

# 改性贵州玄武岩残积土的抗压强度试验研究

张瑞敏<sup>1,2</sup>, 柴寿喜<sup>1</sup>, 魏厚振<sup>2</sup>, 徐良<sup>1,2</sup>

(1. 天津城市建设学院 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**[摘要]** 为了使贵州玄武岩残积土合理用于路基, 通过采用石灰、粉煤灰、水泥三种改性材料按不同含量对其进行单掺、双掺、正交试验研究, 同时考虑未浸水与浸水两种状态, 测其抗压强度, 得出最佳配比。实验结果表明: ①单掺试验, 改性残积土的抗压强度随着改性材料含量的增加而逐渐增大。石灰处理的改性土浸水时在 8% 达到最大值, 粉煤灰处理的在未浸水时在 15% 达到最大值, 同时浸水的试样全部崩解。②双掺试验, 抗压强度均是随着含量的增加而增大, 且石灰: 粉煤灰 = 1: 1 的抗压强度比石灰: 粉煤灰 = 1: 2 的高。③正交掺试验, 得出试样的最佳配比为石灰 8%、粉煤灰 8%、水泥 2%, 同时得出石灰对玄武岩残积土的抗压强度影响最大。石灰、粉煤灰、水泥三种材料处理玄武岩残积土, 其抗压强度均有不同程度的增加, 故考虑三种材料混合处理玄武岩残积土对以后路基填料提供参考。

**[关键词]** 玄武岩残积土; 抗压强度; 最佳配比; 石灰; 粉煤灰; 水泥

**[中图分类号]** U 416.1<sup>+</sup>6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1674-0610(2012)04-0020-04

## Experimental Research on Compressive Strength of Modified Residual Soil of Basalt in Guizhou

ZHANG Ruimin<sup>1,2</sup>, CHAI Shouxi<sup>1</sup>, WEI Houzhen<sup>2</sup>, XU Liang<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China; 2. State Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**[Abstract]** In order to make residual soil of basalt in guizhou underlying for subgrade reasonably, according to the different content of lime, fly ash and cement on the mixed with a single, double, orthogonal. Measuring the compressive strength on considering not water and water to get a best proportion. Test results show that: (1) The compressive strength of modified residual soil of basalt increase gradually with the increase of the content of modified materials with a single experiment. The modification treatment of lime soil reach a maximum 8% when is watered. Fly ash reach a maximum 15% when is not watered, at the same time, the watering sample are all crumbling. (2) The compressive strength increase all with the increase of the content with the double experiment, and the compressive strength of lime: fly ash = 1: 1 is higher than lime: fly ash = 1: 2. (3) The best proportion is for 8% lime, 8% fly ash, 2% cement with the orthogonal experiment, and the lime is the biggest influence factors to the compressive strength of residual soil. Because the compression strength all has different increases with lime, fly ash, cement three kinds of materials processing basalt residual soil, so it is reference for subgrade with three kinds of materials mixed processing basalt residual soil.

**[Key words]** residual soil of basalt; the compressive strength; the best proportion; lime; fly ash; cement

**[收稿日期]** 2012-01-03

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(11072255); 交通部西部交通建设科技项目(2009318802074)

**[作者简介]** 张瑞敏(1986-), 女, 河南封丘人, 硕士研究生, 主要从事非饱和方面的研究。

## 1 概述

玄武岩残积土广泛分布在中国的南方地区,由于受到冬干夏湿、多雨亚热带高原气候的影响,其风化物具有高液限、高含水率、高孔隙比、高压塑性等物理特性<sup>[1-2]</sup>。根据《公路路基设计规范》(JTJ 013-95),玄武岩残积土不能直接用于路基中,化学改良是工程中常用的方法,主要通过向土中掺入一定量的石灰、粉煤灰、水泥等,添加剂与土之间发生物理化学反应,起到提高强度的作用。

近年来,石灰土以其独特的优势广泛应用于高等级公路的路面底基层和二级及其以下公路的基层<sup>[3]</sup>;郭爱国等<sup>[4]</sup>人通过室内和现场试样,对中膨胀土的物理力学特性及其经过石灰改性处理后的效果进行研究,得出经石灰改性之后的中膨胀土有很大提高,水稳性也较好;李长雨等<sup>[5]</sup>采用试验分析方法,得出灰土比相对于含水量对粉煤灰固化土的抗压强度更显著;潘林有<sup>[6]</sup>通过室内试验研究了温州地区的粘土水泥土与软土水泥土的强度特性;李晓全<sup>[7]</sup>等对湘中南地区的红粘土通过不同水泥掺入比以及不同龄期的抗压强度试验,分析水泥红粘土的强度增长机理;吴廷荣等<sup>[8]</sup>通过无侧限抗压强度试验,结果表明,掺加石灰粉煤灰填料后期抗压强度随填料含量的增加而增加;刘峥嵘<sup>[9]</sup>对高液限粘土进行了石灰、粉煤灰、水泥、石灰加粉煤灰以及沙砾的改良试验研究。

从强度、经济考虑,室内以石灰、粉煤灰两种改性材料对玄武岩残积土按不同含量进行单掺和双掺,以石灰、粉煤灰、水泥实行正交掺改性处理方法,结合试验和分析,得出最佳配比,为以后玄武岩残积土路基的填料提供了参考。

## 2 试验材料、试样制备和试验方案

### 2.1 试验材料与试验设备

#### 2.1.1 试验材料

① 玄武岩残积土。取自贵州省赫章县白果镇毕威高速公路一处,以棕红色残积土和黄褐色残积土风干混合土样为例,其基本物性指标如表1所示。

表1 玄武岩残积土的基本物性指标

Table 1 The basic property index of residual soil of basalt

含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	比重
4.5	52.9	37.3	15.5	2.73

② 石灰。采用消石灰粉。粉煤灰:取自青山热电厂火电厂锅炉燃烧后的排放物,属于二级粉煤灰。

水泥:采用普通硅酸盐水泥。

#### 2.1.2 试验设备

试验采用中国科学院武汉岩土力学所南京土壤仪器厂生产的CBR-1型承载比试验仪测其抗压强度,选择规格为106.20393521N/0.01 mm的测力环,每转一圈上升高度为0.093 mm。如图1所示。

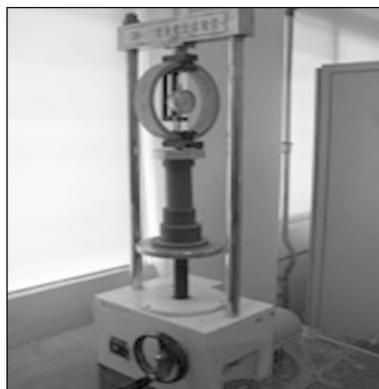


图1 CBR-1 承载比试验仪

Figure 1 The test instruments of CBR-1

### 2.2 试样制备

试样采用风干混合土样,依据交通部行业标准《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ 057-94)<sup>[10]</sup>和《固化类路面基层和底基层技术规程》(CJJ/T80-98)<sup>[11]</sup>。采用静力压实法制备 $\Phi 50$  mm  $\times 100$  mm的圆柱状试样,压实度为95%,试件脱模之后称重,然后用保鲜膜密封,随后放在养护箱中进行养护,根据规范以养护7 d为标准<sup>[12]</sup>。

### 2.3 试验方案

① 试验以石灰、粉煤灰为改性处理玄武岩残积土,以不同改性材料含量、未浸水和浸水为影响因素进行单掺和双掺。

② 以一种石灰、粉煤灰、水泥混合掺为例,得出水泥对处理玄武岩残积土的影响,然后对其进行正交掺分析抗压强度的变化,得出最佳配比。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 单掺试验

#### 3.1.1 单掺石灰对强度的影响

按照石灰土的抗压强度 $\geq 0.8$  MPa和压实度 $\geq 95\%$ 的要求,根据设计强度的标准,选定合适的石灰含量,试验以石灰的不同掺量(0%、4%、6%、8%、10%、12%,是指填料占干土质量的百分比)成型石灰土试件测其抗压强度。试样在浸水(0%和4%的石灰改性土在浸水下崩解)和未浸水时的抗压强度

随石灰含量的变化如图 2 所示。

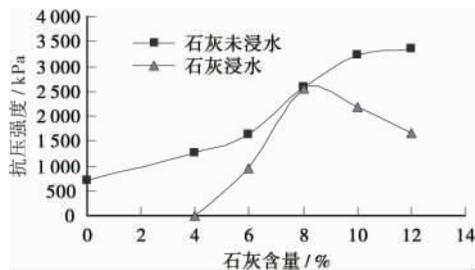


图 2 改性土的抗压强度随石灰含量的变化

Figure 2 Unconfined compressive strength of modified soil vs. the content of lime

由图 2 可知: 单掺石灰的改性土未浸水时的抗压强度比浸水时的高,但在 8% 时几乎相等。在未浸水情况下,刚开始抗压强度随着石灰的含量增加而缓慢增加,到 10% 之后增加的比较平缓,石灰含量为 12% 的抗压强度相对于 10% 的仅仅提高了 3.7%。而试样浸水情况下,抗压强度随石灰含量刚开始几乎直线增加后缓慢降低,含量为 8% 时有明显的峰值出现。

单掺石灰的抗压强度明显比石灰含量为 0% (即素土) 的要高很多,这是因为残积土颗粒表面的少量活性氧化硅和氧化铝与消石灰 (氢氧化钙) 发生了反应,生成水硬性的水化硅酸钙和水化铝酸钙,这样使玄武岩残积土的抗压强度和耐水性得到了改善。

### 3.1.2 单掺粉煤灰对强度的影响

粉煤灰作为一种典型的轻质廉价材料,现已经被广泛的用作路基填料,试验以粉煤灰不同掺量 (0%、6%、9%、12%、15%、18%) 成型。则其抗压强度在未浸水 (粉煤灰改性土在浸水下全部崩解) 下随粉煤灰含量的变化如图 3 所示。

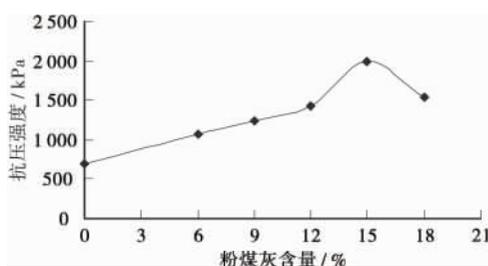


图 3 改性土的抗压强度随粉煤灰含量的变化

Figure 3 Unconfined compressive strength of modified soil vs. the content of fly ash

如图 3 显示粉煤灰改性土在未浸水时抗压强度随粉煤灰含量刚开始平缓增加,从 12% 突然猛增,到 15% 达到峰值。

粉煤灰虽然本身具有活性,但由于粉煤灰在没

有其他填料存在的情况下,其活性不被激活,粉煤灰与高液限土之间发生的水解、水化、离子交换和团粒化作用不强烈,因此粉煤灰改良的效果不明显<sup>[13]</sup>,故考虑双掺试验。

### 3.2 双掺试验

由于单掺试验对提高玄武岩残积土的强度作用有限,因此考虑从 2 种不同组合掺量出发,分析 2 种混合改性材料对残积土的影响。

试验以二灰比 (石灰:粉煤灰 = 1:1 或 1:2) 两种情况考虑对强度的影响,分别以不同掺量 (6%、9%、12%、15%、18%) 制成试样,养护 7 d。则二灰改性土的抗压强度随二灰不同掺量的变化如图 4 所示。

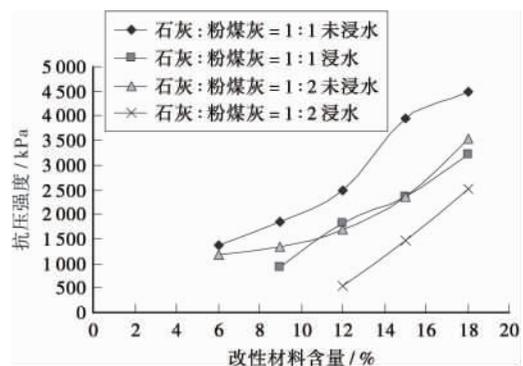


图 4 改性土的抗压强度随不同二灰比含量的变化

Figure 4 Unconfined compressive strength of modified soil vs. the content of the ratio of two ash

如图 4 可知: 当石灰:粉煤灰 = 1:1 时,抗压强度均是随着改性材料的含量增加而增大,但是在 6% 时,试样浸水崩解,未浸水的抗压强度明显高于浸水的抗压强度。当石灰:粉煤灰 = 1:2 时,抗压强度随着含量增加均呈“凹”型增大,试样在 6% 和 9% 浸水崩解,同样也是未浸水的抗压强度高于浸水的抗压强度。同时由图可知,石灰:粉煤灰 = 1:1 在未浸水或浸水时的抗压强度分别高于石灰:粉煤灰 = 1:2 的。

由于粉煤灰是一种人工火山灰质混合材料,它本身略有或没有水硬胶凝性能,但是当其以粉状及有水存在时,能在常温下,特别是水热处理条件下与氢氧化钙发生化学反应,生成具有水硬胶凝性能的化合物,成为一种增加强度和耐久性的材料。同时也因为石灰能激发粉煤灰的活性,从而发生强度较大的水解、水化、离子交换和团粒化作用<sup>[13]</sup>,所以石灰粉煤灰改性土的抗压强度随其不同配比的含量的增加而增大。另外石灰:粉煤灰 = 1:1 的抗压强度高于石灰:粉煤灰 = 1:2 说明石灰对处理玄武岩残

积土的影响大。两种双掺灰土比相对于粉煤灰单掺有明显的增加。但是相对于单掺石灰也有所提高, 这样双掺既节省了石灰的用量, 又合理利用工业废料。

### 3.3 正交掺试验

由以上试验双掺与单掺石灰相比, 添加粉煤灰对改性土的抗压强度提高不大。故考虑添加少量的水泥, 以检验水泥对玄武岩残积土抗压强度的增强效果。由双掺可知石灰: 粉煤灰 = 1 : 1 的改性土的抗压强度比石灰: 粉煤灰 = 1 : 2 的高, 故采用二灰比为 1 : 1 的前提下添加少量水泥。以石灰 6%、粉煤灰 6%、水泥 3% 为例处理残积土。得出抗压强度未浸水时的为 3 402. 76 kPa, 浸水时为 1 992. 93 kPa。比同等含量下双掺石灰粉煤灰时的要高, 说明添加水泥对双掺二灰有明显的增强效果。

所以以石灰、粉煤灰、水泥 3 种材料为影响因素处理玄武岩残积土, 但为了对改性材料各种配比进行优选, 不仅要考虑单一或者两种因素的影响, 更需要考虑各因素之间的相互作用, 因此在此情况下, 需要对改性材料各个组合进行全面的分析, 但是全部考虑试验量大, 耗时耗力, 而正交试验可以在最少的试验次数的情况下, 充分利用试验数据, 推导出各个因素之间的关系。

试验从三个因素考虑, 分别是石灰、粉煤灰、水泥。每种因素分三个水平, 因此选用  $L_9(3^3)$  正交表, 其表见表 2。根据正交试验设计原则, 设计出正交试验方案, 如表 3 所示。

表 2  $L_9(3^3)$  正交因素水平表

Table 2 The level table of  $L_9(3^3)$  orthogonal factors

水平	因素		
	A 石灰/%	B 粉煤灰/%	C 水泥/%
一水平	0	0	0
二水平	4	4	2
三水平	8	8	4

注: 各因素的掺量是相对于干体干重量的百分比。

表 3  $L_9(3^3)$  正交试验方案

Table 3 The pan of  $L_9(3^3)$  orthogonal test

试验组号	A 石灰/%	B 粉煤灰/%	C 水泥/%
S1	1(0)	1(0)	1(0)
S2	1(0)	2(4)	2(2)
S3	1(0)	3(8)	3(4)
S4	2(4)	1(0)	2(2)
S5	2(4)	2(4)	3(4)
S6	2(4)	3(8)	1(0)
S7	3(8)	1(0)	3(4)
S8	3(8)	2(4)	1(0)
S9	3(8)	3(8)	2(2)

根据规范标准养护 7 d 之后, 考虑到有些试样

在浸水后崩解, 故在未浸水条件下, 进行无侧限抗压强度试验, 总结见表 4, 得到抗压强度的未浸水最大值为 4 063. 17 kPa, 其试验条件为  $A_3B_3C_2$ , 即最大抗压强度的配比是: 石灰 8%、粉煤灰 8%、水泥 2%。

表 4 9 种正交试验结果

Table 4 9 kinds orthogonal test results

组号	A 石灰/%	B 粉煤灰/%	C 水泥/%	7 d 强度/kPa
S1	1(0)	1(0)	1(0)	704. 86
S2	1(0)	2(4)	2(2)	989. 37
S3	1(0)	3(8)	3(4)	1 415. 85
S4	2(4)	1(0)	2(2)	1 129. 32
S5	2(4)	2(4)	3(4)	2 320. 36
S6	2(4)	3(8)	1(0)	1 703. 26
S7	3(8)	1(0)	3(4)	3 331. 72
S8	3(8)	2(4)	1(0)	2 805. 62
S9	3(8)	3(8)	2(2)	4 063. 17
$K_1$	3 110. 08	5 165. 9	5 213. 74	
$K_2$	5 152. 94	6 115. 35	6 181. 86	
$K_3$	10 200. 51	7 182. 28	7 067. 93	
$\bar{K}_1$	1 036. 69	1 721. 97	1 737. 92	
$\bar{K}_2$	1 717. 65	2 038. 45	2 060. 62	
$\bar{K}_3$	3 400. 17	2 394. 1	2 355. 98	
R	2 363. 48	672. 13	618. 06	

依据表 4, 采用极差分析, 以因素 A 为例, 因素 A 有三个水平, 用  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  表示, 每一水平平均有三次试验, 把 A 因素的  $K_1$  的三次归为一组, 同理  $K_2$  和  $K_3$  分别归为一组, 这样九组试验归为三组。将每个水平对应的三个试验数据相加, 得到该因素对应水平的 K 值。

例如因素 A:

$$K_1 = 704. 86 + 989. 37 + 1 415. 85 = 3 110. 08;$$

$$K_2 = 1 129. 32 + 2 320. 36 + 1 703. 26 = 5 152. 94;$$

$$K_3 = 3 331. 72 + 2 805. 62 + 4 063. 17 = 10 200. 51。$$

同理计算每一个因素对应的 3 个组分的平均值  $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$ 、 $\bar{K}_3$ , 如下所示:

$$\bar{K}_1 = (704. 86 + 989. 37 + 1 415. 85) / 3 = 1 036. 69;$$

$$\bar{K}_2 = (1 129. 32 + 2 320. 36 + 1 703. 26) / 3 = 1 717. 65;$$

$$\bar{K}_3 = (3 331. 72 + 2 805. 62 + 4 063. 17) / 3 = 2 363. 48。$$

另外两种因素对应的  $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$ 、 $\bar{K}_3$  采用类似方法计算得到。

各列极差 R 是各列对应的  $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$ 、 $\bar{K}_3$  中, 最大值减去最小值得到的。

(下转第 99 页)

胶结料路面结构较基质沥青路面变形量减小32.3%效果较为明显,岩沥青掺量继续增加则改善效果不很明显。

#### 4 结论

通过MEPDG设计方法对不同胶结料中面层沥青路面永久变形量进行预估,结果表明岩改沥青可以显著提高路面的抗变形能力,7.5%岩改沥青使路面变形量减小32.3%,岩沥青掺量继续增加对路面的抗变形能力有一定提高,但效果不明显。

#### [参考文献]

- [1] 宋小金,樊亮,申全军,等.国产岩沥青混合料动态模量研究[J].中外公路,2010,30(2):239-241.
- [2] 韦金城,王林,杨永顺,等.永久性沥青路面试验路力学响应

- 分布的数值仿真[J].公路交通科技,2010,27(6):15-19.
- [3] 王刚,刘黎萍,孙立军.国产天然岩沥青及其混合料相关性试验研究[J].公路工程,2011,36(4):72-75.
- [4] JTJ 052-2000,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [5] 敖盛.天然沥青改性沥青混合料路用性能研究[J].公路工程,2010,35(3):159-166.
- [6] 陈兴伟.力学-经验路面设计指南(MEPDG)简介[J].道路工程,2011,121(3):1-7.
- [7] AASHTO. Guide for Design of on Pavement Structures [S]. AASHTO, 1993.
- [8] ARA Inc. User Manual for the M-E Pavement Design Guide (advance copy) [M]. NCHRP 1-40B Report, 2007.
- [9] 游双杰,黄超.利用修正的MEPDG损伤模型进行混合料服务寿命模拟和对比[J].公路,2011,4(4):152-155.
- [10] 邓学钧.路面设计原理与方法:第二版[M].北京:人民交通出版社,2007:374-388.

(上接第23页)

各列极差R的大小是反映该列所排因素选取的水平变动对指标影响的大小,因此,由表4可知:石灰对玄武岩残积土的影响最大,分别是粉煤灰和水泥的3.5倍多,而粉煤灰和水泥影响较小。

由正交试验得到最佳配比为石灰8%、粉煤灰8%、水泥2%。石灰在处理玄武岩当中起主要作用即石灰掺量是影响抗压强度的最主要的因素。所以在固化剂组分时,应该着重考虑影响大的因素。

#### 4 结论

通过改性处理玄武岩残积土,从单掺、双掺、正交掺方面出发,得出以下结论:

① 单掺情况下,石灰改性玄武岩残积土在未浸水时随石灰含量逐渐增加的,在12%时的增加量比10%高出3.7%,而浸水时在8%达到峰值。粉煤灰改性土未浸水时,15%达到峰值,浸水的情况下试样全部崩解。

② 双掺时,两种双掺未浸水或者浸水的抗压强度均是随着改性材料的含量逐渐增加,只有石灰:粉煤灰=1:1时由15%到18%有增加平缓的趋势,其他三种情况均是一直增大。

③ 以石灰6%、粉煤灰6%、水泥3%为例得出的抗压强度,明显要比同等含量的双掺的高很多,所以在里面掺加水泥对改性土的影响很大。从而进行了正交试验,得出石灰8%、粉煤灰8%、水泥2%的情况下,抗压强度最高,同时得出,石灰对处理玄武岩残积土的影响最大,粉煤灰和水泥对其影响程度

相差不大。

④ 改性处理玄武岩残积土,仅仅从改性材料含量的影响方面上来测其抗压强度,还有其他因素需要考虑,例如养护龄期、温度、压实度等,这些有待于研究。

#### [参考文献]

- [1] 王国华,区锦富,王汇明,等.广东省湛江市雷州青年运河灌区续建配套及节水改造工程初步设计报告(3工程地质)[R].广州:广东省水利电力勘测设计研究院,2009.
- [2] 王国华,陈海明.雷州半岛玄武岩残积土工程特性试验[J].华北水利水电学院学报,2011,32(6):67-71.
- [3] 张蓓.石灰稳定土最大干密度衰减机理的试验研究[J].路基工程,2007,(6):95-96.
- [4] 郭爱国,刘观仕,孔令伟,等.高速公路建设中中膨胀土特性的试验研究[J].岩土力学,2005,26(3):397-403.
- [5] 李长雨,刘寒冰,魏海斌.粉煤灰土工程特性试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(1):63-66.
- [6] 潘林有.温州软土水泥土强度特性规律的室内试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):863-865.
- [7] 李晓全,马石城,屈畅姿,等.水泥红粘土的强度试验研究[J].公路工程,2007,32(6):49-52.
- [8] 吴廷荣,贾锦绣,王都兴.石灰粉煤灰改良盐渍土填料的力学性能研究[J].路基工程,2010,(1):57-59.
- [9] 刘峥峰.高液限粘土路用填料的改良研究[J].路基工程,2010,(1):131-133.
- [10] JTJ 057-94,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [11] CJJ/T80-98,固化类路面基层和底层技术规程[S].
- [12] 交通部公路科学研究所.中华人民共和国交通行业标准,见:JTJ 057-94 公路工程无机结合料稳定材料试验规程,北京:人民交通出版社,1994.
- [13] 杜长学.铝土矿泥物理力学性质及固化技术研究[D].长沙:中南大学,2006.