



# 潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法

刘汉龙<sup>1</sup>, 韩绍康<sup>1</sup>, 陈卉丽<sup>2</sup>, 仇文岗<sup>1</sup>, 蒋思维<sup>2</sup>, 杨阳<sup>1</sup>, 肖杨<sup>1</sup>, 成亮<sup>3,4</sup>

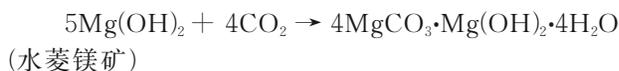
(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 大足石刻研究院, 重庆 402360; 3. 重庆大学溧阳智慧城市研究院, 江苏常州 213332; 4. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏镇江 212013)

## Microbial reinforcement and repair method of sandstone grottoes in humid environment

LIU Hanlong<sup>1</sup>, HAN Shaokang<sup>1</sup>, CHEN Huili<sup>2</sup>, ZHANG Wengang<sup>1</sup>, JIANG Siwei<sup>2</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, XIAO Yang<sup>1</sup>, CHENG Liang<sup>3,4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, P. R. China; 3. Chongqing University Liyang Smart City Research Institute, Changzhou 213332, Jiangsu, P. R. China; 4. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, P. R. China)

微生物加固是一门将微生物的矿化过程应用于岩土工程的新型生物介导岩土加固技术,对改善土体的强度、渗透性等具有显著效果<sup>[1]</sup>。微生物加固技术具有碳排放低、土体扰动小、施工速度快、无需特殊养护等优点,是一种环境友好型土体改良技术<sup>[2]</sup>。目前,基于尿素水解的微生物诱导活性氧化镁碳化生成水合碳酸镁的微生物加固技术受到了学者们的广泛关注<sup>[3]</sup>。该技术具有强度高、稳定性强、耐候性好、无毒等适用于石质文物修复的突出特点,且未完全反应的活性氧化镁在潮湿环境下可以继续水化,并与空气中的二氧化碳反应,从而继续提高强度。其主要化学方程式为



典型潮湿环境砂岩质石窟岩体——大足石刻的维修保养主要依据历史文献、碑刻和造像题记,严格遵守“不改变原状”的原则,采取传统工程手段与现代科学技术相结合的方式。目前,大足石刻针对风化问题的修复主要采用有机高分子材料,但随着修复工作的大范围开展,有机高分子材料的弊端逐渐显现,如有机合成材料在高温高湿环境下的干燥性能、

固化能力、防霉抗菌性及耐候性等问题,越发不适合部分石质文物的修复,选择适合的黏结材料逐步成为文物保护工作者需要思考解决的问题。

若能利用微生物加固技术进行石质文物的补配修复,对于石质文物保护而言,将是里程碑式的发展,对文物保护工作具有重要的社会效益。然而,目前利用微生物诱导水合碳酸镁矿化加固技术进行文物补配修复的研究尚无报道,影响了微生物加固技术在文物保护中的应用推广。

笔者采用微生物诱导无机水合碳酸镁矿物的方法加固砂岩石粉制成修复砂浆,并固结成修复试样(图1),通过无侧限抗压强度试验、分层硬度试验、理化性质分析试验、耐候性试验、色差试验、微观分析试验研究潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法,揭示其补配修复机理并开展可行性分析。结果表明,微生物诱导无机水合碳酸镁矿物制成的修复砂浆可满足砂岩质石窟岩体补配修复对强度、色差和耐候性等的基本要求。微生物加固试样的强度随养护龄期的增加而增加,其颜色与现场砂岩试样接近;砂岩石粉经微生物加固后的耐候性与生成矿化产物的量有关,其力学性能和抗劣化性能随产物生成量的增加而增强。

收稿日期:2022-04-19

基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项(JG2021072);重庆市科研机构绩效激励引导专项(cstc2021jxj00028);国家自然科学基金(52108300)

作者简介:刘汉龙(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程研究,E-mail:hliuhhu@163.com。

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

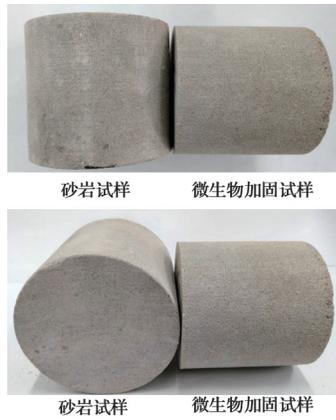


图1 微生物加固砂岩石粉试样耐候性试验

Fig. 1 Weather resistance test of biocemented sandstone powder samples

基于无侧限抗压强度试验和分层硬度试验结果,系统分析微生物加固砂岩石粉的强度特性,发现微生物加固砂岩石粉试样矿化产物的含量随养护龄期而提高,试样的强度也随养护龄期增加;分层硬度试验则表现为上下表层硬度大于里层硬度,即硬度由外向里递减,但差异小于25%,为了得到更好的补配修复效果,应当从工艺上进行调整,采用分层、分阶段处理的方法。

通过X射线衍射分析(XRD)、X射线荧光光谱分析(XRF)、扫描电镜(SEM)等微观分析方法,探究潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复的微观机理,发现微生物加固试样和砂岩试样的成分及元素基本相同,只是其含量稍有差异,且差异相对较小,因此,采用微生物加固方法进行砂岩质石窟文物的补配修复不会引入异物,符合文物修复的基本原则;砂岩试样和微生物加固试样均含较多微观孔隙,表明其对水的敏感性较高。力学断裂形成的碎屑较多,在湿度较高的情况下,其长期强度有可能会随时间的推移而降低,即典型的水岩相互作用;水菱镁矿是微生物加固的胶结产物,呈现针状晶体聚集成细枝状,也以纤维状集合体(常呈放射状)和球状块体产出,具有稳定性好、硬度大、抗化学腐蚀性强、电阻率高和几乎不与水发生化学反应等特性,因此,用微生物加固方法产生的菱镁矿进行石质文物补配修复具有可行性。

在系统研究微生物加固试样的强度特性和微观机理的基础上,通过劣化模型箱同步开展室内微生物加固试样在干湿循环、冻融循环、酸雨、盐侵等作用下的劣化试验。干湿循环对微生物加固试样强度有促进作用,主要是因为饱和和环境起到养护试样的效果,使强度进一步提高。冻融循环对微生物加固试样影响较小,主要表现为轻微掉粉,强度同样有所增加。酸雨循环使微生物加固试样表现出粉化剥落,且随着循环次数的增加劣化越来越严重,最终导致强度降低,这是生成的水合碳酸镁矿物在酸雨中溶解导致的。硫酸盐对微生物加固试样的破坏最严重,且硫酸盐浓度越高破坏越严重,

盐侵试验主要采用不同浓度硫酸钠溶液进行,硫酸钠对试样的劣化程度与试样中硫酸钠的含量正相关,且随着硫酸钠侵蚀时间的增加,劣化现象更加明显,最终表现为“环状剥落”的破坏模式,这是因为硫酸钠晶体含量较大时,硫酸钠晶体产生的结晶力大于试样颗粒的胶结力,进而发生劣化。

通过密度测试、吸水率测试、压汞测试、色差测试探究微生物加固试样的基本物理特性,发现微生物加固试样密度低于砂岩试样,吸水率略大于砂岩试样,孔隙率略大于砂岩试样,表明微生物加固试样具有一定的透气性,可以用于砂岩质石窟文物的补配修复。但较高的孔隙率在潮湿环境下会加剧水岩相互作用,可以通过改善石粉级配、提高微生物活性、增加活性氧化镁掺量、增加二氧化硅粉末等方法进一步增加微生物加固试样的密度、降低其吸水率和孔隙率。微生物加固试样色差改变较小,在正常肉眼情况下基本没有色差区别,单个参数色差数据相对集中,基本在砂岩试样平均值上下波动,且波动幅度相对较小,包括: $L$ (亮暗)、 $a$ (红绿)和 $b$ (黄蓝),因此,对于砂岩质石窟文物的补配修复不会产生色差问题。

针对潮湿环境砂岩质石窟岩体的典型代表、世界文化遗产——大足石刻开展了残缺佛指试样的微生物加固补配修复试验(图2),通过硬度计、色差仪,结合室内试验、现场劣化试验及现场监测数据,检测佛指试样修复后的加固强度、色差及耐候性,并对补配修复效果进行跟踪监测与评价,初步验证了多因素作用下通过微生物加固方法进行砂岩质石窟文物补配修复的有效性和实用性。



图2 基于微生物加固技术的石质文物补配修复试样

Fig. 2 Repaired sandstone grottoes sample using biocementation

#### 参考文献

- [1] YANG Y, CHU J, XIAO Y, et al. Seepage control in sand using bioslurry [J]. Construction and Building Materials, 2019, 212: 342-349.
- [2] MA G L, HE X, JIANG X, et al. Strength and permeability of bentonite-assisted biocemented coarse sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 58(7), 969-981.
- [3] YANG Y, RUAN S Q, WU S F, et al. Biocarbonation of reactive magnesia for soil improvement [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(4): 1113-1125.