

文章编号:1005-1538(2019)06-0046-08

微生物诱导碳酸钙修复汉白玉石梁裂缝试验研究

何建宏,郭红仙,谭 谦,程晓辉
(清华大学土木工程系,北京 100084)

摘要:石质文物劣化后产生裂缝等病害,需要恰当的修复方法。本研究应用微生物诱导碳酸钙沉积技术修复汉白玉石梁裂缝,模拟石质文物裂缝修复。研究对象为带V型槽的非贯通和贯通裂缝的汉白玉石梁(尺寸为40 mm × 40 mm × 160 mm),修复方法为先注浆后自由下渗。通过对比石梁修复前后破坏荷载和强度的变化以及CT扫描技术可视化非贯通裂缝修复过程来评价修复效果。结果显示:修复后石梁裂缝表面致密光滑,颜色与母材相近,整体美观性好;非贯通裂缝修复后破坏荷载均有所增加,贯通裂缝修复后的抗折强度能恢复到原有强度的35.12%,均值为3.684 MPa,最高能达到5.234 MPa;CT扫描结果定性和定量均表明胶凝体密度随修复进行而增加,接触面修复质量弱于其他位置。

关键词: MICP技术;汉白玉石梁;裂缝修复;力学测试;CT扫描

中图分类号: K876.2 **文献标识码:** A

0 引言

石质文物是人类文明的见证,具有极高的历史、科学和艺术价值。汉白玉属于大理岩,其色泽晶莹剔透而洁白,广泛应用于建筑物和构筑物的建造,如故宫、十三陵、圆明园等地都有大量的汉白玉石质文物。它们随时间流逝而逐步劣化,经历各种类型的风化病害。图1为故宫大高玄殿的石栏杆发生了断裂。



图1 风化的汉白玉石梁(故宫大高玄殿)

Fig. 1 Weathered white marble beam
(Hall of High Heaven of the Imperial Palace)

汉白玉石质文物的风化是化学、物理、生物作用和环境污染等因素综合影响的结果^[1-3]。学者们研究了石质文物风化的病害分类和修复方法。在来自意大利、德国和中国的研究团队以及国际古迹遗址委员会等的病害分类体系中,石质文物的裂缝和断裂均被视为一种重要病害^[3-5]。其修复方法需要遵循“不改变原状”、“最低限度干预”和“使用恰当的保护技术”等原则,修复后需要具备足够的强度和耐久性。

然而,针对汉白玉石质文物的裂缝和断裂病害,目前的修复效果并不理想:石灰水、氢氧化钡等无机材料难以满足强度和耐久性要求;环氧树脂类、有机硅类、丙烯酸酯类、有机氟聚合物等有机材料存在相容性、渗透性和耐久性问题;水泥砂浆修复和铁箍加固等方法甚至会引起二次病害,如图1所示,汉白玉栏杆使用了铁箍加固,产生的铁锈对文物造成二次破坏。

微生物诱导碳酸钙沉积(microbially induced carbonate precipitation, MICP)技术(以下简称MICP技术)为汉白玉石质文物的修复提供了一种新方法。这是一种微生物矿化技术,其机理可简单理解

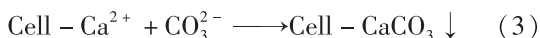
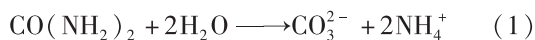
收稿日期:2018-06-22;修回日期:2018-10-23

基金项目:北京市自然科学基金资助(8162025)

作者简介:何建宏(1994—),男,清华大学土木工程系硕士研究生,研究方向为砖石文物建筑微生物修复,E-mail: 2216261860@qq.com

通讯作者:郭红仙(1967—),女,清华大学土木工程系副研究员,研究方向为微生物岩土工程,E-mail: guohx@tsinghua.edu.cn

为:微生物所产脲酶水解尿素产生的碳酸根离子与钙离子结合,矿化生成碳酸钙结晶。主要反应如下^[6]:



许多学者对这一技术的潜在应用做了大量的研究,如针对地基加固^[7]、重金属污染治理^[8]、混凝土裂缝修复^[9]、自愈混凝土^[10]等。该技术应用于石质文物修复的主要优点有:最终的胶凝产物碳酸钙与石材相容性好;菌液和营养盐溶液粘度低便于渗透;修复后仍具有一定的透气性;等等。目前该技术推广应用的主要难点在于:经济成本相对其他修复方式更高;温度等环境因素对注浆的影响较大^[11];生成碳酸钙的均匀性较难控制^[12];等等。

Adolphe^[13]等于1990年首次将MICP技术应用于装饰石材保护领域。目前,石质文物微生物修复的研究集中在利用这种技术进行石材表面覆膜。法国的南特大学(Université de Nantes)^[14]、西班牙的格拉纳达大学(Universidad de Granada)^[15-17]、比利时的根特大学(Ghent University)^[18]、英国的朴茨茅斯大学(University of Portsmouth)^[19]以及中国的同济大学^[20]和西南科技大学^[21]等研究团队采用喷涂、浸泡和渗透等方式,对石灰岩、大理岩和砂岩的石材样品或实际文物进行微生物覆膜的室内试验或现场试验。也有一些学者利用该技术来粘接石材裂缝,清华大学的杨钻采用注浆法修复了清华大学西体育馆的石柱裂缝和石栏缺失部分^[22],同课题组的谭谦利用入渗法修复了破损的汉白玉立方块,并进行了冻融试验^[23]。

本研究利用MICP技术,对人造非贯通裂缝和贯通裂缝的汉白玉石梁试件进行修复,对试件进行了弯折强度试验,还对贯通裂缝石梁试件的修复进行了CT扫描。本研究侧重外观修复效果、强度恢复和内部变化情况。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

汉白玉石材取自北京市房山区大石窝镇,其矿物成分几乎都是白云石,主要化学成分为碳酸镁钙 $[\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2]$ 。石梁尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$,跨中的人造V槽宽度分别为 4 mm 、 7 mm 和 10 mm ,深度分别为 2 mm 、 3.5 mm 和 5 mm 。试验包括含非贯通和贯通裂缝的两种试件,贯通裂

缝石梁试件是非贯通裂缝石梁经三点弯折得到。填充裂缝的白云石砂材质与石梁相同,颗粒粒径为 $0.10 \sim 0.25\text{ mm}$ 。

试验所用细菌为巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*)。它是化能异养菌,直径 $1 \sim 2\text{ }\mu\text{m}$,长度 $2 \sim 3\text{ }\mu\text{m}$,细胞呈卵圆形或球状,革兰氏阳性。非贯通和贯通裂缝两种试件的MICP修复,分别在清华大学的清华大学和英国的斯特拉斯克莱德大学(University of Strathclyde)完成。非贯通裂缝试验所用菌种(ATCC® 11859™)来自美国菌种保藏中心(American Type Culture Collection, ATCC),其培养基为 20 g/L 酵母粉, 10 g/L 硫酸铵 $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ 和 $10\text{ }\mu\text{mol/L}$ 氯化镍(NiCl_2)。用氢氧化钠(NaOH)溶液调节培养基pH值到9,消毒灭菌 20 min ($120\text{ }^\circ\text{C}$)后接种,在振荡培养箱中($30\text{ }^\circ\text{C}$, 180 r/min)培养 24 h 后可使用。菌液的光度 OD_{600} 均值为3.6,单体酶活平均值为 $3.4\text{ mmol/L} \cdot \text{min}^{-1}/\text{OD}_{600}$ 。贯通裂缝试验菌种(DSM-33)购于德国菌种中心(Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen, DSMZ),其培养基为 37 g/L 的脑浸液(brain heart infusion, BHI)和 20 g/L 的尿素,消毒灭菌接种后培养 26 h 后可使用。细菌 OD_{600} 平均值为1.5,单体酶活平均值为 $6.8\text{ mmol/L} \cdot \text{min}^{-1}/\text{OD}_{600}$ 。

1.2 试验装置

两部分试验均包括注浆和入渗两阶段。图2为非贯通裂缝修复试验装置图,在注浆阶段,使用塑料板、硅胶和注射头形成密封体系,注浆出入口添加双层纱布以减少颗粒流失,连接蠕动泵后注浆,完成注浆后移除密封装置,对水平放置的石梁进行入渗。最后采用四点弯曲试验测试其强度。

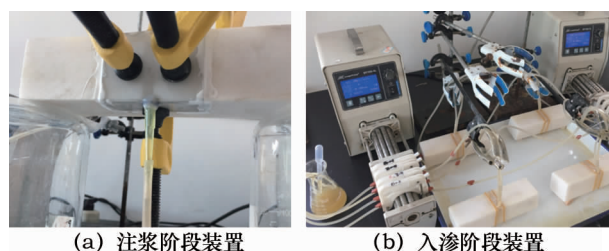


图2 非贯通裂缝修复试验装置图

Fig. 2 Experiment device for repairing beams with non-through cracks

图3为贯通裂缝试验装置,石梁裂缝宽度为 2 mm ,四面用塑料板固定,每面有3个注浆口,密封后的石梁水平放置。连接蠕动泵后注浆,完成注浆后移除密封体系继续自由入渗。为使完整石梁与带

V 槽石梁的贯通裂缝位置接近,选择三点弯折试验测试修复前后石梁强度变化。

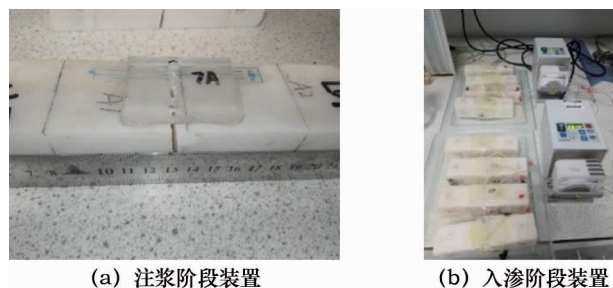


图 3 贯通裂缝修复试验装置图

Fig. 3 Experiment device for repairing beams with through cracks

1.3 修复过程

非贯通裂缝石梁修复试验中,营养盐为 0.5 mol/L 的氯化钙 (CaCl_2) 和 20 g/L 的尿素 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] 混合溶液,固定液为 50 mmol/L CaCl_2 溶液。裂缝填充白云石砂后注浆,注浆速度为 66 $\mu\text{L}/\text{min}$ 。每轮先注入 1 倍 V 槽体积菌液,静置 10 min 后注入 0.1 倍 V 槽体积的固定液,最后注入 5 倍体积营养盐溶液。为提高修复均匀性,每批次完成后调换出入口,多批次注浆直至灌浆路径堵塞,移除密封体系后持续入渗菌液和营养盐溶液,直至裂缝填充部分完全固化。其中 V 槽宽度为 4 mm 的石梁样品裂缝体积过小,故直接采用入渗法修复。

贯通裂缝石梁修复试验中,营养盐为 0.5 mol/L

的等浓度 CaCl_2 和 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 混合溶液,固定液为 50 mmol/L 的 CaCl_2 溶液。裂缝处填充约 10 g 的白云石砂后注浆,菌液和固定液注入速度为 66 $\mu\text{L}/\text{min}$,营养盐溶液注入速度为 33 $\mu\text{L}/\text{min}$ 。每轮先注入 1.6 mL 菌液,静置 10 min 后注入 0.2 mL 固定液,最后注入 8 mL 营养盐溶液。每根石梁样品共经过 18 批次垂直方向和 4 批次水平方向的注浆修复,移除密封装置后添加白云石砂,依次入渗修复石梁每个表面,此阶段共使用 48 mL 菌液和 240 mL 营养盐溶液。

2 结果与分析

2.1 非贯通裂缝石梁修复试验

2.1.1 外观对比 修复前后石梁外观对比如图 4 所示,图中上部分为修复前带 V 槽裂缝的石梁,下部分为修复后的石梁。填充的白云石砂胶凝于 V 槽处,修复后的裂缝表面致密,附近区域颜色稍偏暗黄,整体美观性较好。颜色暗黄的主要原因是:注浆所用菌液含有酵母粉(棕黄色),处理过程中菌液残留在 V 槽表面及附近区域。可在修复时通过做遮蔽处理控制入渗区域避免颜色变黄。

2.1.2 力学性能 在四点弯曲试验中,石梁下方的两个对称支撑点间距为 120 mm,上方的两个对称加载点间距为 40 mm,V 槽缺口位于受拉侧。每种规格的非贯通裂缝石梁有 3 个样品。石梁的破坏荷载结果如表 1 所示。

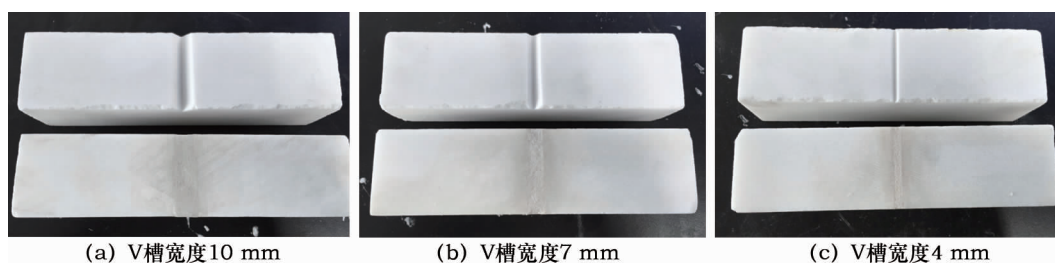


图 4 非贯通裂缝石梁修复前后的石梁外观对比图

Fig. 4 Appearance comparison of the marble beams with non-through cracks before and after restoration

表 1 非贯通裂缝石梁的破坏荷载

Table 1 Damage loads of the beams with non-through cracks

V 槽宽度/mm	修复状态	破坏荷载/kN
0	未修复	9.50 ± 0.81
4	未修复	9.17 ± 0.44
	修复后	9.26 ± 0.41
7	未修复	7.85 ± 0.38
	修复后	8.23 ± 0.49
10	未修复	6.61 ± 0.31
	修复后	7.16 ± 0.43

由表1可知:石梁修复前,当V槽裂缝深度增加时,有效受力面积减少,破坏荷载减小;修复后的石梁承载力均有不同程度的提高。为便于比较修复效果,将完整石梁的破坏荷载平均值视为100%,计算其余石梁破坏荷载平均值与它的比值,结果如图5所示。

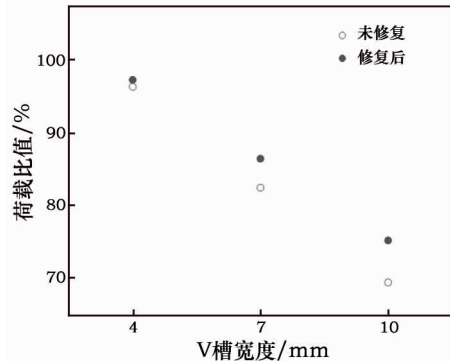


图5 非贯通裂缝石梁有无修复的对比图
Fig.5 Damage loads comparison of the marble beams with non-through cracks before and after restoration

由图5可知,V槽宽度为4 mm、7 mm、10 mm的样品修复后的荷载比值增长值分别为0.94%、4.00%、5.79%。这说明形成的胶凝体不仅能填充非贯通裂缝,还有一定的抗拉强度,可以增大石梁有效受力面积并提高其承载力。特别地,当石梁裂缝宽度越大时,修复效果就越明显。这也

说明MICP技术可用于修复较大的非贯通受力裂缝。

2.1.3 破坏位置和断面形态 V槽宽度为4 mm的石梁修复后的破坏位置不总在V槽处,而其余两种规格石梁破坏位置总是在V槽处。石梁修复后的典型破坏位置和断面如图6所示,样品破坏时位置在填充白云石砂处,并沿着填充物质与裂缝的接触面破坏,其中部分胶凝体与石材界面几乎完全剥离。这说明人工切割的V槽过于光滑,不利于其与白云石砂的粘接。

2.2 贯通裂缝石梁修复试验

2.2.1 外观对比 石梁断裂后及修复后外观对比如图7所示,贯通裂缝被有效粘接,修复后的表面致密光滑,颜色与石材本身相近,整体美观性好。通过严格控制菌液所影响区域,并在修复时使表面稍高于目标位置,最终达到了美观的要求。

2.2.2 力学性能 在三点弯折试验中,石梁下方的两个对称支撑点间距为100 mm,集中荷载在石梁跨中,V槽缺口位于受拉侧。每种规格的石梁有2个样品。试验得到了石梁的破坏荷载(后续用第一次弯折表述)和修复后的石梁破坏荷载(后续用第二次弯折表述),并按试件实际截面高度计算了抗折强度,见表2。其中样品V10-1在注浆结束后拆密封体系时意外折断,简易固定后与其余样品一同进入入渗阶段。

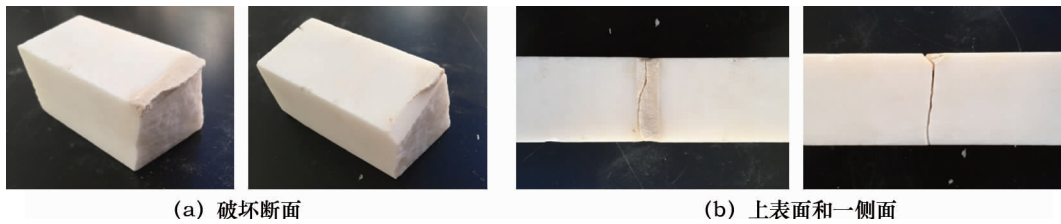


图6 非贯通裂缝石梁修复后的典型破坏位置(V槽宽度10 mm)
Fig.6 Typical failure locations of the marble beams with non-through cracks after restoration (the width of V groove equals 10 mm)



图7 贯通裂缝石梁修复前后的石梁外观对比图
Fig.7 Appearance comparison of the marble beams with through cracks before and after restoration

表 2 贯通裂缝石梁的破坏荷载和抗折强度

Table 2 Damage loads and flexural strength of the beams with through cracks

槽宽/mm	编号	破坏荷载/kN		抗折强度/MPa	
		第一次弯折	第二次弯折	第一次弯折	第二次弯折
0	V0-1	5.491	2.637	10.898	5.234
	V0-2	6.029	1.248	11.446	2.369
4	V4-1	4.981	1.894	12.076	3.752
	V-4-2	4.492	1.400	9.768	2.795
7	V7-1	2.893	4.893	6.755	9.407
	V7-2	4.274	1.732	9.911	3.451
10	V10-1	3.580	1.814	9.524	3.556
	V10-2	3.919	2.417	9.803	4.629

由表 2 可知,样品 V7-1 与其余样品差异大,第一次弯折破坏荷载(2.893 kN)显著低于另一个同等规格样品(4.274 kN),第二次弯折破坏荷载(4.893 kN)显著高于第一次弯折。其余样品第一次弯折破坏荷载组内差异不大,第二次弯折破坏荷载均低于第一次弯折。

除 V7-1 外的 7 个试件,第一次弯折强度为

10.490 ± 0.915 MPa,第二次弯折强度为 3.684 ± 0.917 MPa。第二次弯折强度均值达到第一次弯折的 35.12%。这表明 MICP 能有效粘接断裂的石梁,并达到了较高的抗折强度。为了便于比较修复效果,将样品 V0-1 的破坏荷载和抗折强度视为 100%,计算其余样品与之相对比例,结果如图 8 所示。

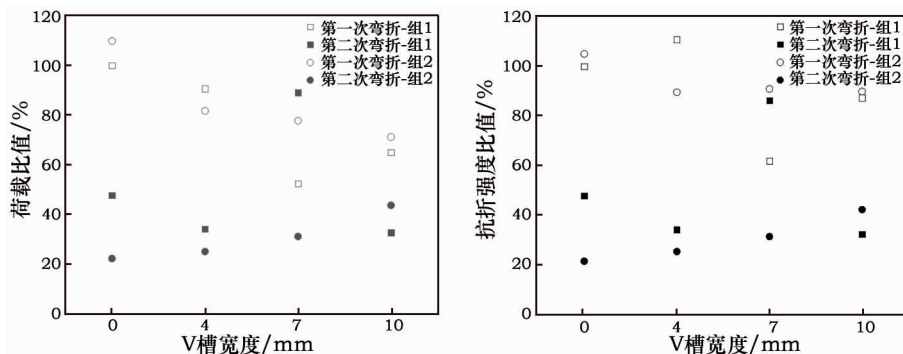


图 8 贯通裂缝石梁两次弯折的的破坏荷载和抗折强度对比图

Fig. 8 Damage loads and flexural strength comparison of the marble beams with through cracks in the two bending tests

除 V7-1 外的 7 个样品,第一次弯折荷载比值为 65.20% ~ 109.80%,第二次为 22.73% ~ 48.02%;第一次弯折强度比值为 87.40% ~ 110.81%,第二次为 21.74% ~ 48.03%,如图 8 所示。样品在第一次弯折时破坏荷载随 V 槽深度增加而下降,这反映出裂缝对截面的削弱;而按截面实际高度得到的石梁第一次弯折的抗折强度随 V 槽变化不大。第二次弯折的抗折强度与 V 槽宽深无关。

需要说明的是,样品 V10-1 实际修复仅有入渗阶段,仍能有效修复石梁,其抗折强度与其余样品亦无明显差距。这表明注浆和入渗两阶段的菌液和营养盐溶液是过量的,裂缝若只采用入渗法也能成功修复。

2.2.3 破坏位置和断面形态 修复后的所有石梁破坏位置都在 V 槽缺口处,但也有一定差别。除样品 V7-1 外,所有石梁破坏后均沿着修复界面破坏,如图 9a 所示;样品 V7-1 破坏沿胶凝体与石材接触面发展后在原母材上有新的断面,如图 9b 所示。

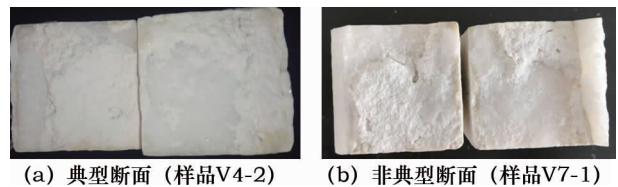


图 9 贯通裂缝石梁修复后的破坏断面

Fig. 9 Damaged cross section of the marble beams with through cracks after restoration

样品 V7 - 1 折断再修复后,破坏时有部分发生在母材断面,第二次弯折的抗折强度高于第一次弯折强度。同时发现该试件的第一次弯折强度明显低于其他样品。原因可能是样品在 V 槽位置存在薄弱面,修复后的胶凝体强于薄弱面,使得破坏面部分在母材上,而未沿着界面发展,从而增大了修复后的抗折强度,也说明胶凝后的白云石砂强度并不低。

3 CT 结果与讨论

所有样品在注浆前、竖直方向注浆完成后和入渗修复完成后都分别进行一次 CT 扫描。其中样品 V10 - 1 在水平方向注浆完成后增加一次 CT 扫描。每次扫描前均烘干石梁,扫描在英国斯特拉斯克莱德大学完成,典型 CT 扫描结果如图 10 所示,图 10a 和图 10b 分别为修复前和修复后的石梁横截面。修复后 CT 扫描图像的灰度值更高,部分区域的白云石砂灰度值甚至接近汉白玉石材本身灰度值,这表明 MICP 生成的碳酸钙晶体填充部分孔隙。

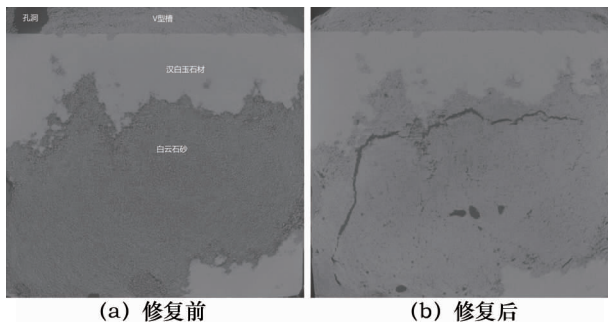


图 10 贯通裂缝石梁修复前后的横截面 CT 扫描图像(样品 V7 - 2)

Fig. 10 Cross - sectional CT scan image of the marble beams with through cracks before and after restoration (Sample V7 - 2)

使用 AVIZO 软件将得到的 CT 数据重建为三维模型。如图 11 所示,样品 V10 - 1 的贯通裂缝与 V 槽被有效填充并粘接,在接触面处粘接质量相对差些。这与液体在压力作用下更容易在界面位置形成过水通道有关。

为进一步量化评价各阶段修复效果,将原石材横截面灰度平均值视为为 100%,计算其他横截面灰度平均值相对石材本身灰度平均值的比例。图 12 给出了此平均值在修复前、竖向注浆结束后、水平注浆结束后和修复完成后沿石梁轴线方向在扫描范围内的分布。此比例随注浆和渗透的进行而不断提高,说明修复质量在逐步提升。注浆过程中提高

最大,说明填充体密度在注浆前期增加较快。同时也发现在裂缝处填充体的密度并不均匀。

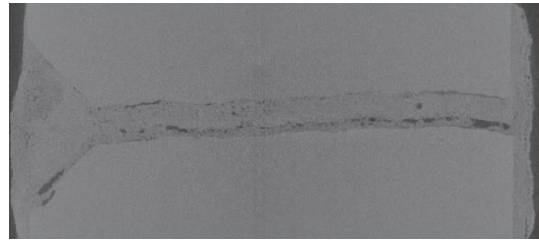


图 11 修复后的石梁 V 槽截面 CT 扫描图像(样品 V10 - 1)

Fig. 11 CT scan image in V - shaped cross section of the marble beams with through cracks after restoration (Sample V10 - 1)

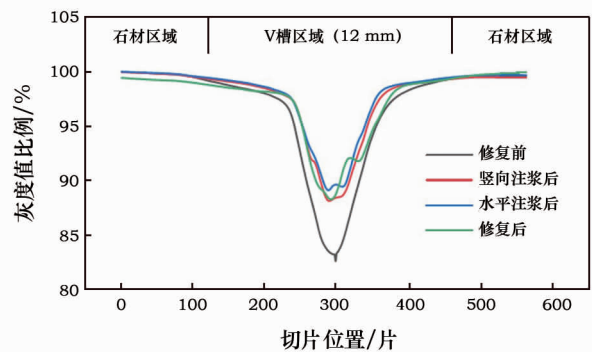


图 12 非贯通裂缝石梁横截面灰度值相对比值(样品 V10 - 1)

Fig. 12 Relative ratio of grey value in cross section of the marble beams with through cracks (Sample V10 - 1)

4 结论与展望

本研究利用微生物诱导的碳酸钙晶体胶凝白云石砂,并修复粘接贯通或非贯通石梁裂缝,试验表明这种修复是有效可行的。主要结论如下:

- 1) 修复后石梁裂缝表面致密光滑,颜色与石梁相近,整体美观性好。修复后再破坏的位置大多位于缺口处,沿接触面逐步发展至破坏。
- 2) 对于受拉侧的非贯通 V 槽裂缝,石梁修复后的破坏荷载都较修复前有所增加,随 V 槽宽度增加,破坏荷载比值增幅也增大。
- 3) 对于贯通裂缝,石梁修复后的抗折强度能恢复到原有强度的 35.12%,均值为 3.684 MPa,最高能达到 5.234 MPa。
- 4) CT 扫描结果定性和定量均表明胶凝体密度随修复进行而增加,接触面修复质量弱于其他位置。

微生物诱导碳酸钙沉积技术是石质文物修复的一种新方法,本研究从宏观强度和微观 CT 图像两方面论证了它的可行性。如将其应用于实际修复工程,不仅需要关注粘接强度、继续提高接触面修复质量,还需要进一步考虑修复方法对文物的长期影响和实际工艺等问题。

致谢: 本研究得到了北京市自然科学基金:石质文物古建的微生物修复(No. 8162025)、欧盟玛丽居里计划“GREAT”项目和北京国文琰公司的资助和支持,英国斯特拉斯克莱德大学的 Grainne El Mountassir 博士、Rebecca Lunn 教授和 James Minto 博士对本课题均有贡献,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 李宏松. 文物岩石材料劣化特征及评价方法[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
LI Hongsong. Character and evaluation method of historical rock deterioration[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [2] 陆寿麟, 梁宝鑫, 程昌炳. 故宫博物院中汉白玉构件风化研究[J]. 故宫博物院院刊, 2001(1): 84-88.
LU Shoulin, LIANG Baoli, CHENG Changbing. Weathering of the white marble in the Palace Museum [J]. Palace Museum Journal, 2001(1): 84-88.
- [3] 张涛, 黎冬青, 张中俭. 北京汉白玉石质文物的病害类型及病害机理研究[J]. 工程勘察, 2016(11): 7-13.
ZHANG Tao, LI Dongqing, ZHANG Zhongjian. Damage categories and deterioration mechanism of stone cultural relics of white marble in Beijing[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016(11): 7-13.
- [4] 中华人民共和国国家文物局. 石质文物病害分类与图示: WW/T 0002—2007[S]. 北京: 文物出版社, 2008.
National Cultural Heritage Administration of the People's Republic of China. The classification and symbols for the diseases of ancient stone objects: WW/T 0002—2007[S]. Beijing: Cultural Relics Press, 2008.
- [5] VERGÈS - BELMIN V. Illustrated glossary on stone deterioration patterns [M]. Paris: ICOMOS Documentation Centre, 2008.
- [6] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [7] DEJONG J T, FRITZGES M B, NUSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [8] CHEN Xihai, GUO Hongxian, CHENG Xiaohui. Heavy metal immobilisation and particle cementation of tailings by biomineralisation [J]. Environmental Geotechnics, 2018, 5(2): 107-113.
- [9] RAMACHANDRAN S K, RAMAKRISHNAN V, BANG S S. Remediation of concrete using microorganisms [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(1): 3-9.
- [10] WIKTOR V, JONKERS H M. Quantification of crack - healing in novel bacteria - based self - healing concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(7): 763-770.
- [11] 杨钻, 程晓辉. 劣化古建砖石砌体的微生物注浆加固试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(7): 48-53.
YANG Zuan, CHENG Xiaohui. Experimental study of deteriorated historic masonry structures reinforced by microbial grouting method [J]. Industrial Construction, 2015, 45(7): 48-53.
- [12] 陈婷婷, 程晓辉, 郭红仙. 基于数值模拟的砂柱微生物注浆影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(6): 111-119.
CHEN Tingting, CHENG Xiaohui, GUO Hongxian. Influencing factors of bio - grouting precipitation in sand column based on numerical simulation analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(6): 111-119.
- [13] J P Adolphe, J F Loubie're, J Paradas, et al. Proce'de'de traitement biologique d'une surface artificielle; European patent, 90400G97. 0 [P]. 1990. 09.
- [14] LE METAYER - LEVREL G, CASTANIER S, ORIAL G, et al. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony [J]. Sedimentary Geology, 1999, 126: 25-34.
- [15] RODRIGUEZ - NAVARRO C, RODRIGUEZ - GALLEGO M, CHEKROUN K B, et al. Conservation of ornamental stone by Myxococcus xanthus - induced carbonate biomineralization [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(4): 2182-2193.
- [16] JROUNDI F, GÓMEZ - SUAGA P, JIMENEZ - LOPEZ C, et al. Stone - isolated carbonatogenic bacteria as inoculants in bioconsolidation treatments for historical limestone [J]. Science of the Total Environment, 2012, 425: 89-98.
- [17] JROUNDI F, FERNÁNDEZ - VIVAS A, RODRIGUEZ - NAVARRO C, et al. Bioconservation of deteriorated monumental calcarenite stone and identification of bacteria with carbonatogenic activity [J]. Microbial Ecology, 2010, 60(1): 39-54.
- [18] MUYNCK W D, LEURIDAN S, LOODV, et al. Influence of pore structure on the effectiveness of a biogenic carbonate surface treatment for limestone conservation [J]. Applied & Environmental Microbiology, 2011, 77(19): 6808-6820.
- [19] ZAMARREÑO D V, INKPEN R, MAY E. Carbonate crystals precipitated by freshwater bacteria and their use as a limestone consolidant [J]. Applied & Environmental Microbiology, 2009, 75(18): 5981-5990.
- [20] 李沛豪, 屈文俊, 徐德强, 等. 大理石历史建筑遗产的细菌修复加固[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(9): 36-41.
LI Peihao, QU Wenjun, XU Deqiang, et al. Remediation of historic marble architectural heritages by bacterially - induced biomineralization [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(9): 36-41.
- [21] ZHU W K, TAO M, ZHANG Y K, et al. Coating of microbially produced calcium carbonate onto stone materials [J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(2): 266-272.

- [22] 杨钻. 高强微生物砂浆机理与工作性能研究[D]. 北京:清华大学, 2013.
YANG Zuan. Research on mechanism and performance of high-strength microbial mortar [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [23] TAN Qian, GUO Hongxian, CHENG Xiaohui. The remediation of

historic stone monuments by microbial induced carbonate precipitation [C]//PAPAYIANNI I, STEFANIDOU M, PACHTA V. Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference. Thessaloniki: Laboratory of Building Materials, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 2016:747-754.

Experiment research on the restoration of white marble beams using microbially – induced carbonate precipitation

HE Jianhong, GUO Hongxian, TAN Qian, CHENG Xiaohui

(*Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Stone relics suffering from diseases such as cracks due to deterioration, need proper restoration methods. In our work, in order to simulate the restoration of cracks in stone relics, the technology of microbially – induced carbonate precipitation was applied to the restoration of broken marble beams. The research objects were some white marble beam models (40 mm × 40 mm × 160 mm) with V – shaped cracks, some of which penetrated the beam completely and some that did not. The restoration method was grouting and free infiltration. The effect of restoration was evaluated by comparing the change of load capacity and flexural strength before and after the restoration and by visualizing the restoration process of through cracks using computed tomography (CT) scanning. The results show that after restoration, 1) the surfaces of the cracks are dense and smooth, the color is similar to that of the base material and that the overall appearance is nice; 2) the load capacities of beams with non – through cracks were all increased, and the flexural strengths of the beams with through cracks reached a mean value of 3.684 MPa (recovering up to 35.12% of the original strength) and the maximum value of 5.234 MPa. The qualitative and quantitative results of CT scanning also indicate that the density of bio – cementation increases as the restoration goes on, and that the restoration quality of contact surfaces is weaker than that of other locations.

Key words: Microbially – induced carbonate precipitation technology; White marble beam; Restoration of cracks; Mechanical test; CT Scanning

(责任编辑 张存祖)