

滞洪区路堤改良路基填土 CBR 试验研究

何忠意^{1,2}, 王海波³, 徐文平⁴

(1. 广东天信电力工程检测有限公司, 广东 广州 510600; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
3. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 4. 煤炭科学研究总院 重庆研究院, 重庆 400037)

摘 要:滞洪区亚粘土作路基基层、底基层填料土必须进行固化改良, 本文采用石灰—粉煤灰、水泥—粉煤灰组合和水泥—石灰组合对其进行改良研究, 以承载比 CBR 值作为指标, 针对不同的压实度、固化剂不同配合比掺量开展了系列试验, 并进行了分析和讨论. 试验结果表明, 三种改良填料的抗压强度, 随着压实度增加, 分别先呈现不同比例的增长, 但增加到一定值后, 开始趋于平稳或略有减少, 可控制压实度在 93%~96% 之间, 能兼顾施工质量与经济. 水泥—粉煤灰组合改良土和石灰—粉煤灰土在水泥或石灰掺量一定时, 其承载比随着粉煤灰掺量的增大呈先增大后减少; 水泥—石灰组合和石灰—粉煤灰组合改良土在水泥或粉煤灰掺量一定时, 其承载比也随石灰掺量的增大呈先增大后减少. 三种改良土粉煤灰、石灰掺量都存在最佳配合掺量, 基于试验结果, 笔者就三种改良路基土给出了建议的配比.

关键词:水泥; 粉煤灰; 石灰; 压实度; 改良路基填土; CBR 试验

中图分类号: TU4 **文献标识码:** A

The Study of CBR Test of Improved Soils of Embankment in Flood Storage and Detention Areas

HE Zhong-yi^{1,2}, WANG Hai-bo³, XU Wen-ping⁴

(1. Guangdong Tianxin Electric Power Engineering Testing Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong 510600, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
3. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;
4. Chongqing Research Institute, China Coal Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: The sub-clay of embankment in flood storage and detention areas should be improved when being used as the subbase course or the sub-subbase course. In this paper, three soil improvement methods, such as adding lime-fly, cement-fly ash or cement-lime, are proposed at one time. Based on CBR index, experiments on improving these soils are

收稿日期: 2011-04-13

作者简介: 何忠意(1986-), 男, 湖南衡阳人, 河海大学岩土工程科学研究所硕士研究生. 主要研究方向: 岩土与道路工程试验及数值研究.

carried out,aiming at analyzing and discussing the compaction and the mix ratios of hardening agent on the CBR index. Test showed that,along with the compactedness,CBR index of three improved soils gained and then fell slightly or levelled off,and the optimum compactedness was in 93% ~ 96%. When cement or lime content maintained constant,the CBR index of the line-fly ash-soils and the cement-fly-soils respectively gained firstly and decreased subsequently with fly ash content,and as cement or lime content kept constant,the CBR index of the line-fly ash-soils and the cement-lime-soils respectively gained then decreased subsequently with lime content. There are the optimum addition of fly ash or lime to three improved soils and based on that the author recommends the mix ratios.

key words:cement;fly ash;lime;compactedness;improved soils;CBR test

0 引言

承载比(CBR) 试验由美国加州公路局首先提出,CBR 值是用材料抵抗局部荷载压入变形的能力来表示的,指试料贯入量达到 2.5 mm 时,单位压力对标准未筛分碎石压入相同贯入量时标准荷载强度的比值,用于评定路基土和路面材料的强度^[1-2]. CBR 试验能考虑到材料在使用过程中处于最不利状态以及水稳性能^[3]. CBR 试验通常按饱水 4 昼夜作为设计状态,但可结合工程所在地区、地形、排水等因素,适当改变试件饱水方法和饱水时间,使得 CBR 试验更能符合实际状况^[4]. 目前,承载比试验在世界各地得到广泛应用,已成为公路和机场跑道的路面设计及路基填土的质量控制指标^[5].

苏北某高速公路邳州段经过地段为冲积平原,地处多雨地区,沿线经过黄墩湖滯洪区,所处境的地表有大量亚粘土,该类土直接作滯洪区路基填料粘聚力差,易于松散,压实较困难,路基强度无法得到保证,尤其水稳性差,饱和后土颗粒之间失去粘结力,抗剪强度骤降,易使土体软化、瓦解,造成路面滑坡、路面坍塌等灾害. 路基填料工程性质的好坏直接关系到填土路基的质量,对路基填土的固化改良具有一定的优越性,鉴于此,针对该类土质开展滯洪地区路基填土改良方案的试验研究是十分必要的.

本文对苏北某高速公路邳州段黄墩湖滯洪区的土样,采用石灰—粉煤灰组合、水泥—粉煤灰组合、水泥—石灰组合 3 种方法进行室内改良,选以承载比 CBR 值为质量技术指标,重点研究了将压实法和掺灰改良法综合起来对改良填土 CBR 值的影响,旨在为高等级公路的实际工程设计和工程施工中提供参考依据.

1 试验材料与方法

1.1 原材料

本试验用土选自苏北某高速公路邳州段黄墩湖滯洪区典型亚粘性土、亚砂性土,试样前采用土样经过风干碾碎过 5 mm 圆孔筛,其物理力学指标详见表 1.

表 1 公路沿线土层的物理力学指标

Table 1 The basic physical indexes of soil samples

液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P	土粒组成/%			
			>0.25	0.25 ~ 0.075	0.075 ~ 0.005	<0.005
33.0	21.1	11.9	13.9	14.3	71.8	0

水泥(C) 为钟山牌复合普通硅酸盐水泥,标号为 C32.5,比重为 3.0,基本性能指标见表 2. 粉煤灰取自某电厂,粉煤灰(FA) 取自南京聚力粉煤灰建材厂,Ⅱ级,相对密度为 2.20 g/cm³,轻型击实试验测得其最大干密度为 1.33 g/cm³,级配良好,其中 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO 含量分别为 53.46%、27.25%、5.3%、2.34%、1.56%,烧失量为 5.37%. 石灰(L) 选用南京产钙质生石灰,试验前测得所制成消石灰的有效 CaO、MgO 的含量为 64.1%,属于Ⅱ级消石灰.

表 2 水泥基本性能指标

Table 2 The property indexes of cement

细度 /%	初凝 时间 /h	终凝 时间 /h	安定 性	标准 稠度 /%	水泥 抗折 /MPa	水泥 抗压 /MPa
2.60	3.0	5.67	合格	28.9	3.9	34.5

1.2 试验配比及试验方法

本次试验分别采用石灰—粉煤灰(L-FA)组合、水泥—粉煤灰(C-FA)组合、水泥—石灰(C-L)组合以不同掺量与滞洪区土样加以混合形成不同类型的改良土,各组分掺量百分比基于干土质量,水的添加量以重型击实试验所得的最优含水量(OMC)为控制标准,各配比详见表 3。

试验参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009),将试筒放在坚硬的地面上,按压实度要求(控制压实度 D 为 90%, 93%, 96% 和 100%)计算称重,采用静压法一次性成型,将试件浸水 96 h(4 d),然后进行加载试验。试验采用贯入量为 2.5 mm 时的单位压力与标准压力之比作为材料的承载比。

表 3 改良填土各组分分配比及最优含水率						
Table 3 The mix ratios and OMC of improved soil samples						
改良方案	编号	水泥	粉煤灰	石灰	原料土	$\omega_{opt}/\%$
(L-FA) 组合改良	A1	—	10	5	100	15.8
	A2	—	15	5	100	16.0
	A3	—	20	5	100	16.3
	A4	—	10	7	100	15.9
	A5	—	15	7	100	16.1
	A6	—	20	7	100	16.7
	A7	—	10	9	100	16.1
	A8	—	15	9	100	16.2
	A9	—	20	9	100	17.0
(C-FA) 组合改良	B1	3	9	—	100	15.5
	B2	3	12	—	100	15.3
	B3	3	15	—	100	15.1
	B4	5	9	—	100	15.6
	B5	5	12	—	100	15.0
	B6	5	15	—	100	14.9
	B7	7	9	—	100	15.8
	B8	7	12	—	100	15.0
	B9	7	15	—	100	14.9
(C-L) 组合改良	C1	1.5	—	4	100	16.8
	C2	1.5	—	6	100	17.0
	C3	1.5	—	8	100	17.4
	C4	2	—	4	100	16.9
	C5	2	—	6	100	17.1
	C6	2	—	8	100	17.5
	C7	2.5	—	4	100	17.0
	C8	2.5	—	6	100	17.3
	C9	2.5	—	8	100	17.7

2 试验结果与分析

2.1 改良路基填土 CBR 与压实度 D 的关系

图 1(a)、(b)和(c)分别描述的是石灰—粉煤灰改良填料土、水泥—粉煤灰改良填料土和水泥—石灰改良路基土 CBR 值与压实度之间的关系。由图 1 可知,压实度对于 3 种改良土 CBR 值有着很明显的影 响。石灰—粉煤灰改良填料土、水泥—粉煤灰改良填料土和水泥—石灰改良路基土的 CBR 值随着压实度 D 在 90% ~ 96% 范围内增加,分别先呈现不同比例(分别为 41.1% ~ 82.5%, 37.2% ~ 98.4%, 56.9% ~ 77.2%)的增长,当压实度 $D > 96\%$ 后,前两种改良路基土 CBR 值增长趋于平稳的趋势,受压实度影响的敏感性减弱,而水泥—石灰改良路基土转为减少的趋势。

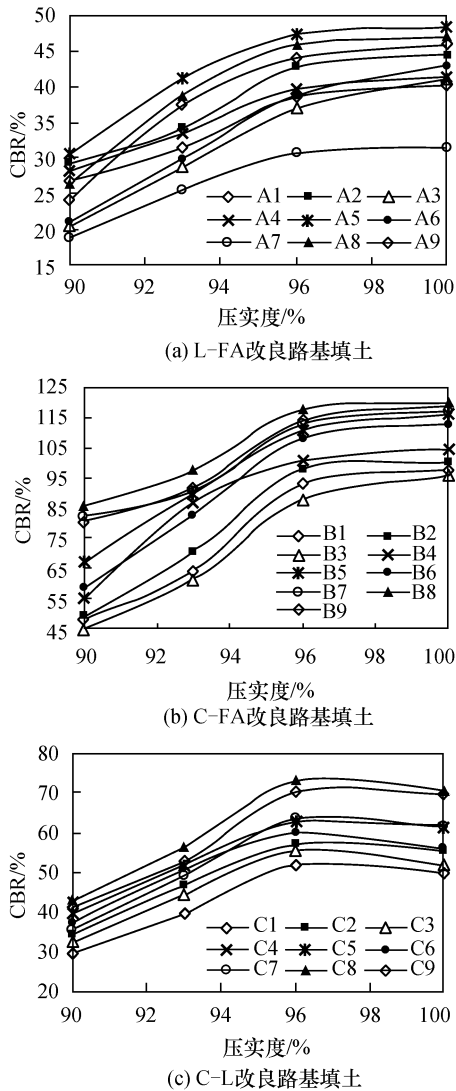


图 1 CBR 指标与压实度之间的关系
Fig. 1 CBR index versus compaction

总体来说,表 3 中所列各配比的 CBR 值均大于 15%,远高于高等级公路路基填料最小强度 (CBR) 的要求,可以用于公路的填筑,说明对该地区路基土固化改良从技术上是可行的.但过高压实度 (压实度 >97%) 对土体改良并不能取得较好的效果,三种改良土控制压实度均在 93% ~ 96% 的范围内,即可兼顾施工要求与经济两方面.

2.2 石灰—粉煤灰改良填土 CBR 与组分掺量的关系

图 2 列出的是不同压实度条件下,粉煤灰为掺量为 15% 时,试样 CBR 值随着石灰掺量与改良填料土的变化曲线.结合图 1 (a) 和图 2 可知,调节各因素可以控制改良填土的 CBR 值在 19% ~ 48.3% 的范围内变化.相比水泥—粉煤灰改良土和水泥—石灰改良土,石灰—粉煤灰改良土的 CBR 值相对较小,这主要是由于添加水泥的试样,早期强度较大,CBR 值也随之较大.

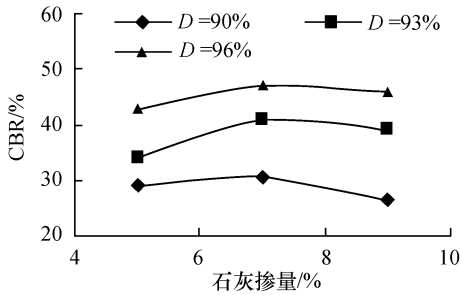


图 2 石灰掺量与 CBR 的关系 (L-FA 改良土)

Fig.2 CBR index versus lime content (L-FA-Soils)

由图 2 可知,控制粉煤灰和其他条件不变情况下,石灰—粉煤灰改良填土的 CBR 值随着石灰掺量的增大,基本呈现先增大后减小的趋势,即 CBR 值存在峰值情况,在 6% ~ 8% 的范围内存在最佳石灰掺量.低于最佳值时,CBR 值增大;高于最佳值时,CBR 值逐渐减小.这主要是与石灰—粉煤灰改良填土的固化机理有关,当土体与粉煤灰、石灰相接触时,离子交换反应、结晶硬化反应、火山灰反应和碳酸化反应,使土的性质发生根本的变化;固化土的强度与稳定性得到提高^[2].若石灰和粉煤灰以适当的比例掺量添加时,相当于增加一定量的水泥,可以起到稳定作用,使土的塑性降低,生成的胶结物少,密实度、强度得到稳定,随着石灰掺量的增加到超过最佳值后,石灰和粉煤灰的比例失衡,过多的石灰将沉积在土中孔隙而不参加反应,会导致孔隙比增加^[6],CBR 值转

而逐渐衰减.

图 3 列出的是不同压实度条件下,石灰掺量为 7% 的试样,随着粉煤灰掺量与改良填料土 CBR 值的变化曲线.由图 3 可见,在其他条件相同情况下,随着粉煤灰掺量的增加,改良填料土的抗压强度先增大,后减小,在粉煤灰掺量为 15% 时,出现明显的转折点.这主要是因为石灰保持不变时,适当地添加粉煤灰,相当于添加了水泥剂量,粉煤灰的主要成分为氧化硅 (SiO_2)、氧化铝 (Al_2O_3) 以及氧化铁 (Fe_2O_3),它们与石灰的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 经过化学反应产生一系列不溶于水的化合物,充满在土体颗粒周围,使土颗粒间的胶结力增大,从而提高了改良土的强度^[7];但随着粉煤灰,石灰含量不变,继而参与反应的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 相对减少,部分粉煤灰没有参与反应而残留在粘土空隙中^[8],使得土样内部缺陷,水稳定性能较差,强度变弱,CBR 值会随其掺量的增大而减少.

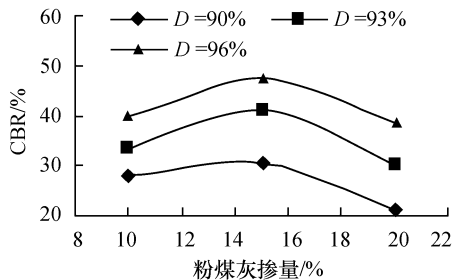


图 3 粉煤灰掺量与 CBR 的关系 (L-FA 改良土)

Fig.3 CBR index versus fly ash content (L-FA-Soils)

2.3 水泥—粉煤灰改良填土 CBR 与组分掺量的关系

图 4 列出的是不同压实度下粉煤灰掺量为 12%,水泥掺量与水泥—粉煤灰改良填料土 CBR 的关系曲线.随着水泥掺量增加,水泥改良填料土 CBR 值增大.由图可知,以 $D=93\%$ 为例,随着水泥掺量为 3% ~ 7% 时,可以使的水泥改良填料土 CBR 值 70.2% ~ 97.2% 范围内变化;另外,对于同种配比也可通过适当地调节压实度 D 来调节 CBR 的变化.

图 5 列出的是不同压实度下水泥掺量为 5%,不同粉煤灰掺量与改良填料土抗压强度的关系曲线.其他条件相同情况下,随着粉煤灰掺入量的增加,改良填料土的抗压强度先增大,在掺入量 12% 时发生转折,随后开始减小.这主要是因为水

泥—粉煤灰改良填料土,其固化机理在于胶凝材料水化产物对于土颗粒的胶结作用与土颗粒之间的离子交换及火山灰反应^[9].保持水泥一定量时,低掺量的粉煤灰能够有效的参与并促进粘土之间的火山灰反应,提高土颗粒间的粘结作用力,促使承载比增大;但是当粉煤灰达到一定量时,稳定土中的水泥不足以使粉煤灰活性被充分激发,这样未被激发的粉煤灰分散在土体中,尤其是没有参与反应的粉煤灰颗粒,使得土样内部缺陷增多,难以有足够的生成物填充周围的空隙^[8],导致改良填土承载比会随其掺量的增加呈明显的下降趋势.可见,粉煤灰掺量对水泥—粉煤灰改良土的影响,与石灰—粉煤灰改良土相一致.

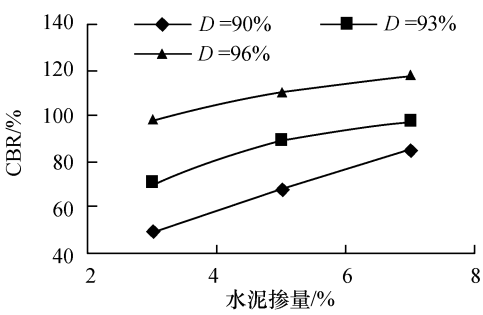


图 4 水泥掺量与 CBR 值的关系
(水泥—粉煤灰改良土)

Fig.4 CBR index versus cement content (C-FA-Soils)

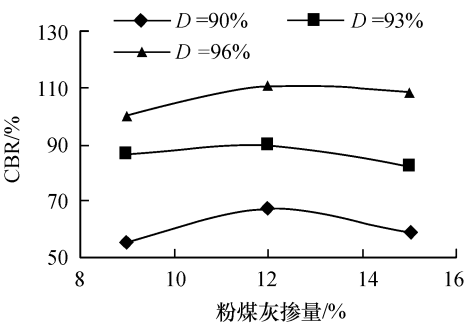


图 5 CBR 指标与粉煤灰掺量的关系
(水泥—粉煤灰改良土)

Fig.5 CBR index versus fly ash content (C-FA-Soils)

结合图 1(b)和图 5 可知,对不同的水泥掺量,适当地增加粉煤灰掺量,如掺量为 15%,对改良填料土强度的提高具有一定的促进作用.

2.4 水泥—石灰灰改良填土 CBR 与组分掺量的关系

图 6 揭示了不同压实度条件下,水泥掺量为

2 时,试样 CBR 值随着石灰掺量与改良填料土的变化情况.根据图 6 可知,当水泥掺量和其他条件不变情况下,水泥—石灰改良填土的 CBR 值随着石灰掺量的增大,呈现先增大后减小的趋势,即 CBR 值存在峰值情况,存在最佳石灰掺量为 6%;当掺量低于 6%时, CBR 值增大;高于 6%时, CBR 值逐渐减小.产生该现象主要与水泥—石灰改良填土的加固机理有关,当土体与水泥、石灰相接触时,水泥、石灰颗粒表面的化合物迅速地参与并土中的水发生一系列的水解和水化反应、凝硬反应以及碳酸化作用,生成坚硬的钙化物,使得改良土具有一定强度和稳定性^[10],这一点与前面所及石灰—粉煤灰改良土有所相似.若石灰以低掺量添加时,相当于增加一定量的水泥,可以起到稳定作用,使土的塑性降低,生成的胶结物少,密实度和承载比得到稳定,但当石灰的掺量增加到超过最佳值后,过多的石灰将沉积在土中孔隙而不参加反应^[6],会导致孔隙比增加,对改良土的强度起到负面作用.

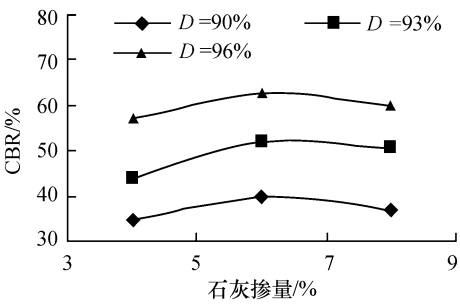


图 6 CBR 指标与石灰掺量的关系
(水泥—石灰改良土)

Fig.6 CBR index versus lime content (C-L-Soils)

图 7 描述了不同压实度下石灰掺量为 6%,水泥掺入量与改良填土 CBR 的关系.与水泥—粉煤灰改良土相似,增加水泥的掺量可以增加改良土的承载比 CBR 值;结合图 1(c)和图 7 可知,适当地变化其他因素可以使得改良填土的承载比 CBR 的大小在 29.7% ~ 72.9% 的范围内变化.

3 结 论

本文以 CBR 值为控制指标,通过以不同配比的石灰—粉煤灰、水泥—粉煤灰、水泥—石灰对滞洪区填土改良后,不同压实度下的性能研究,通过分析和讨论得出以下结论:

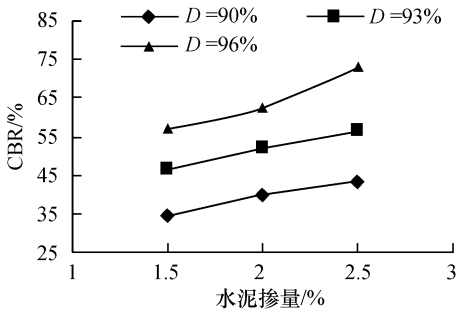


图 7 CBR 指标与水泥掺量的关系
(水泥—石灰改良土)

Fig.7 CBR index versus cement content (C-L-Soils)

1)对于石灰—粉煤灰改良土,当石灰掺量一定时,其承载比随着粉煤灰掺量的增大呈先增大后减少趋势;当粉煤灰掺量保持不变时,石灰—粉煤灰改良土的 CBR 值随石灰掺量的变化也呈类似现象。

2)对于水泥—粉煤灰和水泥—石灰改良填料土,水泥掺量对其承载比的影响比较相似, CBR 值与其掺量呈正相关关系。在水泥掺量一定时,两种改填料土 CBR 值分别随着粉煤灰、石灰掺量的增大呈先增大后减少趋势,即粉煤灰、石灰掺量存在最佳配合掺量,严格适当地控制粉煤灰或石灰掺量对改良填料土的质量提高具有一定的促进作用。

3)压实度对 3 种改良填土的 CBR 值有不同程度的影响,随着压实度增加, CBR 值分别先呈现不同比例的增长,但增加到一定值后,开始趋于平稳或有所减少;三种改良土最佳压实度均在 93% ~ 96% 之间。

4)若采用以 93% 或 96% 的压实度为标准,综合考虑实际施工拌和过程中的损失和不均匀性,

环境的复杂性,本文建议石灰—粉煤灰改良填土应可控制石灰掺量在 6% ~ 8% 之间,与之相应粉煤灰掺量在 14% ~ 16% 之间;水泥—粉煤灰改良填料土应控制水泥掺量在 4% ~ 6% 之间,粉煤灰掺量在 11% ~ 14% 之间;水泥—石灰改良填料土应控制水泥掺量在 2% ~ 2.5%,石灰掺量在 5% ~ 6% 之间。

参考文献:

[1] 朱志铎,郝建新,黄立平. CBR 试验影响因素及在工程中应注意的几个问题[J]. 岩土力学,2006,27(9): 1593-1595.

[2] 何强. 黄土填料掺生石灰改良后 CBR 承载能力分析[J]. 四川建筑,30(1): 76-80.

[3] 李萍,徐佳祥,温学涛,等. 石灰改良黄土路基的 CBR 试验研究[J]. 甘肃科学学报,2008,20(4): 74-77.

[4] 李萍,孔江伟,张玉秀,等. 生石灰提高黄土路基 CBR 值的试验与应用[J]. 兰州理工大学学报,2010,36(2): 05-109.

[5] 屈冉,张大伟,贺睿. 路基填料强度(CBR 值)研究综述[J]. 内蒙古农业大学学报,2008,29(4): 276-279.

[6] 张玉秀,郭鑫,孔江伟. 黄土路基掺入生石灰的 CBR 试验分析[J]. 科学技术与工程,2009,9(20): 6243-6246.

[7] 王益萍,宋汉周. 不同配合比二灰土最佳力学指标的试验研究[J]. 勘察科学技术,2008(3): 16-18.

[8] 潘宏彬. 粉煤灰掺量对混凝土强度的影响[J]. 试验技术与试验机,2006,46(1): 42-46.

[9] 夏琼,杨有海,耿焄. 粉煤灰与石灰、水泥改良黄土填料的试验研究[J]. 兰州交通大学学报,2008,27(3): 40-47.

[10] 凌建明,谢华昌,庄少勤,等. 水泥—石灰土水稳性的实验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2001, 29(6): 733-737.