

盐溶液浸泡养护固化土的耐久性分析

任瑞平¹, 刘世皎^{2,3}, 樊恒辉³, 史祥³, 贺智强³

(1. 杨凌职业技术学院 交通与测绘工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072; 3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 基于改善固化土养护环境的思路, 提出了用硅酸钠、硫酸钠和氢氧化钠的混合溶液以及饱和石灰水养护固化土, 以期达到提高固化土的耐久性, 延长固化土使用寿命的目的。通过无侧限抗压强度试验、干湿循环试验、冻融循环试验以及扫描电子显微镜试验对两种盐溶液养护进行了对比研究。试验结果表明, 硅酸钠、硫酸钠和氢氧化钠的混合溶液养护与饱和石灰水养护均可提高固化土的强度、抗干湿循环以及抗冻融循环的耐久性; 硅酸钠、硫酸钠和氢氧化钠的混合溶液养护对强度和耐久性的提高优于饱和石灰水养护; 微观结构分析表明, 两种溶液养护固化土生成了较多致密的凝胶物质, 增加了黏聚力, 降低了孔隙率, 减少了大孔隙。

关键词: 固化土; 养护溶液; 饱和石灰水; 耐久性; 干湿循环; 冻融循环

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0113-05

中图分类号: TU411.99

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.028

Durability of Stabilized Soil Cured with Saline Solution

REN Rui-ping¹, LIU Shi-jiao^{2,3}, FAN Heng-hui³, SHI Xiang³, HE Zhi-qiang³

(1. School of Traffic and Surveying Engineering, Yangling Vocational & Technical

College, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Northwestern Polytechnical University,

Xi'an, Shaanxi 710072, China; 3. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to improve the durability and prolong the service life of the stabilized soil, the methods of curing stabilized soil in the mixture solution of sodium silicate, sodium sulfate and sodium hydroxide and in the saturated limewater were proposed based on the idea of improving the curing environment of stabilized soil. The unconfined compression strength test, dry-wet cycle test, freezing-thawing cycle test and scanning electron microscope(SEM) test were conducted to compare the two kinds of saline solution curing methods. The results showed that curing stabilized soil in the mixture solution of sodium silicate, sodium sulfate and sodium hydroxide or in the saturated limewater could improve the strength, the resistance of dry-wet circulation and freezing-thawing circulation; Considering the effect on improvement of strength and durability, curing in the mixture solution of sodium silicate, sodium sulfate and sodium hydroxide was better than curing in the saturated limewater; Microscopic structures showed that the two kinds of curing methods generated more dense gel material, increased the cohesion, reduced the porosity, and decreased the macropore of the stabilized soil.

Keywords: stabilized soil; curing solution; saturated limewater; durability; wet-dry cycle; freezing-thawing cycle

土壤固化剂是一种能够在常温下加固土体的新型材料, 其以节能环保、性能优异而备受人们的关注, 已应用在建筑地基、路基、渠道工程以及水土保持等工程领域中。对土壤固化剂的研究主要集中于固化土的力学性能、变形性能, 而在工程实践中发现固化

土的耐久性是其推广应用的瓶颈。尤其在寒冷的北方地区, 设计使用年限为 20 a 的固化土工程往往经过 5~8 a 就会破坏。目前, 国外研究者^[1-6]多是以干湿循环、冻融循环后试件抗压强度的损失、质量的损失、变形量及表面的破坏程度来评估固化土的耐久

收稿日期: 2014-06-06

修回日期: 2014-08-10

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划项目“农田水沙调控新型材料开发与技术集成示范研究”(2011BAD31B05)

作者简介: 任瑞平(1962—), 男(汉族), 陕西省三原县人, 实验师, 主要从事土力学试验与教学工作。E-mail: rjb@ms.iswc.ac.cn。

通信作者: 刘世皎(1989—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事土体化学加固方面的研究。E-mail: lshijiao@126.com。

性,也有研究同时考虑了其它的因素,如疲劳荷载等^[7]。

在国内,多数关于固化土耐久性的研究只是考虑单方面的因素,一些研究只考虑冻融循环因素^[8-10],一些只考虑干湿循环因素^[11-12],还有一些只对固化土进行抗渗试验^[13-14]。在提高固化土耐久性方面,国内外均有许多尝试,如添加纤维^[15]、使用不同的压实方法^[16]、增加固化剂掺量或延长养护龄期^[17]等。但目前固化土的耐久性问题仍没有得到很好的解决。固化土形成强度的一系列反应都是在一定的环境下进行的,故固化土所处的环境对固化土的强度及耐久性

的形成起决定性的作用。本研究基于这一思路提出用盐溶液养护固化土,通过创造一个不同于传统方式的养护环境,以期能够提高固化土的耐久性,延长使用年限。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土为陕西省杨凌示范区的黄土,取土深度为 5~6 m,其基本物理性质指标详见表 1。各物理性质均依据《土工试验方法标准》^[18]测定。试验前将土料风干、碾散、过 5 mm 筛。

表 1 杨凌黄土的物理性质指标

颗粒相对密度 G_s	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_P	颗粒组成/ $\%$			最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率 $W_{op}/\%$
				砂粒 (2~0.075 mm)	粉粒(0.075 ~0.005 mm)	黏粒 (<0.005 mm)		
2.71	38.0	21.8	16.2	2.8	64.2	33.0	1.65	19.5

试验用水泥为冀东水泥股份有限公司生产的普通硅酸盐水泥(P. O. 42. 5)。水泥添加量以每千克干土中加入的水泥质量计,试验中水泥的掺量为 0.08 kg/kg。浸泡养护所用盐溶液有饱和石灰水,硅酸钠、硫酸钠和氢氧化钠的混合溶液(下文称“混合溶液”),混合溶液中硅酸钠为 0.4 mol/L、氢氧化钠为 0.2 mol/L、硫酸钠为 0.04 mol/L。

1.2 试验方案

试验中所用试块的制作均为同一标准,均按掺水水泥后击实试验所得最大干密度制作。将制好的试件分为 4 组,分别为混合溶液浸泡组、饱和石灰水浸泡组、水浸泡组和标准养护组。其中水浸泡组与标准养护组为对照组。每组进行 5 项试验,分别是 7 和 28 d 龄期无侧限抗压试验、干湿循环试验、冻融循环试验及扫描电子显微镜(SEM)试验。每项试验做 6 次平行试验。

1.3 试验方法

1.3.1 试块制备及养护 参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[19]制块。试块为直径(50 mm)×高(50 mm)的圆柱体,用千斤顶静压成型。养护分为标准养护与浸泡养护。标准养护是将试件在温度(20±2)℃,相对湿度大于 95%的养护条件下养护。浸泡养护是将试块标准养护 3 d,然后浸入配制好的溶液里养护,温度(20±2)℃。标准养护的试块在龄期的最后 1 d 将试件浸泡在水中,水面高出试件顶部约 2.5 cm。浸泡 24 h 后,将试件从水中取出进行试验,浸泡养护的试块龄期结束后直接进行试验。

1.3.2 无侧限抗压试验 无侧限抗压强度试验采用

河南恒瑞金试验机有限公司生产的 WDW—100 微机控制电子万能试验机测定。试验参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》。

1.3.3 干湿循环试验 将龄期为 7 d 的试件分为两组,一组继续养护至 28 d;另一组在 70℃的烘箱里烘 24 h,然后在水浴槽中放置 24 h,温度设为(22±1)℃。此过程为一个干湿循环过程,即 2 d 一个干湿循环。28 d 时正好 10 次干湿循环。对比标准养护和干湿循环后试件的抗压强度。根据强度的变化评估固化土抗干湿循环能力。

1.3.4 冻融循环试验 将试件养护至 28 d 龄期。然后将试件分为两组,其中一组为对照组,进行无侧限抗压试验,另外一组进行冻融循环试验。一次冻融循环包括在-18℃下冻结 16 h,然后在(20±1)℃的融解水槽中融化 8 h,保证水面高出试块 2 cm。冻融循环 10 次后进行无侧限抗压强度试验。根据试块的强度损失评估固化土的抗冻融循环能力。

1.3.5 微观结构 采用型号 J-5 800 扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM),对 28 d 龄期固化土的微观结构进行观察。

2 结果分析

2.1 无侧限抗压强度试验

7 d 养护龄期与 28 d 养护龄期的无侧限抗压试验结果详见表 2—3。由表 2—3 可以看出,两种盐溶液浸泡提高了固化土强度,提高最多的是 28 d 龄期下的混合溶液养护,其与标准养护相比提高了 70%,与水中养护相比提高了 40%。在同一养护龄期下,

混合溶液养护对强度的提高效果大于饱和石灰水养护。同一养护方式下,28 d 龄期强度提高的效果比 7 d 龄期的更明显。如混合溶液养护 7 d 后,强度比标准养护提高 58%,而养护 28 d 后强度提高 70%。盐溶液养护的强度比水中养护高,证明了盐溶液中的化学物质对固化土强度的增长贡献明显。

表 2 养护 7 d 固化土无侧限抗压强度

序号	养护方式	无侧限抗压强度/MPa	与水中养护比较/%	与标准养护比较/%
1	混合溶液养护	3.66	34	58
2	饱和石灰水养护	3.21	17	39
3	水中养护	2.73	0	18
4	标准养护	2.31	-15	0

2.2 干湿循环试验

干湿循环后无侧限抗压强度的变化情况详见表 4。由表 4 可以看出,各养护方式下固化土试块的强

度经过 10 次干湿循环后均增高。干湿循环后混合溶液与饱和石灰水养护试块的强度明显比水中养护和标准养护试块的强度高,如混合溶液养护试块比标准养护试块的强度高出 41%。其原因在于混合溶液与饱和石灰水养护的环境有利于固化土内部生成更多的水化胶结物质。这些胶结物增大了土团粒间的黏聚力,使固化土可以更有效地抵抗干湿循环产生的内应力。胶结物质同时填充了团粒间的空隙使水分在干湿循环过程中不易进入固化土内部,从而有效地降低了固化土内部因干湿不均匀产生的内应力。

表 3 养护 28 d 固化土无侧限抗压强度

序号	养护方式	无侧限抗压强度/MPa	与水中养护比较/%	与标准养护比较/%
1	混合溶液养护	5.52	40	70
2	饱和石灰水养护	4.72	20	46
3	水中养护	3.93	0	22
4	标准养护	3.23	-18	0

表 4 干湿循环后土体强度变化

序号	养护方式	养护 28 d 强度/MPa	10 次干湿循环后强度/MPa	循环后与水中养护比较/%	循环后与标准养护比较/%
1	混合溶液养护	5.52	6.47	32	41
2	石灰水养护	4.72	5.56	13	21
3	水中养护	3.93	4.90	0	7
4	标准养护	3.23	4.58	-7	0

2.3 冻融循环试验

2.3.1 无侧限抗压强度 经过 10 次冻融循环后固化土的抗压强度变化情况详见表 5。由表 5 可以看出,冻融循环后混合溶液养护与饱和石灰水养护试验土块的强度损失均小于水中养护与标准养护的试验土块。且冻融循环后混合溶液与饱和石灰水养护试验土块的强度显著大于水中养护与标准养护试验土块的强度。

冻融循环的破坏主要是由于颗粒间水分结冰膨胀而产生的冻胀应力造成的,这种冻胀应力破坏颗粒间的胶结,当胶结力小于冻胀应力固化土便被冻坏。而混合溶液养护与饱和石灰水养护使固化土内部生成更多胶结物质,这些胶结物质增加土团粒间的黏聚力,从而使固化土抵抗冻胀应力的能力增强。胶结物质同时填充了颗粒间空隙,使进入固化土内部的水分减少,产生的冻胀应力也随之减小。

表 5 冻融循环前后土体抗压强度变化

序号	养护方式	养护 28 d 强度/MPa	10 次冻融循环后强度/MPa	循环后强度变化/%	循环后与标准养护比较/%
1	混合溶液养护	5.52	4.91	-11	152
2	石灰水养护	4.72	3.96	-16	103
3	水中养护	3.93	2.61	-34	34
4	标准养护	3.23	1.95	-40	0

2.3.2 冻融循环后试块的外观特征 图 1 为各养护方式下的试块经冻融循环后的外观特征。由图 1 可以看出,混合溶液与饱和石灰水养护试块经冻融循环后表面仍然保存完整,边角无破损现象。但是水中养

护试块表面冻坏明显,并产生了较明显裂缝。标准养护受冻破坏最严重。试块冻融循环后外观的情况与上述试块强度的变化相一致,即强度损失越小试块表面越完好,而强度损失越大试块表面冻坏越严重。

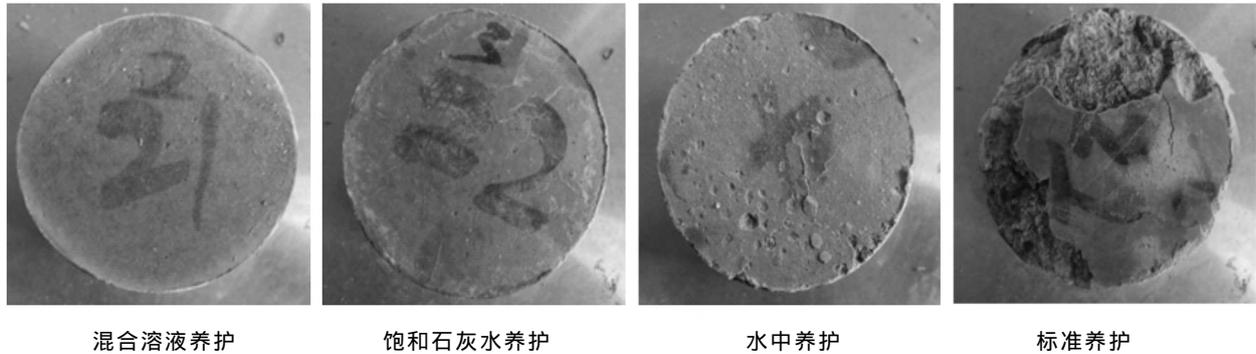


图 1 冻融循环后各养护方式下的试块

2.4 扫描电子显微镜(SEM)试验

各养护方式下试块的扫描电子显微镜图片如图 2 所示。从图 2 可以看出,混合溶液养护试块生成的水化物最多,纤维状结晶向外延伸,产生分叉,且相互连接形成空间蜂窝状结构,针状结晶穿插于蜂窝状结构中。

土颗粒完全被水化凝胶物质包裹,看不到土颗粒的形状、轮廓;饱和石灰水中养护的试块,其水化产物较多,呈团粒状结构。团粒之间针状结晶物较多,纵横交错,将团粒牢固粘结在一起形成了整体;水中养

护的试样以团粒结构为主,伴有小颗粒,间隙较明显;标准养护试块的内部,小颗粒多,大团粒少,间隙大。在颗粒、团粒表面虽有水化物生成,但由于生成的量少,不能有效地将土颗粒连接成整体。分析表明,盐溶液养护使固化土生成更多更致密的凝胶体,进而降低了固化土的孔隙率,减少了固化土的大孔隙。由于固化土的强度、耐久性随孔隙率降低、孔径减小、胶结力增大而提高,因此从微观结构角度出发,混合溶液养护与饱和石灰水养护可以提高固化土的强度与耐久性。

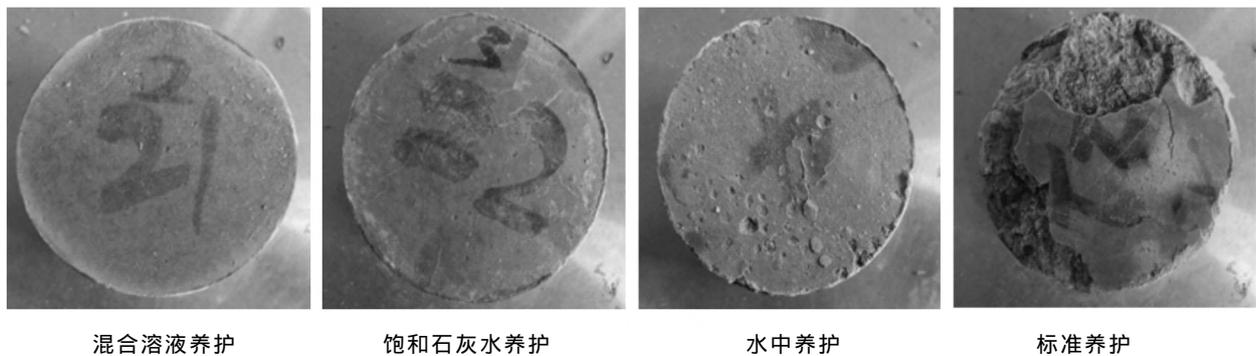


图 2 不同养护方式下固化土的 SEM 图像

3 结论

(1) 混合溶液养护与饱和石灰水养护均可提高固化土的强度、抗干湿循环以及抗冻融循环的耐久性。

(2) 混合溶液养护对强度和耐久性的提高优于饱和石灰水养护。在实际工程中应综合考虑各方面因素,使养护成本与效果最经济。

(3) 从微观结构图中可以看出,混合溶液与饱和石灰水养护使固化土生成了更多更致密的凝胶物质,增加了黏聚力,降低了孔隙率,减少了大孔隙。

(4) 混合溶液与饱和石灰水养护对固化土的强度与耐久性的提高切实有效,有必要结合工程实践做进一步的试验研究。

[参 考 文 献]

- [1] Khattab S A A, Al-Juari K A K, Al-Kiki I M A. Strength, durability and hydraulic properties of clayey soil stabilized with lime and industrial waste lime[J]. Al-Rafidain Engineering, 2008, 16(1): 102-116.
- [2] Khoury N N, Zaman M M. Environmental effects on durability of aggregates stabilized with cementitious materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(1): 41-48.
- [3] Kamei T, Ahmed A, Shibi T. Effect of freeze-thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilised with recycled Bassanite[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 82(10): 124-129.
- [4] Walker P J. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks[J]. Cement and Concrete Composites, 1995, 17(4): 301-310.

- [5] Bin-Shafique S, Rahman K, Yaykiran M, et al. The long-term performance of two fly ash stabilized fine-grained soil subbases[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(10): 666-672.
- [6] Ahmed A, Ugai K. Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 66(2): 84-92.
- [7] Sobhan K, Das B M. Durability of soil-cements against fatigue fracture[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(1): 26-32.
- [8] 贺行洋,陈益民,张文生. 土的组成、结构与固化技术[J]. 岩土工程技术, 2003(3): 129-133.
- [9] 韩苏建,郭敏霞,李宁. 黄土地区渠道防渗固化剂初探[J]. 水土保持通报, 2005, 25(2): 60-62.
- [10] 李圣君,哈图,苏跃宏,等. 固化风沙土抗冻性能试验研究[J]. 低温建筑技术, 2012(8): 4-6.
- [11] 郑军,阎长虹,夏文俊,等. 干湿循环对新型固化土承载强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3051-3056.
- [12] 周永祥,阎培渝. 不同类型盐渍土固化体的干缩与湿胀特性[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1653-1658.
- [13] 张丽萍,张兴昌,孙强. SSA 土壤固化剂对黄土击实、抗剪及渗透特性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 1002-6819.
- [14] 张丽萍,张兴昌,孙强. EN-1 固化剂加固黄土的工程特性及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 60-65.
- [15] 周炜,娄宗科,谭明. 纤维固化土抗渗性试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(6): 96-98.
- [16] Kenai S, Bahar R, Benazzoug M. Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(21): 6956-6964.
- [17] 张巨松,金亮,刘志鑫,等. 硫铝酸盐基土壤固化剂性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2012, 28(1): 116-122.
- [18] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
- [19] 交通部公路科学研究院. JTG/E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2009.

(上接第 112 页)

- [9] 宋丰骥,常庆瑞,钟德燕,等. 黄土丘陵沟壑区土壤微量元素空间变异特征及其影响因素[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 36-42.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
- [11] Cao Zhihong, Zhang Hongcheng. Phosphorus losses to water from lowland rice fields under rice-wheat double cropping system in the Tai Lake region [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26(2): 229-236.
- [12] 杜俊平,廖超英,田联合会,等. 长白山自然保护区土壤重金属含量及其分布特征研究[J]. 西北林学院学报, 2008, 22(3): 84-87.
- [13] 马扶林,宋理明,王建民. 土壤微量元素的研究概述[J]. 青海科技, 2009, 16(3): 32-36.
- [14] 林蔚新. 土壤微肥肥效及有效态微量元素分级[J]. 甘肃科技, 2003, 19(10): 145-145.
- [15] 王建中,陈立,徐建明. 黄土丘陵区不同地貌类型地球化学分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1): 125-130.