

文章编号:1007-9629(2021)04-0687-07

基于 MICP 的珊瑚砂浆裂缝自修复新型细菌载体

刘士雨^{1,2}, 俞 缙¹, 刘文强¹, 蔡燕燕¹, 涂兵雄¹

(1. 华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省智慧基础设施与监测重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 用以石膏为细菌载体及以乳酸钙、尿素为底物的自修复剂, 基于微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 技术实现了珊瑚砂浆裂缝的自修复, 验证了石膏作为细菌载体修复珊瑚砂浆裂缝的可行性, 探讨了自修复剂配比和养护方式对自修复效果的影响, 分析了裂缝区生成物的矿物成分及形态。结果表明: 掺入石膏为细菌载体的自修复剂后, 试样裂缝自修复效果良好; 裂缝生成物主要是方解石和球霏石型碳酸钙; 当含菌载体和底物掺量均为 3.0% 时, 试样裂缝有较好的自修复效果, 同时对珊瑚砂浆强度影响相对较小。

关键词: 石膏; 微生物诱导碳酸钙沉淀; 细菌载体; 珊瑚砂浆; 自修复

中图分类号: TU43

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.003

New Bacterial Carrier for the Crack Self-healing in Coral Sand Mortar Based on MICP

LIU Shiyu^{1,2}, YU Jin¹, LIU Wenqiang¹, CAI Yanyan¹, TU Bingxiong¹

(1. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory for Intelligent Infrastructure and Monitoring of Fujian Province,

Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A self-healing agent was prepared using gypsum as a bacterial carrier, calcium lactate and urea as substrate. Microbially induced carbonate precipitation (MICP) technology was used to achieve self-healing of coral sand mortar cracks. The feasibility of using gypsum as a bacterial carrier to repair cracks in coral sand mortar was verified. The effects of self-healing agent content and curing method on self-healing performance were investigated. The mineral composition and morphology of the products in the crack were analyzed. The results show that cracks of the samples added with gypsum carrier have good self-healing performance. The calcium carbonate produced in the cracks is mainly calcite and vaterite. When the content of carrier and substrate is 3%, cracks of the sample have good self-healing performance, and the impact on the strength of coral sand mortar is relatively small.

Key words: gypsum; microbially induced carbonate precipitation; bacterial carrier; coral sand mortar; self-healing

南海岛礁珊瑚砂资源丰富, 用珊瑚砂作为混凝土集料可以有效缓解长途运输问题, 从而降低工程成本, 保证工期^[1]。珊瑚砂又称钙质砂, 沉积过程大多未经搬运用, 保留了原生生物骨架中的细小孔隙^[2], 形状不规则且容易碎裂^[3]。珊瑚砂制成的混

凝土容易开裂, 会引起海水渗透和钢筋腐蚀^[4]。因此, 珊瑚砂混凝土结构裂缝的修复是亟待解决的问题。自修复是一种提供高质量材料并具有自我修复损伤能力的新兴概念, 该技术在建筑结构中的应用受到了极大的关注^[5]。

收稿日期: 2020-07-11; 修订日期: 2020-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51874144, 51978292, 52178334); 福建省自然科学基金资助项目 (2019J01048)

第一作者: 刘士雨 (1979—), 男, 辽宁铁岭人, 华侨大学副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: scholarrain@163.com

近年来,利用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术来封闭和修复裂纹的可持续自愈机制已被广泛研究^[6].然而,当生物制剂被直接添加到混凝土中时,细菌的生存可能会遇到障碍. Jonkers^[7]研究表明,未受保护的细菌孢子寿命仅为2个月.目前采取的有效方法是用细菌载体去保护它们,已使用的细菌载体包括膨胀黏土^[8]、硅藻土^[9]、硅胶和聚氨酯^[10]、水凝胶^[11]和纤维^[12]等,但这些细菌载体存在稳定性差、相容性差、环境污染、成本高等缺点.因此,亟需一种成本较低、相容性较高、环境友好且便于施工的微生物载体.

石膏被广泛用作强度要求较高、吸水率要求较低的建筑材料^[13].石膏与其他类型细菌载体相比具有以下优势:矿产资源丰富,取材方便,价格低廉;与水泥基材料有良好的相容性;结晶后比表面积大,无毒且pH值为中性,能给微生物提供较好的生存环境;易于制作,便于施工.本文研究了利用石膏作为

细菌载体的可行性及其对珊瑚砂砂浆(CSM)自修复效果的影响.

1 试验

1.1 原材料

石膏(G)为山东金信新型建材有限公司生产的 β 型半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$);水泥(C)为福建省龙岩市三源水泥公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥;珊瑚砂(CS)取自南海,中砂.材料的主要化学组成¹⁾见表1.珊瑚砂使用前用淡水冲洗并浸泡以达到脱盐的目的,处理后珊瑚砂中氯离子含量低于0.03%^[14].细菌为德国菌种保藏中心的编号DSM33 巴氏芽孢杆菌,冻干粉状菌种需要进行细菌活化,活化培养基为ATCC 1376 $\text{NH}_4\text{-YE}$ 培养液.细菌培养过程中,使用去离子水以消除污染离子的影响.试验所需其他药剂均为分析纯,购自国药集团.

表1 材料的主要化学组成
Table 1 Main chemical composition of the materials

Material	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	IL
G	0.50	2.38	53.24	37.25	0.46	0.37	0.10	0.21	4.92
C	5.68	21.70	2.41	62.23	3.14	1.28	0.08	0.83	2.23
CS	0.22	0.79	0.85	51.11	0.08	2.07	0.36	0.02	44.02

1.2 含菌载体的制备及其最佳浓度比的确定

培养巴氏芽孢杆菌40 h后,在转速4 000 r/min下离心处理20 min,得到细菌菌泥.将其重悬于去离子水中得到细菌浓度 c_{BL} 为 10^9 cells/mL的菌液(BL).取6 mL菌液分别与6.0、7.2、8.4、9.6和10.8 g灭菌石膏粉末在50 mL离心管中搅拌混合5 min,得到含菌载体(BC).在含菌载体中加入尿素和去离子水,搅拌30 s后,倒入事先准备好的装有由水泥(2.5 g)加去离子水配置而成的水泥悬浮液的三角瓶中,定容至100 mL后放入100 r/min的振荡箱中3 d,测试三角瓶中尿素质量浓度的变化($\Delta\rho(\text{urea})$),以此作为尿素的分解量来表征细菌对尿素的分解活性,从而确定含菌载体的最佳浓度比.细菌的尿素分解活性根据HJ 535—2009《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》进行测定.作为对照,将未与石膏混合的6 mL细菌悬浮液直接加入到水泥悬浮液中,经过相同的程序后,测试尿素分解活性.混合物中各组分含量如表2所示,表中: ρ_{C} 、 ρ_{G} 、 $\rho(\text{urea})$ 分别为水泥、石膏、尿素的质量浓度;混

合物的pH值约为12.5,高碱性的混合物是为了模拟水泥基材料内部环境.

表2 混合物中各组分含量
Table 2 Content of each component in the mixture

Group	$\rho_{\text{C}}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{G}}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$c_{\text{BL}} \times 10^{-7}/(\text{cells} \cdot \text{mL}^{-1})$	$\rho(\text{urea})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
1	25	0	6	20
2	25	60	6	20
3	25	72	6	20
4	25	84	6	20
5	25	96	6	20
6	25	108	6	20
7	25	96	6	20
8	25	96	6	20
9	25	96	6	20
10	25	96	6	20
11	25	96	6	20

1.3 CSM的制备

预试验发现珊瑚砂与水泥的质量比为750:450时,砂浆具有较好的和易性与强度,因此选用该

1)文中涉及的组成、含量、掺量、水灰比等除特殊说明外均为质量分数或质量比.

质量比进行 CSM 试样的制备. 根据 JTG E30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》来拌制 CSM,其水灰比为 0.5. CSM 拌制过程为:先将等质量的乳酸钙与尿素混合组成底物(S),再将由含菌载体与底物组成的自修复剂(SFA)和去离子水加入搅拌机内拌和 30 s,按一定配合比将水泥加入搅拌机内慢速搅拌 30 s,接着加入珊瑚砂,慢速搅拌 30 s,再快速搅拌 30 s,停止搅拌 30 s,再快速搅拌 60 s. CSM 拌制完成后,将其浇筑到直径 40 mm、高度 10 mm 的模具中. 成型后的试样在相对湿度 RH 为 95%、温度为 20 ℃ 的养护箱内养护 24 h,拆模后继续置于养护箱内养护至规定龄期,使用劈裂法制作裂缝,并通过嵌入不同直径的钢针来控制试样裂缝的宽度.

为研究不同养护方式下裂缝的自修复效果,分别采用浸水养护、循环养护和湿养护方式进行裂缝的自修复试验,这 3 种养护方式的条件均为:养护温度 25 ℃,养护时间 28 d. 浸水养护是将试样浸没在水中,并连续通入空气;湿养护是将试样放在底部浸入水中的土工布上;循环养护是将试样浸没水中 1 h 后取出,然后在空气中暴露 11 h,该过程为 1 个循环.

为研究不同自修复剂掺量对裂缝自修复效果的影响,含菌载体掺量 w_{bc} 和底物掺量 w_s 均取 0%、1.5%、3.0%、4.5% (以水泥的质量计),CSM 的配合比见表 3. 各组试样在相对湿度 RH 为 95%、温度为 20 ℃ 的条件下养护至 7 d 后制作裂缝,裂缝宽度为 0.3 mm,养护的方式为浸水养护.

表 3 CSM 的配合比
Table 3 Mix proportions of CSM

Group	$w_{bc}/\%$	$w_s/\%$	Group	$w_{bc}/\%$	$w_s/\%$
A	0	0	I	3.0	0
B	0	1.5	J	3.0	1.5
C	0	3.0	K	3.0	3.0
D	0	4.5	L	3.0	4.5
E	1.5	0	M	4.5	0
F	1.5	1.5	N	4.5	1.5
G	1.5	3.0	O	4.5	3.0
H	1.5	4.5	P	4.5	4.5

1.4 试验方法

1.4.1 自修复效果的表征方法

自修复效果的表征方法有面积修复率法和渗透系数法. 面积修复率法是通过 Image-J 软件对得到的裂缝图片进行分析:先把拍摄获得的原始图片转换为 8 bit 图像,将图片降噪和调整对比度后进行二

值化转换,经过阈值分割获得未被修复的裂缝图像,统计不同修复时间对应裂缝的像素点个数,就可以计算出相应修复时间裂缝的面积修复率 γ . 渗透系数法参考 Zhang 等^[15] 采用的装置和方法来计算试样的渗水系数 k . 面积修复率法能够表征裂缝表面的自修复效果,难以表征试样内部裂缝的自修复效果;而渗透系数法可以用来表征内部裂缝的自修复情况.

1.4.2 裂缝区矿化产物分析

扫描电子显微镜 (SEM) 采用荷兰 Phenom-Word BV 公司的型号为 Phenom proX 的台式 SEM,用溅射镀膜仪处理待测试样,试验加速电压为 15 kV. X 射线衍射 (XRD) 仪为日本株式会社理学公司的 SmartLab 型 X 射线粉末衍射仪,试验参数为 40 kV、30 mA,扫描范围为 $3^\circ \sim 60^\circ$.

1.4.3 抗压和抗折强度测试

试样尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm 的棱柱体,制作好的试样在标准条件下养护 28 d 后,根据 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》,在上海荣计达仪器科技有限公司的 DYE-300S 试验机上进行抗折、抗压强度测试,每组 3 个试样,结果取平均值.

2 结果与讨论

2.1 含菌载体最佳浓度比的确定

不同石膏质量浓度下细菌对尿素分解活性的影响见图 1. 由图 1 可见:随着石膏质量浓度 ρ_G 的增大,尿素分解量 $\Delta\rho(\text{urea})$ 逐渐增加,说明在高碱环境下石膏对细菌起到了有效的保护作用;当石膏质量浓度从 60 g/L 增大到 96 g/L 时,尿素分解量从 9.65 g/L 增加至 17.21 g/L;当石膏质量浓度达到 96 和 108 g/L 时,细菌对尿素的分解活性均较高,且两者的数值非常接近,这说明石膏质量浓度为 96 g/L 时,石膏对细菌的保护作用已达到最佳. 石膏对细菌的保护原理示意图见图 2. 由图 2 可见:石膏包裹在细菌细胞的外部形成保护层,从而达到在高碱性环境中保护细菌的作用;石膏质量浓度越大,细菌细胞外部的保护层越致密;当其质量浓度达到一定值时,混凝土内部的高碱性溶液已经不能渗透其保护层,此时石膏对细菌的保护作用达到最佳状态. 在此基础上继续增加石膏用量,已经不能再提高这种保护效果,同时考虑到石膏增多可能给珊瑚砂浆基材料的强度带来不利的影响,因此当细菌浓度为 6×10^7 cells/mL 时,选择石膏质量浓度为 96 g/L 来进行后续试验研究.

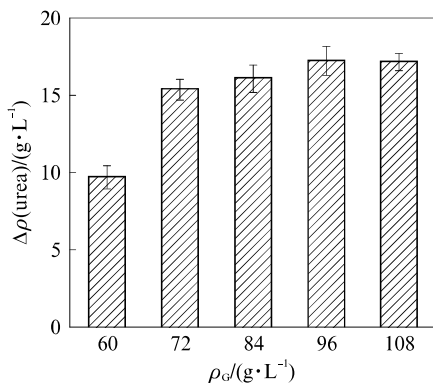


图1 不同石膏质量浓度下细菌对尿素分解活性的影响
Fig. 1 Effects of bacteria on urea decomposition activity under different gypsum concentration

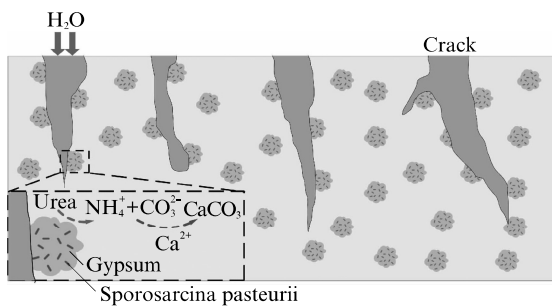


图2 石膏对细菌的保护原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the protection principle of gypsum on bacteria

2.2 自修复剂及养护方式对裂缝自修复效果的影响

2.2.1 自修复剂对裂缝自修复效果的影响

浸水养护试验中,取A组试样(未掺入自修复剂)作为对照组.图3为浸水养护下A、K组试样裂缝表面自修复情况.由图3可见:参加了自修复剂的K组试样在各个阶段的裂缝自修复效果明显优于A组试样;K组试样修复7 d后裂缝基本闭合,而A组

试样修复28 d后裂缝仍然清晰可见.图4为A、K组试样裂缝的自修复效果.由图4(a)可见:K组试样3、7、28 d裂缝的面积修复率 γ 分别为50.2%、85.3%、97.2%;A组试样从3 d到28 d裂缝的面积修复率仅由28.7%缓慢增长到38.8%,其裂缝面积修复率的增加是由于水泥的水化作用导致的.由图4(b)可见:随着养护时间的延长,A、K组试样的渗透系数 k 均减小,但2组试样渗透系数减少的幅度存在较大差异,仅靠自身水化作用的A组试样对裂缝的修复能力有限,经过28 d养护后渗透系数为0.117 m/s,而添加了自修复剂的K组试样,渗透系数随养护时间增加明显减小,养护7 d后其渗透系数接近0 m/s,这说明了石膏作为细菌载体修复珊瑚砂混凝土裂缝的可行性.

对比2种裂缝修复效果的评价方法发现,虽然面积修复率法不能直接反映裂缝内部的修复情况,但与渗透系数法所体现的修复效果趋势是一致的.渗透系数法能反映裂缝修复引起的抗渗性提升,从而间接表明试样裂缝内部的修复情况,在实验室内可以使用该方法,但在具体工程上难以进行渗水试验,而面积修复率法操作较为简单,易于收集处理数据,在实验室与现场工程中都可以使用,因此采用面积修复率法进行后续试验研究.

2.2.2 养护方式对裂缝自修复效果的影响

不同养护方式下K组试样裂缝自修复效果见图5.由图5可见:3种养护方式中,浸水养护裂缝自修复效果最好,循环养护自修复效果最差,湿养护自修复效果居中.分析其原因:浸水养护在不断的通入空气的情况下进行,水促进了离子和气体在裂缝中的运移,不仅有利于细菌的矿化作用,而且还促进了水泥的水化作用,所以自修复效果最好;循环养护为

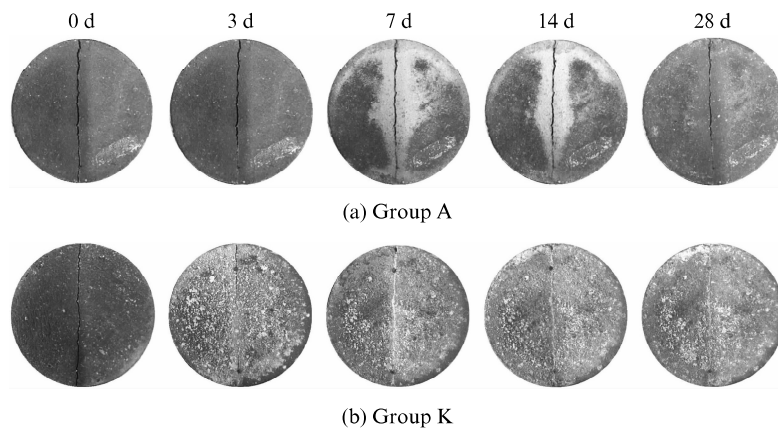


图3 浸水养护下A、K组试样裂缝表面自修复情况
Fig. 3 Self-healing of cracks in group A and K samples under immersion curing conditions at different times

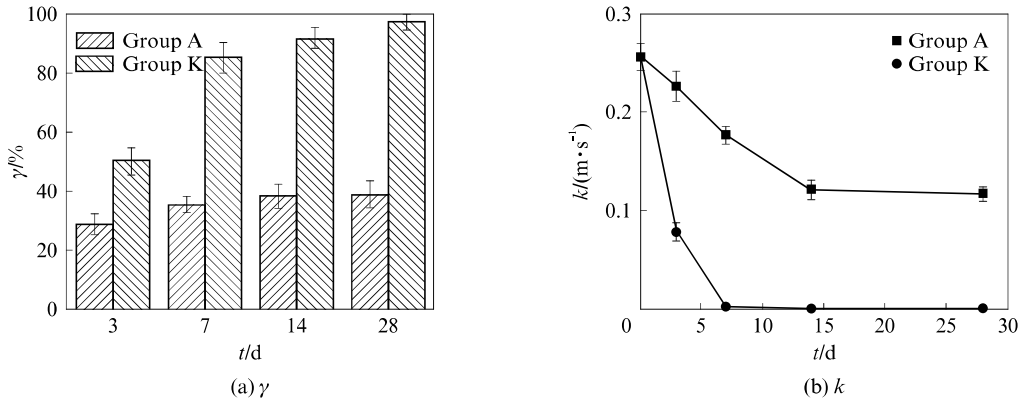


图 4 A、K 组试样裂缝的自修复效果

Fig. 4 Self-healing effects of cracks in group A and K samples

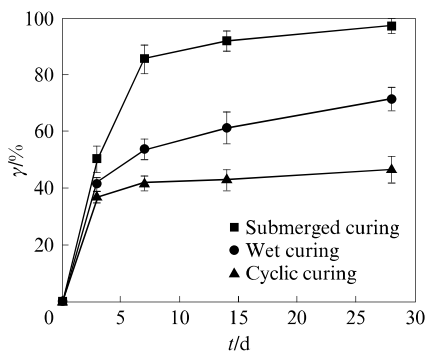


图 5 不同养护方式下 K 组试样裂缝的自修复效果

Fig. 5 Self-healing effects of cracks in group K samples under different curing methods

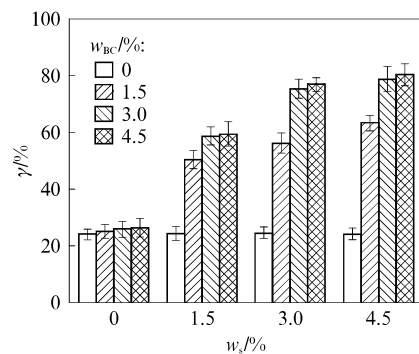


图 6 不同含菌载体和底物掺量试样裂缝的自修复效果

Fig. 6 Self-healing effects of cracks with different bacterial carrier and substrate dosage

浸水 1 h, 沥水 11 h, 虽然裂缝与空气可以充分接触, 但由于裂缝中水分的快速流失, 阻碍了细菌的矿化和水泥的水化作用, 因此裂缝自修复效果最差; 湿养护方式下, 水可以通过毛细作用到达裂缝处, 虽然裂缝中水分没有浸水养护充盈, 但由于水对裂缝修复的促进作用, 因此其自修复效果要好于循环养护。

2.3 自修复剂配比及掺量对自修复效果的影响

不同含菌载体与底物掺量下试样裂缝的自修复效果见图 6。由图 6 可见: 对于含菌载体掺量为 0% 的试样, 底物掺量从 0% 增加至 4.5% 时, 试样裂缝的面积修复率无明显变化; 对于底物掺量为 0% 的试样, 含菌载体掺量的增加也对试样的裂缝面积修复率无明显影响。Bhaskar 等^[16] 研究也发现了类似的试验结果, 只掺入底物对试样裂缝自修复效果的提高微不足道。Xu 等^[17] 的研究中, 仅添加底物的试样自修复后裂缝内只观察到少许充填物, 他们将其归因于环境中存在的少量杂菌诱导矿化作用所致。综上, 单纯添加含菌载体或者底物对裂缝的自修复效果影响有限。

由图 6 还可见: 当含菌载体掺量为 1.5% 时, 底物掺量从 0% 增加至 4.5% 时, 试样裂缝的面积修复率从 25.1% 增加至 63.2%, 当含菌载体掺量为

3.0% 和 4.5% 时, 也发现了类似的规律, 这说明当含菌载体掺量一定时, 试样裂缝的自修复效果随着底物掺量的增加而增大; 当底物掺量一定时, 试样裂缝的自修复效果随着含菌载体掺量的增加而增大。由此可见, 相同条件下, 含菌载体和底物掺量的增加会促进细菌的矿化作用, 生成更多的碳酸钙沉淀封堵裂缝, 从而达到较好的裂缝修复效果。值得注意的是, 随着含菌载体与底物掺量的增加, 试样裂缝的面积修复率相对于对照试样得到有效的提高, 但这种修复率的提高并不是线性的, 而是在含菌载体和底物掺量均为 3.0% 后开始减缓。

2.4 裂缝区矿化产物分析

2.4.1 SEM 分析

K 组试样的 SEM 图见图 7。由图 7 可见: 裂缝处沉淀物主要为类似于方解石的块状晶体, 部分晶体呈现出球状形态, 与球霏石型碳酸钙形态相近; 块状晶体中存在一些孔洞。晶体中孔洞的存在体现了细菌在矿化沉积修复裂缝中的成核位点作用。

2.4.2 XRD 分析

裂缝处沉淀物的 XRD 图谱见图 8。由图 8 可见: 裂缝中生成的沉淀物主要是方解石和球霏石型

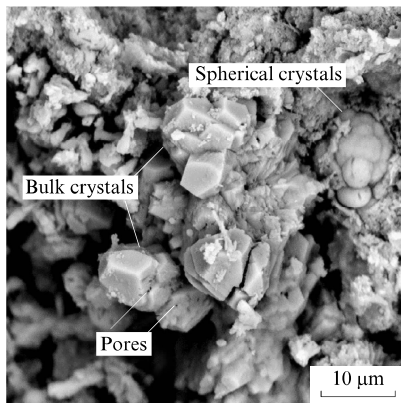


图7 K组试样的SEM图

Fig. 7 SEM pattern of group K sample

碳酸钙,验证了SEM试验的推断结果.类似的结果在Achal等^[18]的研究中也有报道.除了方解石与球霏石型碳酸钙,其他形式的碳酸钙晶型如文石在Wiktor等^[19]研究中有发现,但在本试验的结果中没有观察到,这可能是由不同的生长介质成分、基质类型、pH值、温度、细菌和有机物种类等^[20]造成的.

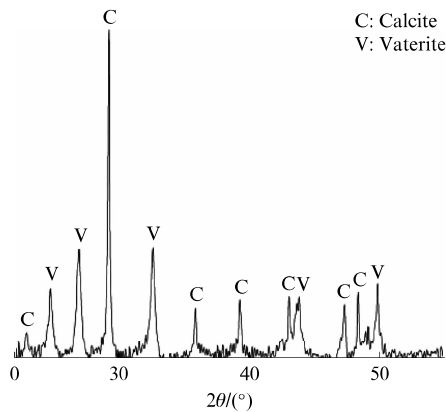
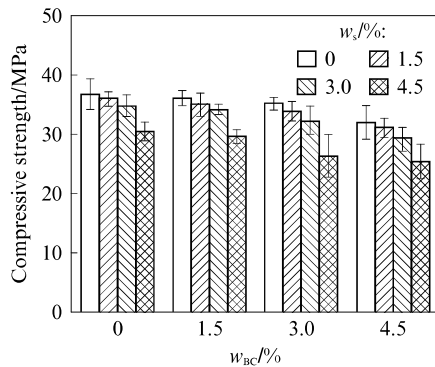
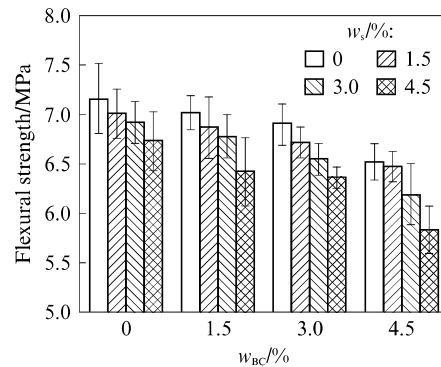


图8 裂缝处沉淀物的XRD图谱

Fig. 8 XRD spectrum of precipitates at crack



(a) Comprehensive strength



(b) Flexural strength

图9 自修复剂对CSM抗压和抗折强度的影响

Fig. 9 Effects of self-healing agent on the compressive and flexural strength of CSM

2.5 自修复剂对CSM抗压和抗折强度的影响

自修复剂对CSM抗压和抗折强度的影响见图9.由图9可见:随着含菌载体与底物掺量的增加,CSM的抗压强度与抗折强度均逐渐降低;当底物掺量为0%时,含菌载体掺量为3.0%时,与未掺自修复剂的A组试样相比,CSM的抗压、抗折强度分别降低了5.4%和4.8%,当含菌载体掺量提高为4.5%时,其抗压、抗折强度分别降低了16.8%和9.0%,这说明含菌载体对CSM的力学性能具有负面影响,但仅当含菌载体掺量高于3.0%时,其抗压、抗折强度才显著降低;当含菌载体掺量为0%,底物掺量高于3.0%时,CSM的抗压、抗折强度显著降低;同时添加含菌载体与底物,砂浆的力学性能进一步降低,当二者的掺量均为3.0%时,CSM的抗压、抗折强度分别降低了11.9%和8.5%.Jonkers^[7]使用多孔膨胀颗粒保护微生物自修复混凝土裂缝时,自修复剂的掺入会使混凝土强度降低50%.Wang等^[11]使用水凝胶载体保护微生物,发现载体的掺入会明显降低水泥基材料的力学性能,添加1%的水凝胶就会使试样的抗压强度与抗拉强度分别降低23.4%与30.0%.与上述2种载体相比,石膏作为细菌载体在保持自修复能力的同时,能够较好地维持水泥基材料的强度.由于安全原因,在实际工况下抗压强度的大幅降低是不可接受的,而含菌载体和底物的掺量在3.0%以内时,CSM的抗压强度为32 MPa,在许多实际应用中是可以接受的,因此建议将含菌载体与底物的掺量均限制在不超过3.0%.此外,还可以通过加入某些功能性添加剂(例如减水剂)来提高砂浆的力学强度.

综上,含菌载体和底物掺量均为3.0%的自修复剂对裂缝具有较好的自修复效果,同时对CSM强度影响相对较小.

3 结论

(1)当细菌浓度为 6×10^7 cells/mL,石膏质量浓度为 96 g/L 时,细菌活性最大。

(2)掺入石膏为细菌载体的自修复剂后,试样裂缝的面积修复率可达到 97.2%,渗透系数接近 0 m/s;试样裂缝的自修复率随着自修复剂掺量的增加而非线性增大;浸水养护、循环养护和湿养护方式中,浸水养护方式下裂缝的自修复效果最好;裂缝区生成物主要是方解石和球霰石型碳酸钙。

(3)自修复剂(含菌载体和底物)的掺入对试样的力学性能具有负面影响,当含菌载体和底物掺量均为 3.0%时,试样裂缝有较好的自修复效果,同时对珊瑚砂浆强度影响相对较小,建议含菌载体与底物的掺量不超过 3.0%。

(4)石膏作为细菌载体是可行的,但在工程中的实际应用效果还需要进一步的研究,包括成本、寿命以及环境和社会效益等。

参考文献:

- [1] 达波,余红发,麻海燕,等.混凝土强度等级对全珊瑚海水钢筋混凝土梁抗剪性能的影响[J].中国科学:技术科学,2019,49(2):212-222.
DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Influence of concrete strength grade to the shear behavior of coral aggregate reinforced concrete beam[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(2):212-222. (in Chinese)
- [2] 梅军帅,吴静,王罗新,等.珊瑚砂浆的力学性能与微观结构特征[J].建筑材料学报,2020,23(2):263-270.
MEI Junshuai, WU Jing, WANG Luoxin, et al. Mechanical properties and microstructural characteristics of coral sand mortar[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):263-270. (in Chinese)
- [3] YASER J, HAMED J, ABDOLHOSEIN H. Dynamic properties of coral and siliceous sands under isotropic and anisotropic stress conditions [J]. Soils and Foundations, 2018, 58(1):172-184.
- [4] ROGER F, STAN H. The corrosion of cast duplex stainless steels in seawater and sour brines [J]. Corrosion, 2019, 75(11):1383-1390.
- [5] 魏玉伟,程培峰,刘满,等.自修复混凝土修复效果影响因素的试验研究[J].建筑材料学报,2018,21(4):588-594.
WEI Yuwei, CHENG Peifeng, LIU Man, et al. Influencing factors of self-healing performance of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4):588-594. (in Chinese)
- [6] GUPTA S, PANG S D, KUA H W. Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents-A review [J]. Construction and Building Materials, 2017, 146:419-428.
- [7] JONKERS H M. Bacteria-based self-healing concrete [J]. Heron, 2011, 56:1-12.
- [8] XU J, YAO W. Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 64:1-10.
- [9] WANG J Y, DE BELIE N, VERSTRAETE W. Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete [J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2012, 39:567-577.
- [10] WANG J Y, VAN TITTELBOOM K, DE BELIE N, et al. Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1):532-540.
- [11] WANG J Y, MIGNON A, SNOECK D, et al. Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: A promising strategy for crack self-healing [J]. Frontiers Microbiology, 2015, 6:1088. 1-1088. 14.
- [12] NASRIN K, DAVOOD M. Bacillus subtilis bacteria used in fiber reinforced concrete and their effects on concrete penetrability [J]. Construction and Building Materials, 2020, 230:117051. 1-117051. 9.
- [13] KONDRATIEVA N, BARRE M, GOUTENOIRE F, et al. Study of modified gypsum binder [J]. Construction and Building Materials, 2017, 149:535-542.
- [14] WANG Y Y, SHUI Z H, YU R, et al. Chloride ingress and binding of coral waste filler-coral waste sand marine mortar incorporating metakaolin [J]. Construction and Building Materials, 2018, 190:1069-1080.
- [15] ZHANG J G, ZHAO C, ZHOU A J, et al. Aragonite formation induced by open cultures of microbial consortia to heal cracks in concrete: Insights into healing mechanisms and crystal polymorphs [J]. Construction and Building Materials, 2019, 224:815-822.
- [16] BHASKAR S, HOSSAIN K M, LACHEMI M, et al. Effect of self-healing on strength and durability of zeolite-immobilized bacterial cementitious mortar composites [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 82:23-33.
- [17] XU J, WANG X Z. Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material [J]. Construction and Building Materials, 2018, 167:1-14.
- [18] ACHAL V, MUKHERJEE A, BASU P C, et al. Lactose mother liquor as an alternative nutrient source for microbial concrete production by Sporosarcina pasteurii [J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2009, 36:433-438.
- [19] 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.
- [20] KAUR G, DHANI N K, GOYAL S, et al. Utilization of carbon dioxide as an alternative to urea in biocementation [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123:527-533.