

## Ca(OH)<sub>2</sub> 对低掺量水泥土的强度影响

赵振亚, 申向东, 贾尚华

(内蒙古农业大学, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 用低掺量水泥加固3种不同的土进行室内试验研究, 测试了不同Ca(OH)<sub>2</sub>掺量及不同龄期下3种水泥土的无侧限抗压强度。分析了随Ca(OH)<sub>2</sub>掺量的增加, 不同龄期的3种水泥土无侧限抗压强度变化规律及原因。试验结果表明: 水泥红粘土强度随Ca(OH)<sub>2</sub>掺量的增加提高最为明显, 粉质粘土次之, 砂土最弱。分析原因是由于土体的细度对水泥土强度影响较大。土体越细, 土体中粘土矿物越多, Ca(OH)<sub>2</sub>掺量的增加促进了更多的离子交换作用和火山灰作用的发生, 从而提高了水泥土强度。试验所用的3种土中红粘土最细, 所以水泥红粘土强度随Ca(OH)<sub>2</sub>掺量的增加提高最为明显。

**关键词:** 水泥土; 粘土; 无侧限抗压强度; Ca(OH)<sub>2</sub>。

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0170-04

## Influence of Ca(OH)<sub>2</sub> on Strength of Low Proportional Cemented Soil

ZHAO Zhenya, SHEN Xiangdong, JIA Shanghua

(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P. R. China)

**Abstract:** Laboratory experimental research is performed by strengthening three different types of soil with low proportional cement to test the unconfined compressive strength of such cemented soil under different dosages of Ca(OH)<sub>2</sub> and the different ages. The variation rules and causes of the unconfined compressive strength of these three types of age-different cemented soil with increasing the dosage of Ca(OH)<sub>2</sub> are analyzed. The results shows that the intensity of red clay cement improves most obviously with Ca(OH)<sub>2</sub> content increased, followed by silty clay, and sand is the weakest. The reason is that the fineness of the soil affect the strength of the cement greatly. The finer the soil, the more clay minerals in soil. The increase in Ca(OH)<sub>2</sub> content promotes the ion exchange and the occurrence of volcanic ash, which improves the strength of cemented soil. Among the three types of soil in this experiment, the fineness of red clay particles is the best, so the intensity of red clay cement improves most obviously with Ca(OH)<sub>2</sub> content increased.

**Key words:** cemented soil; clay; unconfined compressive strength; Ca(OH)<sub>2</sub>

水泥土是由水泥、土和水以及外加剂按一定的比例掺合而成的多相混合体系, 具有水硬、高强、低压缩性、低渗透性等优点, 同时又具有费用低、施工方便、作业面小等优越性。因此在地基处理、基坑围护、路面基层材料、斜坡加固、渠道防渗衬砌、预制建筑材料等工程领域中得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。一般应用于工程中的水泥土中水泥掺量都在10%以上<sup>[4-5]</sup>, 掺量低于10%的水泥对于地基土的加固效果不明显。当水泥掺量在5%以下时, 水泥对土的加固效果微乎其微, 根本无法应用于工程实践, 为了改善低掺量水泥土强度不足这一特点, 本文试图通过掺加其他外加剂来提高低掺量水泥土强度。目前研究表明Ca(OH)<sub>2</sub>对于水泥土强度影响较大, Ca(OH)<sub>2</sub>为混凝土提供碱性环境, 它使得水泥土中水化生成物长期稳定存在得以保障<sup>[6-8]</sup>。同时还能增强水泥土中离子交换作用和火山灰作用等。所以本试验考虑用Ca(OH)<sub>2</sub>作为外加剂来改善低掺量水泥土的强度<sup>[9-11]</sup>。如果低掺量水泥土能够应用于工程实践, 这会大大的减少水泥用量节约成本。

在水泥土一系列物理力学性质中, 最重要的是土的力学

性质, 常用无侧限抗压强度来表示<sup>[12-13]</sup>。笔者对低掺量水泥加固3种不同的地基土, 用Ca(OH)<sub>2</sub>改良。并对改良后3种水泥土测试了在不同Ca(OH)<sub>2</sub>掺量及不同龄期下3种水泥土的无侧限抗压强度。

### 1 试验材料和研究方法

#### 1.1 材料特性

试验选用的材料为冀东牌普通硅酸盐水泥土P. O42.5, 其主要成分见表1。熟石灰为Ca(OH)<sub>2</sub>分析纯, 碳酸钙为分析纯, 水为呼和浩特普通自来水。鉴于生石灰吸水原因使得试件难以成型, 本文用熟石灰代替生石灰。由于Ca(OH)<sub>2</sub>分析纯颗粒粒径较小, 所以在理论上有一定的微集料效应, 为消除微集料效应对测试的影响, 在水泥土中掺加了对应量的惰性材料碳酸钙粉, 保证每一个试件土与外加剂质量恒定。为保证氢氧化钙与碳酸钙的细度相同, 都使用水泥土负压筛过0.08 mm的筛使他们细度相同。

表 1 冀东 P.O42.5 普通硅酸盐水泥矿物组成

成分	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	f-CaO
W/%	55.7	22.09	5.12	16.79	0.29

表 2 3 种土的颗粒组成

土类	d/mm	0.25<d≤1	0.075<d≤0.25	0.005<d≤0.075	0.002<d≤0.005	d≤0.002
砂土	P/%	30.6	54.48	10.57	3.41	0.94
粉质粘土	P/%	10.49	32.72	40.95	12.49	3.35
红粘土	P/%	3.50	16.50	43.32	31.48	5.20

由表 2 可以看出,红粘土含有的小于 0.005 mm 的颗粒最多,粉质粘土次之,砂土最少。

### 1.2 试验方法

水泥土水泥掺量固定在 3%,Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量分别为:0%、2.5%、5%、7.5%、10%,养护龄期为 7、28 d。经过击实试验分析得出水泥砂土最佳含水率为 8%、水泥粉质粘土的最佳含水率为 14.5%、水泥红粘土 15%,密实度为 95%,制作 φ50 mm×H50 mm 的水泥土试件,在标准养护箱内养护到设计龄期,本文依据《土工试验规程 JTJ-051-93》和《公路无机结合料试验规程 JTGE51—2009》通过 WYH-300 型微机控制万能试验机测试试件的无侧限抗压强度。

## 2 试验结果及影响因素分析

测试结果见表 3 和图 1~6。

表 3 3 种水泥土无侧限抗压强度(kPa)的实测数据

土类	龄期/ d	Ca(OH) <sub>2</sub> 掺量 w/%				
		0	2.5	5	7.5	10
砂土	7	204.0	308.4	308.2	522.7	437.2
	28	410.8	622.1	646.0	863.9	514.2
粉质粘土	7	571.2	621.1	814.2	601.7	595.7
	28	1 253.7	1 182.8	1 337.5	1 424.4	1 560.5
红粘土	7	0	387.6	1 162.3	1 263.2	1 446.5
	28	263.3	1 035.3	1 782.7	2 441.3	2 651.9

由表 3 可以看出,各龄期下不同水泥土无侧限抗压强度随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量的增长都有不同程度的增长。通过试验结果可以明显看出:水泥砂土的无侧限抗压强度在 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量为 7.5% 时,达到峰值 863.9 kPa,小于 1 MPa,强度较低;水泥粉质粘土随龄期增长,强度增长明显,峰值达 1.56 MPa;水泥红粘土无侧限抗压强度随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增加强度增长最明显,水泥红粘土在不掺加 Ca(OH)<sub>2</sub> 时,基本没有强度,Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量为 10% 时,水泥红粘土强度能达到 2.65 MPa。

### 2.1 龄期对水泥土强度的影响

由表 3 可以得出,3 种水泥土的无侧限抗压强度随着龄期的增长而增长。

### 2.2 Ca(OH)<sub>2</sub> 对水泥土强度的影响

由表 3 和图 1、2 可以得出,对于 3 种土配制成的低掺量

试验采用 3 种土样分别为为内蒙古巴彦淖尔盟河套平原广泛分布的普通粉质粘土、准格尔旗附近高速公路普遍分布的砂土、呼市小黑河附近地下 3 m 的红粘土,通过粒度分析得出 3 种土的颗粒组成分别为见表 2。

水泥土,掺加 Ca(OH)<sub>2</sub> 对于改善 3 种水泥土的强度效果不同,其中对于提高低掺量水泥红粘土的强度效果最明显。1)粉质粘土:7 d 龄期时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增加水泥土强度先提高后降低,当掺量为 5% 时,水泥土强度达到峰值。28 d 龄期时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增加水泥土强度一直增加。说明在早期(7 d)Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量过高对水泥土的强度有抑制作用。而到了中期(28 d),Ca(OH)<sub>2</sub> 的促进作用大于抑制作用;2)砂土:7 d 龄期和 28 d 龄期时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增加水泥土强度先提高后降低,当掺量为 7.5% 时,水泥土强度达到峰值。说明适量的 Ca(OH)<sub>2</sub> 能增加水泥土的强度,过量的 Ca(OH)<sub>2</sub> 对水泥土强度有抑制作用;3)红粘土:7 d 和 28 d 龄期时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增加水泥土强度一直增加。7 d 龄期时,当不掺加 Ca(OH)<sub>2</sub> 时水泥红粘土没有强度。当 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量小于 5% 时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增长水泥土强度增长较明显;当 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量大于 5% 时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增加水泥土强度增长较缓慢。28 d 龄期时,当 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量小于 7.5% 时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增加强度增长较明显,当 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量大大于 7.5% 时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增加水泥土强度增长缓慢。

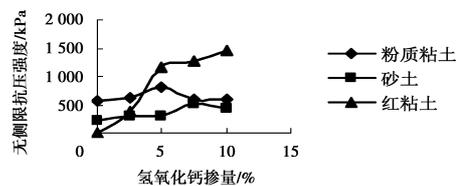


图 1 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量与水泥土强度的关系曲线(7 d)

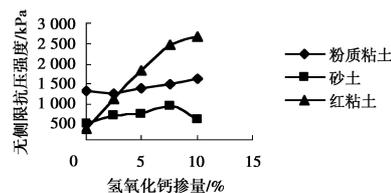


图 2 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量与水泥土强度的关系曲线(28 d)

## 3 机理分析

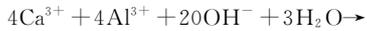
### 3.1 水泥土反应机理

水泥土中除了水泥的水化作用可以提高水泥土强度外,还有填充作用、火山灰作用和离子交换作用对水泥土强度增

长由很大的影响<sup>[14-16]</sup>。

3.1.1 离子交换作用 粘土颗粒中含量最多的  $\text{SiO}_2$  遇水后,形成硅酸胶体微粒,其扩散层中带有离子半径较大的  $\text{Na}^+$  或  $\text{K}^+$ ,它们能和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  中的离子半径较小的  $\text{Ca}^{2+}$  发生离子交换作用。经过离子的吸附交换,使双电层中的扩散层减薄,结合水减少,因此增强了土颗粒之间的结合力,使较小的土颗粒联结形成较大的土团粒,从而提高土体的强度。

3.1.2 火山灰作用 随  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量增加,溶液中析出大量的  $\text{Ca}^{2+}$ ,当其数量超过上述离子交换的需要量后,则在碱性的环境中,能使粘土中的胶质  $\text{SiO}_2$  及胶质  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的一部分或大部分与  $\text{Ca}^{2+}$  发生化学反应。随着反应不断进行,逐渐生成不溶于水的、复杂的、稳定的结晶化合物:



反应生成物有硅酸钙类水化物、铝酸钙类水化物等。这些新生成的化合物在水中中和空气中逐渐硬化,与土颗粒粘在一起,形成网架结构。其晶体在土颗粒之间相互穿插,

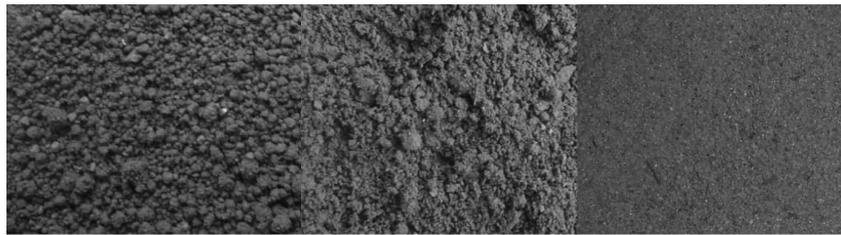
使土颗粒联系得更加牢固,改善了粘土的物理力学性能,增大了水泥石的强度。

以上2种作用的分析可以看出这2种作用反应的大小与土种类有直接关系。土体颗粒越细、比表面积越大,离子交换作用越强烈;火山灰作用与水泥土中粘土矿物有关,土体越细形成的粘土矿物越多,所以火山灰作用越强。所以在土种类中,土体越细的地基土配制成的水泥土,能够发生离子交换作用和火山灰作用的潜质就越大,配制成的水泥土强度越高。

### 3.2 土质对水泥土作用机理分析

由上面的分析可知:水泥土中存4种化学作用,水化作用、离子交换作用、火山灰作用和碳酸化作用,对于不同的土质,由于土的颗粒细度不同,各种作用发挥的程度有所不同。本实验所用3种土分别为砂土、粉质粘土和红粘土。

由表1的粒度分析结果可知,小于0.005 mm的粒度,红粘土大于粉质粘土,粉质粘土大于砂土。如下图3所示为3种土样照片:



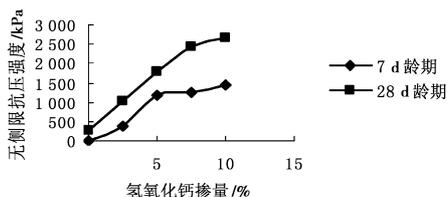
(a)红粘土

(b)粉质粘土

(c)砂土

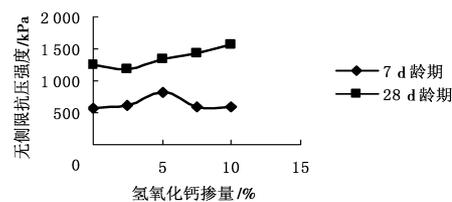
图3 土样

我们一般把小于0.005 mm的颗粒称之为粘性颗粒<sup>[17]</sup>。红粘土中的粘性颗粒比前两种土多,其占到了总成分的36.68%,是粉质粘土的2.3倍,是砂土的8.4倍。由3.1分析可知:土体越细的地基土配制成的水泥土,能够发生离子交换作用和火山灰作用的潜质就越大。又通过粒度分析得到,红粘土中的土细度比较细。所以水泥红粘土中离子交换作用和火山灰作用发生的潜质更大,只要  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的量足够多,水泥红粘土中这两种反应将会急剧增大<sup>[18-22]</sup>。所以随着  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量的增加水泥红粘土强度持续增长见图4。

图4  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量与水泥红粘土强度的关系曲线

粉质粘土的粘性颗粒数量介于红粘土的砂土之间,所以离子交换作用和火山灰作用不及红粘土, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量对水泥加固粉质粘土强度贡献有限。

砂土的粘土颗粒最少,而且其强度极低,随  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量增加其强度增长规律性不强。

图5  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 掺量与水泥粉质粘土强度的关系曲线

### 3.3 2种固化作用对水泥土作用效果

由图5可以看出:不同龄期  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量对水泥加固粉土的效果不同,前期(7 d)随  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量增加水泥粉质粘土强度先提高后降低。强度提高是由于水泥粉质粘土中发生离子交换作用,当  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量达到5%后强度降低是因为水泥土复合体中石灰溶液达到过饱和,反而造成了对水泥矿物成分特别是能促进早期强度的  $\text{C}_3\text{A}$  和  $\text{C}_4\text{AF}$  的正常水化、凝结反应的抑制和延迟,导致水泥土试样的早期强度低。中期(28 d)随  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量增加水泥土强度先降低后增加。如图1所示即掺加2.5%的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的水泥土强度比外加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的水泥土强度低,原因是水泥水化能够产生  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,而掺加的2.5%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  抑制了水泥水化作用,使水泥水化作用的速率变慢,从而抑制了水泥水化,降低了水泥土强度。之后随  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量增加水泥土强度持续增长,这是由于高掺量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  激发了火山灰作用,使得水泥土强度持续增长。

由图 3(c)可见:砂土中颗粒粗大,土体中游离硅铝含量极少,所以水泥砂土中离子交换作用和火山灰作用很小,可以忽略,水泥砂土强度极低且 28 d 峰值没有超过 1 MPa,由图 6 中水泥砂土强度增长趋势可能是由于 Ca(OH)<sub>2</sub> 和水反应的结晶效应所至。

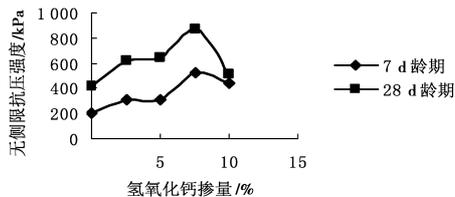


图 6 Ca(OH)<sub>2</sub>掺量与水泥砂土强度的关系曲线

另外,由图 6 可以看出,7 d 和 28 d 龄期时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增长水泥粘土强度持续增长。7 d 龄期时,当不掺加 Ca(OH)<sub>2</sub> 时,水泥土没有强度。当 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量达到 10% 时,水泥土强度能达到 1.45 MPa,可以看出 Ca(OH)<sub>2</sub> 对水泥红粘土强度提高明显。原因主要是由于红粘土中含有的粘土颗粒较多,水泥红粘土中的离子交换作用强烈的原因。当 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量大于 5% 时强度开始增长较缓慢。主要原因是以当 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量达到 5% 时,离子交换作用所需 Ca(OH)<sub>2</sub> 已经满足,不能给水泥土持续提供更大的强度。而此龄期时的火山灰作用微弱,所以曲线后半段趋于平缓。而 28 d 龄期较 7 d 龄期增长速度较快的掺量点由 5% 变为 7.5%,是因为红粘土中粘性矿物较多,火山灰作用对水泥土强度发挥了较大影响。当 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量达到 7.5% 时,强度增长平缓,是因为粘性矿物中的游离硅铝与火山灰作用已经消耗完全,所以此后强度趋于平缓。

## 4 结 论

1) 低掺量水泥土的无侧限抗压强度随着龄期的增长而增长。

2) Ca(OH)<sub>2</sub> 对 3 种水泥土的无侧限抗压强度影响不同,对水泥红粘土的强度影响较大,水泥红粘土随着 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量的增加而持续增长。水泥红粘土在不掺加 Ca(OH)<sub>2</sub> 时,基本没有强度,在 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量为 10% 时,强度达到 2.65 MPa。随着 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量的增加,砂土与粉质粘土配制成的水泥土强度增长并不明显,水泥砂土强度峰值小于 1 MPa,强度极低。水泥粉质粘土最高强度为 1.56 MPa,龄期对强度影响较大。

3) 土体细度对掺加 Ca(OH)<sub>2</sub> 的水泥土强度影响较大,这是因为土体越细,土中存在的粘性颗粒越多,粘性颗粒触发的离子交换和火山灰作用越大。

4) 7 d 龄期时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增加水泥粉质粘土强度先提高后降低,是因为水泥土中发生离子交换作用使得强度提高,而过量的 Ca(OH)<sub>2</sub> 对水泥水化有抑制作用,使得强度降低。28 d 龄期时,随 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量增加水泥土强度先降低后增加,是因为 Ca(OH)<sub>2</sub> 抑制了水泥水化作用,之后由于火山灰作用开始占主导地位,所以强度增加。

5) 7 d 龄期时,当 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量大于 5% 时水泥红粘土强度开始增长较缓慢,是因为离子交换作用已经充分发挥,不能持续提供更多的强度。28 d 龄期时,当 Ca(OH)<sub>2</sub> 掺量

大于 7.5% 时水泥红粘土强度开始增长较缓慢,是因为粘性矿物中的游离硅铝与火山灰作用已经消耗完全。

## 参考文献:

- [1] 周丽萍,申向东. 水泥土力学性能的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(2): 360-365.
- [2] Wayne S A. Soil cement—a material with many applications[J]. Concrete International, 1991, 13(1): 49-52.
- [3] Stavridakis E I, Hatzigogos T N. Influence of liquid limit and slaking on cement stabilized clayey admixtures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1999, 17(1): 145-154.
- [4] Suksun H, Norihiko M, Nagaraj T S. Clay-water/cement ratio identity for cement admixed soft clays[J]. J Geotech and Geoenviron Engrg, 2005, 131(2): 187-187.
- [5] 梁仁旺, 张明, 白晓红. 水泥土的力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 212-213.
- [6] 苏胜, 张利. 土木工程材料[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007: 30-32.
- [7] 王梅, 白晓红, 梁仁旺, 等. 生石灰与粉煤灰桩加固软土地基的微观分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 67-70.
- [8] Diamond S, Kinter E B. Mechanisms soil-lime stabilization[J]. Public Road, 1966, 33(12): 260-265.
- [9] 宁建国, 黄新. 土样矿物成分对固化土抗压强度增长的影响[J]. 岩土力学, 2010, 30(1): 113-117.
- [10] 冒海军, 郭印同, 王光进, 杨春和. 黏土矿物组构对水化作用影响评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2723-2728.
- [11] Yarbasi N, Kalkan E, Akbulut S. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1): 44-54.
- [12] 游波, 王保田, 李治朋, 张鸿, 程卓. 水泥土无侧限抗压强度影响因素试验研究[J]. 现代交通技术, 2010, 7(5): 4-7.
- [13] Dempsey B J, Thompson M R. Durability properties of lime soil mixtures [R]. Highway Research Record National Research Council, Washington, D. C. 1968(235): 61-75.
- [14] 郭培奎, 阮怀宁. 红粘土地区水泥土强度的试验研究[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(3): 132-135.
- [15] 印长俊, 马石城. 水泥红土的力学性能试验研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2004, (6): 99-101
- [16] 杨滨. 水泥土强度规律研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [17] 赵杏媛, 张有瑜. 粘土矿物与粘土矿物分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 1-2.
- [18] 张英, 邓安福. 重庆红粘土本构模型验证[J]. 重庆建筑大学学报, 1997, 19(4): 48-53.
- [19] 张宏, 柳艳华, 石名磊. 海陆交互相黏性土工程特性及微结构特征[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(6): 47-52.
- [20] 黄新, 宁建国, 许晟, 兰明章. 固化土孔隙液 Ca(OH)<sub>2</sub> 饱和度对强度的影响[J]. 工业建筑, 2006, 369(7): 19-24.
- [21] 童小东, 蒋永生, 龚维明, 龚晓南. 石灰在水泥系深层搅拌法中的应用[J]. 工业建筑, 2000, 30(1): 21-30.
- [22] 董玉文, 张伯平. 养护龄期对灰土工程性能的影响试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(3): 38-42.

(编辑 郑洁)