研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 402-406.

[11] 周云东, 何奇宝, 丰士根, 等. EPS 颗粒混合轻质土动强度特性对比研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 810-813.

[12] 李明东, 朱伟, 张春雷, 等. 击实参数对砂土 EPS 颗粒混合轻质土的影响 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 814-817.

[13] 颜云辉, 谢里阳, 韩清凯. 结构分析中的有限单元法及其应用 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000.

(收稿日期: 2010-04-23 编辑: 高建群)

(上接第 61 页)

[7] 阮龙飞, 王永庆. 中远船务启东海工基地坞口围堰工程的设计与施工 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 90-94.

[8] 缪绪樟, 曾鹏九, 鄢泰宁, 等. 回填砂卵石层固结灌浆 [J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(4): 60-64.

[9] 赵元弘. 小南海水库地震堰塞坝体防渗处理 [J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5): 39-44.

[10] 刘顺义, 李千, 范洪国, 等. 建平白山水库坝址渗漏基流分析 [J]. 水利水电科技进展, 2010, 28(s1): 77-79.

[11] 施建勇, 冒俊. 水泥垃圾土强度特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1951-1966.

[12] DIXON N, LANGER U, GOTTELAND P. Classification and mechanical behavior relationships for municipal solid waste: study using synthetic waste [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(1): 79-90.

[13] ZEKOS D, BRAY J D, ATHANASOPOULOS G A, et al. Compositional and loading rate effects on the shear strength of municipal solid waste [C] // 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Thessaloniki, Greece: Proceedings of ICEGE, 2007.

[14] 陈云敏, 高登, 朱斌. 城市固体废弃物的复合指数应力-应变模型及其应用 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1020-1029.

[15] 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.

[16] 旦增顿珠, 介玉新, 魏弋峰, 等. 垃圾土的强度特性试验研究 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(9): 1538-1541.

[17] 冒俊. 人工改良垃圾土强度特性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.

(收稿日期: 2010-01-01 编辑: 方宇彤)