

\*\*\*\*\*  
应  
用  
技  
术  
\*\*\*\*\*

# 土壤固化技术应用于戈壁荒漠区 水土保持工程的试验研究

武 晟, 许光照, 谢永平, 胡丽萍

(西北电力设计院, 陕西 西安 710075)

**摘 要:** 依托输变电项目工程, 对高强高耐水土壤固化剂(HEC)应用于戈壁荒漠区 3 种典型土壤的固化效果进行了室内试验研究。试验以无侧限抗压强度要达到 1.5 MPa 为标准, 分别对影响固化效果的养护龄期、固化剂掺量等因素进行了对比分析。结果表明, 在养护龄期 7 d 以上, 固化剂掺量达到 8% 以上时, 固化剂对 3 种土壤的固化效果能够达到设计要求。通过对固化样本的力学性能、渗透性能、干缩性能等测试后表明, 样本的各项性能均能满足输变电路工程的水土保持要求。

**关键词:** 土壤固化剂; 戈壁荒漠区; 水土保持; 室内试验

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)01-0243-03

中图分类号: TU528.004

## Experimental Study of Soil Solidification Technology Applied to Soil and Water Conservation Engineering in Gobi Desert

WU Sheng, XU Guang-zhao, XIE Yong-ping, HU Li-ping

(Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

**Abstract:** Relying on power transmission and transformation project, a laboratory experiment was conducted to study the curing effectiveness of high strength and water stability earth consolidator(HEC) soil stabilizer applied to three typical soils in the Gobi Desert region. The influence factors for the curing effectiveness such as curing age and curing agent content were analyzed at the 1.5 MPa unconfined compressive strength. Results from the laboratory tests show that the curing effectiveness of the three soils meets design requirements when curing period is more than 7 days and hardener volume reaches 8% and above. The tests for mechanical properties, permeability performance and shrinkage performance indicate that all the performances of samples meet soil and water conservation requirements in transmission line project.

**Keywords:** soil stabilizer; Gobi Desert region; soil and water conservation; laboratory experiment

西北戈壁荒漠区干旱少雨, 植被稀少, 土壤盐渍化严重, 输变电工程建设中遇到的水土保持问题较多, 工程建设对地表造成的扰动会使土壤侵蚀模数显著增加, 而内地成熟的水土保持治理经验又无法全盘照搬。主要原因是戈壁荒漠区土壤含盐量较高, 昼夜温差极大, 冷暖交替频繁, 内地采用的混凝土固化技术存在混凝土整体耐久性偏低, 抗冻等级不能满足结构长期耐久安全运行的问题<sup>[1]</sup>, 更无法有效地开展植物敷设措施。

根据工程建设中遇到的实际情况, 在进行了大量对比分析后, 认为土壤固化技术更适合解决西北地区的水土保持问题。土壤固化技术一直是国内外土木

工程领域受到广泛关注和普遍使用的工程技术。该技术兴起于 20 世纪 40 年代, 处理对象主要为固体、半固体物质, 应用目标不仅是加固作用, 还包括增加渗透性, 提高抗冻能力, 防止污染物泄漏等诸多方面<sup>[2]</sup>。国外研究者针对不同土质开发出了不同的土壤固化剂<sup>[3-5]</sup>, 国内的研究主要集中在无机类固化剂的开发和应用方面, 并且取得了一定的进展<sup>[6-11]</sup>。

从现有的土壤固化技术成果来看, 该技术主要有以下适合于西北地区的特点:

(1) 抗化学腐蚀性强。固化体不怕酸、碱的腐蚀, 适用于西北盐渍土。

(2) 耐久性极好。固化体具有优异的水稳定性、

收稿日期: 2012-01-16

修回日期: 2012-03-15

资助项目: 西北电力设计院技术创新项目“水土保持工程中的土壤固化研究”(XB1-JX03-2010)

作者简介: 武晟(1978—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士研究生, 研究方向为电网及火力发电厂环境保护及水土保持设计工作。E-mail: wushenghou@163.com。

抗冻性、抗渗性和耐磨性,适用于西北恶劣气候条件。

(3) 干缩率小,适用于现场直接制备、铺设作业。

根据上述分析,本文对西北戈壁的土石山区、戈壁风沙区和荒漠盐渍土区应用土壤固化剂的固化效果进行了系统的试验研究。

## 1 研究区概况

本项目依托的是 750 kV 吐鲁番—巴音郭楞输电线路工程,工程区植被类型为荒漠草原,属暖温带干旱荒漠气候区。试验对象选择了土壤类型具有代表性的 3 座塔基,分别是:J<sub>30</sub> 塔基,代表戈壁土石山区,岩性主要为角砾、砂土及黏性土;J<sub>111</sub> 塔基,代表戈壁风沙区,以粉土为主;J<sub>112</sub> 塔基,代表盐渍土荒漠区,表层为角砾层。

## 2 固化材料的选择

土壤固化剂种类繁多,按照外观形态可以分为液粉固化剂和粉状固化剂;按照主要成份可以分为无机类、有机类、生物酶类固化剂<sup>[12]</sup>。

从收集的资料看,HEC 高强高耐水土体固化剂(high strength and water stability earth consolidator,简称 HEC 土壤固化剂),是较好的试验材料。该固化剂为无机类土壤固化剂,已大规模应用于三峡水利枢纽、金沙江等电站,京广、京沪等国家重点铁路干线,上海世博园、浦东机场等重点工程,尤其是用于酒泉卫星发射基地火箭场内转运道路工程盐渍土的固化等,这些在西北地区的应用实例,为本研究提供了可以借鉴的经验。

HEC 土壤固化剂是一种无机类水硬性胶凝材料,它的活性组分在常温下直接渗入被固化材料基本单元的相界面,激发被固化材料中铝硅酸盐活性,利用多组分复合产生超叠加效应,使之形成多晶聚集体,将被固化材料基本单元黏结成牢固整体,产生较高强度和水稳定性,最终实现对有害物质的钝化和固封。

HEC 土壤固化剂的性能特点主要有如下几个方面。(1) 固化范围广泛。可代替普通水泥配制混凝土,可固化一般土体,如砂质土、壤土,可固化特殊土,如膨胀土、湿陷性黄土和淤泥,甚至还可以固化工业废渣。(2) 掺量少,固化体性能稳定。HEC 掺量一般为土体干重的 5%~10%,被 HEC 固化的土体早期强度高,为同条件下水泥土强度的 120%~200%,后期强度稳定。(3) 水稳性好,固化后的土体遇水抗压强度基本无变化。(4) 抗冻性能好,耐久性高。通

过上述分析,确定选用 HEC 高强高耐水土体固化剂作为本试验原材料。

## 3 试验设计

试验分 3 个阶段。第 1 阶段是基础试验,对抗动土进行土工试验、土易溶盐含量分析以及不同固化剂掺量的击实试验等,掌握扰动土的土壤类型、颗粒级配、酸碱性以及固化剂固化扰动土的最优含水量等基础参数。第 2 阶段是固化制备试验,以基础参数为控制条件,对抗动土固化样本的养护龄期、固化剂掺量等制备参数进行系统试验,找出最优参数范围。第 3 阶段是对固化样本进行各项性能测试。

根据输电工程塔基的特点,认为固化剂的固化效果应当满足以下要求。

(1) 力学性能。线路塔基的扰动土固化层没有运输道路的负荷要求,只是在线路检修时,存在人员踩踏、检修设备压盖固化层的可能性。经估算,固化层的承重要求也仅为 0.05 MPa 左右。考虑到要保证耐久性需要一定的抗压强度,所以参考《上海市地方标准 第一部分:道路人行道设计要求》,确定本试验固化样本的无侧限抗压强度不小于 1.5 MPa。

(2) 耐久性能。由于固化扰动土的效果没有统一的工程标准,因此与其他工程材料的性能进行对比,分析说明固化样本的耐久性能。

## 4 结果与分析

### 4.1 基础试验

根据土工试验结果,扰动土的土壤粒组含量见表 1,根据粒径级配的不同,3 座塔基处的土壤分别为角砾、粉土和中砂,颗粒级配均良好,有助于固化剂对抗动土的固化。

表 1 不同塔基处平均粒组含量 %

粒径/mm	J <sub>30</sub>	J <sub>111</sub>	J <sub>112</sub>
>20	13.58	0	0
2~20	34.95	1.75	4.59
0.075~2	44.38	42.65	92.69
0.005~0.075	7.13	39.20	
<0.005		16.40	2.73

根据土易溶盐含量分析试验结果,3 处塔基均为碱性土,其中 J<sub>112</sub> 塔基的盐渍土还具有较强的腐蚀性(如表 2 所示)。

通过击实试验结果确定了不同的固化剂掺量条件下,扰动土的最佳含水量和最大干密度,为制备固化样本提供了基本控制条件。

表 2 不同塔基处土壤的化学性质 mg/kg

塔基序号	pH 值	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> × 0.25 + Cl <sup>-</sup>	腐蚀性
J <sub>30</sub>	8.18	480.3	310.2	430.3	无
J <sub>111</sub>	9.02	150.1	243.8	281.3	无
J <sub>112</sub>	8.61	8 0870.5	11 279.8	31 497.4	强

### 4.2 固化制备试验

根据上述基础试验结果,并结合类似工程的经验,以最大干密度,最优含水量,压实度 90%,7 d 养护龄期为控制条件,对扰动土分别添加 6%,8%,10%,12%的 HEC 固化剂,进行强度试验,结果见图 1。可以看出,3 座塔基的固化扰动土在固化剂掺量为 6%时,无侧限抗压强度就可以满足大于 1.5 MPa 的要求。但考虑到实际现场的施工条件,以及较为恶劣的气候条件,为保证土壤固化的耐久性,适宜将固化剂的掺量提高到 8%。

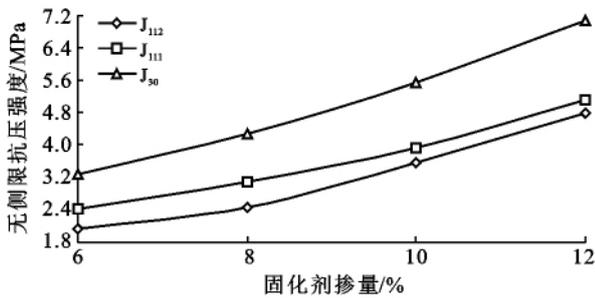


图 1 固化剂掺量与无侧限抗压强度的关系

在 8%的固化剂掺量条件下,进行养护龄期为 7, 2, 90, 180, 270, 360 d 的固化样本无侧限抗压强度试验,结果见图 2。可以看出,7d 的养护龄期就可使无侧限抗压强度达到 1.5 MPa 的要求,与混凝土相比显著缩短了养护周期。

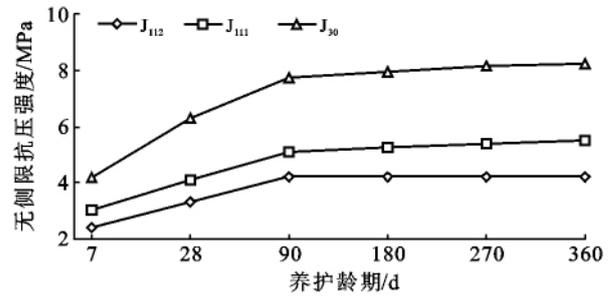


图 2 养护龄期与无侧限抗压强度的关系

### 4.3 性能试验

为了解在 8%的固化剂掺量、养生龄期 7 d 条件下制备的固化样本的耐久性,分别进行了干缩变形,湿胀变形,冻胀变形,渗透试验以及冲刷试验。试验结果与其他工程材料的对比分析见表 3。可以看出,固化样本在干缩、湿胀、冻胀、渗透等方面与道路硅酸盐水泥、高强度楼板、石灰改良软土的性能差别不大,与混凝土的冲磨损失率相比冲刷损失率偏高,考虑到本试验的固化土是以防治水土流失为主要目标,不承担繁重运输任务,所以综合各项性能的比较结果来看,固化样本的耐久性满足对扰动土的水土保持要求。

表 3 不同塔基处土壤性能试验结果与其他工程材料对比分析

对比项	J <sub>30</sub>	J <sub>111</sub>	J <sub>112</sub>	对比值
干缩变形/%	0.13	0.36	0.39	道路硅酸盐水泥 28 d 干缩率 ≤ 0.10%
湿胀变形/%	0.13	0.29	0.30	高强度楼板湿胀率 < 0.19%
冻胀变形/%	0.18	0.44	0.46	地基土 1 级不冻胀的平均冻胀率 ≤ 1%
渗透系数/10 <sup>-7</sup> (cm · s <sup>-1</sup> )	0.96	0.71	1.82	石灰改良软土平均渗透系数 6.71 × 10 <sup>-5</sup> cm/s
冲刷质量损失率/%	1.62	4.78	4.91	混凝土冲磨损失率 0.16% 左右

## 5 结论

从室内试验结果来看,只需 6%的 HEC 固化剂掺量就能使扰动土的固化样本抗压强度达到设计要求,说明该固化剂对戈壁土石山区、风沙区以及盐渍土荒漠区的土壤具有较好的固化能力。考虑到现场实际气候条件等不利因素,为提高固化效果的耐久性,建议将固化剂掺量提高至 8%。从养护龄期来看,龄期控制在 7 d 就能使固化效果满足设计强度要求,若顺利应用于实际工程当中,将显著降低原材料的使用量及人工养护费,并缩短工程周期,而且固化

样本与水泥等其他工程材料相比耐久性差别不大,满足水土保持工程的要求。

室内试验结果为现场试验提供了指导性的数据支持,为现场试验的顺利实施打下了坚实的基础。下一步将对工程现场的固化效果进行现场试验和长期观测,并与室内试验结果进行对比,以期获得室内外试验结果的差异规律,找出切合现场实际情况的施工技术方案,为西北荒漠地区输变电线路工程的水土保持工作提供科学的技术支持。

(下转第 260 页)

- [10] 漆良华,张旭东,彭镇华,等.不同植被恢复模式下中亚热带黄壤坡地土壤微量元素效应[J].应用生态学报,2008,19(4):735-740.
- [11] 张俊云,周德培,李绍才.厚层基材喷射护坡试验研究[J].水土保持通报,2001,21(4):45-48.
- [12] Kleinman P J A, Srinivasan M S, Dell C J, et al. Role of rainfall intensity and hydrology in nutrient transport via surface runoff [J]. Journal of Environmental Quality, 2006,35(4):1248-1259.
- [13] 王辉.降雨条件下黄土坡地养分迁移机理及模拟模型[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [14] 李绍才,孙海龙.我国岩石边坡植被护坡技术现状及发展趋势[J].资源科学,2004,26(8):61-66.
- [15] Tong Juxiu, Yang Jinzhong, Bill X H. Experimental study and mathematical modeling of soluble chemical transfer from unsaturated/saturated soil to surface runoff [J]. Hydrological Processes, 2010,24(21):3065-3073.
- [16] White M J, Storm D E, Philip R B, et al. A quantitative phosphorus loss assessment tool for agricultural fields [J]. Environmental Modelling & Software, 2010,25(10):1121-1129.
- [17] Wang Lingqing, Liang Tao, Kleinman P J A, et al. An experimental study on using rare earth elements to trace phosphorous losses from nonpoint sources[J]. Chemosphere, 2011,85(6):1075-1079.
- [18] Wang Lingqing, Liang Tao, Chong Zhongyi, et al. Effects of soil type on leaching and runoff transport of rare earth elements and phosphorous in laboratory experiments[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2010,18(1):38-45.
- [19] Gao Bin, Walter M T, Steenhuis T S, et al. Investigating raindrop effects on transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff[J]. Journal of Hydrology, 2005,308(1/4):313-320.
- [20] Gao Bin, Todd Walter W, Steenhuis T S, et al. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff theory and experiments [J]. Journal of Hydrology, 2004, 295(1/4):291-304.
- [21] Bosch N S, Allan J D, Dolan D M, et al. Application of the Soil and Water Assessment Tool for six watersheds of Lake Erie: Model parameterization and calibration[J]. Journal of Great Lakes Research, 2011, 37 (2): 263-271.
- [22] 牛明芬,温林钦.可溶性磷损失与径流时间关系模拟研究[J].环境科学,2008,29(9):2580-2085.
- [23] 石德坤.模拟降雨条件下坡地氮流失特征研究[J].水土保持通报,2009,29(5):98-101.
- [24] 吴希媛,张丽萍,张妙仙,等.不同雨强下坡地氮流失特征[J].生态学报,2007,27(11):4576-4582.
- [25] 王全久,穆天亮,王辉.坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(40):176-179.

(上接第 245 页)

[参 考 文 献]

- [1] 李金玉.冻融环境下混凝土结构的耐久性设计与施工[J].水力发电,2004,30(A02):244-252.
- [2] 童彬,李真.土壤固化剂研究进展[J].合肥师范学院学报,2009,27(3):91-93.
- [3] Medina J, Guida H N. Stabilization of lateritic soils with phosphoric acid[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1995, 13(4): 199-216.
- [4] Tomohisa S, Sawa K, Naitoh N. Hedoro hardening treatment by industrial wastes[J]. Zairyo/Journal of the Society of Materials Science Japan, 1995, 44 (503): 1023-1026.
- [5] Zalihe N, Emin G. Improvement of calcareous expansive soils insemi-arid environments[J]. Journal of Arid Environments, 2001,47(4):453-463.
- [6] 梁文泉.土壤固化剂的性能及机理研究[J].武汉水利电力大学学报,1995,10(6):71-75.
- [7] 崔德山.离子土壤固化剂对武汉红色黏土结合水作用机理研究[D].武汉:中国地质大学,2009.
- [8] 贺立军,唐雪云. HEC 固化剂加固膨胀土试验研究[J].人民黄河,2010,32(9):148-149.
- [9] 刘清秉,项伟,张伟锋,等.离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究[J].岩土力学,2009,30(8):2286-2290.
- [10] 彭波,李文瑛,陈忠达.固化剂加固土性能的研究[J].内蒙古公路与运输,2001,67(1):27-29.
- [11] 季节,张志新.加固土路用性能的评价[J].北京建筑工程学院学报,2001,17(2):44-46.
- [12] 樊恒辉,高建恩,吴普特.土壤固化剂研究现状与展望[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(2):141-143.