

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.02.002

不同矿化底物及掺量对自愈混凝土 修复效果和力学性能的影响

刘 晓, 耿俊峰, 王 浩

(沈阳大学 建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110044)

摘要: 矿化底物作为微生物诱导碳酸钙沉积技术中关键的功能组分,其种类和掺量对自修复混凝土的裂缝修复效果和力学性能具有重要作用。为深入研究矿化底物的作用机制,选用巴氏芽孢杆菌作为矿化微生物,以25%取代率的再生骨料作为载体,在不同矿化底物及其在不同掺量下系统研究其对混凝土裂缝修复能力和基本力学性能的影响。结果表明:在经过28 d修复养护后,制备出的自修复混凝土具有优异的裂缝自修复能力,以乳酸钙、尿素和营养物质为底物制备出的混凝土的裂缝修复能力最好,其平均和最大修复宽度分别为0.31 mm和0.6 mm。以乳酸钙和尿素为矿化底物,且掺量为胶凝材料质量分数2%的混凝土的力学性能最好。

关键词: 再生骨料;微生物矿化;裂缝自修复;矿化底物;底物掺量;修复能力;力学性能

中图分类号: TU528.01

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)02-0010-09

Impact of Various Mineralized Substrates and Dosages on Repairing Efficacy and Mechanical Properties of Self-healing Concrete

LIU Xiao, GENG Junfeng, WANG Hao

(College of Architecture and Engineering, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110044, China)

Abstract: As a critical functional component of microbially induced calcium carbonate precipitation technology, the type and dosage of mineralization substrates significantly influence the crack repair efficiency and mechanical properties of self-healing concrete. To further investigate the mechanism of mineralization substrates, this work selected *Bacillus pasteurii* as the mineralizing microorganism and utilized recycled aggregates with a 25% replacement rate as carriers. A series of experimental schemes with different types and dosages of mineralization substrates were designed to systematically evaluate their effects on the crack repair capability and basic mechanical properties of concrete, providing a reference for optimizing the design of self-healing concrete. The results show that the self-healing concrete prepared after 28 days of repair and maintenance had excellent crack self-healing ability. The concrete prepared with calcium lactate, urea and nutrients as substrates had the best crack repair ability. The average and maximum repair widths were 0.31 mm and 0.6 mm, respectively. The mechanical properties of concrete with calcium lactate and urea as mineralized substrates and 2% of the mass fraction of cementitious materials were the best.

Keywords: recycled aggregate; microbial mineralization; crack self-healing; mineralization substrate; substrate dosage; repair capability; mechanical property

在混凝土结构工程中,混凝土常常处于带裂缝的工作状态,可导致侵蚀性离子极易通过裂缝部位

进入到混凝土的内部,破坏其内部结构,因此解决混凝土在服役过程中的开裂问题刻不容缓。微生物诱

收稿日期:2024-12-13

修稿日期:2025-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52078306)

作者简介:刘 晓(1974—),女,博士,教授,硕士生导师,主要从事结构工程、混凝土材料及防灾减灾工程方向的研究工作。

E-mail: liuxiao@syu.edu.cn

通讯作者:耿俊峰(1999—),男,硕士研究生,研究方向为微生物自修复混凝土。E-mail:1337400458@qq.com

导碳酸钙沉积(microbially induced carbonate precipitation, MICP)技术是一种绿色高效的混凝土裂缝修复技术^[1-3],是利用自然界一些可以进行矿化诱导碳酸钙沉积的微生物,利用其矿化产生的沉淀物对裂缝部位进行黏结和填充,进而实现混凝土裂缝部位的自修复^[4]。外国学者 Jonkers^[5]研究了微生物数量在水泥基材料中的变化规律,发现随着养护时间的延长,试块中的细菌逐渐减少,至 135 d 时几乎没有细菌。因此,在制作裂缝自修复混凝土时,需选择合适的载体以保护微生物免受高碱性环境的侵害^[6-8]。钱春香等^[9]利用陶砂负载嗜碱芽孢杆菌,使得修复 40 d 后的混凝土裂缝最大填充宽度超过 1 mm。Wiktor 等^[10]采用膨胀黏土颗粒固载微生物,制备出的混凝土最大修复宽度达 0.47 mm。Liu 等^[11]采用再生骨料固载巴氏芽孢杆菌制备自修复混凝土,试件修复 28 d 后,宽度在 0.3 mm 的裂缝平均愈合率可达 90.3%。刘超等^[12]研究了再生粗骨料、膨胀珍珠岩和硅藻泥作为载体的混凝土裂缝修复情况,结果显示:经过 28 d 修复,以再生骨料为载体的效果最佳,所有有载体组的修复效果均优于无载体组。这些研究表明,选择合适的载体在制备裂缝自修复混凝土时至关重要。

除此之外,矿化底物的选择和掺入量对基于 MICP 的自修复混凝土也至关重要。适当的矿化底物和掺量不仅能提升混凝土的裂缝修复能力,还能改善其力学性能。许顺顺^[13]研究了硝酸钙、乙酸钙和氯化钙作为钙源对混菌矿化沉积效率的影响,发现氯化钙能产生最多沉淀。吴健峰等^[14]采用蛋壳粉提取物作为 MICP 钙源,验证了其作为钙源修复砂浆裂缝的可行性。Achal 等^[15]比较了氧化钙、乙酸钙、硝酸钙和氯化钙四种钙源,结果显示在相同条件下氯化钙为钙源生成的碳酸钙质量最高。冯涛等^[16-17]使用科式芽孢杆菌和膨胀珍珠岩制备自修复混凝土,发现当乳酸钙掺量为水泥质量的 1.75% 时,混凝土修复裂缝宽度可达 0.67 mm,具有较好的裂缝修复能力;而 1.05% 掺量时,抗压强度达到 23.28 MPa,为自修复混凝土组中的最高值。白镜泉^[18]以乳酸钙、尿素和酵母提取物(营养物质)的掺量为胶凝材料质量的 1% 进行研究,结果表明,乳酸钙和尿素均有助于提升砂浆的力学性能,而酵母提取物则显著降低其性能。上述基于 MICP 的裂缝自修复混凝土在制备时多采用乳酸钙作为矿化底物,乳酸钙可为微生物提供 Ca^{2+} 离子和营养,有时为了确保在 MICP 过程中微生物能够获得充足的供其生

长繁殖以及矿化中所需要的营养物质,可以在加入钙源类底物的基础上再加入额外的营养物质^[19-20]。

上述研究表明,载体和矿化底物均是自修复混凝土的重要组成部分,因此选用合适的载体和矿化时所需要加入的底物尤为重要,以保证基于 MICP 的裂缝自修复混凝土具有良好的裂缝愈合能力以及力学性能。基于此,为了探究矿化底物的种类和掺量与自修复混凝土的修复效果及力学性能的关系,拟对三种矿化底物(乳酸钙;乳酸钙和尿素;乳酸钙、尿素和营养物质)及其在不同掺量下对混凝土裂缝自修复效果和力学性能的影响进行研究,以期为后续微生物自修复混凝土对于矿化底物的选用以及掺量提供理论基础。

1 试验概况

1.1 微生物选用与培养

本试验选用一种产脲酶型微生物,称为巴氏芽孢杆菌,该菌属于一种产碳酸钙能力较强的耐碱细菌^[21-22]。培养微生物所采用的培养基为 LB 培养基,成分含量为:10 g/L 胰蛋白胨、5 g/L 酵母提取物和 10 g/L 氯化钠。菌种的培养按照好氧型微生物的常规接种和培养方法进行,步骤为:先使用溶解液对菌粉进行活化,再将活化后的菌种接种到试管斜面上,最后将试管放置到恒温培养箱中,在 30℃ 下恒温培养 24 h 后得到含巴氏芽孢杆菌的试管斜液面,随后将其放入 4℃ 的冰箱中保藏,供后续扩大培养使用。扩培时,取斜面上的菌种于液体培养基中,将其放入摇床中,设定摇床参数为 30℃、160 r/min,在这种条件下振荡培养 48 h 后得到含巴氏芽孢杆菌的菌液。采用紫外分光光度计测得培养后的菌液在 600 nm 波长下的 OD_{600} 值为 1.6 左右,加入蒸馏水稀释至 OD_{600} 值为 1.0 左右。

1.2 巴氏芽孢杆菌在水泥浆中矿化沉积的有效性验证

在将巴氏芽孢杆菌掺入到混凝土中之前,必须要确定菌体在混凝土环境中生存的能力。首先取三支 50 mL 的离心管,在离心管底部放置水泥浆用来模拟混凝土内部高碱性的环境,之后往离心管中分别加入 15 mL 的营养液(由浓度为 0.5 mol/L 的乳酸钙和 1.5 mol/L 的尿素混合溶液组成)和 5 mL 的菌液,最后将离心管放置于 37℃ 的恒温培养箱中通气培养。为了确保芽孢杆菌能够充分接触氧气,将离心管瓶盖替换为透气组培膜。菌液与水泥浆初始混合时,如图 1(a)所示,混合 3 d 后,三支离心管中

水泥浆体顶部均可见一层白色沉淀,如图 1(b)所示。这种白色沉淀是由巴氏芽孢杆菌矿化沉积产生的,证实了本研究选用的菌株可以在混凝土环境中生存,并能产生生物矿物质。

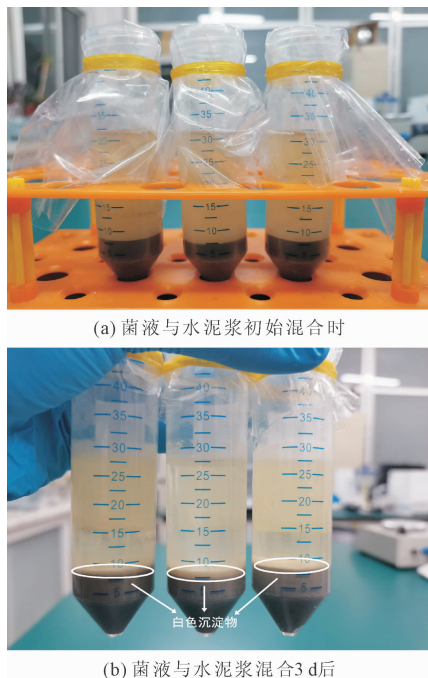


图 1 离心管中菌液与水泥浆相容性测试前后对比图

1.3 原材料

再生骨料:立方体试件采用 5 mm~25 mm 连续级配粒径,棱柱体试件采用 5 mm~10 mm 粒径,吸水率 5%,表观密度 2 460 kg/m³;天然骨料:级配良好的碎石,表观密度 2 690 kg/m³,立方体试件最大粒径 25 mm,棱柱体试件最大粒径 10 mm;水泥:P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥;河砂:细度模数为 2.4,堆积密度 1 480 kg/m³,最大粒径小于 4.75 mm;乳酸钙:分析纯乳酸钙;尿素:分析纯尿素;减水剂:聚羧酸高效减水剂;水:培养微生物所用的水为超纯水,其余用水均为自来水。

1.4 试验设计

为了研究不同矿化底物及其不同掺量下对自修复混凝土裂缝修复效果及力学性能的影响,共设计了两种尺寸的混凝土试件,分别是 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体试件和 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件。其中,棱柱体试件在养护结束后先进行抗折试验,待抗折试验结束后将得到带有裂缝的试件用于裂缝自修复试验,立方体试件则用于抗压试验。含有再生骨料的混凝土组,再生骨料的掺量为取代 25% 的天然骨料,骨料总质量不变。

1.5 试件制作

为防止采用机械拌制混凝土会对含菌再生骨料造成破坏,试件的制作采用手工拌制,每组制作 3 个试件,如表 1 所示,试件经拌和浇筑成型后,静置 24 h 脱模并编号,脱模后的试块放在室温下浸水养护 28 d。除 NC-2 组和 NC-3 组分别制作立方体试件以及棱柱体试件外,其它各混凝土组每组分别制作两种不同尺寸的试件。在试件配合比表 1 中:NC-1 组和 NC-2 组分别为天然骨料和再生骨料混凝土对照组,均不加入细菌;NC-3 组中的拌合用水为再生骨料负载细菌所剩余的菌液,菌液的用量和水的用量相等,并加入乳酸钙;A1—A3 组、A1-U—A3-U 组和 A1-UN—A3-UN 组中的再生骨料均经过载菌处理,并以矿化底物的掺量及种类作为变量。

表 1 混凝土配合比

编号	各材料用量/(kg·m ⁻³)								
	再生骨料	碎石	砂子	水泥	水	减水剂	乳酸钙	尿素	营养物质
NC-1	0	1126	662	422	190	3.17	0.00	0.00	0.00
NC-2	282	844	662	422	190	3.17	0.00	0.00	0.00
NC-3	0	1126	662	422	190	3.17	8.44	0.00	0.00
A1	282	844	662	422	190	3.17	4.22	0.00	0.00
A1-U	282	844	662	422	190	3.17	4.22	4.22	0.00
A1-UN	282	844	662	422	190	3.17	4.22	4.22	4.22
A2	282	844	662	422	190	3.17	8.44	0.00	0.00
A2-U	282	844	662	422	190	3.17	8.44	8.44	0.00
A2-UN	282	844	662	422	190	3.17	8.44	8.44	8.44
A3	282	844	662	422	190	3.17	12.66	0.00	0.00
A3-U	282	844	662	422	190	3.17	12.66	12.66	0.00
A3-UN	282	844	662	422	190	3.17	12.66	12.66	12.66

注:A1-UN 组表示矿化底物为乳酸钙、尿素和营养物质,并且底物的掺量为胶凝材料质量分数的 1%,数字“1”表示底物的掺量为胶凝材料质量分数的 1%,同样 A2-UN、A3-UN 中的“2”和“3”与其类似,“A”代表添加了乳酸钙,“U”代表添加了尿素,“N”代表添加了营养物质(组成成分为:15 g/L 胰酪胨,5 g/L 大豆蛋白胨和 5 g/L 氯化钠)。

1.6 试验方法

采用抗折试验机对棱柱体试件进行三点抗折试验,得到各混凝土组的抗折强度,并将得到的带有裂缝的试件用于裂缝自修复试验。取 NC-1、NC-3、A2、A2-U 和 A2-UN 组进行裂缝自修复能力观测试验,试验步骤为:先用记号笔对混凝土试件沿裂缝方向每隔 1 cm 设置一个裂缝观测点,之后采用工业电子显微镜记录裂缝初始宽度,并将记录完成的试件在室温下浸水养护,分别在修复养护 7 d、14 d、28 d 时观察并记录裂缝修复情况,养护期间采用充氧泵

24 h 持续往水中供氧。裂缝修复情况采用 28 d 裂缝最大修复宽度 (D)、28 d 平均修复裂缝宽度 (S) 和裂缝修复率 (δ) 进行表征,28 d 平均修复裂缝宽度和裂缝修复率分别按照下式进行计算:

$$S = \frac{\sum(d_0 - d_{28})}{N} \quad (1)$$

式中: S 为 28 d 平均修复裂缝宽度,mm; d_0 为各测试组观测点裂缝初始宽度,mm; d_{28} 为各测试组观测点修复 28 d 后的裂缝宽度,mm; N 为各测试组观测点总数。

$$\delta = \frac{d_0 - d_t}{d_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ 为裂缝修复率,%; d_t 为养护 t 时间后观测点的裂缝宽度,mm。

混凝土经 28 d 水中修复后,对裂缝处生成的矿化沉淀物进行了 X 射线衍射 (XRD) 分析。测定条件为:Cu 靶 K_α ,测定范围 $20^\circ \sim 80^\circ$,步宽角度 0.02° ,扫描速度为 0.5 s/step ,管电压 40 kV,管电流 30 mA。混凝土立方体抗压强度试验按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019) 中的相关规定进行。

2 试验结果与分析

2.1 裂缝部位表观分析

图 2 为各组试块经 28 d 修复前后的裂缝修复效果对比图。从图 2 可以看出,对照组 NC-1 组和 NC-3 组在经过 28 d 的修复后,裂缝部位均不能完全修复,其中 NC-3 组修复效果较前者稍好;从 NC-3 组和 A2 组的对比中可以看出,在加入吸附了菌液的再生骨料作为载体后 A2 组表现出更为出色的修复能力,裂缝部位沉淀物连续性及致密性更好;相比对照组,A2、A2-U 和 A2-UN 组的裂缝处均可被矿化生成的沉淀物填充,且裂缝修复的连续性更好,其中与 A2 组和 A2-U 组相比,A2-UN 组裂缝处沉积的沉淀物更加密实饱满,并有往外凸起的现象,修复效果表现最佳。试验结果表明,采用再生骨料固载微生物制备出的混凝土比直接掺菌制作出的混凝土的裂缝修复效果更好,并且在微生物混凝土中加入乳酸钙和尿素的基础上,再额外添加营养物质可以有效提高混凝土的裂缝自修复能力。

图 3 为 NC-1 组试块与 A2-UN 组试块修复 14 d 后裂缝部位矿化产物结晶图。从图 3 可以观察到,NC-1 对照组裂缝处仅有少部分的结晶生成,各颗粒团之间相对独立,生成的颗粒量少且连续性差;而

A2-UN 组试块裂缝部位处有较多的晶体生成,且生成的晶体颗粒相对较大,晶体形态较为饱满,各颗粒团体之间连续性较好。上述裂缝部位生成的矿化产物对比表明,基于再生骨料制备出的自修复混凝土较普通混凝土具有更好的裂缝自修复能力。

为了更深入地研究裂缝处混凝土内部矿化物质的生成情况,对修复后的棱柱体试块进行抗折,将其从裂缝部位劈裂。断面如图 4 所示。通过观察该断面,可以看出在混凝土的外层向内部一定深度处出现了白色沉淀物的生成,说明裂缝部位的修复效果良好。这种白色沉淀物是由巴氏芽孢杆菌的矿化沉积物形成的,附着于裂缝表面,有效地修复了裂缝。这进一步验证了本研究所选用的微生物菌株能够在混凝土环境中存活并产生生物矿物质,且与 1.2 节中的试验现象相一致。

2.2 裂缝部位矿化产物分析

图 5 为试件经水中修复养护 28 d 后,裂缝部位矿化沉淀物的分析结果图。从图 5 可以观察到,在 2θ 值为 29.64° 处出现了最高峰,这与方解石的标准卡片在该位置的强峰高度一致。此外,该矿化沉淀物在其他 2θ 值下的峰值也与标准卡片中的对应峰值高度匹配。同时,最强峰旁的次强峰与球霏石标准卡片上相应的强峰值也吻合良好,其他峰值的位置同样与标准卡片的对应位置相符。试验结果表明:裂缝处矿化生成的碳酸钙沉淀物以方解石为主,同时其中也含有少量的球霏石。

2.3 混凝土裂缝修复效果量化分析

图 6 展示了各试验组的初始裂缝宽度分布。从图 6 可观察到,各组的初始裂缝宽度主要集中在 $0.20 \text{ mm} \sim 0.80 \text{ mm}$ 之间,尽管不同组之间存在差异,但裂缝宽度的分布范围大致相同。

混凝土在水中修复养护 7 d、14 d、28 d 的裂缝修复率如图 7 所示。由图 7 可观察到随着修复时间的增加,各混凝土组的裂缝修复率均呈增大的趋势,与 NC-1 组和 NC-3 组相比,A2、A2-U 和 A2-UN 组的裂缝修复效果增长的更为明显,其中 A2-UN 组的裂缝修复效果表现为最好。在修复时间达到 14 d 时,对照组 NC-1 组仅有 3 个观测点处的裂缝被完全修复,且修复宽度均不超过 0.2 mm ,当裂缝超过 0.35 mm 时,其裂缝修复率均不超过 30%,裂缝修复率达到 50% 以上的观测点数占其总测点数的 36.0%,修复效果较差;NC-3 组有 5 个观测点被完全修复,大部分观测点处的裂缝修复率位于 50% 以下,裂缝修复率在 50% 以上的观测点数占总测点数的 32.0%;A2 组、

A2-U 组和 A2-UN 组裂缝修复率在 50% 以上的观测

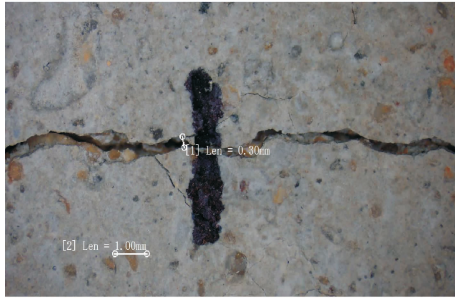
点数分别占总测点数的 40.0%、52.0% 和 56.0%。



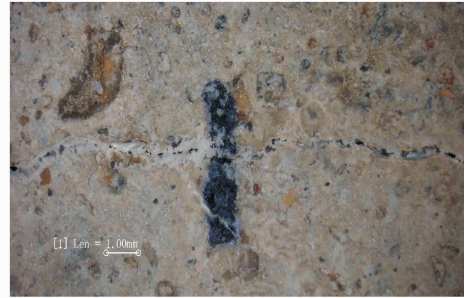
(a) NC-1 养护 0 d



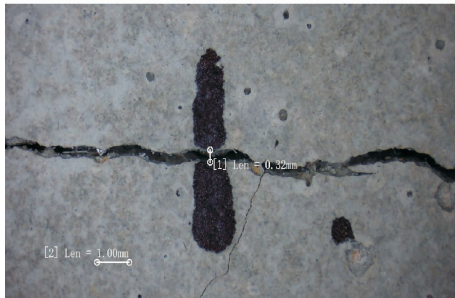
(b) NC-1 养护 28 d



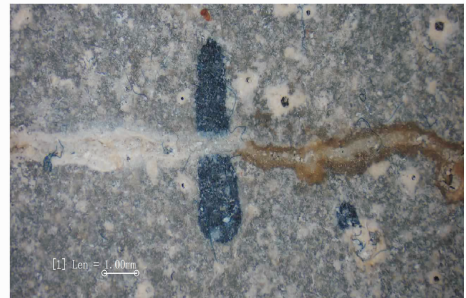
(c) NC-3 养护 0 d



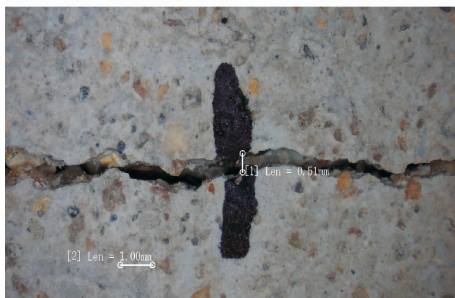
(d) NC-3 养护 28 d



(e) A2 养护 0 d



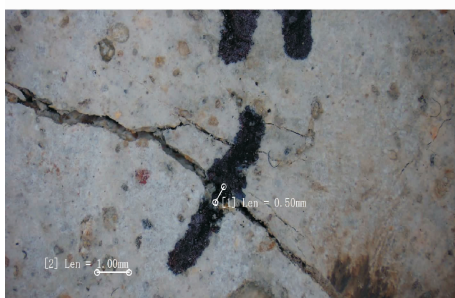
(f) A2 养护 28 d



(g) A2-U 养护 0 d



(h) A2-U 养护 28 d

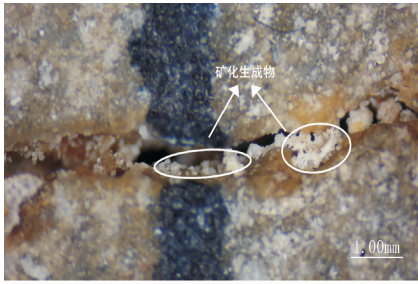


(i) A2-UN 养护 0 d

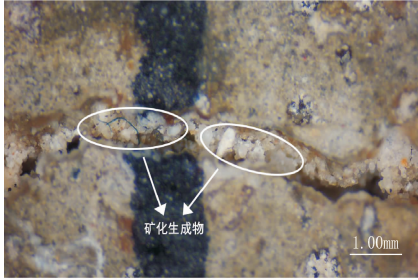


(j) A2-UN 养护 28 d

图 2 混凝土裂缝部位修复 28 d 前后对比图



(a) NC-1组试块裂缝部位矿化结晶图



(b) A2-UN组试块裂缝部位矿化结晶图

图 3 修复 14 d 后裂缝部位矿化结晶图



(a) 混凝土断面1



(b) 混凝土断面2

图 4 棱柱体试块断面图

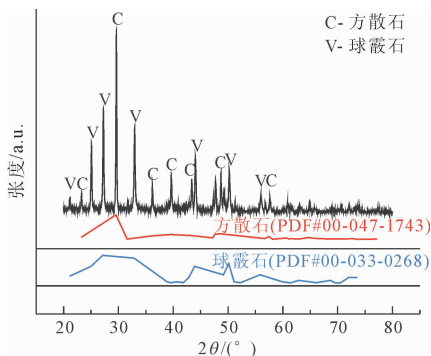


图 5 裂缝部位沉淀物的 XRD 谱

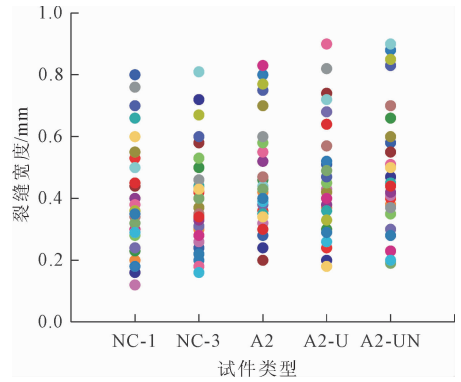
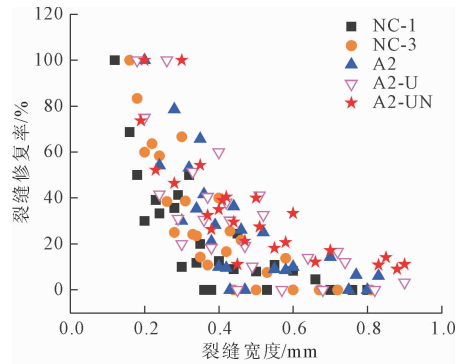
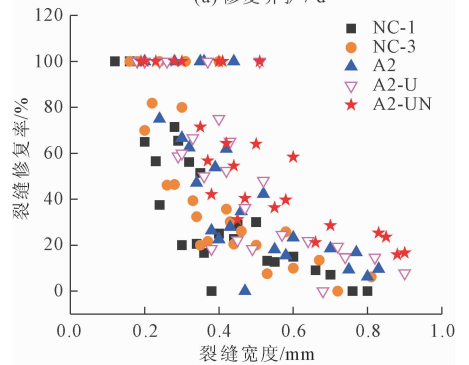


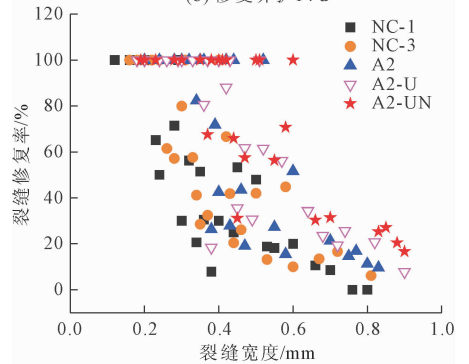
图 6 混凝土初始裂缝宽度分布图



(a) 修复养护 7 d



(b) 修复养护 14 d



(c) 修复养护 28 d

图 7 混凝土观测点处裂缝修复率对比图

在养护时间达到 28 d 时,NC-1 组与修复 14 d 时相比,修复率达到 50% 以上的测点数占总观测点数的 44.0%,裂缝最大修复宽度为 0.29 mm,裂缝

修复效果提高较小,分析原因是 NC-1 组混凝土试块裂缝处未水化的胶凝材料随着修复时间的延长,胶凝材料的水化作用越来越弱,使得裂缝修复效果逐渐趋于稳定;与 NC-1 组相比,NC-3 组在完全修复的观测点数虽比 NC-1 组多,但总体修复效果与 NC-1 组相差不大,裂缝修复率达到 50% 以上的测点数占总观测点数的 48.0% 与 NC-1 组相差较小,分析原因是 NC-3 组中掺入了菌液和乳酸钙,因此在修复效果上表现出比 NC-1 组稍好的修复效果,但由于并未加入载体,致使细菌暴露在混凝土内部高碱性的环境中,从而造成细菌大量死亡,使得修复效果与对照组 NC-1 组相似;与养护 14 d 相比,A2 组、A2-U 组和 A2-UN 组对于大多数宽度在 0.6 mm 以下的裂缝其裂缝修复效果明显提升,对于在 0.6 mm 以上的裂缝其修复效果提升较小,A2 组、A2-U 组和 A2-UN 组裂缝修复率在 50% 以上的测点数分别占总测点数的 52.0%、64.0% 和 72.0%,其中 A2-UN 组有 13 个裂缝观测点被完全修复,最大修复裂缝宽度达 0.6 mm,大于 A2 组和 A2-U 组的最大修复宽度 0.52 mm 和 0.51 mm,是 NC-1 组最大修复宽度 0.29 mm 的 2.07 倍,且完全修复的观测点数也比 NC-1 组多 8 个,A2-UN 组对于大宽度裂缝表现出较其它测试组更优异的修复能力。上述试验结果表明:再生骨料作为载体能为巴氏芽孢杆菌提供良好的保护作用,使细菌存活率提高,从而提高裂缝自修复能力;采用再生骨料固载微生物制备的再生混凝土随着修复时间的延长,其裂缝修复能力会逐渐提高,最后减弱并趋于稳定,而普通混凝土的裂缝修复能力会随着修复时间的延长而逐渐减弱;加入营养物质能提高混凝土的裂缝修复效率和裂缝处矿化产物的生成量。

图 8 展示了养护 28 d 后各混凝土组的平均和最大裂缝修复宽度。结果显示,NC-1 组和 NC-3 组的裂缝修复效果较差,裂缝平均修复宽度均低于 0.2 mm,其中 NC-1 组的裂缝平均修复宽度仅为 0.13 mm,而基于以再生骨料为载体制备的自修复混凝土其平均修复裂缝宽度均在 0.2 mm 以上,其中 A2-UN 组 28 d 平均修复裂缝宽度达到 0.31 mm,分别是 NC-1 组、A2 组和 A2-U 组的 2.38 倍、1.35 倍和 1.19 倍,并且 A2-UN 组最大修复宽度可达 0.6 mm 均高于其它混凝土组,呈现出较好的自修复效果;A2 组和 A2-U 组在 28 d 时的平均修复宽度分别为 0.23 mm 和 0.26 mm,最大修复宽度为 0.52 mm 和 0.51 mm,结合裂缝修复率分析结果,发现 A2-U

组的修复能力略优于 A2 组,分析原因是 A2-U 组比 A2 组中多加入了尿素,巴氏芽孢杆菌属于产脲酶型微生物,其矿化反应的进行离不开尿素的参与,在混凝土拌合用水中加入尿素使得这一矿化反应正常进行,进而提高了裂缝自修复能力。试验结果表明:普通混凝土的裂缝自修复能力最差,与未加入载体的自修复混凝土相比,加入载体后制备出的自修复混凝土拥有较好的裂缝修复能力,其中同时加入了乳酸钙、尿素和营养物质制备出的混凝土其裂缝修复能力表现为最好。

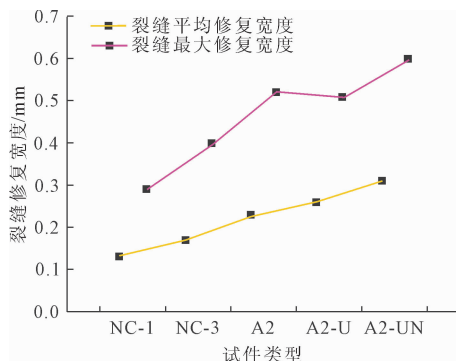


图 8 养护 28 d 后裂缝平均和最大修复宽度图

2.4 混凝土抗压及抗折强度

经过 28 d 的浸水养护,试件的抗压强度如图 9 所示。由图 9 可知,NC-1 组试件的抗压强度为 35.8 MPa,而掺入再生骨料的 NC-2 组试件抗压强度为 30.9 MPa,较 NC-1 组降低了 13.7%;以矿化底物的种类为变量,在相同的掺量下,可以看出同时加入乳酸钙和尿素作为矿化底物的混凝土组的抗压强度要比单加乳酸钙和同时加入乳酸钙、尿素和营养物质的混凝土组的抗压强度都高,其中矿化底物加入了三种物质的混凝土组的抗压强度最低,说明营养物质的加入会降低混凝土的抗压强度;以矿化底物的掺量为变量,在相同的底物下,可以看出抗压强度的大体变化规律为:随着底物掺量的增加呈现出先增大后降低的趋势,当底物的掺量为胶凝材料质量分数的 2% 时,其对应各混凝土组的抗压强度要大于底物的掺量为胶凝材料质量分数的 1% 时和 3% 时的情况,底物在 3% 掺量下对应各组的抗压强度最低,说明在该试验中矿化底物的最佳掺量为胶凝材料质量分数的 2%。结合底物的种类以及掺量来看,A2-U 组中混凝土的抗压强度达到了各混凝土组抗压强度的最大值 39.1 MPa,相比天然骨料对照组 NC-1 组和再生骨料对照组 NC-2 组,分别提高了 9.2% 和 26.5%。混凝土棱柱体试件在养护 28 d 后

的抗折强度如图 10 所示,从图 10 可以看出,矿化底物的种类及掺量对抗折强度的影响规律与抗压强度基本一致,各混凝土组中抗折强度最大的为 A2-U 组(5.9 MPa),较 NC-1 组和 NC-2 组分别提高了 25.5% 和 31.1%。

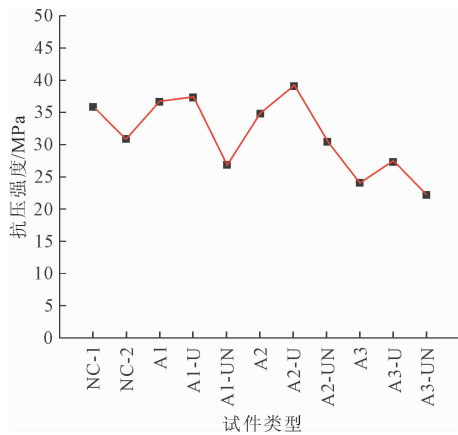


图 9 立方体试件抗压强度

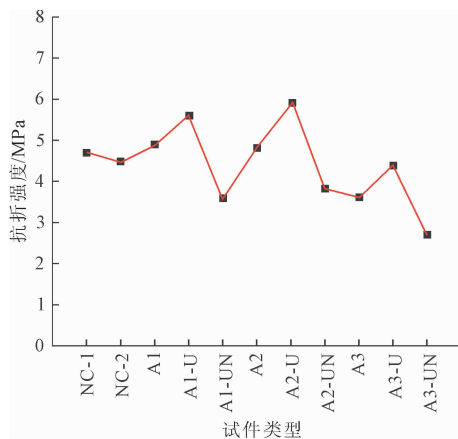


图 10 棱柱体试件抗折强度

综上所述,发现乳酸钙和尿素在一定掺量范围内对混凝土的力学性能有明显的提高作用,当超过这个范围后则会明显降低混凝土的力学性能,营养物质的掺入会降低混凝土的力学性能,该试验结果与文献[17]和文献[18]中的研究发现相似。文献[17]通过调节乳酸钙的掺量,制备了不同配比的混凝土块,乳酸钙的掺量分别为水泥质量分数的 0%、0.35%、0.70%、1.05%、1.40%、1.75%、2.10% 和 2.45% 共八个水平。试验表明,在乳酸钙掺量从 0% 增加至 1.05% 时,混凝土的抗压强度呈现上升趋势,而当掺量超过 1.05% 后,抗压强度则持续下降。本研究设定乳酸钙掺量为水泥质量分数的 0%、1%、2% 和 3%,共四个水平进行试验,结果显示当乳酸钙掺量为 1% 时,混凝土的抗压强度有所

提升,但当掺量超过 1% 时,抗压强度则持续下降。该结果与文献[17]中的结论相一致。此外,文献[18]中分别添加为水泥质量分数 1% 的乳酸钙、尿素和酵母提取物(营养物质)制备砂浆试块,结果表明乳酸钙和尿素均有助于增强砂浆的力学性能,而酵母提取物则显著降低其性能。

分析乳酸钙、尿素和营养物质的掺入对混凝土力学性能影响的原因是:

(1) 乳酸钙对混凝土力学性能影响的原因是:在适宜的掺量范围下对混凝土的力学性能有提高作用。这是因为混凝土内部的砂浆以及砂浆与骨料之间结合的部位存在空隙,而添加的乳酸钙电离出的 Ca^{2+} 离子通过水化以及碳化作用与混凝土内部的物质反应生成氢氧化钙、碳酸钙和硅酸钙,生成的这些物质对混凝土内部的空隙进行封堵,进而提高了混凝土的力学性能。当乳酸钙掺量高于这一范围时会对混凝土力学性能产生不利影响,过量的乳酸钙会改变水泥浆体的化学组成和微观结构,使水泥石的结晶形态和孔隙结构变差。

(2) 尿素对混凝土力学性能影响的原因是:当尿素掺量在一定的较低范围内时,会对混凝土的力学性能有提高作用。这是因为尿素在混凝土中可以起到一定的早强作用,它能够促进水泥的水化反应,使水泥水化产物更快地生成和发展,从而填充混凝土内部的孔隙,提高混凝土的密实度和强度。随着尿素掺量的不断增加,会对混凝土的抗压强度产生不利影响,导致强度逐渐降低。这是由于过多的尿素会引入过多的气泡,使混凝土内部孔隙结构变差,密实度下降;同时,高掺量的尿素会与水泥中的某些成分发生不良化学反应,生成一些对强度不利的产物,削弱水泥石与骨料之间的粘结力。

(3) 营养物质对混凝土的力学性能有不利影响的原因是:一方面,在往拌和用水中加入营养物质的过程中,发现随着营养物质的加入,水中逐渐产生了大量气泡,说明在其加入到混凝土中后,会在试件内部产生气泡,提高试块内部的孔隙率,从而降低了混凝土的力学性能;另一方面,营养物质的加入可能会引入有机杂质,这些杂质会干扰水泥的正常水化过程,导致水泥石的结构不均匀,从而使混凝土的力学性能降低。

3 结 论

(1) 在修复养护过程中,自修复混凝土能够在裂缝部位矿化生成大量晶体颗粒沉淀从而填补裂

缝,达到修复裂缝的效果,而普通混凝土只能依靠自身的水化作用修补裂缝,修复效果较差,与普通混凝土相比,自修复混凝土呈现出更好的裂缝自修复效果。

(2) 载体是自修复混凝土中不可缺少的组成部分,含有载体的自修复混凝土的裂缝修复能力要比不含载体的自修复混凝土的裂缝修复能力要好。

(3) 在裂缝自修复试验中,使用乳酸钙、尿素和营养物质作为底物制成的混凝土展现了最佳的自修复能力。经过 28 d 的修复养护,其裂缝的平均和最大修复宽度分别达到 0.31 mm 和 0.6 mm,分别是普通混凝土的平均修复宽度(0.13 mm)和最大修复宽度(0.29 mm)的 2.38 倍和 2.07 倍。

(4) 在抗压及抗折试验中,以乳酸钙和尿素为矿化底物,且掺量为胶凝材料质量分数 2% 的混凝土组的力学性能最好,抗压和抗折强度分别为 39.1 MPa 和 5.9 MPa,其强度比未加入矿化底物的普通再生混凝土分别提高了 26.5% 和 31.1%。

参考文献:

[1] 韦双妮,王英辉,赖俊翔,等. 微生物自修复混凝土研究进展[J]. 硅酸盐通报,2024,43(8):2737-2747,2757.

[2] 高瑞晓,王剑云. 微生物矿化沉积碳酸钙技术修复混凝土既有微裂缝研究进展[J]. 材料导报,2023,37(1):96-105.

[3] 王海良,陈仓,荣辉,等. 基于微生物的水泥基材料裂缝自修复技术研究进展[J]. 科技导报,2022,40(15):90-103.

[4] 钱春香,王瑞兴,詹其伟. 微生物矿化的工程应用基础[M]. 北京:科学出版社,2015.

[5] Jonkers M H, Thijssen A, Muyzer G, et al. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete[J]. Ecological Engineering, 2008, 36(2):230-235.

[6] 田园,姚星旭. 不同载体对于微生物矿化修复混凝土裂缝效果的研究进展[J]. 粘接,2022,49(4):98-101.

[7] 侯福星,白一鸣,沈嶝,等. 微生物自修复混凝土载体材料研究进展[J]. 材料导报,2024,38(13):84-98.

[8] 路伟,胡思斯,王亚妹,等. 载体材料对微生物自修复效果的影响[J]. 材料科学与工程学报,2024,42

(4):680-691.

[9] 钱春香,李瑞阳,潘庆峰,等. 混凝土裂缝的微生物自修复效果[J]. 东南大学学报(自然科学版),2013,43(2):360-364.

[10] Wiktor V, Jonkers M H. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2011,33(7):763-770.

[11] Liu Chao, Xu Xiaoyu, Lv Zhenyuan, et al. Self-healing of concrete cracks by immobilizing microorganisms in recycled aggregate[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2020,18(4):168-178.

[12] 刘超,吕振源,肖建庄,等. 再生骨料的微生物载具性及其在自修复混凝土中的应用[J]. 建筑材料学报,2020,23(6):1337-1344.

[13] 许顺顺. 基于混菌矿化修复骨料缺陷的再生混凝土性能试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2021:25-26.

[14] 吴健峰,喻峰,朱玲丽,等. 蛋壳粉钙源对微生物修复砂浆裂缝效果的影响研究[J]. 混凝土,2023(12):202-206.

[15] Achal V, Pan X, Zhang D, et al. Bioremediation of Pb-contaminated soil based on microbially induced calcite precipitation. [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2012,22(2):244-247.

[16] 冯涛,张家广,李珠,等. 乳酸钙掺量对基于微生物矿化沉积的混凝土裂缝自修复效果的影响[J]. 科学技术与工程,2017,17(31):147-152.

[17] 冯涛,张家广,李珠,等. 乳酸钙掺量对微生物自修复混凝土裂缝修复宽度与抗压强度的影响[J]. 混凝土,2017(8):32-36.

[18] 白镜泉. 微生物活性功能材料制备及其在砂浆自修复中的应用研究[D]. 扬州:扬州大学,2021:47-53.

[19] 孙潇昊,缪林昌,吴林玉,等. 低温条件下微生物诱导固化对比研究[J]. 岩土力学,2018,39(S2):224-230.

[20] 彭劼,何想,刘志明,等. 低温条件下微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(10):1769-1774.

[21] 吴洋,练继建,闫玥,等. 巴氏芽孢八叠球菌及相关微生物的生物矿化的分子机理与应用[J]. 中国生物工程杂志,2017,37(8):96-103.

[22] 裴迪,刘志明,胡碧茹,等. 巴氏芽孢杆菌矿化作用机理及应用研究进展[J]. 生物化学与生物物理进展,2020,47(6):467-482.