

# 水硬性石灰改性土修复加固材料性能研究

孙延忠

(中国文化遗产研究院, 北京 100029)

**摘要:** 针对土遗址土体坍塌、残缺等病害,为选择更好的土遗址修复加固材料,通过遗址土中添加水硬性石灰进行改性,分析检测水硬性石灰改性土修复材料的性能,并与石灰改性土材料性能进行对比分析。研究表明,与石灰改性土性能相比,水硬性石灰改性土修复材料夯土收缩率小、水稳定性好、抗压强度大和强度增加快、耐冻融性好;其性能优于石灰改性土材料的性能,适合土遗址土体坍塌、残损病害的修补加固,其研究成果为土遗址的保护修复加固提供科学依据。

**关键词:** 水硬性石灰;改性土;修复材料;性能研究

**中图分类号:** K878 **文献标识码:** A

## 0 引言

中国土遗址规模巨大、数量众多,是悠久历史、灿烂文化的载体,是文明古国的实物例证。但受本身材质和自然环境因素的影响,土遗址整体保存状况不容乐观,且土遗址保护是世界公认的难题<sup>[1]</sup>。土遗址发掘后受自然环境因素和人为因素的影响,尤其是露天保存的土遗址,土体坍塌残损是土遗址常见的病害,坍塌一般是裂隙发展到一定时期后的作用结果,是影响土遗址长期保存的关键性病害<sup>[2]</sup>,直接关系到土遗址的稳定性和安全性。土体坍塌病害如果得不到控制,将直接导致文物主体的毁灭性破坏。目前针对土遗址风化病害主要采用PS及有机化学材料等进行保护加固,取得较好的加固效果;但对坍塌土体病害采用传统灰土夯实或土砖等加固措施,效果不太理想。因此开展土遗址土体坍塌、残损病害的保护加固修复材料研究是土遗址保护的核心工作,其中关键技术是改性土修复材料性能的研究,其研究成果将对土遗址保护具有重要意义。

水硬性石灰具有与水接触后先产生水硬过程和后产生气硬过程的自我修复特性。即早期与水接触后先产生水硬过程而快速凝固,且强度也迅速增长,接而产生的气硬过程有很好的自我修复作用,使强度逐渐增长。这一过程使水硬性石灰产生多孔隙,使其具有较好的透水气性,与被加固修复对象的性

能兼容性好。水硬性石灰既有水硬性,又具有气硬性,因此它有水泥和气硬性石灰不可替代的特殊性<sup>[3-6]</sup>。水硬性石灰作为胶结材料,可以根据加固对象的材质、结构及强度性能等,选择骨料配比,适应加固对象的结构、形态、色泽及力学性能、膨胀系数等。可以广泛应用于开裂文物的加固、修复,石窟岩体裂隙的灌浆加固,土遗址开裂裂隙的修复加固,壁画地仗层的修复加固,砖石文物的修复保护等,应用前景广泛<sup>[7]</sup>。本研究利用水硬性石灰对遗址土改性,研究改性土材料的性能,筛选出土体坍塌修复加固改性土材料配方和配比,为土遗址相似病害治理提供技术支持。

## 1 材料与方法

1) 材料。水硬性石灰(NHL2)、熟石灰。根据传统灰土3:7、2:8、1:9(体积比),本试验选用了水硬性石灰灰质量分数6%、10%、15%的进行改性土性能研究。

2) 遗址土。选取两种不同土质的遗址土,粉质粘土和粉土。将土在室内风干,再将碾碎的土过3mm筛。

3) 土样养护条件。恒温恒湿箱(25℃,80%)。

4) 制样依据。根据《土工试验方法标准》GB/T50123-1999,重塑样的制备方法,进行击实试验,确定最佳含水率及最大干密度;根据击实试验结果制备标准土柱和环刀样。

5) 检测指标。根据《土工试验方法标准》GB/T50123-1999,对不同养护龄期的改性土样进行收缩率、吸水率、水稳定性、抗压强度和冻融试验,以检测水硬性石灰改性土材料的性能。

## 2 试验结果

### 2.1 改性土颜色

改性土土样凉干后,观察外观颜色变化,照片见图1。

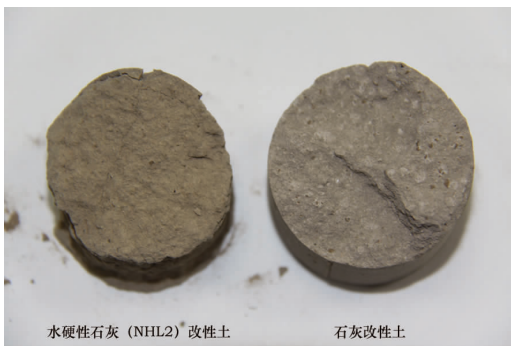


图1 改性土颜色

Fig. 1 Colour of modified soil

外观颜色上,石灰改性土颜色发白,而水硬性石灰改性土颜色变化不大。主要由于石灰颜色发白,水硬性石灰呈灰色,导致石灰改性土颜色发白,水硬性石灰改性土颜色变化较小。因此石灰改性土作为修复材料对遗址夯土的外观颜色将造成影响。

### 2.2 收缩率

对养护 60d 的土柱样进行收缩率检测,对比分析纯土、水硬性石灰改性土、石灰改性土的收缩率,分析趋势图见图2。

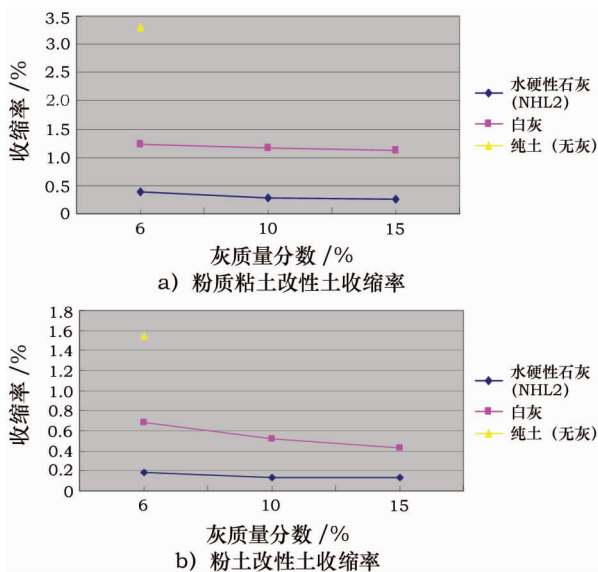


图2 改性土收缩率分析图

Fig. 2 Shrinkage rate of modified soil

1) 粉质粘土及石灰改性土在养护过程出现土样开裂现象,而水硬性石灰改性土土样在养护过程无开裂出现。

2) 改性土材料的收缩率明显小于纯土的收缩率。收缩率随着改性土灰质量分数的增加而降低。水硬性石灰改性土材料收缩率最小,明显低于石灰改性土的收缩率。

3) 粉土改性土的收缩率明显小于粉质粘土改性土的收缩率。

### 2.3 水稳定性(耐崩解性)

对养护 28d 的水硬性石灰及石灰改性土土样进行浸泡试验,测试改性土的耐崩解性和水稳定性,具体见图3。



图3 改性土土样养护 28d 的耐崩解性

Fig. 3 Good water stability of modified soil after maintaining 28d

图3显示,纯土水稳定性最差,浸泡到水中马上崩塌。改性土的耐崩解性较好,表明改性土水稳定性较好。养护 28d 的石灰改性土崩解速度较慢,最后也完全崩解。而水硬性石灰改性土耐崩解性较好,除水硬性石灰质量分数 6% 的改性土稍有掉渣现象外,其他保存较完整。总之,改性土材料水稳定性好于纯土的水稳定性,水硬性石灰改性土的水稳定性好于石灰改性土的水稳定性。

### 2.4 吸水率

对养护 60d 的水硬性石灰改性土土样进行吸水

率测试,检测结果见图4。

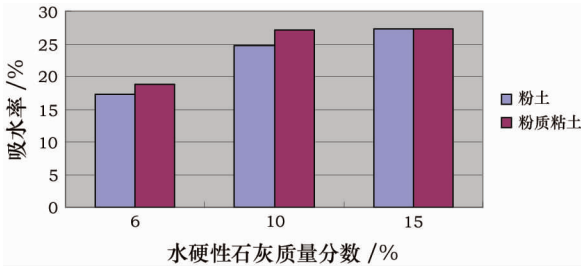


图4 水硬性石灰改性土的吸水率(养护60d)

Fig.4 Water absorption of modified soil after maintaining 60d

图4表明,随着水硬性石灰质量分数的提高,改性土材料的吸水率增加,主要由于灰质量分数增加,夯土密实度降低,导致孔隙率增加。

### 2.5 抗压强度(土柱)

对养护7d、28d、60d、90d、180d和270d后,进行抗压强度检测。抗压趋势见图5。

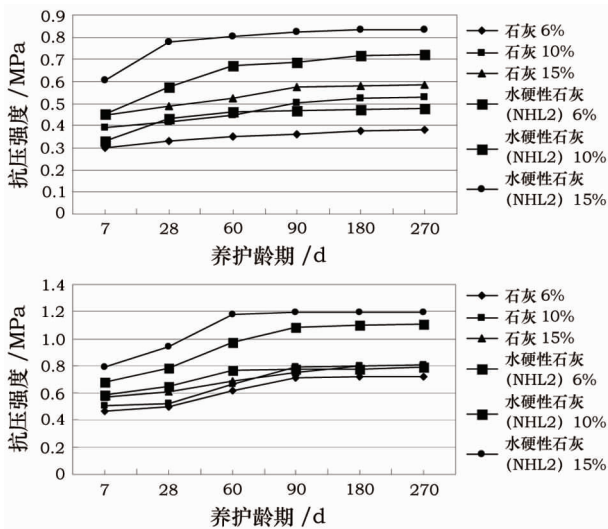


图5 改性土抗压强度变化趋势图

Fig.5 High compressive strength of modified soil

图5表明,粉土原状土抗压强度为0.257MPa,粉质粘土原状土抗压强度为0.452MPa。石灰改性土和水硬性石灰改性土的抗压强度大于原状土的抗压强度,且改性土材料的抗压强度早期阶段随养护时间的延长而增加。水硬性石灰的抗压强度明显大于石灰改性土的强度,尤其早期强度。且养护90d前,水硬性石灰改性土抗压强度增加较快,而石灰改性土抗压强度增加较慢。主要由于水硬性石灰含有水硬成分,对早期强度的提高有利。养护到90d后,改性土的抗压强度增加较缓慢。石灰改性土土柱抗压时呈外层壳破坏,而水硬性石灰改性土呈竖向碎裂,说明石灰改性土气硬反应导致土柱外层形成一

层硬壳。

### 2.6 冻融实验

对养护90d的改性土土柱进行冻融试验(-30℃冻24h,溶解48h,属于一个循环),冻融20个循环,检测土样的耐冻性,冻融照片见表1和图6。

表1 改性土土柱耐冻性质量变化

Table 1 Weight change of modified soil after freezing

材料	质量分数/%	质量减少/g	外观变化
石灰	6	23.4	土柱破损较严重,6%土柱已严重变形,表面脱落严重,且有裂纹。
	10	13.5	
	15	7.6	
水硬性石灰(NHL2)	6	11.2	土柱保存较完整,只有6%土柱顶部脱落较严重,且表面有小裂纹,10%和15%土柱保存较好,表面局部有脱落。
	10	4.9	
	15	2.1	



图6 改性土冻融试验照片

Fig.6 Photo of modified soil after freezing

实验结果表明,经过20个冻融循环,石灰改性土土柱破坏严重,表层脱落及变形较重。而水硬性石灰改性土土柱只有质量分数6%时表层会脱落严重,其他保存较完整,表层脱落较轻。表明水硬性石灰改性土比石灰改性土具有更好的耐冻性。

### 3 结论

1) 水硬性石灰改性土材料外观颜色变化小、收缩率小、不开裂、水稳定性好、抗压强度大,且力学强度增加快。而石灰改性土材料颜色发白、收缩率大、易开裂、水稳定性差,早期强度低等。

2) 水硬性石灰改性土材料比石灰改性土耐冻融性好。

3) 对比分析两种改性土材料的性能,水硬性石灰改性土材料早期性能优于石灰改性土材料的性能,其长期保护修复效果有待于进一步验证。

## 参考文献:

- [1] 孙满利,李最雄,王旭东,等.干旱区土遗址病害的分类研究[J].工程地质学报,2007,15(6):772-778.  
SUN Man-li, LI Zui-xiong, WANG Xu-dong, *et al.* Classification of deteriorations associated with many earthen heritage sites in arid areas of northwest China [J]. J Eng Geol, 2007, 15(6): 772-778.
- [2] 李最雄,赵林毅,孙满利,等.中国丝绸之路土遗址的病害及PS加固[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):1047-1054.  
LI Zui-xiong, ZHAO Li-yi, SUN Man-li, *et al.* Deterioration of earthen sites and consolidation with PS material along silk road of China [J]. Chin J Rock Mech Eng, 2009, 28(5): 1047-1054.
- [3] Struebel G, Kraus K, Kuhl O, *et al.* Hydraulische Kalke fuer die Denkmalpflege [R]. Insitutit Fur Steinkonservierung, 1998.
- [4] Knoefel D, Schubert, P. Handbuch Moertel und Ergaenzungsstoffe in der Denkmalpflege [R]. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1993.
- [5] 彭反三.天然水硬性石灰[J].石灰,2009(3):44-48.  
PENG Fan-san. Natural hydraulic limes [J]. Lime, 2009(3): 44-48.
- [6] 周霄,胡源,王金华,等.水硬性石灰在花山岩画加固保护中的应用研究[J].文物保护与考古科学,2011,23(2):1-7.  
ZHOU Xiao, HU Yuan, WANG Jin-hua, *et al.* Study on hydraulic lime mortar used for consolidation of Huashan rock paintings [J]. Sci Conserv Archaeol, 2011, 23(2): 1-7.
- [7] 李黎,赵林毅,王金华,等.我国古代建筑中两种传统硅酸盐材料的物理力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2120-2127.  
LI Li, ZHAO Lin-yi, WANG Jin-hua, *et al.* Research on physical and mechanical characteristics of two traditional silicate materials Chinese ancient buildings [J]. Chin J Rock Mech Eng, 2011, 30(10): 2120-2127.
- [8] 赵林毅.应用于岩土质文物保护加固的两种传统材料的改性研究[D].兰州大学,2012.  
ZHAO Lin-yi. The modification research of two kinds of traditional materials used on preservation of the stone and earthen cultural relics [D]. Lanzhou University, 2012.
- [9] 王金华,周霄,胡源,等.花山岩画保护与水硬性石灰的应用研究[N].中国文物报,2010-11-26(4).  
WANG Jin-hua, ZHOU Xiao, HU Yuan, *et al.* Conservation of Huashan rock painting and study of NHL [N]. China Cultural Relics News, 2010-11-26(4).
- [10] 李博,宋燕,马清林,等.中国传统灰土灰浆强度增强方法研究[J].中国文物科学研究,2012,3:92-95.  
LI Bo, SONG Yan, MA Qing-lin, *et al.* Research on the intensity strengthening of Chinese traditional lime-clay mortar [J]. China Cult Herit Sci Res, 2012, 3: 92-95.
- [11] 中华人民共和国国家标准. GB/T 50123—1999, 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999.  
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 50123—1999, Standard for soil test method [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.

## Study on the performance of hydraulic lime modified soil materials

SUN Yan-zhong

(Institute of Cultural Heritage Conservation Projects and Planning, Beijing 100029, China)

**Abstract:** This paper describes a study of the performance of hydraulic lime modified soil material for soil site collapse. The research results show that hydraulic lime modified soil material display little color change, a low shrinkage rate, no cracking, good water stability, high compressive strength, good resistance to freezing and good resistance to dry-wet alternations. Compared with the performance of traditional lime, hydraulic lime modified soil materials is more suitable for soil site collapse disease restoration and reinforcement. This research provides scientific basis for protection and restoration of soil sites.

**Key words:** Hydraulic lime; Modified soil; Restorative material; Performances

(责任编辑 马江丽)