

# 水泥加固酸污染土无侧限强度特征<sup>\*</sup>

丁勇,王鹏,董雪花,胡强强,吕会

(南京理工大学 土木工程系,南京 210094)

**摘 要:**污染土是利用水泥固化处理后,土体的强度得到提高。针对该项技术,采用水泥固化法处理酸污染土,通过两种试验方案,对水泥加固酸污染土的无侧限抗压强度特性进行研究。试验所用酸污染土用浓硫酸配置人工制备而成,并考虑了不同水泥掺量、不同硫酸浓度和不同龄期对水泥加固酸污染土强度的影响。试验表明:水泥固化酸污染土的强度与水泥掺量和硫酸含量有密切关系,二者共同作用决定其强度的变化。在一定硫酸浓度(2~16g/kg)条件下,伴随硫酸含量的升高,水泥掺量较低时,无侧限抗压强度整体呈明显下降的趋势;水泥掺量较高时,无侧限抗压强度呈缓慢上升的趋势。随着水泥掺量提高,土样的无侧限抗压强度达到峰值时所对应的硫酸含量也逐渐变大。

**关键词:**水泥加固;酸污染土;无侧限抗压强度;试验方法

中图分类号:TU443

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)04-0918-05

## Unconfined Compressive Strength Characteristics of Cement Solidified Acid-contaminated Soils

Ding Yong, Wang Peng, Dong Xuehua, Hu Qiangqiang, Lü Hui

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, P.R. China)

**Abstract:** After contaminated soils treated by the stabilization/solidification method, the strength of the soil is improved and it can be used in site backfill and foundation reinforcement. Soil acidification is one of the common types of soil contamination, the mechanical properties of the stabilized soil is of great significance in controlling pollution acidic soils and engineering applications. The acid-contaminated soils treated by the stabilization method, which uses cement as a binder, and two methods were used to study the unconfined compressive strength characteristics of cement reinforcement acid contaminated soils. The acid-contaminated soils are prepared in the laboratory by adding concentrated sulfuric acid as a source of pollutant. Considering the influence of the factors such as acid content, cement content, curing time on the strength, the test samples were made with different concentrated sulfuric acid contents, different cement contents and curing time. The tests results show that cement content and sulfate content are closely related to the unconfined compressive strength, which determine its variation. In the condition of sulfuric acid between 2g/kg to 16g/kg, unconfined compressive strength shows a trend of significant decreasing in low cement content but slows increasing in high cement content with the sulfuric acid content rising. The content of sulfuric acid becomes larger when the strength reached a peak with the cement content increase.

**Keywords:** cement solidification; acid contaminated soil; unconfined compressive strength; test methods

\* 收稿日期:2017-01-05(修改稿)

作者简介:丁勇(1977-),男,江苏海安人,博士,副教授,主要从事结构健康监测方面的研究。

E-mail: njustding@163.com

基金项目:海洋公益性行业科研专项经费项目(201005006)

0 引言

随着工业的发展及生态环境的不断恶化,逐渐出现一系列环境污染问题,与岩土工程相关的就是环境岩土工程,其中污染土问题逐渐引起国内外学者的关注与研究。

对于酸污染土<sup>[1-2]</sup>来说,最常见的就是由于工业三废和酸雨侵蚀造成的。土体受到酸的侵蚀后,土体内部的次生矿物与之发生化学反应,导致土体的物理化学性质发生变化。被酸侵蚀的土体内部结构也会发生变化,会导致土体颗粒分散、表面粗糙,还会造成土体变软,出现特殊颜色和气味等。目前,国内大多数采用固化法<sup>[3]</sup>对酸污染土进行处理,常用的固化剂为普通硅酸盐水泥。水泥与酸污染土拌和,能够降低酸在土体中的溶解度和迁移性,同时将有害废物转化为稳定的固体。在美国,一般将无侧限抗压强度和淋滤特性作为评价固化法处理效果的两个重要指标。许多研究表明,酸对土体和水泥土有不利影响。伯桐震等<sup>[4]</sup>研究了红土被酸污染后物理性质的变化,发现酸浓度增大,土体的比重和液塑限均先增加再减小。朱春鹏等<sup>[5]</sup>对酸碱污染土强度特性开展了试验研究,对影响酸碱污染土直剪强度的各种因素进行了分析。刘汉龙等<sup>[6]</sup>对酸碱污染土的物理性质进行了测试研究,研究表明酸浓度增大会导致土体塑限增大,液限减小。王晓荣<sup>[7]</sup>在不同侵蚀环境和不同侵蚀时间等条件下对水泥土试块进行了无侧限抗压强度试验研究。李相然等<sup>[8]</sup>对地基土受酸碱污染后的物理力学性质进行了研究。赵永强等<sup>[9-10]</sup>也对水泥加固污染土的强度进行研究,但其试验所用的水泥掺量单一。

本文采用两种试验方法,设定酸浓度(2,4,8,16 g/kg)、水泥掺量(7%,10%,15%)及龄期(7,14,28 d)等条件制备水泥固化酸污染土,测定固化土样的无侧限抗压强度,研究酸浓度、水泥掺量、养护龄期对强度的影响规律,并比较了两种试验方案之间的差异性。

1 酸污染土的制备

1.1 试验材料:

试验制备土样的主要材料有:南京地区黏土(烘干碾碎过2.36 mm筛),32.5级普通硅酸盐水泥,浓硫酸(浓度为98.3%)。试验水灰比为0.8,加水为干土重的50%。按照水泥土配合比设计规

程(JGJ/T 233—2011)进行试验。土体的物理性质如表1。

表1 土体的物理性质  
Table 1 Physical properties of soil

塑限/%	22.28
液限/%	52.50
塑性指数/%	30.22
最佳含水率/%	24.00
最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.58

1.2 试验方法

1.2.1 方案A

(1)浓硫酸在干土中的含量分别为2,4,8,16 g/kg,将水、浓硫酸、干土一起搅拌,然后在干燥器中静止24h,得到酸污染土。

(2)将酸污染土与水泥放入小型搅拌机内低速搅拌5 min,水泥掺量为干土重的7%、10%、15%。

(3)将水泥土放入70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的塑料模具中,分层插倒,用振动台振动2 min,之后覆盖一层塑料薄膜,在(20±5)℃的环境下静止48 h后拆模,然后装入密封的塑料袋中,进行标准养护,养护时间为7 d、14 d、28 d。

(4)将养护至设计龄期的试样进行无侧限抗压强度试验。试验所用仪器为常规的液压式压力试验机,控制轴向应变速度为1%/min。

1.2.2 方案B

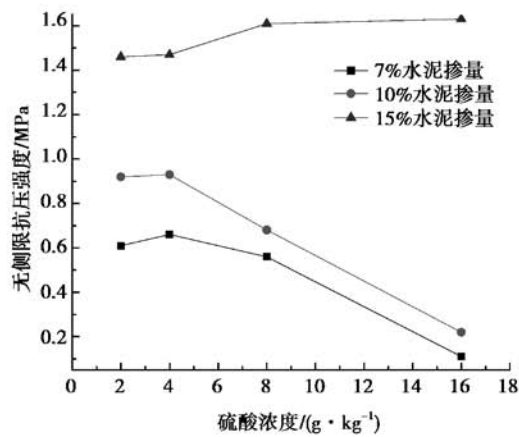
(1)将稀释后的硫酸溶液与干土、水泥放一起搅拌,浓硫酸在干土中的含量分别为2,4,8,16 g/kg,水泥掺量为干土重的7%、10%、15%,在小型搅拌机中低速搅拌5 min。

(2)剩余步骤与方案A中步骤(3)、(4)相同。

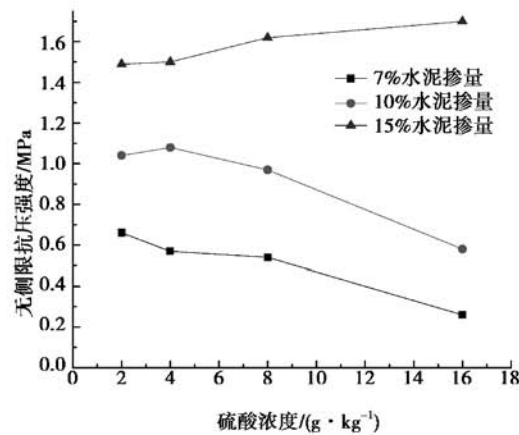
2 无侧限抗压强度试验结果

2.1 方案A

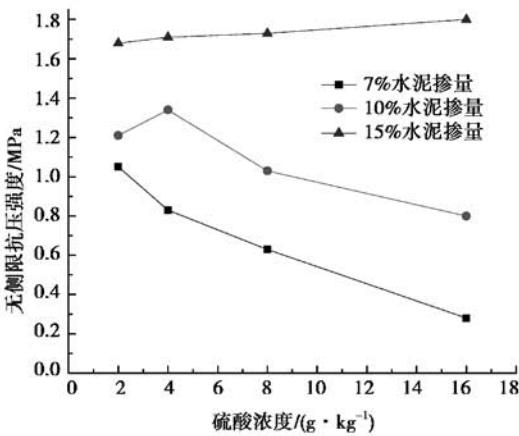
图1是酸污染土采用方案A在水泥掺量为7%、10%、15%条件下各个龄期的无侧限抗压强度随硫酸浓度的变化曲线。可以看到,在图1中使用10%水泥加固酸污染土后,无侧限抗压强度呈现先增大后减小的趋势,在硫酸浓度为4 g/kg时达到峰值。使用15%加固酸污染土,强度随硫酸浓度的增大逐渐增大,但是增长的幅度逐渐放缓。在图1(a)中使用7%水泥固化污染土,强度与使用10%



(a) 7 d龄期



(b) 14 d龄期



(c) 28 d龄期

图 1 方案 A 无侧限抗压强度随硫酸含量的变化

Fig. 1 Variation of unconfined compressive strength with sulfuric acid content by method A

水泥固化时的规律一致,在图 1(b)、(c)中 7%水泥掺量下,强度随硫酸浓度增大而下降。硫酸在酸污染土中的含量在2~16 g/kg 之间变化时,随着水

泥掺量提高,固化土的无侧限抗压强度达到峰值时所对应的硫酸含量也逐渐变大。

2.2 方案 B

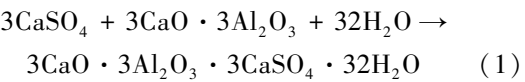
图 2 是酸污染土采用方案 B 在水泥掺量为 7%、10%、15%条件下各个龄期的无侧限抗压强度随硫酸浓度的变化曲线。从图 2 可以看出,无侧限抗压强度随硫酸浓度的变化规律与采用方案 A 类似,低水泥掺量时,水泥加固酸污染土的无侧限抗压强度总体呈明显下降的趋势。高水泥掺量下,无侧限抗压强度呈缓慢上升的趋势,而且随着水泥掺量的增大,在图中强度峰值右移的规律表现得更加明显。

2.3 方案 A 和 B 对比分析

通过图 1 和图 2 可以明显看出,采用两种不同方案时,无侧限抗压强度随硫酸浓度、水泥掺量和养护龄期的变化规律和趋势基本一致。水泥掺量较高时(15%),相同条件下的方案 A 中土样强度明显大于方案 B;水泥掺量比较低时(7%、10%),二者的强度相差较小。随着水泥掺量的减小、养护龄期和硫酸浓度的增大,两种方案的强度之间的差异逐渐变小,特别是养护龄期为 28 d 时,采用两种试验方案在硫酸含量为 8 g/kg、16 g/kg 条件下的强度非常接近。

3 试验结果分析

影响水泥加固酸污染土无侧限抗压强度两个最重要的因素是水泥掺量和硫酸浓度。使用水泥作为固化剂加固酸污染土,其基本机理可归结为两大效应,即复合胶凝效应和填充增强效应<sup>[11]</sup>。复合胶凝效应包括水泥的水化作用、离子交换和团粒化作用、硬凝反应、碳酸化作用。水泥水化产物 CSH 具有胶结作用,水泥水化产生的 Ca(OH)<sub>2</sub>与土中的活性物质发生凝硬反应产生的水化产物也具有胶结作用,其中 CSH 的胶结作用是水泥土强度的主要原因。土体受到硫酸污染后,对其强度有削弱的一面也有增强的一面,H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中的 H<sup>+</sup>与水泥水化生成的 Ca(OH)<sub>2</sub>发生中和反应,导致 C-S-H 分解破坏,腐蚀产物为无胶凝性的 SiO<sub>2</sub>胶体和相应的硫酸盐,致使其胶结作用减小,这是其不利的一面。另外,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与水泥水化产物发生反应,生成具有膨胀性的钙矾石,反应公式如下:



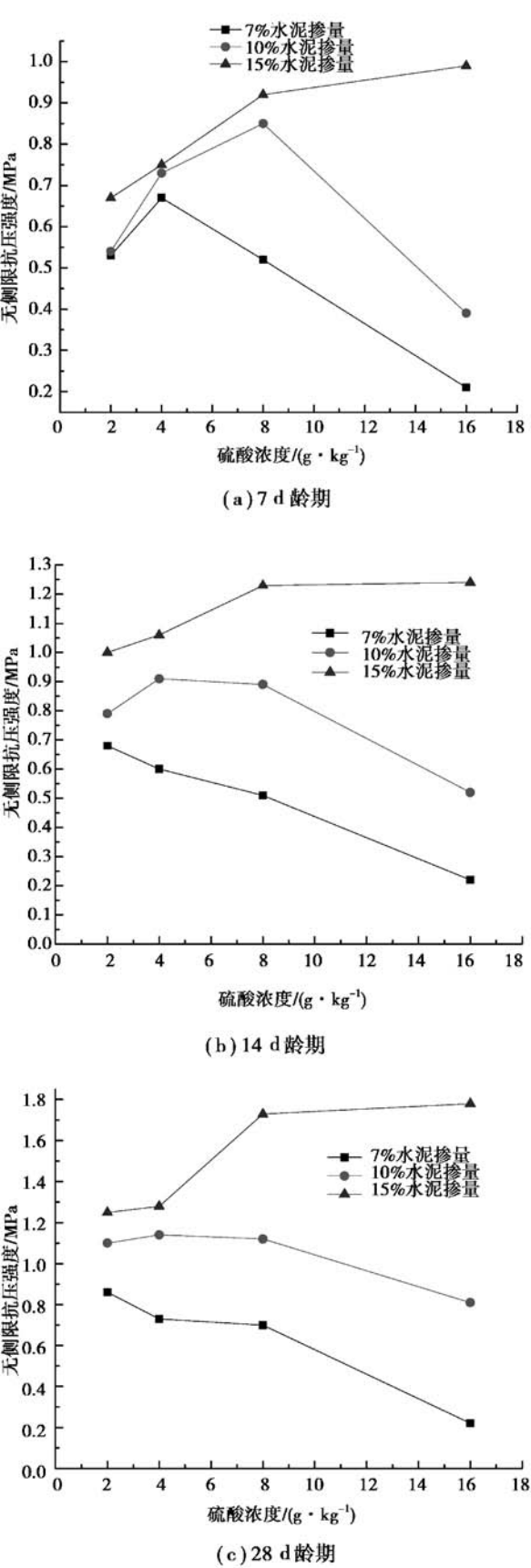


图2 方案B无侧限抗压强度随硫酸含量的变化

Fig. 2 Variation of unconfined compressive strength with sulfuric acid content by method B

这种化学反应非常迅速,同时结合大量自由水为结合水,在短时间内以针状结晶物析出,其生成量随着水泥掺入比和龄期的变化而变化。适量的钙矾石能够填充土体之间的空隙,增强水泥土的密实度,使水泥固化酸污染土的强度提高,这是其有利的一面。也就是说,一定量硫酸的水泥土,并不一定因硫酸腐蚀而破坏,相反,在水泥土内部均匀分布的结晶膨胀,填充空隙,有可能提高水泥土的强度。但是过量的钙矾石产生的膨胀力超过胶结性物质的胶结力,也会使水泥土发生膨胀而破坏。

水泥掺量为7%时,水泥含量过少,水泥水化生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与  $\text{H}^+$  发生中和反应后,CSH 含量骤减,导致水泥土的强度逐渐丧失;水泥掺量为10%时,硫酸浓度为2  $\text{g}/\text{kg}$ 、4  $\text{g}/\text{kg}$  时中和反应消耗一部分  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,还有少量的钙矾石生成,随着硫酸浓度增大为8  $\text{g}/\text{kg}$ 、16  $\text{g}/\text{kg}$  时,水泥水化的大部分产物跟硫酸发生反应,即产生脱钙现象出现类似与水泥掺量为7%的情况,因而强度慢慢减小;水泥掺量为15%时,水泥含量过高,硫酸含量在2~16  $\text{g}/\text{kg}$  之间时,尽管中和反应消耗一部分的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,依然有足够的 CSH,其所产生的复合胶凝效应越强,这样在 CSH 的胶结和钙矾石的填充作用下,水泥土的无侧限抗压强度不断提高。当然,可以预见的是,硫酸浓度加大的时候依然会出现强度下降的情况。

土体由原生矿物和次生矿物组成,原生矿物组成的岩石和风化物一般有良好的耐酸性。次生矿物是原生矿物经风化形成的新矿物,包含  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  等氧化物和伊利石,高岭石等黏土矿物,次生矿物和氧化物相对容易与硫酸发生分解反应和离子交换,生成硫酸盐。采用方案A时,硫酸会先与土体中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  等发生反应,致使土体的空隙增大,氧化物的胶结作用也随之降低;采用方案B时,硫酸与土体反应的同时也直接与水泥和水泥水化产物反应,所以这两种方案总是方案A的强度较大,但是随着硫酸浓度与龄期的增大,这种差异也越来越小,趋向一致。

4 结论

针对酸污染土的固化问题,通过两种不同的室内试验研究了酸污染土经过水泥固化后的强度规律,得到以下几点结论:

(1)水泥加固酸污染土的强度与水泥掺量和硫酸含量有密切关系,在一定硫酸浓度下(2~16 g/kg),伴随硫酸浓度的提高,水泥掺量较低时,水泥加固酸污染土的无侧限抗压强度呈明显下降的趋势,水泥掺量较高时,无侧限抗压强度呈缓慢上升的趋势。

(2)硫酸在酸污染土中的含量在 2~16 g/kg 之间变化时,随着水泥掺量提高,土样无侧限抗压强度达到峰值时所对应的硫酸含量也逐渐变大。

(3)水泥加固酸污染土的强度变化内在主要依赖于 CSH 凝胶和钙矾石的含量,二者共同作用决定其强度的变化。

参考文献(References)

[1] 张晓璐. 酸、碱污染土的试验研究[D]. 南京:河海大学, 2007. (Zhang Xiaolu. Experimental research on soil contaminated by acid and alkali [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))

[2] 朱春鹏, 刘汉龙. 污染土的工程性质研究进展[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 625-630. (Zhu Chunpeng, Liu Hanlong. Study on engineering properties of polluted soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 625-630. (in Chinese))

[3] 许龙. 重金属污染土的固化修复及长期稳定性研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2012. (Xu Long. Research on remediation and long-term stability of solidified/stabilized heavy metal contaminated soil [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese))

[4] 伯桐震, 黄英, 石崇喜, 等. 酸污染红土物理性质的变化特征[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 111-115. (Bo Tongzhen, Huang Ying, Shi Chongxi, et al. Variation characteristics of physical properties of acid pollution laterite [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(2): 111-115. (in Chinese))

[5] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1146-1152. (Zhu Chunpeng, Liu Hanlong, Shen Yang. Laboratory tests on shear strength properties of soil polluted by acid and alkali [J]. Chinese Journal of

Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1146-1152. (in Chinese))

[6] 刘汉龙, 朱春鹏, 张晓璐. 酸碱污染土基本物理性质的室内测试研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1213-1217. (Liu Hanlong, Zhu Chunpeng, Zhang Xiaolu. Fundamental physical properties of soil polluted by acid and alkali in laboratory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1213-1217. (in Chinese))

[7] 王晓荣. 污染环境对水泥土强度的影响研究[D]. 太原:太原理工大学, 2008. (Wang Xiaorong. Study on mechanical property of cemented soil under environmental contamination [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese))

[8] 李相然, 姚志祥, 曹振斌. 济南典型地区地基土污染腐蚀性质变异研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1229-1233. (Li Xiangran, Yao Zhixiang, Cao Zhenbin. Study on physical and mechanical property variation of polluted erosive foundation soils in typical district of Jinan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1229-1233. (in Chinese))

[9] 赵永强. 污染对水泥土影响的力学试验及其损伤本构模型研究[D]. 太原:太原理工大学, 2008. (Zhao Yongqiang. Research on mechanical experiment and damage constitutional model of cemented soil effected by pollution [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008 (in Chinese))

[10] 赵永强, 白晓红, 韩鹏举, 等. 土体污染对水泥土力学性质的影响[J]. 天津大学学报, 2008, 41(1): 72-77. (Zhao Yongqiang, Bai Xiaohong, Han Pengju, et al. Effect of polluted soil on mechanical property of cemented soil [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(1): 72-77. (in Chinese))

[11] 李迎春, 钱春香, 刘松玉, 等. 粉土固化稳定机理研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 268-271. (Li Yingchun, Qian Chunxiang, Liu Songyu, et al. Mechanism of silt stabilization [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 268-271. (in Chinese))