



尿素预水解微生物矿化氢氧化钙加固夹砂遗址土的机理及加固土体的耐久性

刘远坚¹, 王轶楠², 夏华^{3a}, 殷顺浪¹, 蔡亚林¹, 胡立敏¹, 王春艳^{3a,3b}, 杨阳^{3a,3b}
(1. 重庆市文物考古研究院, 重庆 400013; 2. 重庆大学建筑规划设计研究总院有限公司, 重庆 400045;
3. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 针对砂黏粒混合型遗址土在一次性拌合夯补中胶结效率不足、反应过程难以调控等问题, 以重庆钓鱼城加担土遗址典型夹砂夯土为对象, 提出一种微生物诱导尿素预水解方法, 采用室内模拟夯补的一次拌合法, 研究不同氢氧化钙掺量下夹砂遗址土的力学性能、耐盐性、色差兼容性 & 微观结构演化。结果表明, 未经加固的土体强度约为 1.53 MPa, 协同加固后试样 28 d 无侧限抗压强度最高达 9.20 MPa, 约为未加固组的 6 倍; 经 5 次耐盐循环后, 氢氧化钙掺量 30% 的试样残余强度最高为 1.48 MPa, 表现出较好的结构保持能力; 各加固试样总色差 ΔE^* 均小于 3.0, 对遗址土外观影响较小; 扫描电镜结果显示, 试样中存在碳酸钙沉淀并在颗粒间形成桥连结构; 微生物诱导尿素预水解与氢氧化钙协同作用能在一定程度上改善夹砂遗址土的一次拌合成型效果及结构特性。

关键词: 夹砂遗址土; 微生物矿化; 夯补修复; 力学特性; 微观结构

中图分类号: TU44 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-13

Mechanism of urea pre-hydrolysis microbial mineralization of calcium hydroxide for reinforcing sand-filled site soil and durability of reinforced soil

LIU Yuanjian¹, WANG Yinan², XIA Hua^{3a}, YIN Shunlang¹, CAI Yalin¹, HU Limin¹,
WANG Chunyan^{3a,3b}, YANG Yang^{3a,3b}

(1. Chongqing Cultural Relics and Archaeology Research Institute, Chongqing 400013, P. R. China; 2. General Research Institute of Architecture & Planning Design CO., LTD., Chongqing University, Chongqing 400045;

3a. School of Civil Engineering; 3b. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To address the insufficient cementation efficiency and limited reaction controllability of sand-clay

收稿日期: 2026-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(52478326); 重庆市科研机构绩效激励引导专项(CSTB2024JXJL-YFX0045、CSTB2024JXJL-YFX0046)

作者简介: 刘远坚(1984-), 男, 副研究馆员, 主要从事建筑遗产保护研究, E-mail: roy3499@163.com。

杨阳(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn。

Received: 2026-04-21

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52478326); Chongqing Scientific Research Institutions Performance Incentive and Guidance Project (Nos. CSTB2024JXJL-YFX0045, CSTB2024JXJL-YFX0046)

Author brief: LIU Yuanjian (1984-), associate research librarian, main research interest: architectural heritage protection, E-mail: roy3499@163.com.

YANG Yang (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn.

mixed earthen heritage soils during one-step mixing for rammed repair, this study focuses on typical sandy rammed earth from the Jiadan earthen site of Diaoyucheng, Chongqing. A microbial-induced urea pre-hydrolysis method was proposed, and specimens were prepared using a one-step mixing procedure under laboratory-simulated rammed repair conditions. The mechanical properties, salt resistance, color compatibility, and microstructural evolution of the sandy earthen heritage soil with different calcium hydroxide contents were systematically investigated. The results show that the 28-day unconfined compressive strength of the synergistically treated specimens reached a maximum of 9.20 MPa, approximately six times that of the untreated group, which was about 1.53 MPa. After five salt-resistance cycles, the M4 group retained the highest residual strength of 1.48 MPa, indicating relatively good structural stability. The total color difference ΔE^* of all treated specimens was less than 3.0, indicating limited influence on the appearance of the heritage soil. Scanning electron microscopy observations further revealed the presence of calcium carbonate precipitates and bridging structures between soil particles. These results demonstrate that, within the scope of this study, the synergistic action of microbial-induced urea pre-hydrolysis and calcium hydroxide can improve the one-step mixing performance and structural characteristics of sandy earthen heritage soil. This study provides a new technical perspective and experimental basis for the rammed repair of earthen sites.

Keywords: sand site soil; microbial mineralization; tamping repair; mechanical properties; microstructure

土遗址是人类历史文化遗产的重要物质载体,具有不可再生性和独特的科学、艺术和历史价值,其科学保护与合理修复已成为文化遗产保护领域的核心议题之一^[1]。在中国西南地区,重庆钓鱼城古战场遗址因其在宋蒙战争史中的重要地位,被誉为“改写世界战争史的山城要塞”,其保护与修复问题具有重要研究意义。其中的加担土遗址核心建筑遗存以夹砂夯土结构为主,土体中砂粒与黏粒比例约为 4:6,含砂量偏高的特性使其在长期降雨冲刷、温湿度循环及风化作用下易发生表层剥落、局部垮塌、冲沟发育及掏蚀空洞等病害,严重威胁遗址结构稳定性与安全性。

夯补加固是当前土遗址修复中最常用的工程手段之一,其基本原则是采用与原遗址土物理力学性质相近的材料,对病害部位进行回填夯实,以恢复结构完整性并延缓病害发展^[2-3]。然而,在钓鱼城这类高含砂量夹砂夯土遗址中,传统夯补技术在工程实践中暴露出明显不足^[4]。由于砂粒比例较高、颗粒级配复杂,新旧土体之间主要依赖物理压实形成接触,难以在微观尺度实现有效胶结,界面结合强度不足,加固区域在长期服役过程中易发生二次剥离和失稳^[5]。为提升夯补效果,部分研究尝试引入石灰、水泥或高分子类化学材料对夯补土进行改性^[6-8],但这些材料往往存在与原遗址土相容性差、耐老化性能不足及环境友好性欠佳等问题,与文物保护“最小干预”和“可逆性”等原则相悖。

近年来,作为一种新型生物岩土加固方法,微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术在砂土加固、抗液化、渗漏控制等方向受到了广泛关注^[9-11]。该技术

利用微生物代谢活动诱导碳酸钙晶体在土颗粒间形成胶结结构,从而改善土体强度与变形性能^[10,12]。Li 等^[13]研究发现,MICP 能提升西北地区典型夯土试样的机械性能,展现出更优的加固性和相容性;Liu 等^[14]的室内试验进一步表明,MICP 处理能显著降低土壤的水分蒸发速率、地表裂纹比;在黏性土改良方面,Kannan 等^[15]发现,MICP 技术能提升土体黏聚力并改善其变形特性。然而,目前 MICP 在文物保护领域仍主要停留在室内试验和小尺度探索阶段,距离实际工程应用尚有较大距离^[16-19]。一方面,菌液制备、尿素与钙源供给带来的材料与施工成本较高;另一方面,反应速率、环境适应性、生态安全性以及修复体与原遗址土之间的力学兼容性问题仍需进一步论证。因此,从土遗址保护对材料相容性与长期稳定性的基本要求出发,MICP 技术更适合作为一种可调控的辅助胶结手段开展机理与适用性研究,其应用评价亦需综合考虑材料匹配性、环境适应性及长期耐久性等因素。

此外,现有研究多集中于均质土体系,而对于夹砂遗址土,特别是在夯补工程普遍采用的一次性拌合施工条件下,MICP 技术面临着更为具体的制约:常规钙盐分布不均,尿素水解与钙源释放在时间尺度上难以匹配。同时,传统土遗址夯筑多用生石灰(CaO),但其拌合时的熟化放热极易导致微生物热损伤失活^[20-22]。基于此,笔者率先引入微生物诱导尿素预水解的技术思路,并采用相容性好且无热损伤的氢氧化钙替代生石灰作为固相缓释钙源。通过提前激活水解反应,实现碳酸根供给与 Ca^{2+} 缓释的时序匹配。通过设置不同氢氧化钙掺量,从力

学性能、外观兼容性及微观结构等多层面系统评估其协同加固效果。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

1.1.1 遗址土基本物理性质

试验样品为重庆市合川区钓鱼城东北部加担土遗址南宋城墙及高台建筑夯土。为严格遵循文物保护“最小干预”与“不破坏原状”的法律法规及原则,试验未对遗址本体进行任何破坏性钻探或取芯,所有试验用土均收集自遗址墙体底部自然脱落、风化垮塌的残块与散土,样品如图1所示。



图1 遗址夯土样品
Fig. 1 Site rammed earth samples

为最大限度地保持土体原始性状,野外取备的原状土采用保鲜膜包裹并置于密封整理箱内运回实验室。根据回弹强度测试,该遗址土力学回弹强度均小于1 MPa^[23]。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[24]测试土样的矿物成分、颗粒分布、基本物理、力学性质,结果如表1~表3所示。遗址土的击实曲线如图2所示,其最优含水率为10.3%,对应的最大干密度为1.96 g/cm³。按《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[25]粒径大于0.25 mm的颗粒质量占土样总质量的13.7%,粒径大于0.075 mm的颗粒质量约占土样总质量的54.9%,超过总质量的50%,应定名为粉砂。根据级配累积曲线(图3),遗址土中小于0.075 mm的粉、黏粒含量约为45%,使得遗址土具备透水性、黏聚力不佳,类似于粉土,容易出现振动液化、易被冲蚀的特点。

1.1.2 菌液制备

试验菌种为巴氏芽孢杆菌(ATCC11859),采用液体培养基对细菌进行扩大培养,将细菌接种到培养液中,在恒温震荡箱(30 ℃,121 r/min)中培养24 h,培养基pH值为9.5,得到加固遗址夯土所需的菌液,试验采用的细菌吸光度值均统一为OD₆₀₀=1.0。试验所用尿素为3 mol/L及氢氧化钙(经检测含量≥85%,pH值为12.4)。预水解操作步骤为:将培养好的菌液离心后用蒸馏水重悬至OD₆₀₀为1.0,随

表1 XRF 夯土主要成分分析
Table 1 Analysis of main components of XRF rammed earth

成分	质量分数/%	元素	质量分数/%
SiO ₂	59.49	Si	27.81
Al ₂ O ₃	24.06	Al	12.73
Fe ₂ O ₃	5.93	Fe	4.15
MgO	3.99	Mg	2.41
K ₂ O	2.63	K	2.18
Na ₂ O	1.55	Na	1.15
CaO	1.04	Ca	0.743
其他	1.31		

表2 粒径分布
Table 2 Distribution of particle size

粒径 <i>d</i>	质量分数/%
1 mm< <i>d</i> ≤2 mm	97.95
0.5 mm< <i>d</i> ≤1 mm	96.67
0.25 mm< <i>d</i> ≤0.5 mm	94.02
0.075 mm< <i>d</i> ≤0.25 mm	86.33
<i>d</i> ≤0.075 mm	45.10

表3 基本物理性质
Table 3 Basic physical properties

天然密度/ (g/cm ³)	最优含 水率/%	最大干密度/ (g/cm ³)	界限含水率试验		
			液限 <i>W_L</i> /%	塑限 <i>W_p</i> /%	塑性指 数 <i>I_p</i>
2.02	10.3	1.96	25.22	14.23	10.99

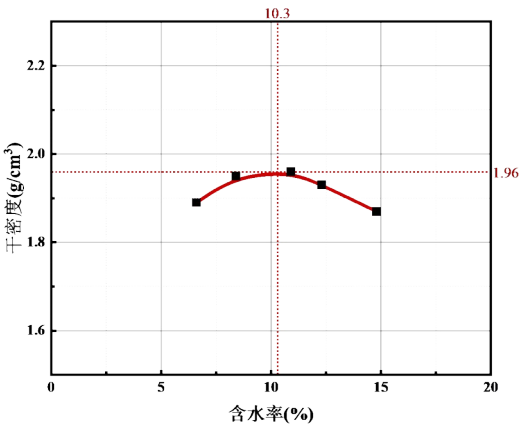


图2 击实曲线
Fig. 2 Compaction curve

后与3 mol/L的尿素等体积混合搅拌,在室温(25 ℃)条件下预反应2 h后,使脲酶催化尿素充分水解并生成大量碳酸根离子与铵根离子。体系pH值显著升高,伴有明显氨味,表明水解反应已充分进行。随后将该预水解液作为拌合用水与土体混合。

1.1.3 试样制备

基于土遗址夯补加固的工程背景,试样制备采用一次拌和法,将破碎烘干后的遗址土(模拟土遗

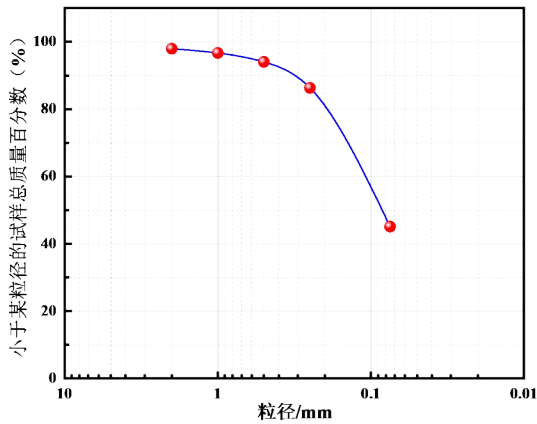


图3 粒径级配累积曲线

Fig. 3 Cumulative curve of soil particle size distribution

址中自然破碎堆积的散土)作为夯补工程中新补土

材料,将预水解液与氢氧化钙及夯土同步拌合成型,试验过程中未引入任何其他外加钙盐,用塑料薄膜密封、湿毛巾覆盖闷发。考虑到夯补工程中填土通常分层回填、逐层夯实的施工特征,同时受限于实验室成型模具高度与压实均匀性控制要求,试样制备过程中采用分两层压实法成型。为消除分层制样带来的界面软弱层,下层土体压实后,使用专用刮刀对其表面进行凿毛处理,以增加层间粗糙度,提高界面黏结强度,避免形成连续软弱面。随后填入上层土继续压实,以提高整体压实度的可控性与重复性。之后采用分层压实法制作试样,最终压实度控制在90%左右,干密度约为 1.75 g/cm^3 ,试样在如图4所示规格为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的模具中成型。



图4 试样制备流程

Fig. 4 Sample preparation process

1.1.4 试验方案

为区分未加固、纯化学加固与微生物参与条件下的差异,并兼顾文物修复中“兼容性优先于高强度”的原则,将10%、20%和30%氢氧化钙掺量作为室内参数筛选范围,而非工程推荐配比(表4)。其中,S1为未加固对照组;M1为纯化学对照组,仅掺入10%氢氧化钙,不加入菌液-尿素预水解体系;M2~M4为微生物参与组,氢氧化钙掺量分别为10%、20%和30%。每组样品制备9个,各龄期取3个平行样,最终结果取平均值。

1.2 试验方法

1.2.1 形貌和物相分析

形貌和物相分析用于研究不同氢氧化钙掺量

表4 试验方案

Table 4 Test programme

试验编号	加固方案	氢氧化钙掺量/%
S1	未加固	
M1	未加固	10
M2	微生物矿化	10
M3	微生物矿化	20
M4	微生物矿化	30

对MICP加固遗址土矿物成分的影响,以确定试样的矿物组成及其含量变化。试验中取3 g经烘干、粉碎、研磨并通过200目筛后的土样进行XRD分析, 2θ 扫描角度范围为 $10^\circ \sim 90^\circ$,扫描时间为20 min。同时,采用赛默飞世尔Quattro环境扫描电镜对试样的微观形貌特征进行观测,使用导电胶将样品固定于直径为1 cm的圆形载片上,并以空气轻柔吹拂样品表面。在采用KYKY SBC-12离子溅射仪进行金喷涂前,确保样品表面尽可能平整。鉴于试样加固程度较弱,为避免引入杂质及盐溶液干扰,制样过程中未对样品进行去离子水清洗。

1.2.2 无侧限抗压强度试验

采用无侧限抗压强度试验系统评估不同加固方案土体的变形与强度特性。试验前,将养护完成后需置于 60°C 的烘箱中干燥直至质量稳定,随后用塑料膜密封保存,防止水分渗入。为降低摩擦系数,试验时在试样上下两端涂抹少量凡士林,将试样安置于加载板中心位置。试验时,设置自动加载,设定应变速率为 1 mm/min ,整个试验过程中持续记录应力-应变数据,确保试验过程的完整性。

1.2.3 三轴压缩试验

三轴压缩试验参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[24]相关规定进行,试验类型为固结不排水(CU)试验。考虑夹砂遗址土主要服务于近地表夯补部位,100 kPa工况用于表征浅层约束条件下的主导力学响应,200 kPa和400 kPa工况主要用于考察围压敏感性和结构演化规律,不直接对应现场实际埋深。

由于遗址土样中粉粒和黏粒含量较高,试样饱和方式选用反压饱和^[26]。在饱和试样时,先将制备好的试样置于真空饱和缸中抽真空3 h,以排出试样孔隙中的空气;然后,在真空环境下注入无菌水,在常压下继续浸泡12 h,使土样充分饱和;最后,将试样装入三轴压力室,分级施加反压至680 kPa,且围压始终高于反压20 kPa。各组试样分别在100、200、400 kPa有效围压下进行等向固结,固结完成后以0.18 mm/min速率剪切,持续监测轴向应力、轴向应变及孔隙水压力,直至试样出现明显破坏或轴向应变达到20%时停止。

1.2.4 耐盐试验

耐盐试验用于评估在盐分结晶反复作用条件下加固后遗址土保持其外观特征与力学性能稳定、抵抗盐害劣化的能力,主要考察试样在盐蚀循环过程中是否出现变色、粉化、表层剥落及强度衰减等现象。硫酸钠是导致土遗址盐害最主要的可溶盐,其结晶析出时体积膨胀约4倍,破坏性最为严重^[27];根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[25],当土中硫酸钠含量不超过1%时可不考虑盐胀性,因此,试验选用质量分数为1%的Na₂SO₄溶液作为侵蚀介质,以模拟遗址土盐害的临界状态。试验先将试样完全浸入质量分数为1%的Na₂SO₄溶液中进行吸盐处理,吸盐时间为12 h,以保证盐溶液充分进入试样孔隙结构。随后取出试样,在50℃恒温烘箱中烘干12 h,使孔隙水分蒸发并诱导盐分结晶。上述“吸盐—烘干”过程构成一个完整的耐盐循环周期。考虑到重庆市合川区夏季极端最高气温可达43℃^[28],试验选用50℃作为烘干温度,模拟高温条件下盐分结晶对遗址土结构的影响。为兼顾盐分累积损伤的有效诱发与试验的可操作性,参考土遗址保护领域耐盐加速试验的常用做法^[29],试样共经历5个耐盐循环周期。循环结束后,将试样再次烘干至恒重,记录其外观变化情况,并进行无侧限抗压强度试验,以评估盐分循环作用下加固遗址土的力学性能保持情况。此外,5次循环可有效评估材料抵抗盐害的初期能力,但对于评估其长期服役性能仍显不足。遗址区可溶盐反复运移-结晶的长期

作用可能导致更严重的累积损伤,后续有必要开展更多次数的干湿循环试验,并结合现场环境监测,以更全面评估加固材料的长期耐久性。

1.2.5 水理性质

遇水软化与膨胀是土体的重要物理特性之一。当土体内部的可溶性矿物及胶结组分在水中发生溶解时,会削弱颗粒间的胶结作用,破坏原有骨架结构,进而引起强度衰减,严重时可导致土遗址结构失稳甚至坍塌。为对比不同试样的加固效果,采用崩解试验对其水稳定性进行评价。试验过程中,将圆柱体试样缓慢、平稳地浸入水中,确保水面高于试样。通过持续观察试样在水中的软化与解体过程,记录试样完全崩解所需时间。

1.2.6 色差分析

文物修复的基本原则是尽可能保持文物原貌,而颜色变化是评估修复工艺合理性的关键指标之一^[30]。颜色差异指两个样本在颜色感知上的差异,包括亮度差异、色饱和度差异和色相差异。采用去离子水配制的标准样本,与不同改性氢氧化钙掺量的遗址土样本进行对比,通过定量分析判断处理后颜色是否符合遗址保护要求。使用色差仪进行测量时,选取圆柱形样本不同位置的5个测量点,每种处理条件设置两个平行样本,最终结果取平均值。色差仪可测量L*、a*、b*的色空间值。通过对比微生物矿化加固后的样品与未处理样品,计算出差异值 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 和 ΔE^* ,其中L*表示颜色的明度,a*表示红绿度,b*表示黄蓝度, ΔE^* 表示总色差值,计算公式为

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

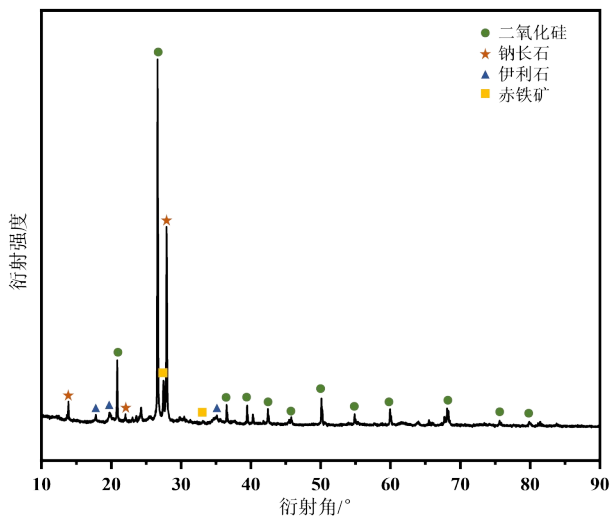
2 试验结果与讨论

2.1 物相和形貌分析

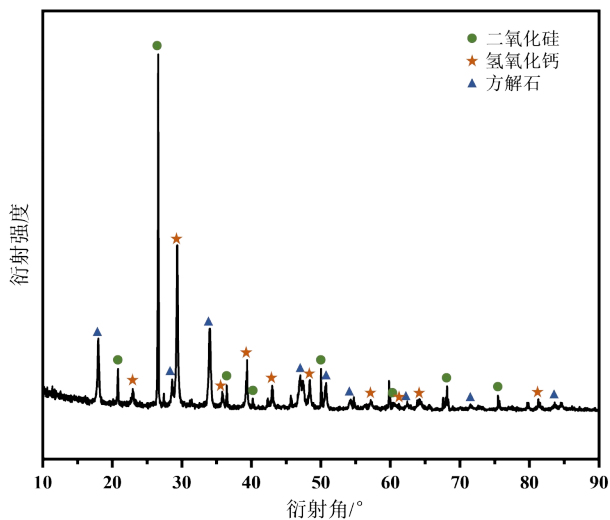
为揭示微生物诱导尿素预水解矿化条件下氢氧化钙协同加固夹砂遗址土的作用机制,采用XRD与SEM对试样的矿物组成及微观结构特征进行综合分析。

图5为未加固夹砂遗址土及经氢氧化钙与预水解微生物矿化处理后试样的XRD图谱。对比可见,未加固土样的主要矿物相为石英(其特征衍射峰在2 θ 为20.8°和26.6°处尤为显著),并含有少量钠长石、伊利石及微弱的赤铁矿峰,表明其为砂-黏混合结构且天然胶结能力有限;而加固试样中除保留石英主峰外,在多个位置出现明显的碳酸钙特征衍射峰,证实微生物诱导作用下新生成了碳酸钙矿化产物。同时,图谱中仍可检测到氢氧化钙的特征峰,说明改性氢氧化钙以固相形式部分保留并持续提

供钙源。随着氢氧化钙的引入,碳酸钙峰强度增强且未出现新杂相,表明该加固体在矿物组成演化中具有良好的稳定性与材料相容性。



(a) 纯夯土



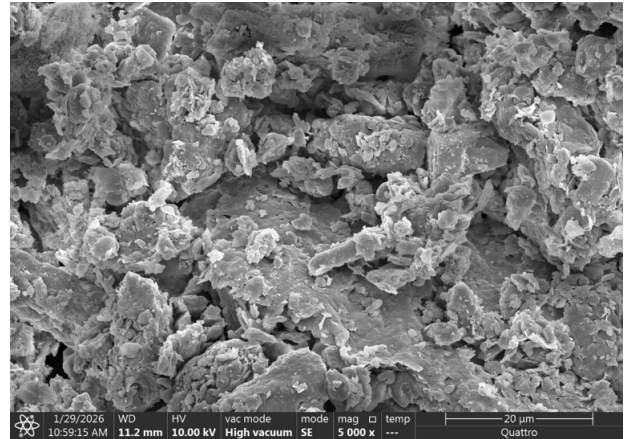
(b) 氢氧化钙固化

图5 XRD图谱

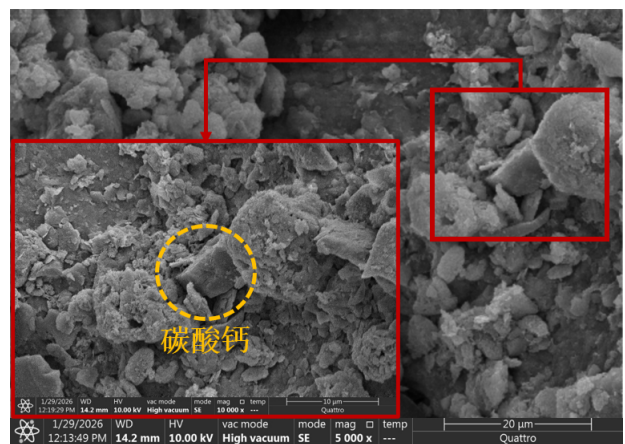
Fig. 5 XRD pattern

进一步结合SEM微观形貌观测结果(见图6),对矿物转化过程在微观尺度上的表现进行验证。SEM图像显示,加固后试样中土颗粒表面及颗粒接触部位出现明显的矿化沉积特征,新生成的碳酸钙以晶体或类胶结物形式附着于颗粒之间,并逐渐填充颗粒间孔隙,使原本以点接触为主的颗粒接触关系向面接触或多点接触转变。该微观胶结结构的形成,有效增强了土体内部的结构完整性与承载能力,与宏观力学性能的提升结果相一致。

综合XRD与SEM分析可知,在预激活微生物矿化条件下,氢氧化钙主要通过参与碳酸钙沉淀过程实现对夹砂遗址土物相组成与微观结构的协同



(a) 纯夯土



(b) 氢氧化钙固化

图6 固化前后夯土电镜图

Fig. 6 SEM diagram of rammed earth before and after curing

调控。生成的碳酸钙矿化产物在不破坏原有土体骨架的前提下,构建起新的颗粒胶结网络,从而为夹砂遗址土的改良效果与耐久性提升提供了微观机制支撑。此外,XRD和SEM结果只能表明加固后试样中存在新的碳酸盐沉淀及颗粒间胶结现象,但尚不能单独证实其全部来源于微生物矿化。对试验体系而言,氢氧化钙自身碳化、压实作用和养护条件同样会影响试样强度与结构演化。因此,M2~M4相较于M1表现出的增强效应,更宜理解为“微生物参与后产生的附加贡献”,而非对全部强度增益的唯一解释。后续仍需结合 CaCO_3 定量、氨氮/pH值/电导率及更多控制组进一步区分不同机制的相对贡献。

2.2 抗压变形及强度特性

不同氢氧化钙掺量条件下微生物矿化加固遗址土的应力-应变曲线及无侧限抗压强度如图7所示。

通过对比不同加固方案,不同试样在3~28 d期间均表现出一定程度的强度增长,纯化学组M1的强度较未加固土S1有所提升,其强度来源主要是分

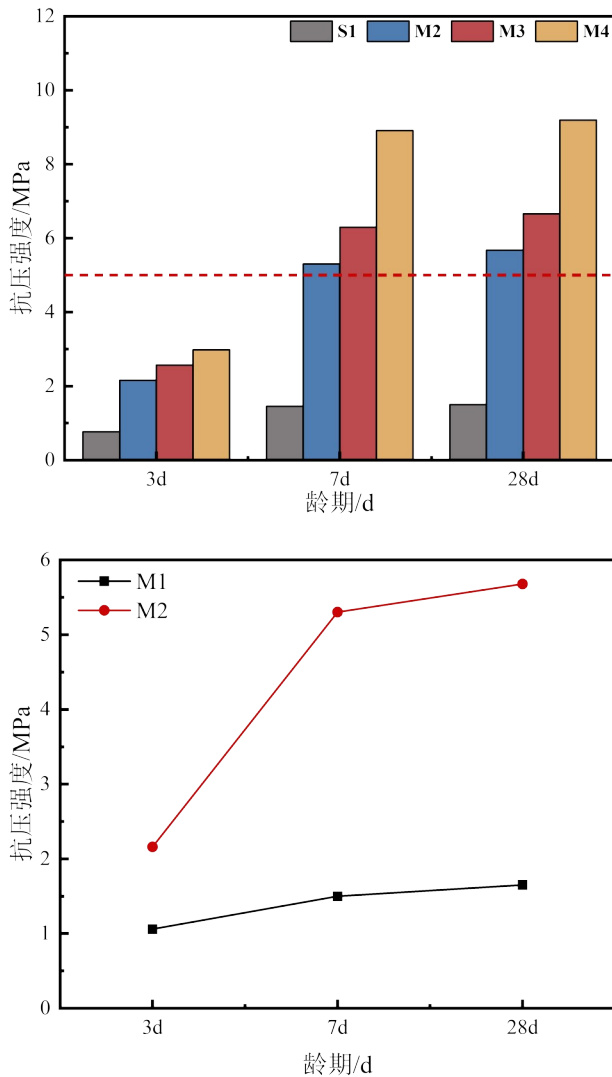


图7 不同掺量下各试样无侧限抗压强度随养护龄期的变化
Fig. 7 The change of unconfined compressive strength of each sample with curing age under different dosage

层压实作用以及氢氧化钙自碳化生成的少部分凝胶;其中M2~M4组的绝对强度整体高于M1组,说明预水解体系的引入有助于改善试样早期成型后的胶结状态。随着氢氧化钙掺量增加,试样绝对强度总体升高,表明在试验范围内,钙源供给对结构形成具有重要影响。

M4组的强度虽达到了9.20 MPa,但其峰后软化明显、材料脆性增加。在实际夯补修复中,修复体强度应控制在接近或适度高于原遗址土的合理区间,以避免因刚度和强度失配引发后续干缩开裂、温湿变形不协调及界面应力集中等问题。因此,设置高掺量(M3、M4组)主要是为了探究“生物-化学”协同体系的作用机理与理论上限;而在面向实际工程应用时,更推荐采用低掺量的M2组。M2组不仅有效提升了土体的耐水、耐盐等耐久性能,且其绝对强度水平(约2~3 MPa)与原遗址土回弹

强度最为匹配,充分遵循了文物保护“物理力学兼容”的核心原则。因此,后续研究与工程应用应着重优化配比与工艺,在确保有效胶结与耐久性的前提下,将加固体的强度控制在合理、兼容的范围内,并更加注重其抗盐蚀、抗干湿循环等长期耐久性指标,以真正满足土遗址科学保护与可持续修复的需求。

2.3 剪切变形及强度特性

图8所示为在有效围压100、200、400 kPa条件下,不同氢氧化钙掺量下微生物矿化加固遗址土的三轴固结不排水压缩试验的偏应力-轴线应变关系曲线。整体来看,各工况曲线均呈现出“初期快速上升—达到峰值后逐渐下降—最终趋于稳定”的演化规律,表现出典型的应变软化特征。这一力学响应表明,在加载初期,土颗粒骨架与微生物诱导生成的碳酸钙胶结结构共同承担外部荷载,偏应力随轴向应变近似线性增长;随着应变持续发展,当外部应力超过胶结结构的承载极限时,局部碳酸钙胶结体发生破坏,颗粒间接触状态由胶结控制逐渐向摩擦控制转变,偏应力进入下降阶段;在大变形条件下,土颗粒发生滑移、重排并形成新的结构平衡,试样强度逐渐稳定,其残余强度主要由颗粒间摩擦与嵌锁作用提供。

在100 kPa围压条件(图8(a))下,试样模拟浅表层遗址土的受力状态。此时,侧向约束较弱,应变软化特征相对平缓。M2试样峰值偏应力与残余应力分别约为880 kPa和725 kPa,整体强度水平较低;当氢氧化钙掺量提高至20%后,峰值偏应力和残余应力分别提升至约1 680 kPa和1 000 kPa,较M2分别提高约90.9%和37.9%,表明适度提高钙源掺量能显著增强微生物矿化胶结效应。将掺量增至30%时,其偏应力-应变曲线整体形态与M3接近,峰值强度提升幅度趋于减缓,说明在低围压条件下,矿化胶结效应逐渐由“钙源控制”向“结构控制”转变。

在200 kPa围压条件下(图8(b)),围压约束增强,各组试样的峰值强度与残余强度整体提高。M2试样峰值偏应力与残余应力分别约为872 kPa和760 kPa;M3约提升至1 594 kPa和1 130 kPa,峰值与残余强度较M2分别提高约82.8%和48.7%。M4在该围压下表现出进一步增强的承载能力,其峰值偏应力与残余应力相对M2提升幅度更为明显,表明在中等围压条件下,提高氢氧化钙掺量有利于强化矿化胶结结构的整体承载能力。

在400 kPa围压条件下(图8(c)),试样模拟深层遗址土或高埋深应力环境下的剪切响应特征。

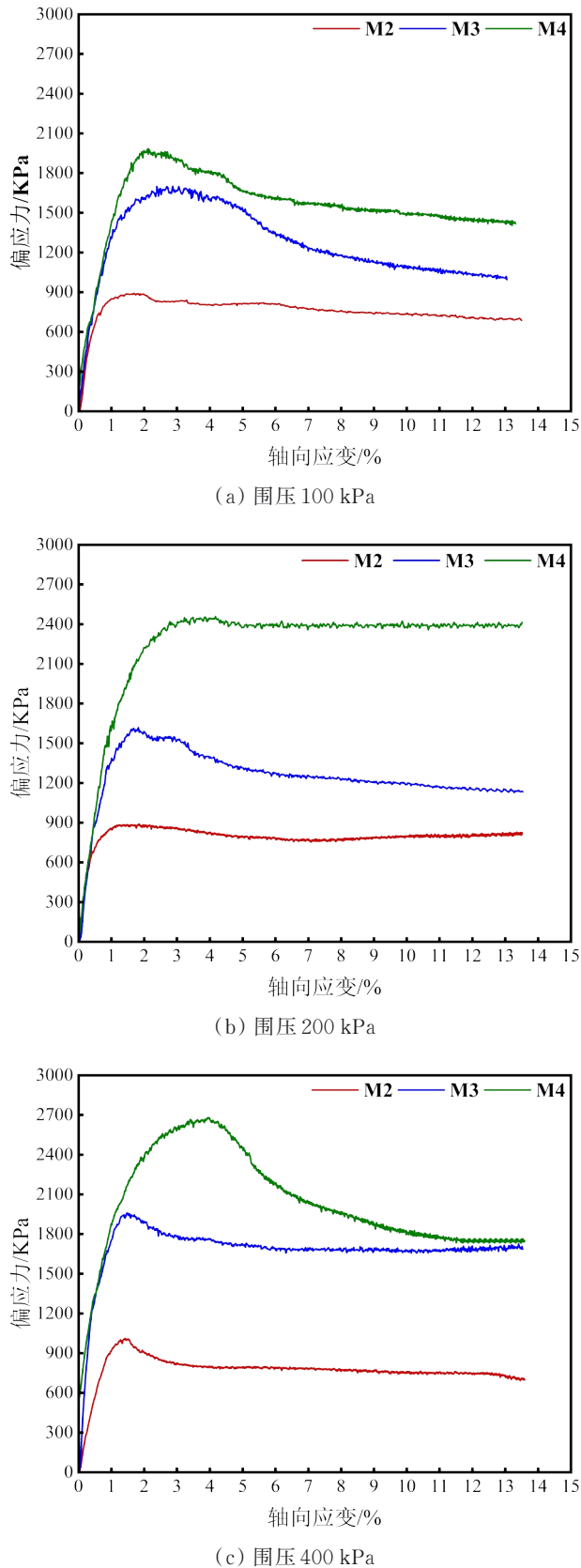


图8 三轴固结不排水试验的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of triaxial undrained consolidation tests

此时,各组试样的峰后软化程度明显增强,剪切破坏更趋集中。M2试样峰值偏应力约为996 kPa,残

余应力约为748 kPa;M3和M4峰值偏应力接近,约1915 kPa,残余应力分别为1674 kPa和1400 kPa。该结果表明在高围压环境中,矿化生成的碳酸钙胶结体在剪切破坏过程中仍能维持较高的结构完整性。M4试样的峰值偏应力最高,约为2650 kPa,较M2提高约166.06%,显示出在强围压约束下,钙基材料对土体骨架强化作用更加充分,但其峰后软化幅度亦相对较大。

综合分析可知,预水解微生物矿化体系通过提前形成稳定的碳酸根供给环境,使氢氧化钙中 Ca^{2+} 的释放过程与微生物矿化反应在时间尺度上实现良好匹配,从而在土颗粒接触部位形成以碳酸钙为主的桥连与填隙胶结结构。该结构在加载初期显著提升土体峰值强度,而在峰后阶段逐步破坏,残余强度则主要由颗粒间摩擦与部分残留矿化产物共同控制。不同围压与钙源掺量条件下力学响应的差异,从宏观层面验证了“矿化胶结增强—结构破坏—摩擦重组”的演化机理,与XRD和SEM所揭示的微观结构特征具有良好一致性。

2.4 耐盐测试

经过5次耐盐循环,观察到试样胀裂、盐析,且上表层有起甲、酥碱、小块胀起等现象出现,如图9所示。

基于全龄期无侧限抗压强度及耐盐循环后强度的对比可以发现,微生物矿化协同加固对土体的抗盐蚀劣化能力有显著提升。高掺量组(M4)在全龄期内展现出较高的绝对残余强度,其在3d龄期的强度保留率达49.66%,显著高于同期纯化学组M1(29.71%)。这从机理层面证明预水解微生物在充足钙源环境下诱导生成的碳酸钙晶体,与化学凝胶形成了有机-无机互锁的复合胶结网络;该结构通过晶体填充细化孔隙、增强界面韧性,能更有效地缓冲与耗散盐结晶反复胀缩引起的内部应力,抑制裂纹的萌生与扩展。相比之下,M1组在各龄期的强度剧烈衰减,则印证了单一以化学凝胶为主的胶结结构刚性大、脆性高,对盐结晶产生的膨胀应力极为敏感,易发生脆性破裂。

然而,结合土质文物修复原则,尽管M4组在盐侵循环作用下保留了最高的残余强度(约1.48 MPa),但其加固前期的绝对强度过高(达9.20 MPa),在实际工程中极易导致新补土与原遗址本体之间产生严重的变形不协调与应力集中。相比之下,低掺量组(M2)在经历5次极端耐盐循环后,能够较好地维持整体结构形态而未发生彻底崩解,且其残余强度与加固前期强度均保持在与遗址原状土更为匹配的区间。这表明,适度的微生物矿化

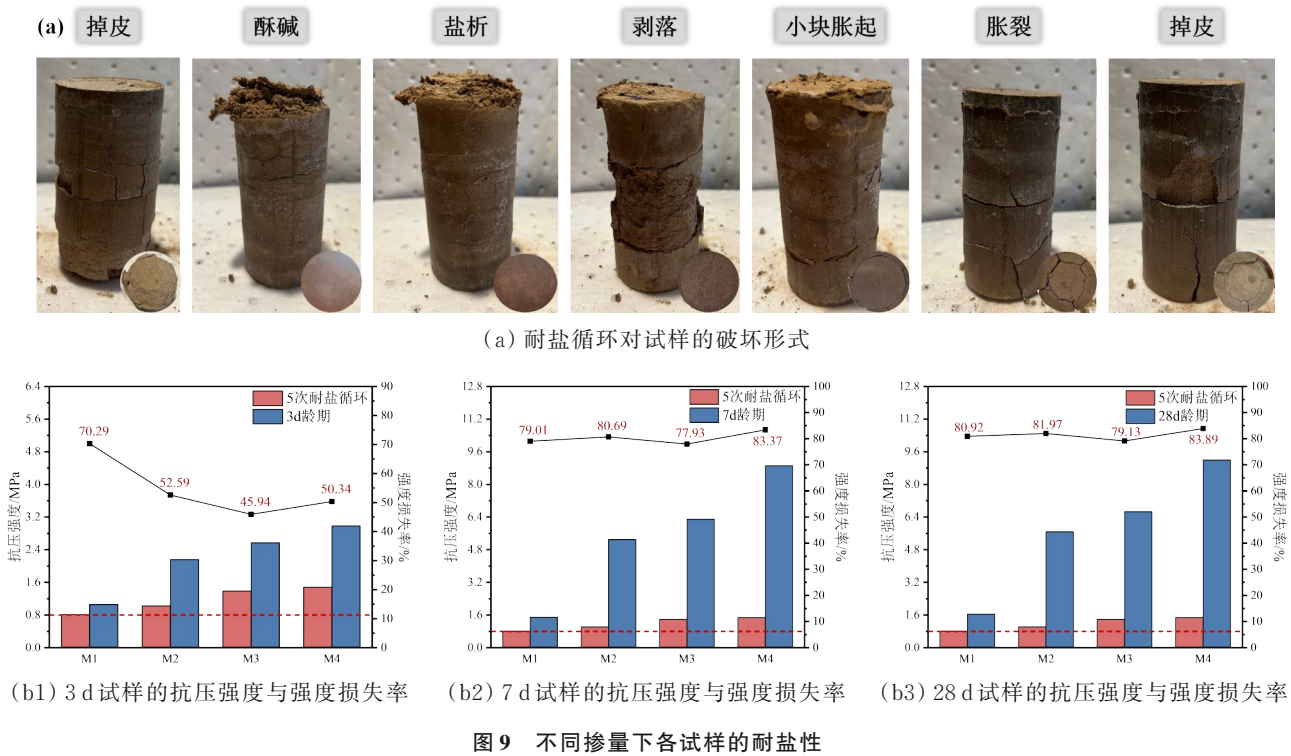


图 9 不同掺量下各试样的耐盐性 Fig. 9 Salt resistance of each sample under different dosage

加固在显著提升原状土抗盐蚀韧性的同时,能最大程度地兼顾力学兼容性。

此外,在耐盐试验过程中,各组试样普遍观察到裂缝首先沿试样高度方向的局部界面位置产生并扩展,这一现象与试样制备过程中采用的分层压实成型方式密切相关。在一次性拌合、分层压实条件下,尽管整体压实度控制在相近水平,但凿毛处理后的层间界面在微观结构上仍可能存在相对疏松区域,在盐结晶胀缩反复作用下更易成为应力集中与破坏起始位置。因此,裂缝的优先生长反映的是成型工艺下的结构非均质性,而非材料本身耐盐性能的根本不足。

综合而言,预水解微生物与氢氧化钙的高效协同,能有效改善夹砂夯土的内部孔隙结构并提升耐久性。其中,高钙配比(M4)在微观尺度上验证了该体系抑制渗透与耗散结晶应力的机理上限;而低钙配比(M2)则在抵抗盐害劣化与维持遗址力学兼容性之间取得了更为理想的平衡,更符合山地土遗址长期科学保护的工程诉求。

2.5 耐水性测试

崩解试验能验证试样的耐水性,具体崩解试验情况见表 5。

不同掺量及加固方式条件下,试样在水中长期浸泡过程中的崩解演化特征如表 5 所示。未加固原状试样 S1 在入水后极短时间内即出现明显劣化,2 s 吸水冒气泡,1 min 后发生开裂,30 min 出现水浑浊

表 5 不同掺量条件下各试样崩解情况

Table 5 Disintegration of each sample under different dosage conditions

时间	S1	M1	M2	M3	M4
2 s	□	-	-	-	-
1 min	△	□	□	□	□
30 min	◇	□	□	□	□
2 h	※	□	□	□	□
6 h	○	△	△	□	□
12 h	-	△	△	△	△
24 h	-	△	△	△	△
48 h	-	-	-	-	-
72 h	-	※	-	-	-
168 h	-	※	-	-	-

注:“□”表示吸水、冒气泡;“△”表示开裂、掉块;“◇”表示水浑浊;“※”表示试样坍塌;“○”表示试样完全解体;“-”表示没有变化。

现象,2 h 内试样发生坍塌,并于 6 h 内完全解体,表明原状夹砂夯土在水作用下结构稳定性极差,耐水性不足。

相比之下,仅掺入 10% 氢氧化钙但未进行微生物矿化处理的 M1 试样,其耐水性虽较 S1 试样有一定改善,但整体效果仍然有限,与图 10 对应。试样在早期阶段仍表现为吸水冒气泡,并在 6~24 h 内逐步出现开裂与掉块现象,说明单纯依靠改性氢氧化钙掺入,难以在土颗粒间形成稳定、连续的胶结结构,其抗水软化与抗崩解能力提升有限。

在微生物协同加固作用下,M2 试样在浸水过程中未出现水浑浊及快速坍塌现象,仅在中后期表

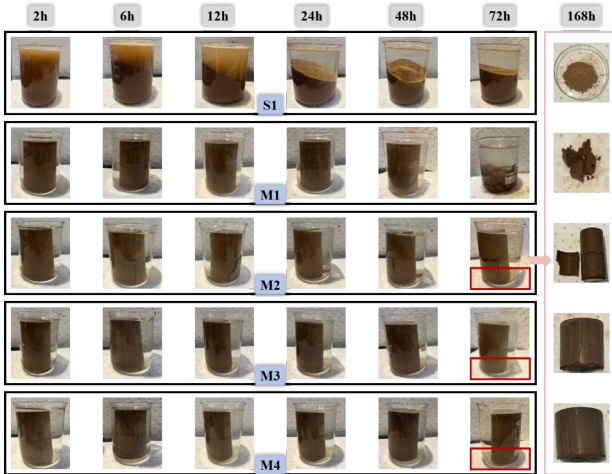


图 10 不同掺量条件下各试样崩解情况对比

Fig. 10 Comparison of disintegration of each sample under different dosage conditions

现出轻微开裂,整体结构保持完整。同时也可以观察到,试样掺量较少,未能完全搅拌均匀导致表皮掉落。随着氢氧化钙掺量提高至20%和30%,试样在168 h内均未发生明显崩解,仅观察到局部吸水或轻微裂隙发展,这表明随着氢氧化钙钙源供给的增加,矿化诱导生成的碳酸钙晶体在土体内部形成了更为完善的抗水化互锁结构,极大地削弱了水流对土体骨架的溶蚀与破坏作用,实现了对遗址土长期水稳定性的显著提升。

微生物矿化加固是提升夹砂遗址土耐水性能的关键因素。其通过诱导碳酸钙在土颗粒接触部位沉积,增强颗粒间胶结并填充孔隙结构,从而有效削弱水分对土体骨架的破坏作用;同时,适当提高氢氧化钙掺量有利于提供持续稳定的钙源,使矿化胶结结构更加致密,从而显著延缓试样的崩解过程。

2.6 色差评价

图11、图12显示了不同测试组样品的外观色度值和总色差。未加固样品(S1)的 L^* 、 a^* 和 b^* 值分别是54.92、10.26和14.89。随着氢氧化钙掺量的增加, L^* 、 a^* 和 b^* 值整体呈增大趋势,表明试样颜色变得更白、更红、更黄,与视觉观察结果相符,这种变化可能是由于微生物矿化反应生成的 CaCO_3 造成的。

目前在土质遗址保护中,对于色差允许范围没有统一的标准,Shi等^[17]和尚东娟等^[31]提出 ΔE^* 应小于5和3,通常, $\Delta E^* \leq 3$ 被认为肉眼不可区分。因此,采用3作为总色差的临界值。从图11(d)可以看出,对于经微生物矿化加固后的试样,对所有情况下的 ΔE^* 均小于3,对色度的影响较小,符合现场修复的色度要求。

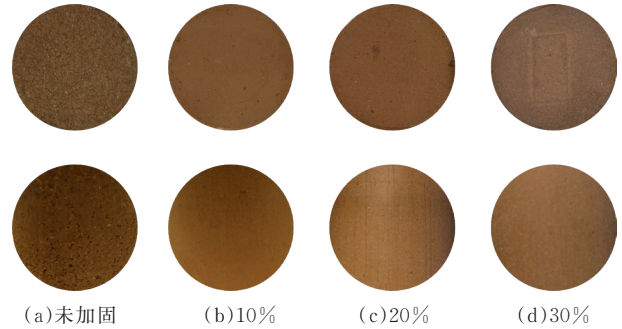


图 11 不同掺量条件下微生物加固试样的外观

Figure 11 The appearance of microbially reinforced specimens under different dosage conditions

2.7 工程适应性与环境适应性讨论

微生物诱导尿素预水解协同氢氧化钙加固方法主要面向夹砂遗址土在夯补修复中的材料改性需求。与表面喷涂、灌浆渗透等原位加固方式不同,该方法更适用于需要补配新土或重塑土体的修复场景,例如遗址局部坍塌后的夯补回填、冲沟与掏蚀空洞填补、表层剥落后局部补配以及砌补材料的预制改性等。由于其采用一次性拌合方式,可使菌液、尿素及钙源在新补土中相对均匀分布,因此更适合用于新补材料的整体改性,而不宜直接用于原遗址本体大面积原位处理,尤其不宜用于保存状态较好、文物信息丰富或对取样和扰动高度敏感的遗址部位。

从工程应用角度看,该类改性材料并非单纯提高强度,而是在满足夯补材料基本结构稳定性的同时,尽可能保持其与原遗址土在颜色、强度、变形及水盐迁移特征上的协调性。因此,在实际修复工程中,应优先采用低掺量、低干预、兼容性较好的配比,并通过现场小样试验确定适宜的菌液、尿素及氢氧化钙用量。对于强度较高的配比,虽然其室内力学性能和耐盐循环后残余强度较优,但可能导致新老土体之间刚度差异增大,在温湿度变化、干缩变形或盐结晶胀缩作用下诱发界面开裂和应力集中。因此,后续工程应用中应以“强度适配”和“长期稳定”为主要控制指标,而不宜以最大抗压强度作为唯一评价依据。

此外,试验主要在室内标准养护和加速耐盐条件下完成,尚不能完全反映真实遗址环境中长期温湿度变化、降雨冲刷、干湿循环、盐分迁移、微生物生态变化及新老土体界面耦合作用影响。针对重庆钓鱼城加担土遗址所处的高湿、多雨及温湿波动环境,后续研究应进一步开展与遗址环境条件相匹配的耐久性测试,包括干湿循环、降雨冲刷、温湿循环、盐蚀-干湿耦合、长期浸润软化以及新老土体界面剪切与剥离试验等。同时,还应结合色差、孔隙

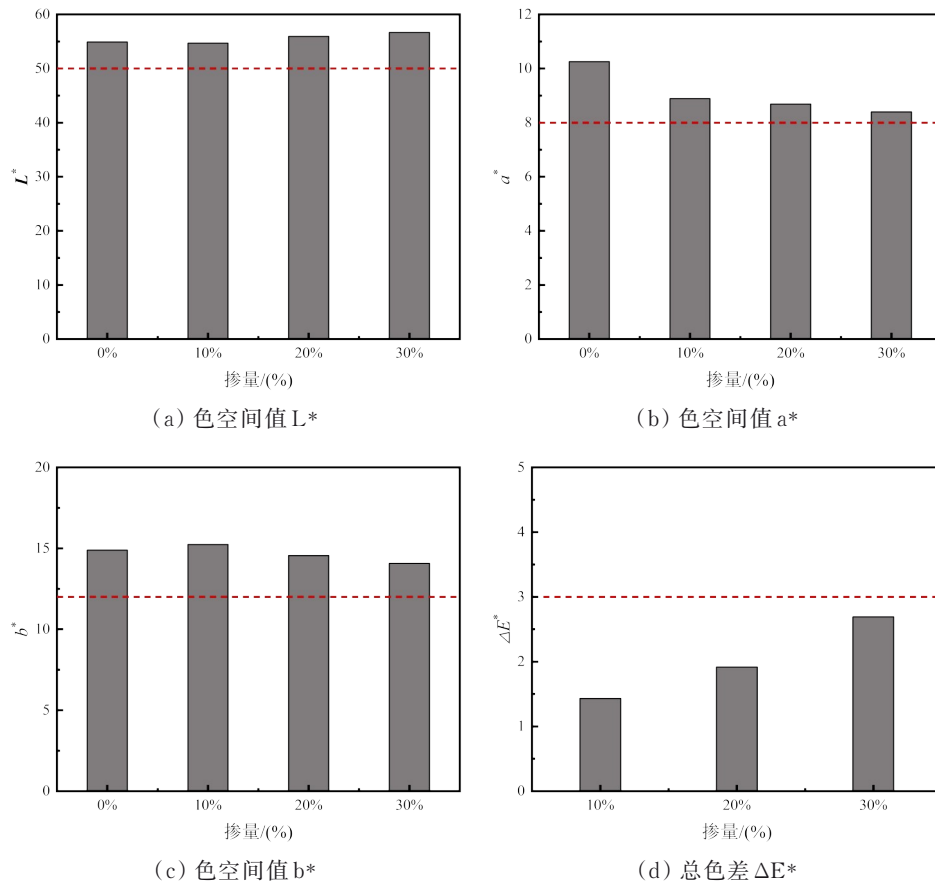


图12 不同掺量条件下加固试样色差分析

Fig. 12 Color difference analysis of reinforced samples under different dosage conditions

结构、渗透性、可溶盐含量、pH值、氨氮释放及微生物残留等指标,系统评价该类材料在真实自然环境中的外观兼容性、物理水理兼容性、化学稳定性及生态安全性。

综上,该方法目前更适合作为夹砂遗址土夯补材料改性的一种室内探索性技术路径,其工程应用仍需经过现场环境适配试验、小尺度试验段验证及长期监测评价。只有在证明其不会对原遗址土产生明显的力学失配、盐分迁移异常、颜色改变或生态风险后,方可进一步考虑在特定病害部位的夯补修复中应用。

3 结论

以重庆钓鱼城加担土遗址典型夹砂夯土为对象,提出并验证了微生物诱导尿素预水解协同氢氧化钙的一次性拌合加固方法。通过系统对比不同氢氧化钙掺量下加固试样的力学性能、耐盐耐久性、水稳定性、外观兼容性、微观结构特征,明确了预水解菌液-尿素体系的参与可改善夹砂遗址土的一次拌合成型效果与早期结构稳定性,揭示了氢氧化钙掺量对加固效果的调控作用及其在文物修复中的适用边界。主要结论如下:

1)预水解微生物矿化协同氢氧化钙能显著提升夹砂遗址土的强度与耐久性。微生物参与组(M2~M4)在各龄期的无侧限抗压强度及耐盐循环后残余强度均高于纯化学对照组(M1),其中M4组28 d强度达9.20 MPa,约为未加固土的6倍;经5次 Na_2SO_4 耐盐循环后,M4组残余强度为1.48 MPa,表现出较好的结构保持能力。XRD与SEM证实,加固后试样中新生成了碳酸钙沉淀,并在土颗粒间形成桥连与填隙结构,为强度提升提供了微观依据。

2)氢氧化钙掺量对加固效果具有双向调控作用。随掺量增加,绝对强度与盐循环后残余强度总体升高,但高掺量条件下强度增长趋于减缓,且峰后脆性增加,易导致与原遗址土的力学兼容性失配。从文物保护“兼容性优先”原则出发,M2低掺量组在适度提升耐久性的同时,保持了更匹配原状土的强度区间。

3)该体系在耐久性方面表现出一定优势,但仍存在盐蚀损伤累积问题。崩解试验中,微生物协同加固组(M2~M4)在168 h内未发生整体崩解,水稳定性显著优于未加固组和纯化学组;色差分析表明所有加固试样总色差 ΔE^* 均小于3.0,满足文物原

貌保持要求。然而,各组在 5 次耐盐循环后均出现不同程度的强度衰减与盐胀裂隙,揭示该体系在反复盐结晶作用下的长期稳定性仍需进一步提升。

4)作为室内机理验证与参数筛选工作,初步证明了该技术路径用于夹砂遗址土夯补加固的可行性。但现有试验尚不能将强度增益完全归因于生物矿化作用,氢氧化钙自身碳化、压实效应及养护条件亦具有重要贡献。该体系更适用于新补土、砌补土或局部回填材料的拌合改性,即在夯填施工前将菌液、尿素、氢氧化钙与补配土均匀拌合,以改善新补材料的胶结性能和水盐稳定性,而不宜直接作为原遗址本体大面积原位加固方法。后续应结合遗址真实温湿、降雨、盐分及新老土体界面条件,开展干湿循环、盐蚀-干湿耦合、降雨冲刷、界面协同、长期干缩开裂、生态安全性及工程成本等方面的系统研究,以进一步验证其工程适用性。

参考文献

- [1] Pan C G, Chen K Y, Chen D T, et al. Research progress on in-situ protection status and technology of earthen sites in moisty environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 253: 119219.
- [2] 裴强强, 王旭东, 郭青林, 等. 干旱环境下土遗址夯补支顶加固变形机制室内试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(8): 2755-2764.
Pei Q Q, Wang X D, Guo Q L, et al. Laboratory test of deformation mechanism of rammed roof-propping reinforcement at earthen heritage sites in arid environment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(8): 2755-2764. (in Chinese)
- [3] Wang X D, Pei Q Q, Guo Q L, et al. Stress mechanism for the rammed layer interfaces of earthen heritage sites with different treatments[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2019, 39: 110-119.
- [4] 朱才辉, 石卫, 李鑫磊, 等. 几类传统改性土的工程特性综合评价及在土遗址修复中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(增刊1): 3033-3043.
Zhu C H, Shi W, Li X L, et al. Comprehensive evaluation of engineering characteristics of several kinds of traditional modified soils and their application in the restoration of soil sites[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(S1): 3033-3043. (in Chinese)
- [5] 郭青林, 裴强强, 王彦武, 等. 我国土遗址保护研究新进展[J]. *石窟与土遗址保护研究*, 2024, 3(3): 18-31.
Guo Q L, Pei Q Q, Wang Y W, et al. New progress in the conservation research on the earthen sites of China [J]. *Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites*, 2024, 3(3): 18-31. (in Chinese)
- [6] 崔凯, 葛诚瑞, 于翔鹏, 等. 西北干旱区遗址夯土结构特性初探[J]. *岩土力学*, 2023, 44(7): 1937-1948.
Cui K, Ge C R, Yu X P, et al. A preliminary study on the structural characteristics of rammed earth at the site in arid area of Northwest China[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(7): 1937-1948. (in Chinese)
- [7] 朱杰, 蔡乐刚, 郭戈. 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[J]. *文物保护与考古科学*, 2015, 27(4): 7-14.
Zhu J, Cai L G, Guo G. Application of ethyl silicate as a strengthening agent for consolidation and conservation of earthen sites under moisture circumstances[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2015, 27(4): 7-14. (in Chinese)
- [8] Ciancio D, Beckett C T S, Carraro J A H. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 53: 59-65.
- [9] 刘汉龙, 肖杨. 微生物土力学原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Liu H L, Xiao Y. Biocemented soils mechanical principles and applications[M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)
- [10] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 1-14.
Liu H L, Xiao P, Xiao Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [11] Sang G J, Lunn R J, Minto J M, et al. Microbially induced carbonate precipitation for soil improvement: insights from a meter-scale radial grouting trial[J]. *Biogeotechnics*, 2026, 4(1): 100157.
- [12] Zhang X S, Wang H Y, Wang Y, et al. Improved methods, properties, applications and prospects of microbial induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review[J]. *Biogeotechnics*, 2025, 3(1): 100123.
- [13] Li J, Zhu F Q, Wu F S, et al. Impact of soil density on biomineralization using EICP and MICP techniques for earthen sites consolidation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 363: 121410.
- [14] Liu B, Tang C S, Pan X H, et al. Influence of layer thickness on bioremediation of drought-induced soil desiccation cracks using microbially induced calcite precipitation[J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(7): 4399-4414.
- [15] Kannan K, Bindu J, Vinod P. Engineering behaviour of MICP treated marine clays[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38(7): 761-769.
- [16] Hussain A, Ali D, Koner S, et al. Microbial induce

- carbonate precipitation derive bio-concrete formation: a sustainable solution for carbon sequestration and eco-friendly construction[J]. *Environmental Research*, 2025, 270: 121006.
- [17] Shi J Q, Zhang L, Ren K B, et al. Experimental investigation on biocementation materials in earthen heritage reinforcement[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2025, 42: 100682.
- [18] Shan Y, Liufu Z Y, Yuan J, et al. Liquefaction resistance of MICP-treated calcareous sand with different particle size and gradation[J]. *Biogeotechnics*, 2025: 100181.
- [19] 李洁, 武发思, 李天晓. MICP技术在岩土质文物加固及防风化中的应用研究进展[J]. *石窟与土遗址保护研究*, 2025, 4(2): 86-99.
- Li J, Wu F S, Li T X. Research progress on the application of MICP technology in the reinforcement and anti-weathering of stone and earthen cultural relics[J]. *Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites*, 2025, 4(2): 86-99. (in Chinese)
- [20] 崔凯, 冯飞, 谌文武, 等. 生石灰为掺料的土遗址裂隙注浆浆液结石体力学兼容性研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4627-4636.
- Cui K, Feng F, Chen W W, et al. Study on the mechanical compatibility of fissure grouting slurry with quick lime and grouting technology optimization in earthen sites[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(12): 4627-4636. (in Chinese)
- [21] 李黎, 赵林毅, 李最雄. 中国古建筑中几种石灰类材料的物理力学特性研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2014, 26(3): 74-84.
- Li L, Zhao L Y, Li Z X. Study on the physical and mechanical properties of several lime materials in ancient Chinese architecture[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2014, 26(3): 74-84. (in Chinese)
- [22] 代佳骏, 呼学, 于翔鹏, 等. 夯土遗址掏蚀区SH-(C+CaO)改性修复材料耐久性研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 22(3): 169-182.
- Dai J J, Hu X, Yu X P, et al. Durability study of SH-(C+CaO) modified repair materials for undercutting zones of rammed earthen sites[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2025, 22(3): 169-182. (in Chinese)
- [23] 刘子龙, 仇文岗, 王硕, 等. 钓鱼城加担土遗址夯土结构成分与回弹强度的纵深变化规律研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2026, 46(1): 47-55.
- Liu Z L, Zhang W G, Wang S, et al. Research on characteristics of rammed earth structure composition and rebound strength with depth at Jiadan earthen site in fishing town[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2026, 46(1): 47-55. (in Chinese)
- [24] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].
- GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. (in Chinese)
- [25] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范(2009年版)[S].
- GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. (in Chinese)
- [26] 丁诗佳, 张哲安, 费康. 升降温作用对黏性土剪切特性影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(增刊1): 132-135.
- Ding S J, Zhang Z A, Fei K. Experimental study on effects of heating-cooling cycles on shear characteristics of clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(S1): 132-135. (in Chinese)
- [27] 靳治良, 陈港泉, 夏寅, 等. 土质文物盐害中硫酸钠的研究: 从微观到宏观[J]. *文物保护与考古科学*, 2016, 28(1): 54-62.
- Jin Z L, Chen G Q, Xia Y, et al. Sodium sulfate behind earthen relics salt damages: from micro to macro[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2016, 28(1): 54-62. (in Chinese)
- [28] 毛泳, 王勇. 近30年来重庆极端高温变化特征及其趋势分析[J]. *科技通报*, 2019, 35(4): 60-68.
- Mao Y, Wang Y. Characteristics and trend analysis of extreme high temperature in Chongqing in recent 30 years[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019, 35(4): 60-68. (in Chinese)
- [29] 李小洁, 林金辉, 万涛, 等. 一种新型土遗址加固材料的制备及加固效果评价[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(3): 321-326.
- Li X J, Lin J H, Wan T, et al. The preparation of a new consolidation material for earthen archaeological site and the evaluation of its effectiveness[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, 33(3): 321-326. (in Chinese)
- [30] 寇芳莹. 文物补配修复中的色差现象与视知觉运用[J]. *文物鉴定与鉴赏*, 2020(18): 70-74.
- Kou F Y. Color difference phenomenon and visual perception application in the restoration of cultural relics [J]. *Identification and Appreciation to Cultural Relics*, 2020(18): 70-74. (in Chinese)
- [31] 尚东娟, 裴强强, 赵国靖, 等. 土遗址夯筑支顶加固表面色度检测的影响因素研究[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(1): 125-134.
- Shang D J, Pei Q Q, Zhao G J, et al. Influencing factors of chromaticity detection on the reinforced surface of rammed support roof for soil sites[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2024, 60(1): 125-134. (in Chinese)