

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220811002

文章编号: 1672-9331(2023)03-0118-09

引用格式: 朱才辉, 邱嵩, 张怡冰. 熟石灰-偏高岭土改性土应用于土遗址病害修复[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(3): 118-126.

Citation: ZHU Caihui, QIU Song, ZHANG Yibing. Hydrated lime-metakaolin modified clay applied to soil site disease restoration[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(3): 118-126.

# 熟石灰-偏高岭土改性土应用于土遗址病害修复

朱才辉, 邱嵩, 张怡冰

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要:**【目的】探索适用于修复土遗址病害的改性材料及修复工艺。【方法】在素土(plain soil, P)中添加偏高岭土(metakaolin, MK)和熟石灰(hydrated lime, HL),并基于室内试验研究两者的最优配比及综合工程特性;基于三类夯土墙模型试验研究改性材料的病害修复工艺及修复效果。【结果】1)当偏高岭土与熟石灰质量比为1:1且两者的总占比为20%时,熟石灰-偏高岭土改性土(HL-MK改性土)的孔隙率较素土的大幅降低,其无侧限抗压强度约为素土的4倍,抗渗性能提高100倍,黏结强度是素土的1.2倍,崩解性也显著提高。2)基于夯土墙体掏蚀、表面剥蚀、裂缝三类病害的模型试验,分别提出了砌补、喷涂、注浆的修复工艺。基于上述工艺,墙体修复后的剥蚀率、裂缝扩展速率、温度梯度及湿度梯度显著降低。【结论】本文提出的HL-MK改性土最优配比及相应修复工艺可适用于土遗址病害的修复,能够为半干旱地区的土遗址病害修复提供科学依据。

**关键词:** 土遗址;病害;熟石灰-偏高岭土改性土(HL-MK);最优配比;修复工艺

**中图分类号:** TU58+2

**文献标志码:** A

## 0 引言

随着城市化的加剧及城市空间的扩容,部分土遗址及生土建筑遭到严重破坏,对其保护与修复工作迫在眉睫<sup>[1-3]</sup>。为此,我国于2012年制定实施了《土遗址保护试验技术规范》(WW/T 0039—2012)<sup>[4]</sup>。王旭东等<sup>[5]</sup>系统开展了土遗址的病害机制、修复材料、加固措施、修复工艺等研究,上述研究为土遗址保护工程提供了强有力的理论指导和技术支撑。

以往针对土遗址保护和修复方法的研究主要是对传统材料的改良和对新型修复材料的发掘。石灰浆是古代建筑中常用的胶凝材料<sup>[6]</sup>。谢潇等<sup>[7]</sup>通过向黄土中掺加不同比例的生石灰(quick lime, QL),发现生石灰的加入可使胶结物质附着

在土颗粒骨架之间,使土体孔隙率减少;改性土的抗剪强度随生石灰掺量的增加呈先增大后减小的趋势;当掺量为8%时,抗剪强度指标达到最大,约为素土的5倍。张豫川等<sup>[8]</sup>研究认为生石灰掺入粉质黏土后,能够降低土体的渗透性。胡再强等<sup>[9]</sup>研究认为,熟石灰改性土在冻融循环作用下,石灰的掺量越大,土体抵抗冻融的能力越强。

偏高岭土(metakaolin, MK)主要成分是无水硅酸铝,能够在有水条件下与熟石灰发生火山灰反应,从而获得水硬性,并且强度较高,收缩变形小<sup>[10-14]</sup>。谈云志等<sup>[15]</sup>研究表明,在熟石灰改良红黏土中添加偏高岭土能改善红黏土的水敏性。李鑫等<sup>[16]</sup>研究认为,在粉砂土中添加6%~8%的熟石灰和4%的偏高岭土,能够起到显著的改良作用,其强度提高了7倍。

上述研究表明,熟石灰和偏高岭土能够作为

收稿日期: 2022-08-17; 修回日期: 2022-09-17; 接受日期: 2022-10-17

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2022SF-197)

通信作者: 朱才辉(1983—)(ORCID: 0000-0002-2601-094X),男,教授,主要从事黄土力学与工程方面的研究。

E-mail: anderth123@163.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

土体的改性材料,具有显著提高素土(plain soil,P)工程性能的作用<sup>[17-18]</sup>。而在以往的土遗址表面修复工程中,人们大多采用有机材料对其进行修复,这容易出现相容性差、透气性差、保护时间有限、改变土体外观甚至整体脱落及进一步损坏的劣势<sup>[19]</sup>。目前,针对熟石灰和偏高岭土等改性材料在土遗址及生土建筑的病害修复中研究较少。

鉴于此,本文通过室内试验研究适宜于土遗址病害修复的熟石灰-偏高岭土混合物改性材料(简称HL-MK改性土)的最优配比,对比分析其综合工程性能,进而基于夯土墙病害修复模型试验综合评价其修复效果,为土遗址病害的修复材料及修复工艺提供科学依据。

## 1 材料与试验方法

### 1.1 素土材料

本文所用的素土来自某土遗址周边的第四纪晚更新世(Q<sub>3</sub>)黄土,颜色呈淡黄灰色,土质较为疏松,没有层理,质地较均匀。试验前将土风干后碾压,分别过5和2 mm筛以备用,土的物理指标见表1。

表1 遗址土物理指标

$w_0/\%$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	各颗粒的质量占比/%		
3.0	1.48	33.3	19.9	细粒	粉粒	黏粒
				9.1	76.2	14.7

注: $w_0$ 为初始含水率; $\rho_d$ 为干密度; $w_L$ 为液限; $w_p$ 为塑限。

### 1.2 改性土工程特性试验

本试验所添加的改性材料:熟石灰、偏高岭土和熟石灰-偏高岭土混合物,设改性材料与素土的配比 $\Phi_i$ 为:

$$\Phi_i = \frac{M_i}{M_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\Phi_i$ 为改性材料与素土的配比; $M_i$ 为改性材料的质量,g; $M_s$ 为素土质量,g。

#### 1.2.1 最佳配比试验

改性材料最佳配比主要采用无侧限抗压强度来判定。不同配比下的无侧限抗压强度达到最大值或某个恒定值时,认为该配比为最佳配比。最佳配比试验的控制条件如下:

1) 采用常规应力-应变控制式三轴仪来测定无侧限抗压强度。试样在保湿缸中静置48 h,试

验加载速度1 mm/min。所有素土及改性土的初始状态为:干密度 $\rho_d=1.5 \text{ g/cm}^3$ ,含水率 $w=20\%$ 。

2) 依据土遗址修复基本原则(不改变原有性质,修旧如旧<sup>[19]</sup>),控制改性材料的掺量 $\Phi_i \leq 20\%$ 。改性材料的配比试验方案见表2。

表2 配比试验方案

改性材料类型	配比 $\Phi_i/\%$	$M_{HL}:M_{MK}$
HL	0、5、10、15、20	
MK	0、5、10、15、20	
HL-MK	0、5、10、15、20	7:3、6:4、5:5、4:6、3:7

注: $M_{HL}$ 为熟石灰的质量, $M_{MK}$ 为偏高岭土的质量。

#### 1.2.2 微观结构试验

本研究采用JSM-6700F冷场发射扫描电子显微镜进行改性土的微观结构试验。图像放大倍数为1 000倍。利用PCAS软件进行孔隙特征参数分析。

#### 1.2.3 击实试验

采用轻型击实仪对素土及最优配比下的改性土进行击实试验,获取各自的最优含水率 $w_{op}$ 和最大干密度 $\rho_{dmax}$ ,为后续试验方案的制定确定物理指标。

#### 1.2.4 崩解性试验

采用自行研制的土样崩解仪(见图1),将恒温恒湿下养护28 d后的试样置于静水条件下,开展其浸水崩解量试验。

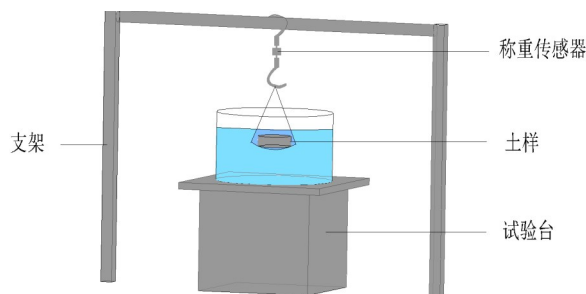


图1 土样崩解仪

Fig. 1 Disintegration instruments of soil

试验前先将土样烘干至其含水率 $w \leq 1\%$ ,静置一段时间称量,将土样挂至铁丝网,浸入没过试样高度的水中,在指定的时间内记录试样在水中的形态变化特征,并读取称重传感器读数,以崩解速率 $v$ 反映改性土的耐水性<sup>[20]</sup>。

$$v = \frac{M_d - M_{ud}}{T} \quad (2)$$

式中: $M_{ud}$ 为未崩解土样的质量,可表示为:

$$M_{ud} = \frac{m_a \rho_{sat}}{\rho_{sat} - \rho_w} \quad (3)$$

式中:  $m_a$  为称重传感器读数, g;  $\rho_{sat}$  为土样的饱和密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_w$  为纯水密度, 1.0 g/cm<sup>3</sup>;  $M_d$  为崩解后土样的质量, g;  $T$  为土样崩解时间, min。

### 1.2.5 渗透试验

试验前, 将土样放入真空仪中充分抽气, 然后采用饱和变水头的方法开展试样的渗透试验。开展6组平行试验, 求其平均值作为渗透系数。

### 1.2.6 浆-土体界面黏结效果评价

先将素土制成 61.8 mm(直径)×10 mm(高)的试样, 置于 61.8 mm(直径)×20 mm(高)的环刀中, 如图 2(a)所示。将制好的土样表面刮毛, 并喷洒水雾湿润。将制好的最优配比下改性材料或素土浆液(水固比为 33%), 充填小环刀, 并震动抹平, 制成 61.8 mm(直径)×20 mm(高)尺寸的试样, 如图 2(b)、2(c)所示。将试样置于保湿缸中养护 28 d, 得到其养护成型的试样, 见图 2(d)。按规范对其进行竖向荷载  $\sigma_c=200$  kPa 的直接剪切试验, 以检验材料的黏结效果。

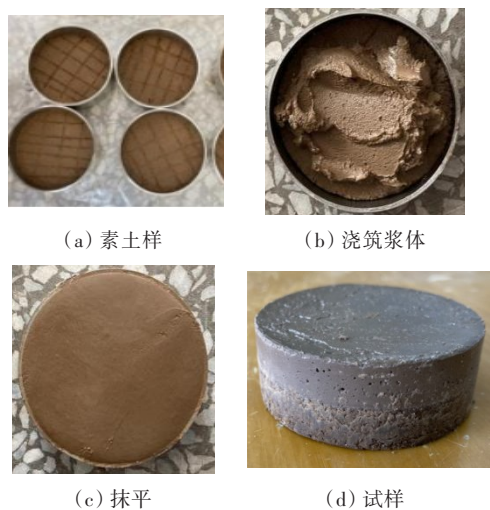


图2 修复材料黏结特性试验

Fig. 2 Restoration material bonding characteristics test

### 1.3 土遗址病害修复模型试验

根据某土遗址规模, 选择缩尺比例为 1:20, 建立其模型试验。模型箱尺寸: 底宽×顶宽×高×纵向长度=0.375 m×0.225 m×0.6 m×0.4 m。选取土遗址周边的素土, 分三层夯筑, 层间刮毛并预埋时域反射技术(time domain reflectometry, TDR)温、湿度传感器, 便于监控其修复前后的温、湿度梯度, 如图 3 所示。

为了模拟土遗址常见病害, 将墙体的掏蚀病害(局部坍塌)、表面剥蚀病害、裂缝病害的模型提前预制好。其中, 墙体掏蚀病害模型采取人工挖除制成; 表面剥蚀病害模型采用鼓风机吹砂剥蚀制成; 裂缝病害模型由人为切割而成。放置一年后, 针对土遗址的病害, 采用不同水固比的 HL-MK 改性土和不同的修复工艺开展病害模型修复试验, 采取观测修复前后的剥蚀特性(剥蚀量)、开裂特性(裂缝扩展率)及温、湿度梯度随时间的变化规律。其中, 剥蚀率  $\eta$  和裂缝扩展速率  $\psi$  定义如下:

$$\eta = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (4)$$

$$\psi = \sum_{i=1}^n \frac{L_i \times W_i}{At} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $\eta$  为剥蚀率, %;  $n$  为剥蚀量, g;  $N$  为模型总质量, g;  $\psi$  为裂缝扩展速率, %/(30 d);  $L_i$  为第  $i$  个裂缝长度, mm;  $W_i$  为第  $i$  个裂缝宽度, mm;  $A$  为模型的顶部表面积, mm<sup>2</sup>;  $i$  为肉眼可见裂缝数目, 条;  $t$  为监测历时, 30 d。

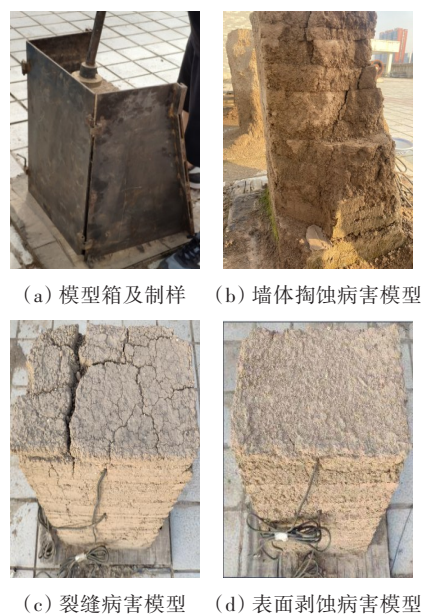


图3 土遗址缩尺模型制造

Fig. 3 Model manufacturing of earthen ruins

## 2 HL-MK 改性土工程特性

### 2.1 HL-MK 改性土的最佳配比

由图 4 可知, 单掺偏高岭土与熟石灰时, 改性土强度均随掺量的增加而增大。其中, 偏高岭土



改性土在 $\Phi_2=20\%$ 时,无侧限抗压强度 $q_u$ 最高可达素土的1.7倍;熟石灰改性土在 $\Phi_1=20\%$ 时,强度最高可达素土的3.2倍;单掺时,熟石灰改性土的加固效果更好,是偏高岭土改性土的1.9倍。

由图5可知,当偏高岭土与熟石灰质量比为5:5且两者在改性土中的总占比为 $\Phi_3=20\%$ 时,其无侧限抗压强度达到峰值,约为素土的3.6倍。综合考虑单掺、复掺强度峰值可认为 $M_{MK}:M_{HL}=1:1, \Phi_3=20\%$ 为改性土的最优配比。

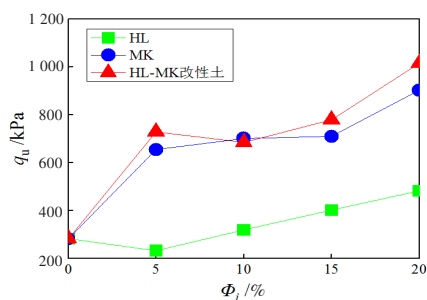


图4 不同配比下改性土的无侧限抗压强度

Fig. 4 Unconfined compressive strength of modified soil with different ratios

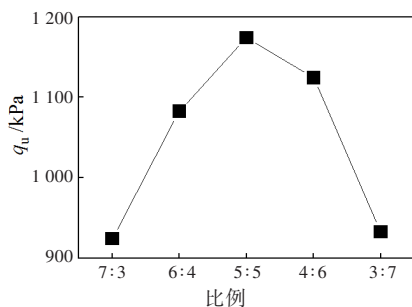
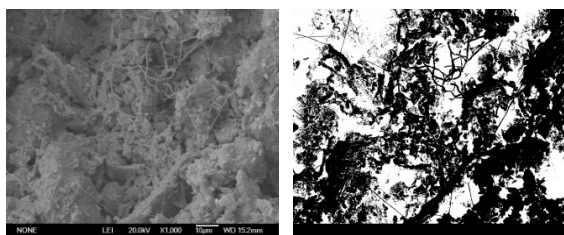


图5 复掺时不同比例改性土的强度

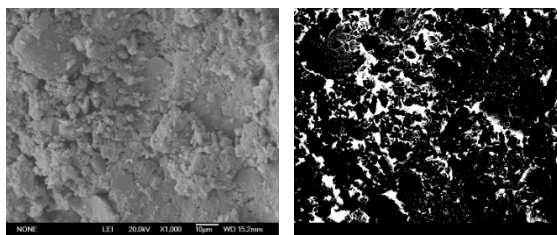
Fig. 5 Strength of modified soil with different proportions when compounded

## 2.2 微观结构对比分析

根据上述最优配比结果,将素土与HL-MK改性土的微观结构进行对比分析,见图6。



(a) 素土的微观结构



(b) HL-MK改性土的微观结构

图6 素土及改性土微观结构

Fig. 6 Microstructure of P and HL-MK

将上述微观结构SEM照片通过PCAS软件进一步分析两种土的微观结构参数,见表3。

表3 微观结构定量分析

Table 3 Quantitative analysis of microstructure

类型	孔隙率/%	定向概率熵	分形维数
素土	35.65	0.995	1.199
HL-MK改性土	11.64	0.991	1.219

从图6、表3对比可见,HL-MK改性土的孔隙比素土的要少,素土中有纤维状结构存在,在HL-MK改性土中未发现,这表明泥浆凝固过程中,素土的体积收缩要比HL-MK改性土的大,内部不密实。HL-MK改性土的孔隙率较素土的减小67%,HL-MK改性土的定向概率熵比素土的减少了0.004,土样骨架的排列方式发生了改变,使得定向性提高;HL-MK改性土的分形维数相比素土的增大0.02,使得土样孔隙边界复杂性提高。可见,改性材料的添加,对土微观结构有着较大的影响,更利于改善土体的强度、耐水性、抗渗透性。

## 2.3 击实特性对比分析

由图7可知:素土的最优含水率 $w_{op}=19.6\%$ ,最大干密度 $\rho_{dmax}=1.65 \text{ g/cm}^3$ ;HL-MK改性土最优含水率 $w_{op}=27\%$ ,最大干密度 $\rho_{dmax}=1.55 \text{ g/cm}^3$ 。改性材料的添加使得土体的最优含水率增加,最大干密度减小。

## 2.4 崩解性对比分析

根据前文的试验方法,可得到素土与HL-MK改性土的崩解形态如表4所示,其称重传感器读数如图8所示。由表4可知,素土浸水后,立即吸收水分,在表层产生气泡,并在边缘处剥蚀脱落。3 min后,表面出现轻微的局部凸起,30 min后,中、下段出现严重的裂缝,试样已经被完全破坏,可见素土在静水条件下抗崩解性较差。HL-MK改性土试样浸水后,土样在前3 min有轻微的气泡,缓慢

吸水。但经过长达 30 min 的浸水,除边角处有少许脱落外,试样基本完整,表明抗崩解性较好。由图 8 可知,素土试样崩解速率为 0.65 g/min,HL-MK 改性土试样的崩解速率为 0.08 g/min。在静水条件下,改性土的抗崩解性大幅度改善,是素土的 8.2 倍。

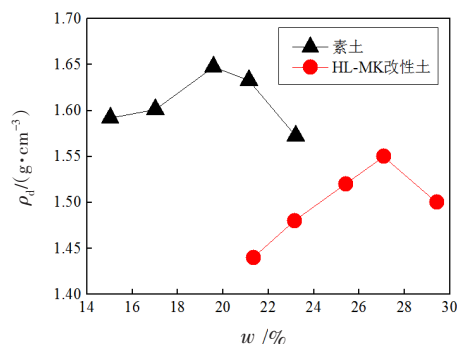


图7 土体击实曲线

Fig. 7 Soil compaction curve

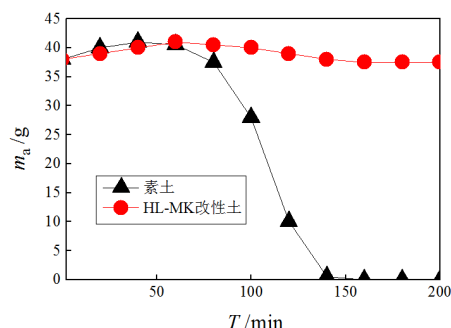


图8 称重传感器读数

Fig. 8 Load cell reading

表4 素土与 HL-MK 改性土的崩解形态

Table 4 Disintegration patterns of plain soil and HL-MK modified soil

时间	素土	HL-MK 改性土	时间	素土	HL-MK 改性土
0 min			10 min		
3 min			30 min		

## 2.5 抗渗性对比分析

根据素土和 HL-MK 改性土试样的饱和渗透试验对比可知,素土渗透系数  $K_p=3.2\times 10^{-5}$  cm/s,改性土渗透系数  $K_{HL-MK}=3.3\times 10^{-7}$  cm/s,改性土的渗透系数约为素土的 1%,由于改性材料在结构内部与土颗粒发生了复杂的物理化学反应,使其强度提高且空隙得到好的填充,使得结构更紧密。

## 2.6 黏结特性对比

根据前文的检验方法,得到了不同浆-土体黏结界面处的抗剪强度与剪切应变曲线对比曲线,如图 9 所示。

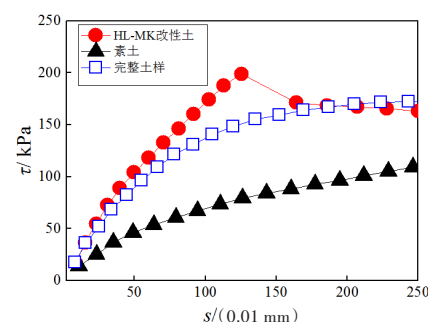


图9 不同黏结材料界面抗剪强度特性对比曲线

Fig. 9 Comparison curves of interface shear strength characteristics of different bonding materials

由图 9 可知:完整素土样的抗剪强度为 172 kPa。素土材料作为黏结界面试样的剪切强度为 127 kPa,而 HL-MK 改性土作为界面黏结材料后试样的强度高达 198 kPa,是完整素土土样的 1.2 倍,可见 HL-MK 改性土的黏结效果更佳。

### 3 土遗址病害修复效果评价

#### 3.1 土遗址病害修复工艺

土遗址病害包括:墙体掏蚀(局部坍塌)病害、表面剥蚀病害、裂缝病害。针对上述3类病害,采取的修复工艺分如下:

##### 1) 砌补修复法。

针对墙体掏蚀(局部坍塌)的遗址病害,采用砌补法修复,工艺流程如图10所示。具体操作流程为:首先采用HL-MK改性土提前制备成膏状体(水固比为33%)和素土砖;再将素土砖通过HL-MK改性土膏状体黏结堆砌,逐层堆砌直至修复完毕。堆砌过程中,素土砖要“里外咬槎,上下层错缝”,严禁用水冲浆灌缝的方法,边角处尽量用完整砖块。

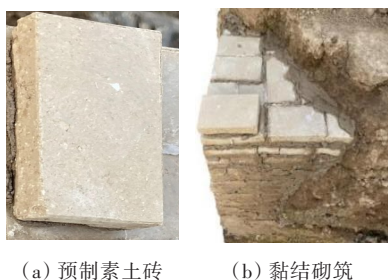


图10 砌补修复工艺

Fig. 10 Repair process of laying adobe

##### 2) 喷涂修复法。

具体操作流程为:采用HL-MK改性土制备水固比为40%的浆液,采用喷浆机将浆液喷涂到发生表面剥蚀病害的土遗址表面。喷浆机的压力控制由遗址本身的稳定性决定,不宜过大,防止对遗址本身造成结构性损伤。喷杆和遗址本身的距离根据喷射压力而定,以0.5~1.0 m为宜。修复工艺如图11所示。

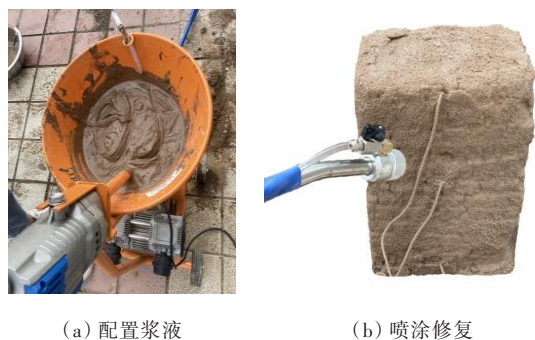


图11 表面喷涂修复工艺

Fig. 11 Repair process of surface spraying

##### 3) 注浆修复法。

具体操作流程为:首先采用HL-MK改性土制备水固比为40%的浆液以备用,再清理土遗址裂缝周边的渣土,将原有裂缝剔成“V”形凹槽,将清理干净“V”形凹槽内洒水浸润,洒水时应将出水口调成雾状,以裂隙侧壁湿润而无水流淌为宜。修复工艺如图12所示。

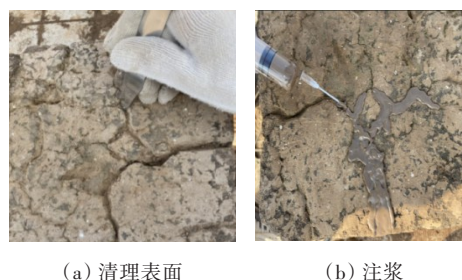


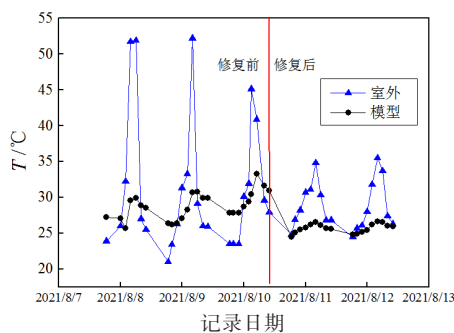
图12 注浆修复工艺

Fig. 12 Repair process of grouting

#### 3.2 土遗址修复前后效果对比分析

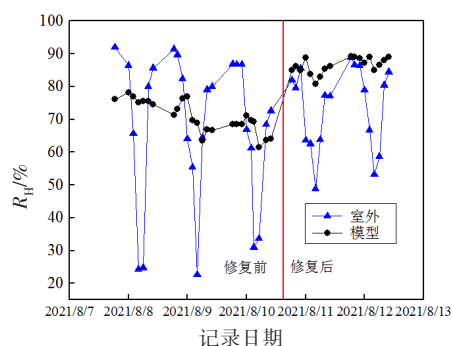
在采用砌补修复法针对土遗址模型修复完成后,通过之前埋置的时域反射(time domain reflectometry, TDR)探头,本文对模型内部的温度、湿度(含水率)进行长期监测(由于篇幅有限,仅展示第一种修复方法下修复效果的试验结果),如图13所示。对修复前后模型的剥蚀率、裂缝扩展率进行检测,结果如图14所示。

由图13可知:室外环境温度、湿度变化幅度最大,其温度为20~55℃,湿度为20%~95%,而土遗址模型在修复之前其内部温度为25~35℃,湿度为60%~80%,受环境影响较大;修复后,土遗址模型的内部温度为23~28℃、湿度为80%~90%,可见,土遗址模型经采用HL-MK改性土修复后,其内部温湿度变化幅度较修复前显著减小,表明其受外界环境的影响程度降低,能量交换显著减弱。



(a) 修复前后温度变化



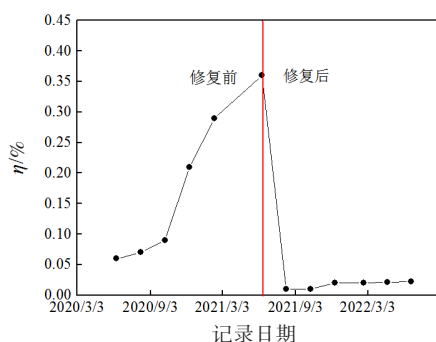


(b) 修复前后湿度变化

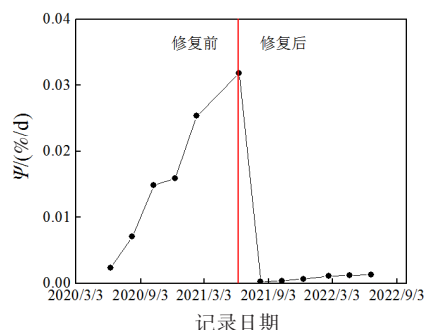
图13 修复前后土遗址模型温-湿度变化规律

Fig. 13 Variation regularity of temperature-humidity of earthen ruins model before and after restoration

由图14可知,土遗址经修复后,其剥蚀率、裂缝扩展率大幅度降低,其中,剥蚀率由原来最高的0.36%下降到0.02%,裂缝扩展速率由最高的0.03%/d下降到0.001%/d,尽管修复后期土遗址的剥蚀率、裂缝扩展速率略有上升,但其上升速度明显比修复前的缓慢。



(a) 修复前后剥蚀率变化



(b) 修复前后裂缝扩展速率变化

图14 修复前后土遗址模型剥蚀与裂缝变化规律

Fig. 14 Variation regularity of denudation and crack of earthen ruins model before and after restoration

综上所述,采用HL-MK改性土修复后,土遗址的内部温度、湿度受外界环境的影响明显下降,

且剥蚀率、裂缝扩展率较修复前的显著降低。这表明本文提出的HL-MK改性土能对土遗址病害进行修复,有利于土遗址及土遗址的保护和保存。

## 4 结论

1) 当改性材料中偏高岭土与熟石灰质量比为1:1,且改性材料的配比 $\Phi=20\%$ 时,形成的HL-MK改性土的配比达到最优状态。

2) HL-MK改性土的微观结构显示,其孔隙率相对于素土的显著降低;其颗粒骨架排列更加定向化,孔隙边界复杂性更高。HL-MK改性土无侧限抗压强度为素土的4倍,抗渗性较素土的可提高两个数量级,抗崩解性也显著提高,HL-MK浆液的黏结强度约为素土泥浆的1.2倍。

3) 针对土遗址三类病害(墙体掏蚀(局部坍塌)、表面剥蚀、裂缝)分别提出了砌补法、喷涂法和注浆法修复工艺。采用HL-MK改性土修复土遗址病害后,显著降低了外界环境与土遗址内部的能量交换,这对土遗址的保护具有重要意义。模型试验研究证实,HL-MK改性土对土遗址病害的修复效果较好,但由于未针对实际工程开展现场试验研究,本研究仍存在一定的局限性,希望在将来的研究中,在工程实际应用的验证方面进行进一步探讨。

## [参考文献]

- [1] 王旭东.中国西北干旱环境下石窟与土建筑遗址址保护加固研究[D].兰州:兰州大学.DOI:10.7666/d.Y488668.  
WANG Xudong.Study on protection and reinforcement of grottoes and earth building sites in northwest China under drought environment [D]. Lanzhou: Lanzhou university.DOI:10.7666/d.Y488668.
- [2] ICOMOS, the Nara Document on Authentic it, the Venice Charter, the Declaration of San Antonio, <http://www.international.icomos.org>.
- [3] 国家文物局.国际保护文化遗产法律文件选编[M].北京:紫禁城出版社,1998.  
State Administration of Cultural Heritage.Selected legal documents of international protection of cultural heritage [M].Beijing:Forbidden City Press,1998.
- [4] 国家文物局.土遗址保护试验规范:WW/T 0039—2012[S].北京:文物出版社,2012.

- State Administration of Cultural Heritage of the People's Republic of China. Testing techniques specifications for preservation of earthen sites: WW/T 0039—2012[S]. Beijing: Forbidden City Press, 2012.
- [5] 王旭东,李最雄,湛文武.土遗址保护关键技术研究[M].北京:科学出版社,2013.
- WANG Xudong, LI Zuixiong, CHEN Wenwu. Research on key technologies of soil site protection[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [6] RODRIGUES P F, HENRIQUES F M. Current mortars in conservation: an overview[J]. Restoration of Buildings Monuments, 2004, 10(6): 609–622. DOI: <http://hdl.handle.net/10362/1744>.
- [7] 谢潇,王璐瑶,邓乐娟,等.生石灰改良黄土的微观机制试验研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(6): 193–199. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.023.
- XIE Xiao, WANG Luyao, DENG Lejuan, et al. Study on the microscopic mechanism of the loess improved by quicklime[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6): 193–199. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.023.
- [8] 张豫川,姚永国,周泓.长龄期改良黄土抗剪强度与渗透性试验研究[J].岩土力学,2017,38(S2): 170–176. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S2.023.
- ZHANG Yuchuan, YAO Yongguo, ZHOU Hong. Experimental study of shear strength and permeability of improved loess with long age[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2): 170–176. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S2.023.
- [9] 胡再强,梁志超,吴传意,等.冻融循环作用下石灰改性黄土的力学特性试验研究[J].土木工程学报,2019,52(S1): 211–217. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2019.s1.027.
- HU Zaiqiang, LIANG Zhichao, WU Chuanyi, et al. Experimental study on mechanical properties of lime modified loess under freeze-thaw cycle[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 211–217. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2019.s1.027.
- [10] 黄戡,李依,闫志刚,等.基于正交设计的石膏砂浆高岭土相似材料试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2018,15(4): 38–44. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.04.006.
- HUANG Kan, LI Yi, YAN Zhigang, et al. Experimental study on gypsum mortar Kaolin similar materials[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(4): 38–44. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.04.006.
- [11] 何叶从,周欢.武汉市梅雨季节农村住宅建筑围护结构影响因素[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(1): 102–110. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.01.013.
- HE Yecong, ZHOU Huan. Influence factors of building envelope condensation in rural residences in Wuhan during plum rain season[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1): 102–110. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.01.013.
- [12] ARIZZI A, VILES H, CULTRONE G. Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 807–818. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.059.
- [13] 宋彦军,周振君.石灰-偏高岭土修复性砂浆的研究进展[J].世界科技研究与发展,2017,39(1): 39–44. DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2017.02.004.
- SONG Yanjun, ZHOU Zhenjun. Research progress of lime-metakaolin restoration mortars[J]. World Sci-Tech R&D, 2017, 39(1): 39–44. DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2017.02.004.
- [14] NEŽERKA V, SLÍŽKOVÁ Z, TESÁREK P, et al. Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 64: 17–29. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.06.006.
- [15] 谈云志,胡焱,曹玲,等.偏高岭土协同石灰钝化红黏土水敏性的机制[J].岩土力学,2020,41(7): 2207–2214, 2282. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1316.
- TAN Yunzhi, HU Yan, CAO Ling, et al. Mechanism of metakaolin and lime modification of water sensitivity for compacted laterite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2207–2214, 2282. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1316.
- [16] 李鑫,赵刚,李新明,等.新型土遗址修复加固材料试验研究[J].中国文化遗产,2021(4): 82–86.
- LI Xin, ZHAO Gang, LI Xinming, et al. Experimental study on new materials for repairing and strengthening earth sites[J]. China Cultural Heritage, 2021(4): 82–86.
- [17] 陈金威,刘勇,石苏意,等.不同掺料泡沫轻质土的强度特性[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2016,13(4): 15–22. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2016.04.003.
- CHEN Jinwei, LIU Yong, SHI Suyi, et al. Strength characteristics of foam lightweight soil with different admixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 13(4): 15–22. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2016.04.003.
- [18] 贺炜,文为,孙淼.非饱和土与混凝土界面摩擦特性试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2011,8(3): 28–32. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2011.03.006.
- HE Wei, WEN Wei, SUN Miao. Experimental study of



- shearing behavior of interface between unsaturated soil and concrete [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2011, 8(3): 28-32. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2011.03.006.
- [19] 杨富巍. 无机胶凝材料在不可移动文物保护中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.  
YANG Fuwei. Application of inorganic cementitious materials in the protection of immovable cultural relics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [20] 许元珺. 黄土振动四促效应研究-机车振动促裂、促崩(解)、促渗、促滑效应[D]. 西安: 西北大学, 2021. DOI: 10.27405/d.cnki.gxbdu.2021.002220.  
XU Yuanjun. Study on four promoting effects of loess vibration-locomotive vibration promoting crack, collapse (solution), infiltration and sliding [D]. Xi'an: Northwest University, 2021. DOI: 10.27405/d.cnki.gxbdu.2021.002220.

## Hydrated lime-metakaolin modified soil applied to soil site disease restoration

ZHU Caihui, QIU Song, ZHANG Yibing

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** [Purposes] This work aims to explore the suitable modified materials and repair process for the protection of earth sites. [Methods] The metakaolin and hydrated lime were added into the plain soil, the optimal ratios of two materials and its comprehensive engineering properties were obtained based on the laboratory tests, and further model experimental studies on their repair effects and process on disease in rammed earth walls were carried out. [Findings] 1) When the ratio of hydrated lime and calcium hydroxide is 1:1 and the proportion of both materials in modified soil is 20%, the porosity of modified soil (HL-MK) are greatly reduced compared with that of plain soil, and the unconfined compressive strength of HL-MK modified soil is about 4 times of that of plain soil, the impermeability is 100 times higher, the bond strength is 1.2 times of that of plain soil, and the disintegration property is 1.2 times of that of plain soil. 2) Based on the model test of rammed earth wall with three types of disease such as partial collapse, surface erosion and cracks, the repair processes of laying adobe, spraying and slurry grouting repair method were proposed. After the repair of diseases in soil sites, the denudation rate, cracks propagation rate, temperature and humidity gradient are greatly reduced. [Conclusions] It can be seen from the above studies that the HL-MK modified soil and the repair process proposed in this paper can be applied to the restoration of soil site diseases, and can provide scientific reference for the restoration of soil site diseases in semi-arid areas.

**Key words:** earthen site; disease; hydrated lime and metakaolin modified soil (HL-MK); optimal ratio; repair process

Manuscript received: 2022-08-11; revised: 2022-09-17; accepted: 2022-10-17

Foundation item: Project(2022SF-197) supported by Key Research and Development of Shaanxi Province

Corresponding author: ZHU Caihui (1983—) (ORCID: 0000-0002-2601-094X), male, professor, research interest: loess mechanics and engineering. E-mail: anderth123@163.com

(责任编辑:赵冰;校对:刘平;英文编辑:栗森)