

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2018.10.015

无机-有机改性土物理力学性能试验研究^①

杨兴据, 王森佩, 唐诗宇, 鲍安红*, 唐 强

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要:川渝地区留存有大量生土墙历史文化建筑,且很多是全国重点保护文物,但大多暴露在野外环境中.由于各种因素,这些珍贵的历史遗迹都受到了不同程度的损坏.为保护性修复生土墙历史文化建筑,项目组在素土中加入水泥、料姜石、环氧树脂等掺和料,研究了一种新型的修复用改性土,利用不同掺和料配比的改性土制成土坯试件,并对试件进行抗压强度、耐盐腐蚀性、抗冲刷性及耐紫外线性能的试验研究.结果表明,按照 5%(质量分数,下同)水泥、10%料姜石、3%环氧树脂、82%土进行配比的修复用土具有良好的力学性能和耐久性能.

关键词:川渝;生土建筑;改性土;力学性能;耐久性能

中图分类号: TU521.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2018)10-0080-07

随着我国物质生活水平的不断提高,国家越来越注重精神文明的建设,对革命旧址的保护与开发也日益重视^[1].但相对于可移动文物而言,生土墙历史文化建筑属于不可移动文物,大多暴露于自然环境中,长期遭受雨水冲刷、盐碱侵蚀等环境因素的破坏,尤其近代工业带来的环境污染和酸雨使露天的土墙受到更严重的损伤^[2].为传承历史文化,保存人类优秀文化遗产,对生土墙历史文化建筑采取抢救性保护加固措施已迫在眉睫.本文试验主要为研究新型修复用土.

梁仁旺等^[3]在水泥土力学性能试验研究中提出,0%~15%水泥掺量不能改变土体强度,但陈平等^[4]提出加入 5%~10%的水泥可提高其抗冲刷能力及耐盐(Na_2SO_4 和 Na_2SiO_4)腐蚀性能,且建议可取 5%的熟石灰和 10%的料姜石来适度改善城墙的强度.据近年来的文献报道^[2],在修复生土墙领域,广泛使用的粘接剂主要是环氧树脂,环氧树脂具有低密度、高渗透性及良好的粘接性能等特点^[4].

目前国内外对土建遗址的研究主要集中在化学保护方面,尤其集中在 PS(硅酸钾溶液)材料保护方面,而对土建遗址的物理保护及生土墙修复保护方面涉及较少^[5],在潮湿环境土遗址的加固保护方面仍未取得突破性的进展^[6].为充分发挥无机、有机修复用材料性能及更好地运用于潮湿地区,项目组将无机和有机材料相结合,即在素土中掺入不同配比的水泥、料姜石、环氧树脂等掺和料,制成土坯试件,对其进行抗压强度试验、耐盐腐蚀试验、抗冲刷试验及耐紫外线试验,以测试其相关性能,并对该修复用土运用于川渝地区的可行性作出分析.

1 试验介绍

试验用土为生土^[7],为探究修复用土的抗压承载力、耐盐腐蚀性能、抗冲刷性能及耐紫外线性能,在生土中加入掺合料,制成 150 mm×150 mm×150 mm 立方体土坯试件进行试验.

1.1 制作土坯的原材料

土样取自西南大学竹园后山,含水率平均为 17.55%.无机外加剂为料姜石和水泥,料姜石取自山西

① 收稿日期:2017-01-13

基金项目:修复既有生土墙的无机-有机改性土研究(100030-2120074601).

作者简介:杨兴据(1995-),男,本科,主要从事土木工程研究.

通信作者:鲍安红,教授,博士.

运城,经机械加工研磨、过筛得到粒径不大于 3 mm 的粉末;水泥为 32.5 普通硅酸盐水泥;有机外加剂为环氧树脂 E-51,固化剂为 T-31,按 4:1 比例配比。

1.2 试件制作

土坯成型前的含水率按照传统土墙制作的工艺方法确定,即生土含水率达到“手握成团,落地开花”为宜,按表 1 配合比称量并搅拌均匀,参照美国 ASTM 有关水泥土规程及 GB50010《混凝土结构设计规范》夯筑立方体试件^[8],由人工振捣成型。按抗压强度、耐盐腐蚀性、抗冲刷性及耐紫外线性试验分 6 组(素土对照组、单加无机外加剂-水泥和料姜石对照组、3%,5%,7%,10%环氧树脂试验组),每组 3 个,制作土坯共计 72 件(表 1)。

表 1 试件配合比及试验项目分类

组别	试件	A(素土)	B(无机)	C(3%)	D(5%)	E(7%)	F(10%)
抗压试验	试件 1	A1	B1	C1	D1	E1	F1
	试件 2	A2	B2	C2	D2	E2	F2
	试件 3	A3	B3	C3	D3	E3	F3
耐盐腐蚀试验	试件 1	A4	B4	C4	D4	E4	F4
	试件 2	A5	B5	C5	D5	E5	F5
	试件 3	A6	B6	C6	D6	E6	F6
抗冲刷试验	试件 1	A7	B7	C7	D7	E7	F7
	试件 2	A8	B8	C8	D8	E8	F8
	试件 3	A9	B9	C9	D9	E9	F9
耐紫外线试验	试件 1	A10	B10	C10	D10	E10	F10
	试件 2	A11	B11	C11	D11	E11	F11
	试件 3	A12	B12	C12	D12	E12	F12
用料占比/%	土壤	100	85	82	80	78	75
	水泥	0	5	5	5	5	5
	料姜石	0	10	10	10	10	10
	环氧树脂	0	0	3	5	7	10

1.3 养护条件

试件制作完成后,整齐放置于室内,在没有任何人为因素干扰的条件下养护 28 d(图 1)。

2 掺合料与土体作用机理分析

1) 水泥与土作用机理:水泥与土拌和后,水泥矿物与土中的水分发生强烈的水解和水化反应,同时从溶液中分解出氢氧化钙及其他水化物,并逐渐凝结硬化形成水泥石骨架,增大本身强度^[9-10];水化产生了能和土粒联结包裹密实并发展形成一定强度的胶体;“水泥杆菌”的存在能结晶自由水,直接增加强度^[10]。同时 Ca^{2+} 、 OH^{1-} 渗透进入土颗粒内部,与土体矿物发生物理化学反应,生成胶凝物质,并封闭团粒之间的孔隙,即很大程度上阻止了外界溶液进入改性土体内部,但水泥掺入量较少时,其作用不明显,故试验在此基础上还加入了料姜石。

2) 料姜石与土体作用机理:料姜石的主要成分是 CaO ,即料姜石和土体的作用机理大部分为石灰和土体作用机理^[5],即 Ca^{2+} 可与 Na^{+} 和 K^{+} 发生离子交换,使胶体吸附层减薄,使粘土胶体絮凝,促使土体凝聚力增加。同时试验使用粉末状的料姜石,类似细骨料,少量水泥为胶凝材料,与土颗粒形成少量类似混凝土的团粒,一定程度上提高了改性土体的强度。

3) 环氧树脂与土体作用机理:环氧树脂主要由 C,H,O 等元素构成,与土的基本构成元素相似,且没



图 1 土坯养护

有其他金属元素,不会对土体本身造成破坏.环氧树脂分子结构中含有极活泼的羟基(—OH)和环氧基,为此其能与其他化合物的官能团如氢氧基、氨基、羧基、酯类等反应生成热固性高分子化合物,又因分子的主键是C—C键、醚键(—O—)组成,故能使相邻界面产生电磁力^[11],因而有高强度的粘合力,且环氧树脂与固化剂共同作用,使得土体随之产生类似固化反应,土颗粒间凝聚力得到提高.

3 试验方法及成果分析

3.1 土坯抗压试验

强度是既有生土墙加固修复的主要评价指标.因既有生土墙的夯筑情况与现有混凝土墙体的受压情况类似,故本次抗压力学性能试验以GB50081-2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》为依据,采用微机控制电液伺服万能试验机,对土坯试件进行了抗压承载力的测试(试验力速率:0.5 kN/s,位移速率:1 mm/s),试验过程如图2.

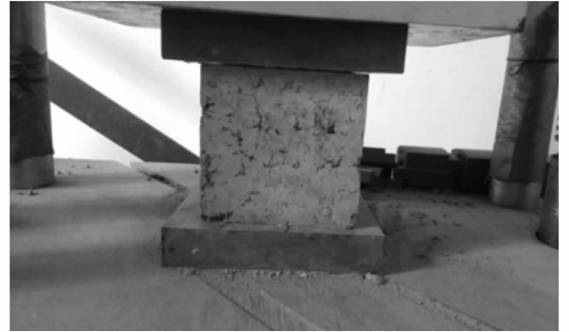


图2 抗压试验过程

由图3可以看出,B,C,D,E,F系列的改性土的延性均较素土高,B和C系列的改性土最大承载力较素土略有增强,且作出试件最大抗压承载力 P_{\max} 与环氧树脂掺入量 c (在加入无机外加剂的基础上)的曲线(图4).考虑试验误差的影响,可认为在环氧树脂掺入量较少时,随环氧树脂配比的增长,环氧树脂结构中极活泼的羟基和环氧基将与氢氧基等反应生成过量热固性高分子化合物,使抗压承载力大大增强^[11],可认为改性土最大承载力 P_{\max} 与环氧树脂掺量 c 呈线性关系,当掺入量超过一定范围时,环氧树脂掺入量对试件最大抗压承载力的影响较小.依据试验结果,笔者认为环氧树脂掺入量超过7%后,试件最大抗压承载力 P_{\max} 保持不变.故有下式:

$$P_{\max} = \begin{cases} K_c + m & c < 6\% \\ P' & c \geq 7\% \end{cases}$$

式中: P_{\max} 为土坯试件的最大抗压承载力; c 为环氧树脂掺入量(掺入无机外加剂的前提下); K 为环氧树脂改性剂固化土体系数; P' 为环氧树脂掺入量为7%时对应的最大抗压强度值; m 为土体故有强度.

在加载时发现,随着环氧树脂掺入量的增加,试件破坏前的裂缝开展宽度有所减小,但仍较素土试件大,即说明 $c \leq 10\%$ 时,改性土的塑性仍较素土的好.由图3可知,环氧树脂掺入量 $\leq 3\%$ 时,在改善土体承载力方面与仅掺入无机外加剂相比优势不大,为使后修补填料与既有生土墙具有良好的协同工作性能,修补填料与既有土墙强度相差不宜过大,故可选用B和C系列的改性土来作为修补填料.

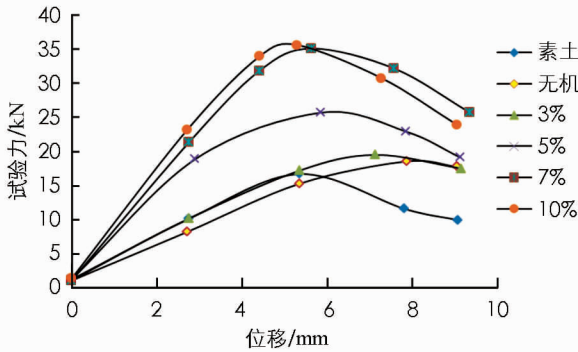


图3 压力-压缩量关系曲线

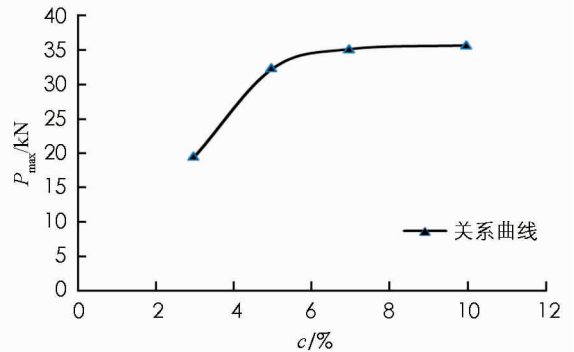


图4 P_{\max} - c 关系曲线

3.2 耐盐腐蚀试验

由既有生土墙病害分析可知,可溶性盐对既有生土墙的危害尤为常见^[12].以 Na_2SO_4 为例,其在土体中会发生溶解收缩—结晶膨胀—再溶解收缩,导致土体结构出现疏松、掉渣、开裂等现象直至破坏^[11].本

次试验模拟实际腐蚀环境: 将待测件下垫薄毛巾放于容器中, 缓慢注入预先配置好质量分数为 5% 的硫酸钠溶液, 使溶液液面略低于薄毛巾表面, 以保证溶液能通过薄毛巾上升到试件底部, 试验期间每隔 24 h 添加适量盐溶液以维持液面基本不变, 过程见图 5; 10 d 后将试件从容器中取出, 在潮湿环境下放置一个月后观察腐蚀现象并记录(表 2), 最后对其进行抗压测试(拟合后见图 6)。



图 5 耐盐侵蚀试验

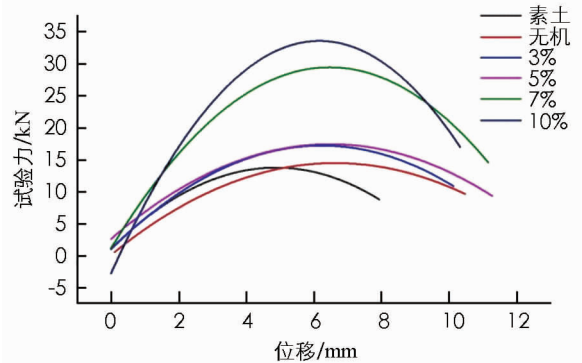
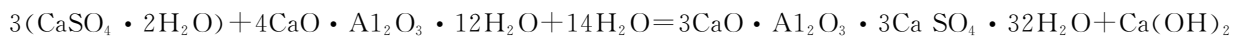
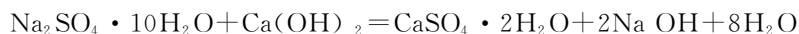


图 6 腐蚀后抗压

表 2 耐盐腐蚀试验记录

试件类别	试件编号	取出并养护一个月后腐蚀情况	备注
素土	A1	表面大量泛白, 所有面出现大量细小裂缝, 上半部分出现大量松土, 表面及棱角轻微脱落	存在既有裂缝一条
	A2	类似 A1, 上表面局部出现少量白色晶体	无
单加无机外加剂	B1	沿劣层面出现细微裂缝, 上半部分出现少量泛白	无
	B2	类似 B1, 棱角处出现松土	无
3% 试验组	C1	上半部分少量泛白, 无明显腐蚀迹象	无
	C2	类似 C1	无
5% 试验组	D1	上半部分侧面少量泛白, 无腐蚀迹象	无
	D2	类似 D1	无
7% 试验组	E1	上半部分侧面极少量泛白, 无腐蚀迹象	无
	E2	类似 E1	无
10% 试验组	F1	上半部分侧面极少量泛白, 无腐蚀迹象	无
	F2	类似 F1	无

作用机理: 硫酸钠溶液对素土的侵蚀主要为硫酸盐自身结晶析出形成晶体引起的体积膨胀, 因素土的粘聚力较低, 从而出现大量裂缝. 掺入无机外加剂后, 虽在一定程度上填补了土颗粒之间的空隙, 并在一定程度上增强粘聚力, 但硫酸根离子与掺和料中的水泥水化产物发生化学反应, 产生一些不可溶的盐^[13], 这些矿物一方面在试件内部形成具有膨胀性的产物, 另一方面使试件中的水泥水化产物氢氧化钙等物质溶出或分解, 破坏结构的粘结性能. 经分析可知, 试件破坏主要为钙矾石结晶型破坏^[14], 即:



故单加无机外加剂的改性土耐腐蚀能力仅有较小提高, 掺入有机外加剂后, 由于环氧树脂的强粘结性能及抗渗能力^[11], 使得试件较为密实, 盐溶液难以侵入土体内部, 从而增强耐盐腐蚀能力.

由图 7 知, 加入无机外加剂能在一定程度上提高试件的耐盐腐蚀能力, 但腐蚀后抗压承载力降低程度仍较大, 低于素土腐蚀前抗压强度; 加入有机改良剂后耐盐腐蚀能力显著提高, 腐蚀后均较素土腐蚀前抗压承载力高. 因此, 对于既有生土墙的修复, 掺入 3% 的环氧树脂较为合适, 基本能满足改性土体对耐盐腐蚀的要求.

3.3 抗冲刷试验

由既有生土墙试验研究分析, 雨水冲刷会对生土墙体造成土体腐蚀、表面酥化、稀疏等影响^[15]. 参考

程晔等^[16]抗冲刷室内模型设计图,并结合现有试验条件,将试块置于坡度为 30° 的自制斜坡上完成本次试件抵抗冲刷能力试验,将喷洒装置垂直置于试件上方 1 m 处冲刷 30 min ,过程见图 8.定时观察试件的损伤情况并记录,如表 3.

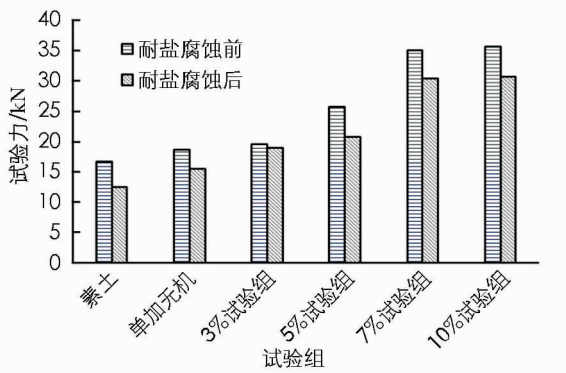


图 7 腐蚀前后对比



图 8 抗冲刷试验

表 3 抗冲刷试验记录

组别	编号	试验过程	备注
素土	1	3 min 时表面已明显破坏, 5 min 时斜面底部有大量积土, 10 min 时试件整体破坏, 失去承载力.	无
	2	3 min 时有一角坍塌, 5 min 时斜面底部有大量积土, 9 min 20 s 时试件明显破坏, 失去承载力.	无
无机	1	3 min 时表面部分破坏, 出现坑洞; 5 min 时坑洞进一步发展, 30 min 时四角明显破坏.	无
	2	前 10 min 内现象类似 1, 28 min 时试件明显破坏, 失去承载力.	无
3%试验组	1	3 min 时试件开始吸水, 至 30 min 时表面小坑洞有所发展, 无其他破坏特征.	表面存在小坑洞
	2	过程类似 1, 至 30 min 时无破坏特征.	无
5%试验组	1	5 min 时开始吸水, 至 30 min 时仍无破坏现象.	无
	2	类似 1;	无
7%试验组	1	5 min 时开始吸水, 至 30 min 无破坏迹象.	无
	2	类似 1;	无
10%试验组	1	10 min 时出现吸水, 30 min 时仍无现象.	无
	2	类似 1;	无

作用机理: 因料姜石和水泥的水化作用及环氧树脂对土颗粒的凝聚作用, 使得改性土强度有适当的提高, 在雨水冲击力作用下表面受损较小, 阻止了雨水进入土体内部, 从而保护了土体内部结构, 故试件表现出较强的抗冲刷能力.

由表 3 可知, 由素土制成的试件损坏最为严重, 即抗冲刷能力最弱. 单加无机外加剂时, 抗冲刷能力有所提高, 但随着试件被冲刷时间的延长, 其破损依旧较为严重. 在单加无机外加剂的基础上掺入一定量环氧树脂后, 试件抗冲刷能力增强, 且提高程度与环氧树脂掺入量有关. 当环氧树脂含量为 3% 时, 试件在 3 min 时出现表面破坏的现象, 随着冲刷过程的进行, 试件出现轻微破坏, 但最终趋于稳定状态, 这表明随着前期薄弱颗粒被冲刷后, 试件处于一个稳定的抗冲刷状态.

对于既有生土墙修复, 为达到同既有建筑的协同作用, 就长期强度而言, 改性土抗冲刷性能保持良好即可, 不宜过强, 避免因新旧无法协同造成既有建筑的二次破坏, 从试件破损情况及经济效益的考虑初步确定环氧树脂含量 $3\% \sim 5\%$ 为修复用土的最适含量.

3.4 耐紫外线试验

本次试验在室内进行, 将试件放入 1 kW 高压汞灯的照射下, 试件表面距离光源距离为 6 cm , 试验共

照射 200 h, 试验结束后进行色差分析, 色差分析结果通过国际通用 CIE 的 Lab 色域空间对应的指标表示, 测试仪为 NR10QC 精密色差仪 SC-10 色差分析仪, 试验结果见表 4~表 8.

表 4 A,B 两组色差分析对照表

平均值	L^*	a^*	b^*	A,B 两组平均色差值		
A(素土坯)	54.18	9.16	12.1			
差值	ΔE^* (总色差)7.45			ΔL^*	Δa^*	Δb^*
				6.27	2.22	3.35

表 5 A,C 两组色差分析对照表

平均值	L^*	a^*	b^*	A,C 两组平均色差值		
A(素土坯)	54.18	9.16	12.1			
差值	ΔE^* (总色差)4.46			ΔL^*	Δa^*	Δb^*
				4.08	-1.61	-0.79

表 6 A,D 两组色差分析对照表

平均值	L^*	a^*	b^*	A,D 两组平均色差值		
A(素土坯)	54.18	9.16	12.1			
差值	ΔE^* (总色差)7.00			ΔL^*	Δa^*	Δb^*
				6.79	0.7	1.56

表 7 A,E 两组色差分析对照表

平均值	L^*	a^*	b^*	A,E 两组平均色差值		
A(素土坯)	54.18	9.16	12.1			
差值	ΔE^* (总色差)7.55			ΔL^*	Δa^*	Δb^*
				7.09	0.64	2.51

表 8 A,F 两组色差分析对照表

平均值	L^*	a^*	b^*	A,F 两组平均色差值		
A(素土坯)	54.18	9.16	12.1			
差值	ΔE^* (总色差)6.97			ΔL^*	Δa^*	Δb^*
				2.63	1.89	6.17

据以上数据可以看出, 在紫外线照射 200 h 后, 试件颜色发生一定程度的变化. 一般来说, 色差 ≤ 6 时, 正常人的肉眼观察不到. 经紫外线照射后, B 系列土坯与素土试件的色差大于 6, 不适合用于生土建筑的修补; C,D,E,F 系列土坯与素土试件的色差与环氧树脂含量有关, 但只有环氧树脂含量为 3% 的试件经紫外线照射后与素土试件的色差小于 6.

原理分析: 土体的外观颜色与组成有复杂的相关性, 土体呈现黯淡的土状光泽的原因有^[11]:

- 1) 成分复杂, 对可见光的吸收没有明显的特征吸收所致;
- 2) 粗糙表面为对光的漫反射;
- 3) 存在宏观的孔隙、裂缝等, 也会影响对可见光的反射.

经无机外加剂改性后的试件, 因料姜石呈淡黄色, 对光具有特征吸收, 进而影响试件对光的吸收能力. 经无机-有机外加剂改性后的试件, 除料姜石本身的影响外, 环氧树脂作为强效粘合剂^[2], 改变试件宏观的孔隙状态, 进而影响试件对光的吸收能力. 在料姜石与环氧树脂的共同作用下, 由试验数据表明, 环氧树脂掺入量为 3% 的试件, 在紫外线照射下, 会产生类似素土试件的色差变化, 因此可将其用于生土墙建筑的修复.

4 结 论

本文通过对土坯进行抗压、耐盐腐蚀、抗冲刷及耐紫外线试验, 得出以下几点结论:

- 1) 兼顾红岩历史革命文化建筑修复的基本原则及满足抗压强度、耐盐腐蚀、抗雨水冲刷性和耐紫外线等性能要求, 川渝地区生土墙修复用改性土取 C 系列配合比 (10% 料姜石、5% 水泥、3% 环氧树脂、82%

土)较为适宜.

2) 以上修复用土配置是在查阅文献后进行室内试验的基础上得出的,且国内外对修复潮湿环境中的生土墙建筑研究较少,因而该修复用土还需用实践来证明其效果.

3) 对生土墙建筑文物的修复保护,还需依据文物所在地区的具体影响因素做出具体的试验研究;同时还需在修旧如旧、可拆除等原则下,对既有墙体与修补土体两者协同工作机理方面做更深入的研究.

参考文献:

- [1] 呼雪娇. 延安鲁艺革命旧址保护与核心景区规划设计研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [2] 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.
- [3] 梁仁旺, 张明, 白晓红. 水泥土的力学性能试验研究 [J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 211-213.
- [4] 孙崇玉. 论古遗址的保护 [J]. 丝绸之路, 2004(2): 26-30.
- [5] 陈平, 杨瑜瑞, 郝宏伟, 等. 榆林卫城南城墙夯土改性加固试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3): 430-436.
- [6] 高延生. 潮湿环境下土遗址化学加固试验的研究 [D]. 南昌: 东华理工大学, 2015.
- [7] 褚俊英, 刘智. 生土墙体材料研究 [J]. 现代商贸工业, 2009(5): 264-265.
- [8] 李建军, 梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量实验研究 [J]. 岩土力学, 2009(2): 473-477.
- [9] 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探 [J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 62-68.
- [10] 杨滨. 水泥土强度规律研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [11] 熊兵. 土遗址加固与保护 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [12] 赵胜杰. 高昌故城土遗址病害分析及化学保护研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [13] 张淑媛. 复杂环境下混凝土硫酸盐侵蚀机理 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
- [14] 贾悦, 纪殿彬. 矿渣粉煤灰高性能混凝土抗硫酸盐侵蚀机理 [J]. 科技致富向导, 2011(27): 129.
- [15] 赵娟. 双酚 A 环氧树脂体系主要性能表征技术研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
- [16] 程哗, 方靓, 赵俊锋, 等. 高速公路边坡 CF 网防护抗冲刷室内模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 2935-2942.

On Physical and Mechanical Properties of Inorganic-Organic Modified Soil

YANG Xing-ju, WANG Sen-pei,
TANG Shi-yu, BAO An-hong, TANG Qiang

College of engineering and technology, Southwestern University, Chongqing 400715

Abstract: There're a large number of raw-soil wall of historical and cultural architectures in Sichuan and Chongqing Region, and most of them are national key cultural relics protection, but mostly exposed to the wild in the environment. Due to various factors, these precious historical sites have been damaged to varying degrees. For protecting and repairing raw-soil wall of historical and cultural architectures, we add some admixture like cement, ginger stone, epoxy resin etc., to research a new kind of modified raw-soil for repairing. Using proportion of modified soil with different admixture made into adobe specimen, and do the experimental study on compressive strength, erosion resistance, UV resistance and salt corrosion resistance of the specimens was carried out. The results show that the repairing soil with 5% (by mass), 10% ginger stone, 3% epoxy resin and 82% soil has good mechanical properties and durability. This study can provide references for the development of high-performance cultural relic protection materials.

Key words: Sichuan and Chongqing region; earth construction; modified soil; mechanical properties; durability

责任编辑 汤振金