

硅酸乙酯类加固材料在潮湿环境土遗址 加固保护中的应用研究

朱杰, 蔡乐刚, 郭戈

(上海市房地产科学研究院, 上海 200031)

摘要: 潮湿环境土遗址因含水率高、成分及所处环境复杂等特点, 是文物保护工作中最难保护的文物之一, 深入开展加固保护材料适用性及优化组合研究对于潮湿环境土遗址保护具有现实意义。以上海广富林文化遗址“F12房址”为对象, 选取硅酸乙酯类加固材料 Remmers SAE 300 和 SAE 300E, 对其不同比例配合下的加固效果进行试验研究。通过表观形貌、渗透性、强度及抗水崩解性等指标分析, 结果表明不同比例配合下的加固效果虽存在一定差异, 但均能有效提高土体抗粉化能力和抑制霉菌生长, 且当含水率较低时, 加固作用将显著提高土体无侧向抗压强度和抗剪强度。研究结果对综合评定硅酸乙酯类加固材料在潮湿环境土遗址加固保护中的应用性有参考价值。

关键词: 土遗址; 潮湿环境; 加固保护; 硅酸乙酯类; 加固剂

中图分类号: K928.5 **文献标识码:** A

0 引言

根据赋存环境, 土遗址主要分为两大类: 干旱环境土遗址和潮湿环境土遗址, 针对干旱环境土遗址保护, 国内已开展了广泛研究, 在病害机理、保护加固技术措施方面均有所突破, 已在我国北方地区的一些大型土遗址保护中得到了有效应用^[1]; 对于潮湿环境土遗址, 含水率高、自身成分及所处环境复杂等特征, 其与干旱环境土遗址有明显差别, 保护难度更大。目前, 潮湿环境土遗址研究主要基于潮湿环境概念、保护理念和保护加固材料研制与应用等方面, 也取得了一定成效, 但从国内几个重要的潮湿环境土遗址如良渚文化遗址、金沙遗址等来看, 保护状况依旧不容乐观。因此, 进一步开展潮湿环境土遗址保护研究是文化遗址保护工作中的迫切任务。

潮湿环境土遗址保护面临的主要问题, 也即研究重点, 便是加固保护材料研制与适用性研究。当前, 潮湿环境土遗址加固保护材料繁多, 主要有高模数硅酸钾溶液、有机硅类材料、丙烯酸类保护材料等。许多研究者^[2-4]通过试验研究, 探索各种加固剂在潮湿环境土遗址保护中的加固效果和适用性, 还有学者研制开发新型加固材料, 如魏国锋等^[5]在改进传统的石灰加固剂的基础上, 研制了钙基液态水硬性无机胶凝材料; 汪海港^[6]以 KH-570 和 G04

作为含氟硅改性剂, 以氟、硅单体含量作为变量, 设计合成了有机氟硅改性丙烯酸酯防护材料, 并研究其在潮湿环境土遗址保护中的应用性。另外, 硅酸乙酯是目前唯一大量使用于石质石迹保护的材料, 既有研究^[7-10]表明, 硅酸乙酯类加固材料加固保护潮湿环境土遗址效果良好, 可优先选择进行筛选试验。然而, 现有研究往往注重单一加固材料的加固效果, 而未考虑几种加固材料配合使用的情况, 且在加固材料评价选择试验中, 以重塑土小试样为主, 导致得出的结论与实际使用状况存在偏差。

本研究以上海广富林文化遗址“F12房址”保护工程^[11]为背景, 选取硅酸乙酯类加固材料, 通过取样试验、现场试验研究, 并优选加固保护效果最佳的加固方式, 应用于实践工程, 探索不同配比方式下的加固效果, 综合评定硅酸乙酯类加固材料在潮湿环境土遗址加固保护中的应用性。

1 遗址土体基本特性

试验土样取自“F12房址”房址邻近区域, 按《土工试验方法标准》GB/T 50123-1999 进行测试分析, 结果如表1。

可以看出, 土样含水率达 25.4% (取样前 3 天未降雨), 极为潮湿, 可判断遗址土体属潮湿环境土

遗址^[12]范畴。根据颗粒分析,遗址土体属粉质粘土,且掺杂少许瓷器、瓦片等杂质。

表 1 土样的基本物理性能指标

Table 1 Basic physical property indexes of site soil

土质	含水率/%	湿密度/ $g \cdot cm^{-3}$	干密度/ $g \cdot cm^{-3}$	孔隙率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数/ I_p
粉质粘土	25.4	1.71	1.36	20.27	40.36	24.55	15.81

2 取样试验

取样试验分为重塑土加固试验和取样原状土加固试验,其中,无侧限抗压强度试验和直接剪切试验采用重塑土试样,其余均为取样原状土试样。重塑土加固试验指将土样粉碎过筛处理后,按要求制备标准土样,养护后进行加固作业;取样原状土加固试验是指现场切取房址相邻区域土样,尺寸为长 \times 宽 \times 高 $=30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 20\text{ cm}$,于实验室内养护和加固作用,模拟遗址土经加固作用后的性状变化。

根据课题组已有工程实践经验,加固材料选用德国雷马仕 Remmers 公司生产的加固剂:Antihydro、SAE 300 和 SAE 300E,具体性能见表 2。将两种加固剂按不同比例配合使用,试验加固参数设计如表 3,其中,取样原状土加固试验发现抗湿胀剂 Antihydro 作用后土样表观形貌严重变形,故重塑土加固试验中未考虑相应的加固方案(重塑土加固试验土样

编号如表 3 括号内编号)。

土样经自然养护干燥 3d 后进行加固作业,先喷洒抗湿胀剂 Antihydro,经养护 1 周后再喷洒加固剂 SAE 300、SAE 300E,其中,SAE 300E 采用湿碰湿工艺,并规定 3min 内加固剂不能渗透而在表面滞留作为饱和状态,停止加固。将加固后试样室内自然养护 6 个月,观察土样表观变化和测试强度性能变化。

表 2 试验所用加固材料

Table 2 Consolidate materials used

材料	类别	主要成分	主要溶剂	有效成分浓度	保存状态
Antihydro	抗湿胀剂	烷基铵化合物	水	0.2mol/L	无色液体
SAE 300	加固剂	硅酸乙酯	/	$\geq 99\%$	微黄色液体
SAE 300E	加固剂	硅酸乙酯	乙醇	$\geq 40\%$	微黄色液体

注:抗湿胀剂主要防止加固作用引起土体膨胀开裂,本身并不起加固作用。

表 3 加固试验参数设计

Table 3 Parameter design of consolidate test

试样编号	$S_0(S_A)$	$S_1(S_B)$	S_2	$S_3(S_C)$	S_4	$S_5(S_D)$	S_6	$S_7(S_E)$	S_8
Antihydro	-	-	Δ	-	Δ	-	Δ	-	Δ
SAE 300	-	1	4	4	2	2	1	0	0
SAE 300E	-	0	0	1	1	1	0	1	1
比例	-	1:0	4:1	4:1	2:1	2:1	1:0	0:1	0:1

注:1. Δ 表示喷洒加固剂前喷洒 Antihydro 饱和量;

2. 表中数据为两种加固剂的用量比,如 S_2 表示 Antihydro 饱和量、加固剂 SAE 300 与 SAE 300E 以 4:1 比例剂量使用,具体加固剂量根据土样尺寸分别测试确定,本试验以 $0.11L/mm \cdot m^2$ 为用量参数。

2.1 表观形貌

土遗址加固保护最基本要求是不改变遗址表观形貌。Antihydro 喷洒后第 10 天,土样 S_2 、 S_4 、 S_6 、 S_8 表面均产生霉菌,且后期发霉程度加重(图 1)。其余未经 Antihydro 作用而直接喷洒加固剂的土样,加固表面均未产生霉菌,而未经加固剂作用的下部土体产生白色霉菌,并随天气变化反复产生、消失。

养护 6 个月后观察,土样 S_0 表面颜色变浅,且土质有一定程度粉化;土样 S_1 表面产生两条微细裂纹,最大裂纹宽度约 0.2mm;土样 S_2 表面产生多条微细裂纹,呈网状,且角部霉菌生长部位土体有粉化

现象;土样 S_4 、 S_6 、 S_8 因霉菌生长,表观形貌严重变化;土样 S_3 、 S_5 表观颜色与初始状态基本相同,表层土体未开裂,土质坚硬,无粉化。

进一步养护至约 20 个月,土样 S_0 表面颜色变浅灰,土质粉化严重,表面呈颗粒状,表观形貌有较大变化;土样 S_1 表观颜色与前期基本未变化,土质坚硬;土样 S_2 除多条细裂纹之外,表面颜色变灰,与初始形貌有一定差异;土样 S_4 、 S_6 、 S_8 表观颜色变化很大,分别呈暗黑、粉黄和苍白色,且表层土体存在开裂、分层剥离现象,表观形貌严重变化;土样 S_7 表面有微裂纹,且有 2 处泛白点,其余与初始基本相同;土样 S_3 、

S₅ 表现形貌与前期基本一致,土质坚硬未粉化。

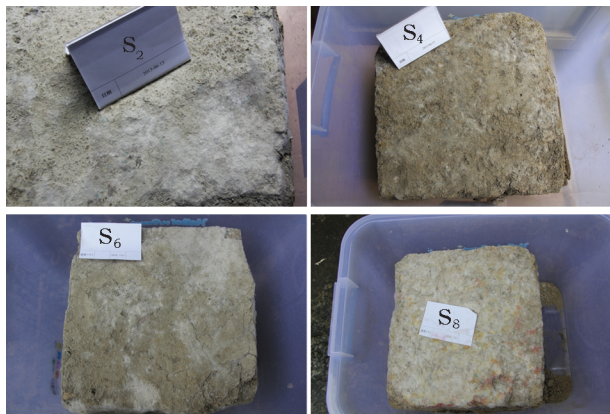


图1 Antihygro 使用后土样发霉

Fig.1 Mildew of the soil samples after using Antihygro

试验分析可得,含水分溶液 Antihygro 喷洒作用,在梅雨季节温湿度高、通风不佳条件下,土体易产生霉菌,当采用含水分除霉剂除霉作用或直接喷洒加固剂,均导致表现形貌严重变化。而加固剂作用可有效抑制霉菌生长和防止土质粉化,主要原因是加固剂与土中水汽反应生成二氧化硅结晶,填充于孔隙中,降低加固土层含水率,阻断土中水汽的流通与反应。

2.2 渗透深度

抗湿涨剂 Antihygro 主要用于表面喷洒,渗透深度达 10mm 即可,试验中并未精确测定。加固剂 SAE 300 和 SAE 300E 渗透深度测定方法为:加固作业完成后开始计时,至 1h 时进行测量,即切除两对边侧面边缘土体各 5mm,测量加固剂渗透最浅和最深两测点,取均值作为渗透深度,实测结果如图 2。

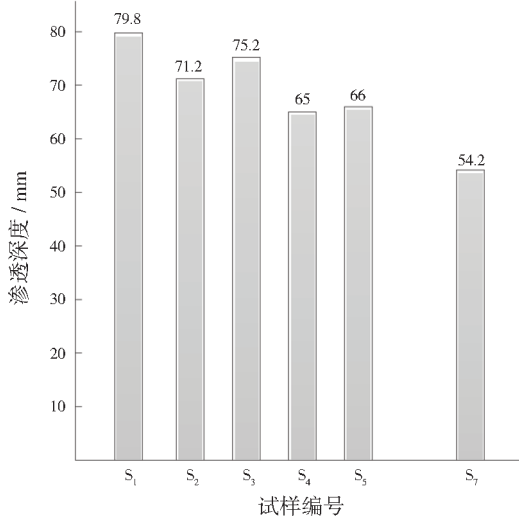


图2 土样表面固化渗透深度测量值

Fig.2 The results of penetration depth

其中,试样 S7 喷洒 0.7L 时便已达饱和状态。从结果看出,按不同比例配合方式进行加固作用,渗透深

度有一定的差异,最大渗透深度可达 79.8mm,最小渗透深度达 54.2mm。由于渗透时间较短,实际渗透深度可能更大,总体认为各配合形式的加固渗透性能较好,均可满足遗址表面加固深度要求。

2.3 表面硬度

硬度是材料软硬程度的定量反映,土体硬度测量尚无相应标准,参照《贯入法检测砌筑砂浆抗压强度技术规程》检测方法定性研究土体经加固作用后的表面硬度变化。因土体贯入深度与表面硬度间相关关系未知,不可将贯入深度转换成土体表面硬度,然而贯入深度与表面硬度间呈反比关系,故将对照组土样的贯入深度作为基准值,将基准值比上加固后土样平均贯入深度作为加固增强系数,则加固增强系数越大,说明加固后土体表面硬度越大,试验值见表 4。

表4 贯入法测定土体表面相对强度

Table 4 Relative strength of the surface soil by penetration method detection technology

土样编号	平均贯入深度/mm	标准差 S/mm	变异系数 C. V/%	加固增强系数
S ₀	11.178	1.389	12.429	1.000
S ₁	6.278	1.018	16.212	1.781
S ₂	13.73	0.449	3.268	0.814
S ₃	7.654	0.685	4.978	1.460
S ₄	10.822	1.252	11.565	1.033
S ₅	7.841	0.624	7.952	1.426
S ₆	8.283	0.482	5.820	1.350
S ₇	8.089	0.669	8.275	1.381
S ₈	8.644	0.791	9.154	1.294

试验发现,测钉形成直径约 4mm 射孔,相邻测点影响较小,从标准差及变异系数来看,各测点差异较小,表明加固作用较均匀,采用贯入法定性测定土体表面硬度是合理的。从表 4 中数据可发现,除试样 S₂,其余试样加固增强系数均较大,即土体表面硬度有所提高,其中,试样 S₁ 固化后表面硬度提高最多,较对照组提高了 78.1%;而试样 S₂ 表面硬度降低,主要原因是 Antihygro 和除霉剂作用后土样表面开裂严重,裂缝交错。

2.4 无侧限抗压强度与抗剪强度

无侧限抗压强度试验和直接剪切试验土样尺寸分别为 $\varphi 39.1\text{mm} \times 80\text{mm}$ 、 $\varphi 61.8\text{mm} \times 20\text{mm}$,初始含水率与房址土样含水率相同,制样加固养护 3 周后进行强度测试,试验结果如表 5。

可以看出,四种加固方案均能有效提高土体的抗压及抗剪能力,其中,S_D、S_E 加固方案对土体无侧限抗压强度的提高较显著,提高率达 36.80% 和

52.00% ;对于抗剪强度, S_D 方案加固作用效果最好,较未加固试样提高了 12.55%。

表 5 无侧限抗压强度试验和直接剪切试验测试结果

Table 5 Results of unconfined compressive strength test and direct shearing test

加固方式	无侧限抗压强度/MPa	提高率/%	抗剪强度/MPa	提高率/%
S_A	1.2159	-	0.3952	-
S_B	1.3331	9.64	0.4081	3.26
S_C	1.5039	23.69	0.4310	9.06
S_D	1.6634	36.80	0.4448	12.55
S_E	1.8481	52.00	0.4127	4.43

注:提高率为加固作用后土样与对照组土样强度的提高比率。

为进一步探究初始含水率对加固效果的影响,选取 S_D 加固方式对不同初始含水率(15%、18%、21%、24%)土样进行加固作用并测试强度(表 6)。

试验数据显示,当初始含水率为 15%~24% 时,未加固土体的无侧向抗压强度和抗剪强度随含

水率增加而增大;经采用 S_D 方案加固作用后,土样初始含水率较低时,无侧限抗压强度和抗剪强度较未加固试样均显著提高,当初始含水率为 15% 时,两者强度分别提高了 85.3% 和 170.6%;而随含水率增大,无侧限抗压强度和抗剪强度提高率呈下降趋势,甚至存在强度削弱现象。另外,对比初始含水率 25.4% 的情况(即表 5 中 S_A 、 S_E 数据),无侧限抗压强度与上述强度变化趋势存在较大差异,可能原因是两组试验土样不同一批次制作,且养护环境(温度)有较大差别。

总体而言,在一定范围内,较高初始含水率的土体,经自然养护干燥后,土粒间连结更紧密,连结强度更高,无侧限抗压强度和抗剪强度相应较大。而加固剂作用改变了土粒间的连结力和微观结构,引起土体强度的改变,特别地,较低初始含水率(15%)水平下,加固后土体强度较未加固土体显著增大。故遗址土加固实施前应进行自然养护干燥,降低表层土体湿度。

表 6 含水率对土样的无侧限抗压强度和抗剪强度影响

Table 6 Results of unconfined compressive strength and shear strength in different moisture content

含水率/%	无侧向抗压强度试验				直接剪切试验			
	未加固/MPa	加固/MPa	增量/MPa	增长率/%	未加固/MPa	加固/MPa	增量/MPa	增长率/%
15	0.422	0.782	0.36	85.3	0.1559	0.4218	0.2659	170.6
18	0.564	0.802	0.238	42.2	0.2989	0.3778	0.0789	26.4
21	0.843	0.967	0.124	14.7	0.3686	0.3943	0.0257	6.97
24	1.38	1.196	-0.184	-13.3	0.4768	0.5649	0.0881	18.5

2.5 抗水崩解性

将取样原状土切成边长 5cm 的立方体试样,加固养护 3 周后进行湿化试验,试验发现,所有土样浸入水中后的变化基本一致,均于角部先出现散落,后逐渐扩展,最后在浸水 48h 左右基本崩解。从表 7 数据看出,经加固作用后,土体抗水崩解性能较未加固土样稍有提高,但效果不显著,可认为加固剂 SAE 300 和 SAE 300E 均无显著防水和抗水崩解性能,不宜作为防水加固剂应用于土遗址加固保护。

另外,文献[2,13]试验结果显示,正硅酸乙酯类加固剂 TEOS、ES 加固遗址土体后耐水性未明显改善;而文献[14]重塑土试验显示经 TEOS 加固后浸泡 1 月而保持完整,文献[15]重塑土试验结果显示正硅酸乙酯 RM300 与无水乙醇按 1:1 比例混合,加固土体后具有极佳的耐水性。主要原因可能为重塑土样时破坏了遗址土体结构,导致加固结果与实际情况产生差异。

因此,当采用硅酸乙酯类加固剂加固土遗址

时,耐水性作为必要要求,应现场试验或取原样土进行湿化试验,探索遗址土体加固后的真实耐水性状。

表 7 土体湿化试验测试结果
Table 7 Results of the soil humidity test

加固方式	崩解量/%				
	1h	6h	12h	24h	48h
S_A	7.8	19.2	42.5	78.5	93.1
S_B	7.4	18.8	41.5	78.0	92.6
S_C	7.3	18.5	40.9	77.5	91.4
S_D	6.9	17.4	39.3	76.0	90.5
S_E	6.7	17.0	38.7	75.4	89.0

3 现场试验

为验核室内环境与现场环境下的加固效果是否一致,综合比较并选取最优加固方案,选取取样试验加固效果较好的加固方式 S_1 、 S_3 、 S_5 、 S_7 (表 3)进行现场加固实验。

3.1 现场试验概况

现场加固试验区域与房址相邻,保证可对比性。由于前期连续降雨一周,土体表面潮湿不利于加固剂喷洒,故在试验区域上方搭建遮阳雨棚自然干燥,并挖导水沟,防止阳光直射与降雨对加固试验的影响。将表面粉尘土去除、划线标记(尺寸 30 cm × 30cm),于 7 月 10 日进行加固剂喷洒(图 3),并记录加固实施前 1 周及实施后 2 周的天气状况(表 8)。



图 3 区块划分与加固作业

Fig. 3 Implement of consolidate word in field test

现场加固试验采用手动喷壶(滴管)方式,按要求量取加固剂并装入容器,控制喷洒速度,将加固材料尽可能均匀地喷洒在试验区块内,由于加固剂为易燃物,作业时天气炎热,需注意安全。作业完毕后正常养护,并定时拍照记录。

表 8 广富林土遗址现场试验期间天气实况
Table 8 The weather condition during the field test

日期 /2013 年	天气	温度/°C	湿度/%	风力/级
07-03	晴	27~48	<20~58	3~4
07-04	晴	27~47	<20~48	3~4
07-05	阴转雷阵雨	27~35	48~73	4~5
07-08	阴转晴	27~36	42~80	2~3
07-09	晴	29~38	40~80	1~2
07-10	晴	28~39	38~78	2~3
07-11	晴	28~37	40~80	-
07-12	晴	27~38	-	-
07-13	阴转多云	27~36	48~78	2~3
07-14	晴	26~37	-	-
07-16	晴	27~37	43~74	1~3
07-17	晴	27~36	43~78	1~3
07-19	多云	29~38	-	3~4
07-20	多云转阵雨	29~37	-	3~4
07-21	多云转阵雨	27~37	46~88	3~4
07-22	多云	25~35	47~89	2~3
07-23	晴	28~38	45~74	2~3

3.2 现场试验加固效果

1) 加固 2 周后。外界因素造成 S_0 区块土体开裂隆起,靠近开裂部位土体表面产生灰黑色霉菌; S_1 区块土体加固区域内未产生霉菌,但划线外部邻近土体产生霉菌,且在角部有点状泛白; S_3 、 S_5 、 S_7 区块

土体表面形貌未显著变化,仅 S_7 区块划线外部邻近未加固土体表面有少量白色霉菌生长。主要原因是期间天气环境恶劣,特大暴雨、闷热、昼夜温湿差大及通风状况不佳,易滋生霉菌,局部未经加固作用土体生长霉菌,而经加固作用的土体未生长霉菌,说明加固剂 SAE 300、SAE 300E 可有效防止霉菌生长,与室内试验结果相同。故建议房址正式实施前,搭建牢固的遮阳棚,并保持良好的通风性。

2) 加固 1 月后。 S_0 区块土体表面霉菌颜色由灰黑色变成淡灰色,表层土体一定程度粉化;其余土样与上期相比未明显变化,划线外部区域白色霉菌反复产生、消失。

3) 加固 3 月后。 S_0 区块土体颜色变黄白,土质粉化严重且表面受潮后产生多条裂纹; S_1 区块土体颜色稍微变淡,角部有 2 条微细裂纹; S_3 区块土体经雨水浸泡、干湿循环作用,土质明显疏松,片状剥离严重; S_5 区块土体表面局部潮湿,表观颜色未显著变化,土质坚硬未粉化; S_7 区块土体与 S_5 相似。各区块土体经加固养护 3 个月后形态如图 4。

从现场试验发现,加固效果与取样原状土加固试验基本相同,各加固方式对原状土有较好的加固保护作用,可有效抑制霉菌生长,防止表层土体粉化。另外,加固后土体经雨水长期浸泡、干湿循环等作用,导致表观形貌严重变化,起皱开裂甚至破碎,因此,在有条件时,土遗址应尽可能保存于室内良好环境中。

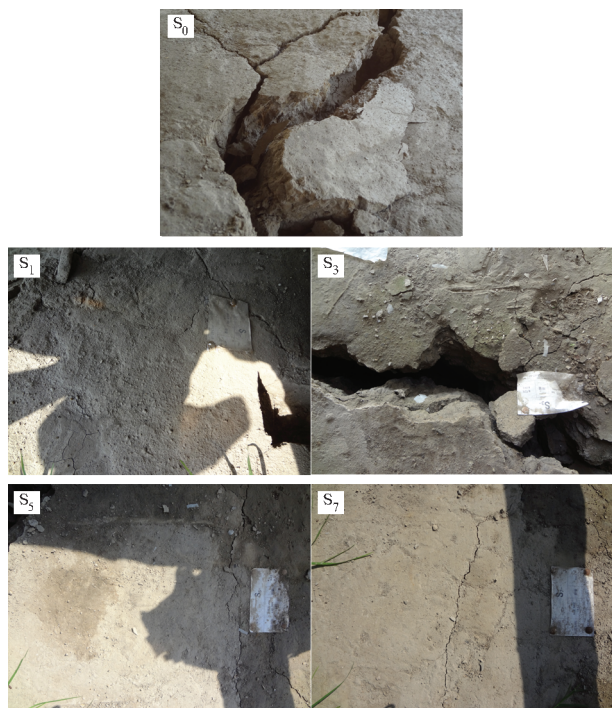


图 4 现场试验各区块土样加固养护 3 个月后形态

Fig. 4 Morphology of the consolidated soil after 3 months

综合取样试验和现场试验,加固剂 SAE 300、SAE 300E 依不同配合方式使用,对土样均有较好的加固保护作用,可抑制霉菌生长,防止表层土体粉化。根据土遗址保护原则,保护遗址表观形貌,提高耐久性为最重要条件,加固剂具有良好的渗透性及适度提高土体强度。根据试验结果,认为 S_5 方式加固作用效果相对最佳。

4 实践案例

“F12 房址”为抢救性考古发掘过程中发现的一座保存较好的广富林文化的地面式双间排房遗址,依上海市文物局等相关部门研究确认,采用试验研究确定的加固方案 S_5 (表 3) 对房址进行表面加固。

4.1 实施概况

表面加固区域为房址主体部分,面积约 130m^2 ,尺寸约 $16.80\text{m} \times 7.80\text{m}$ 。为保护房址安全及表面加固实施,房址上方搭建遮阳雨棚。另由于面积较大,为保证加固均匀,采用逐块喷洒实施,每一区块为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 。具体实施如图 5,其中,探孔仅加固上部 40cm 高度侧面。

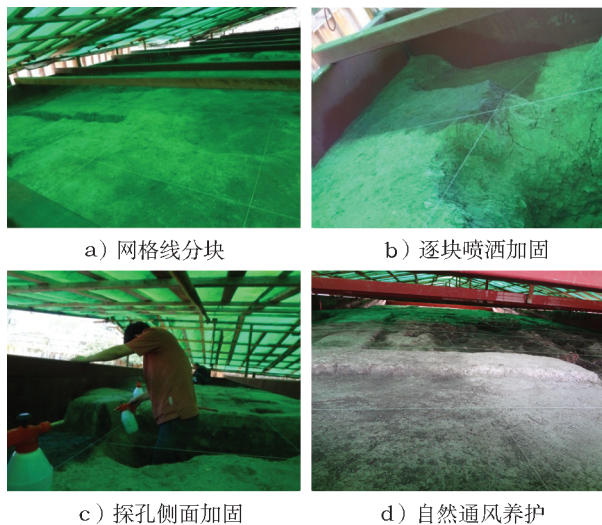


图 5 房址表面加固实施

Fig. 5 Process of reinforcement for “F12 site”

4.2 实施效果

房址加固实施后,自然通风养护 3 周。观察发现房址表面存在泛白情况,共两处,直径约为 100mm ,均位于低洼处,主要原因是加固剂喷洒时未能及时渗透而聚流至低洼处,与水汽反应生产白色晶体。另外,在房址与回填土间存在显著差异,未经处理的回填土表面产生霉菌,严重影响土体表观,而经加固作用的房址土体未生长霉菌(图 6),说明加固作用对于霉菌有抑制作用。对于生长霉菌的土

体,采用毛刷刷除霉菌或表层土体切除,采用同区域粉碎的干土覆盖填充。除此之外,房址土体经加固作用后,土质坚硬,表观形貌与初始状态基本相同。

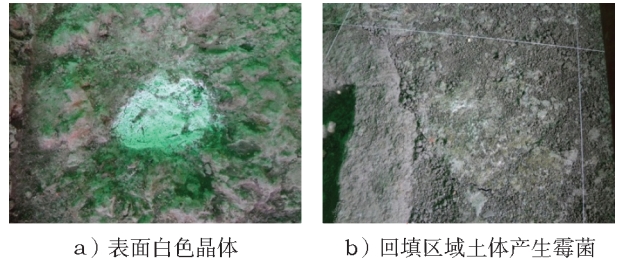


图 6 房址表面加固实施效果

Fig. 6 The reinforce effect of surface strengthening

5 结论

通过取样试验和现场加固试验发现,同属硅酸乙酯类的加固剂 SAE 300 和 SAE 300E 按不同比例配合使用加固潮湿土遗址,加固保护效果存在一定差异,其中,以 2:1 比例配合使用的保护效果相对最优,应用于上海广富林文化遗址“F12 房址”表面加固工程,加固保护效果良好。通过研究,得出以下结论:

1) 试验表明,硅酸乙酯类加固剂 SAE 300 和 SAE 300E 可有效提高遗址土体抗粉化能力,抑制霉菌生长,且按不同方式配合使用,加固保护效果较单一加固剂使用相对更佳。

2) 初始含水率对土体加固效果有显著影响,较低初始含水率时,加固作用将显著提高土体无侧向抗压强度和抗剪强度;而随含水率增大,强度提高程度反而存在下降趋势,甚至存在强度削弱现象。

3) 试验表明,硅酸乙酯类加固剂 SAE 300、SAE 300E 均不具有良好的加固耐水性,不宜作为防水加固剂应用于房址加固保护。当土遗址加固保护时,耐水性作为必要要求,建议取原样土进行湿化试验,更真实地验核加固作用后的耐水性状。

4) 潮湿土遗址加固保护材料的选择时,宜根据遗址状况与现场原状加固试验或取样原状土加固试验优选最优方法。

5) 鉴于条件限制,本研究仅选取了两种硅酸乙酯类加固材料,后期研究中应选取更多不同种类的加固材料,细化组合方式,系统研究各材料及其组合应用对于潮湿环境土遗址的加固保护效果。

参考文献:

- [1] 王旭东. 潮湿环境土遗址保护理念探索与保护技术展望[J]. 敦煌研究, 2013, 1:1-6.
WANG Xu - dong. Exploration of conservation philosophy for

- earthen sites in humid environments and an outlook on future conservation technology[J]. *Dunhuang Res*, 2013, 1:1-6.
- [2] 周双林. 土遗址保护材料探索[M]. 北京:文物出版社,2011. ZHOU Shuang-lin. Exploration of relic protection material [M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House,2011.
- [3] 周双林,原思训. 有机硅改性丙烯酸树脂非水分散体的制备及在土遗址保护中的试用[J]. *文物保护与考古科学*,2004, 16(4):50-52. ZHOU Shuang-lin, YUAN Si-xun. Silicone modified non-aqueous dispersion of acrylic latex: its preparation and test on its ability of anti-weathering on earthen archaeological site[J]. *Sci Conserv Archaeol*,2004, 16(4):50-52.
- [4] 王有为,李国庆. 潮湿环境下的土遗址加固保护材料筛选试验研究——以福建昙石山遗址为例[J]. *文物保护与考古科学*, 2014, 26(1):8-21. WANG You-wei, LI Guo-qing. Experimental study on the selection of materials for reinforcement and protection of earthen archaeological sites in humid environments—on the Fujian Tanshishan site[J]. *Sci Conserv Archaeol*,2014, 26(1):8-21.
- [5] 魏国锋,张秉坚,杨富巍,等. 钙基液态水硬性加固剂用于潮湿土遗址的加固保护[J]. *岩土力学*,2012, 33(3):702-712. WEI Guo-feng, ZHANG Bing-jian, YANG Fu-wei, et al. Consolidation of historical earthen sites under moisture circumstance using calcium-based hydraulic consolidant[J]. *Rock Soil Mech*,2012, 33(3):702-712.
- [6] 汪海港. 潮湿环境土遗址的新型保护材料合成与初步评价[D]. 中国科学技术大学,硕士学位论文,2009. WANG Hai-gang. Preparation and primary evaluation of a new conservation material for earthen sites in moisture circumstance [D]. University of Science and Technology of China,2009.
- [7] 周环,张秉坚,李最雄,等. 潮湿环境土遗址的防水与加固保护研究[C]//中国文物保护技术协会第三次学术年会论文集, 2004:47-51. ZHOU Huan, ZHANG Bing-jian, LI Zui-xiong, et al. Study on waterproof and conservation technology of earthen sites in moisture circumstances[C]// Proceedings of Third Symposium Chinese Association For Preservation Technology of Cultural Relics,2004:47-51.
- [8] 张秉坚,魏国锋,杨富巍,等. 不可移动文物保护材料研究中的问题和发展趋势[J]. *文物保护与考古科学*,2010, 22(4):102-109. ZHANG Bing-jian, WEI Guo-feng, YANG Fu-wei, et al. challenges and future trends in conservation material for immovable objects of cultural heritage[J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2010, 22(4):102-109.
- [9] 周环,张秉坚,陈港泉,等. 潮湿环境下古代土遗址的原位保护加固研究[J]. *岩土力学*,2008, 29(4):954-962. ZHOU Huan, ZHANG Bing-jian, CHEN Gang-quan, et al. Study on consolidation and conservation of historical earthen sites in moisture circumstances conservation of Tangshan Site in situ[J]. *Rock Soil Mech*, 2008, 29(4):954-962.
- [10] 张慧,张金萍,杨隽永. 浙江萧山跨湖桥独木舟遗址加固保护试验研究[J]. *文物保护与考古科学*,2012, 24(3):95-99. ZHANG Hui, ZHANG Jin-ping, YANG Juan-yong. Conservation and reinforcement of Kuahuqiao canoe of Xiaoshan, Zhejiang province[J]. *Sci Conserv Archaeol*,2012, 24(3):95-99.
- [11] 陈洋,朱杰,蔡乐刚,等. 上海广富林文化遗址“F12房址”保护搬迁设计与实施[J]. *住宅科技*,2014, 10:1-5. CHEN Yang, ZHU Jie, CAI Le-gang, et al. Design and implementation of protective relocation for "F12 site" in Shanghai[J]. *Housing Sci*, 2014, 10:1-5.
- [12] 张秉坚,周环,王旭东. 潮湿环境的定量判别初探——以杭州良渚遗址为例[J]. *敦煌研究*,2010, 6:104-108. ZHANG Bing-jian, ZHOU Huan, WANG Xu-dong. Quantitative discrimination of humid environment: A case study of Hangzhou Liangzhu site[J]. *Dunhuang Res*,2010, 6:104-108.
- [13] 张金凤,闫晗,余希寿,等. 硅酸钾和正硅酸乙酯在土遗址加固中作用的研究[J]. *湖北工业大学学报*,2011, 26(5):15-18. ZHANG Jin-feng, YAN Han, SHE Xi-shou, et al. Research on the consolidation ability of potassium silicate and ethyl silicate to soil archaeological sites[J]. *J Hubei Univ Technol*, 2011, 26(5):15-18.
- [14] 周双林,王雪莹,胡原,等. 辽宁牛河梁红山文化遗址土体加固保护材料的筛选[J]. *岩土工程学报*,2005, 27(5):567-570. ZHOU Shuang-lin, WANG Xue-ying, HU Yuan, et al. Selection of strengthening medium for archaeological site of Hongshan Culture at Niuheiliang, Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(5):567-570.
- [15] 韩国强. 土遗址化学加固效果评价试验研究[D]. 中国地质大学,硕士学位论文,2012. HAN Guo-qiang. Experimental study on chemical consolidation of earthen sites[D]. China Univer Geosci, 2012.

Application of ethyl silicate as a strengthening agent for consolidation and conservation of earthen sites under moisture circumstances

ZHU Jie, CAI Le-gang, GUO Ge

(Shanghai Real Estate Science Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstracts: Due to high moisture content, complicated composition and circumstances, the conservation of earthen sites under conditions of high moisture is one of the most difficult problems in cultural heritage protection. Therefore

research on utility of reinforcement materials and portfolio optimization are of practical significance. Based on the existing research and cases, three protective materials were chosen as strengthening agents, and a series of indoor and field tests were carried out and are described in this paper. The strengthening effects of different proportions of the strengthening agents and select the optimum performance indicators, such as morphology, penetration depth, strength and collapse resistance were compared. The tests show that using the chosen strengthening agents and the proper proportions can give good reinforcement effects, such as improve resistance to pulverization and inhibition of the growth of fungi. Furthermore, it can significantly improve the unconfined compressive and shear strength of soil specimens when the moisture content is low. Therefore the results of the studies can be applied to the consolidation and conservation of earthen sites under moisture conditions.

Key words: Earthen sites; Moisture circumstances; Consolidation conservation; Ethyl silicate; Consolidate

(责任编辑 马江丽)

· 科技信息 ·

铜合金文物 XRF 定量分析认证标样介绍

XRF 技术已在艺术和考古研究领域广泛应用,其中包括对于铜合金文物的定量分析。为了提高数据的可比较性和再现性,使合作研究团队间更好的分享数据,J. Paul 博物馆、卢浮宫、美国国家艺术博物馆、大英博物馆等研究设计了一组新的获得认证的铜合金 XRF 定量分析标准参考物,由 MBH 公司(MBH Analytical Limited)生产。这套文化遗产铜合金标样(the Copper CHARM Set),包含 12 个直径 35mm,厚 15mm 的铜合金件。另外还有两个分别针对砷铜和铜镍合金的可选补充集。

标样数量。考虑到标样应适用于多种元素同时校准及基体效应影响等因素,兼顾成本与效率,确定了标样数量为 12 个。合金类型。12 种合金类型,包括低、中、高锌铸造黄铜,低、中、高锡青铜,黄铜片/钎焊金属,粗铜,铅青铜,高砷锡青铜,锡锌青铜和四元青铜。

元素选择。共选择了 20 种元素,其中除了传统铜合金中常见的 Cu, Zn Sn, Pb, Fe, Ni, As, Ag 和 Sb 外,还根据出土铜合金文物的实际情况增加了 S, Cr, Co, Se, Cd, Au, Bi, Al, Si, P, Mn。

浓度范围。根据工作组经验,元素的浓度范围以求覆盖到铜合金文物可能出现的范围,包括成分最异常的铜合金。基体差异。合金类型设定一些微量元素在不同的基体/合金类型中的浓度差不多,以改善与基体效应有关的校准误差的评估,例如含 Pb 量不同标样的含 As 量相近,又如含 Sn 不同标样则具有相近的 Ag 含量。浓度分布。元素浓度分布加权趋于零,最低值接近预期的检出限而最高至最大检测限,既可增加检出限附近检测的精确度,也可更好确定检出限。

Element	Core Set (MBH Designation)												Core Range		Element
	31X 7835.8A	31X 7835.9A	31X 1T5A	32X LB10E	32X LB14F	32X LB17A	32X SNA	32X SNEA	32X SNTA	33X GMAAB	33X GM20A	33X GM21A	Low	High	
Al	Value 0.092	0.0458	(0.0095)	(0.0095)	0.388	0.474	0.0313	0.092	(0.001)	-0.001	0.265		(0.001)	0.474	Al
Si	Value 0.0232	0.122	(0.001)	(0.005)						(0.0006)	0.0156		0.0156	0.122	Si
P	Value 0.122	0.039	(0.001)	0.189	0.091				0.066	0.0058	0.063	0.05	0.0088	0.189	P
S	Value 0.002	0.0006		0.005	0.003				0.003	0.0011	0.003	0.002			S
Cr	Value 0.001	0.0181		0.0116	0.0157		0.0009	0.018		0.0112	0.06		0.0009	0.08	Cr
Mn	Value 0.001	(0.2)		0.0011	0.0017		0.0002	0.0022	0.003	0.005	0.002		0.0008	0.0585	Mn
Fe	Value 0.093	0.0009	0.445	0.0004	0.005	0.296	0.72	0.0024	0.001	0.0007	0.219		0.0004	0.72	Fe
Co	Value 0.003	0.0001	0.008	0.0001	0.0003	0.005	0.004	0.0001	0.0001	0.0001	0.005				Co
Ni	Value 0.1	0.408	0.178	0.013	0.0689	0.488	1.2	0.089	(0.06)	0.053	0.07	0.751	0.013	1.2	Ni
Cu	Value 0.003	0.003	0.005	0.001	0.0028	0.008	0.22	0.004	0.002	0.002	0.008	0.006	0.0003	0.605	Cu
Zn	Value 0.158	0.1	0.079	0.887	0.312	0.465	0.502	0.203	0.175	1.795	0.999	0.129	0.079	1.795	Zn
As	Value 0.005	0.002	0.002	0.01	0.005	0.005	0.005	0.002	0.001	0.016	0.017	0.002			As
Ag	Value 69.93	78.48	55.84	77.98	78.58	74.83	78.56	86.39	80.3	82.96	87.58	78.90	55.84	87.58	Ag
Sb	Value 0.12	0.11	0.13	0.1	0.11	0.08	0.12	0.08	0.06	0.06	0.14	0.12			Sb
Cd	Value 24.83	14.34	40.63	0.566	0.0421	0.634	0.494	1.17	1.96	7.13	3.87	5.05	0.0421	40.63	Cd
Se	Value 0.06	0.06	0.15	0.009	0.0024	0.005	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04			Se
Au	Value 0.143	0.107	0.349	0.151	0.2524	1.51	0.8619	0.764	1.071	0.287	0.196	0.454	0.0524	1.51	Au
Bi	Value 0.004	0.002	0.003	0.003	0.0018	0.02	0.0013	0.006	0.012	0.008	0.003	0.006			Bi
Al	Value 0.001	0.34											0.194	0.34	Al
Si	Value 0.463	2.12	0.213	0.042	0.0619	0.011	0.099	1.169	0.305	0.0265	0.141	0.694	0.0265	2.12	Si
P	Value 0.007	0.006	0.003	0.002	0.0014	0.006	0.003	0.012	0.005	0.0015	0.003	0.007			P
S	Value 0.007	0.0073	0.501		0.151	0.145	0.0903	0.0385		0.0229	0.255		0.0229	0.501	S
Cr	Value 0.003	0.0015	0.005		0.003	0.002	0.0012	0.0012		0.0005	0.002				Cr
Fe	Value 0.016	1.48	0.107	8.16	5.411	5.97	16.95	7.31	12.5	2.56	4.07	4.55	0.107	16.05	Fe
Ni	Value 0.007	0.02	0.002	0.09	0.004	0.09	0.03	0.09	0.05	0.02	0.02	0.03			Ni
Cu	Value 0.115	0.445	0.174	0.591	0.8028	4.1	0.664	0.323	0.263	0.0291	2.004	1.949	0.0291	4.1	Cu
Zn	Value 0.002	0.003	0.004	0.008	0.0014	0.06	0.005	0.004	0.005	0.0012	0.015	0.01			Zn
As	Value 0.001						0.0102	0.0073	0.0005				0.0005	0.0102	As
Ag	Value 3.15	1.024	0.576	11.74	14.82	9.83	6.259	1.589	2.8	4.69	0.106	0.99	0.106	14.82	Ag
Sb	Value 0.003	0.017	0.007	0.07	0.06	0.1	0.004	0.015	0.03	0.04	0.002	0.05			Sb
Au	Value 0.112	0.81	0.314	0.0608	0.974	0.22	0.097	0.158	0.052	0.084	0.031	0.462	0.031	0.974	Au
Bi	Value 0.005	0.02	0.006	0.001	0.014	0.005	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002			Bi

标样铸造。标样件通过铸造而非粉末冶金/热等静压生产,这样更接近传统合金的金相结构。铸造过程在 30 秒内完成,以使组分差异最小化。模具置于重量级钢板上以促进快速凝固从而最大限度减少偏析。铸件的处理和试验参照 ISO 指南(ISO Guide)30 - 35。