

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.115



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



增强再生骨料固载混菌对混凝土裂缝自修复性能的影响试验研究

韩瑞凯^{a,b}, 张家广^{a,b}, 马奥炜^{a,b}, 李真真^{a,b}, 周爱娟^c

(太原理工大学 a. 土木工程学院; b. 土木工程防灾与控制山西省重点实验室; c. 环境科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 微生物诱导碳酸钙沉淀可实现混凝土裂缝的自修复, 微生物载体可以有效提高混凝土基体内部微生物存活率, 从而改善混凝土的自修复效果, 然而目前的载体存在力学性能差、与水泥基材料兼容性差以及费用高等问题。提出一种基于增强再生骨料固载混菌的裂缝自修复混凝土, 通过再生骨料增强时间对混凝土抗压强度和自修复性能的影响研究, 确定再生骨料合理矿化增强时间, 并揭示再生骨料矿化增强和混凝土裂缝自修复机理。结果表明: 再生骨料合理增强时间为 7 d, 矿化增强后再生骨料的吸水率和压碎指标降低幅度分别为 20.5% 和 9.5%; 混凝土抗压强度提高幅度为 8.6%; 经 56 d 的修复养护后, 基于增强再生骨料固载微生物的混凝土裂缝平均修复宽度和完全闭合率分别达到了 0.44 mm 和 73%; 再生骨料表面沉淀物呈规则方块状、晶体类型为方解石, 裂缝部位沉淀物呈规则的方块状和针簇状, 晶体类型为方解石和文石。

关键词: 微生物矿化; 增强再生骨料; 混菌; 裂缝自修复; 抗压强度

中图分类号: TU528.07 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)05-0135-08

Experimental study on the effect of microbial consortia-enhanced recycled concrete aggregates on the self-healing performance of concrete cracks

HAN Ruikai^{a,b}, ZHANG Jiaguang^{a,b}, MA Aowei^{a,b}, LI Zhenzhen^{a,b}, ZHOU Aijuan^c

(a. College of Civil Engineering; b. Shanxi Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Control; c. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China)

Abstract: Microbial induced carbonate precipitation can achieve the crack self-healing in concrete. Bacterial carrier can effectively improve the survival rate of bacteria in concrete matrix and thus improve the crack self-healing effect in concrete. However, the potential decrease in mechanical properties, poor compatibility with the cementitious matrix and relatively high cost of the current bacterial carrier cannot be ignored. The self-healing concrete based on enhanced recycled concrete aggregate as bacterial carrier is proposed in this paper. The influence of enhancement time of recycled concrete aggregate on compressive strength and self-healing capacity

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 山西省基础研究计划(202203021221065)

作者简介: 韩瑞凯(1997-), 男, 主要从事混凝土材料研究, E-mail: hanruikai0106@126.com。

张家广(通信作者), 男, 副教授, E-mail: zhangjiaguang@tyut.edu.cn。

Received: 2023-06-28

Foundation item: Basic Research Program of Shanxi Province (No. 202203021221065)

Author brief: HAN Ruikai (1997-), main research interest: concrete materials, E-mail: hanruikai0106@126.com.

ZHANG Jiaguang (corresponding author), associate professor, E-mail: zhangjiaguang@tyut.edu.cn.

of concrete was studied to determine the reasonable mineralization enhancement time of recycled concrete aggregates, and the enhancement mechanism of recycled concrete aggregates and self-healing mechanism of concrete are revealed. The experiment result shows that the reasonable enhancement time of recycled concrete aggregates is 7 days, the water absorption and crushing index of enhanced recycled concrete aggregates decrease by 20.5% and 9.5%, the compressive strength of concrete prepared with the enhanced recycled concrete aggregates increased by 8.6%. After 56d of curing and healing, the average value of healed crack widths and completely healing percentages of the concrete prepared with enhanced recycled concrete aggregates are 0.44 mm and 73%, respectively. The surface precipitates on the enhanced recycled concrete aggregates exhibit regular cubic shapes and the crystals of these precipitates are calcite. The crack-filling precipitation crystals of the self-healing concrete exhibit regular cubic shapes and cluster shapes. The crystals of these precipitations are calcite and aragonite.

Keywords: microbial mineralization; enhanced recycled concrete aggregates; microbial consortia; crack self-healing; compressive strength

因各向异性、非均质性,混凝土结构在服役期间受荷载、温度等因素的影响会产生微裂缝,这些裂缝为有害离子(氯离子、硫离子)侵入混凝土内部提供通道,造成混凝土劣化和钢筋腐蚀,影响混凝土结构的安全性和耐久性^[1-3]。基于微生物矿化沉积的混凝土裂缝自修复技术利用微生物的新陈代谢矿化沉积碳酸钙,实现混凝土裂缝的自我修复,因其修复过程环境友好、矿化沉淀与水泥基材料相容性良好等优点,引起了很多学者的研究兴趣^[4-6]。

将微生物直接掺入混凝土时,内部高碱性环境、生存空间减少等因素会导致活菌数量显著降低,影响裂缝自修复效果^[7-8];因此,目前学者采用多孔材料和封装材料来固载微生物掺入混凝土基体,如膨胀珍珠岩、微胶囊和陶粒等^[9-12]。这些载体自身物理力学性能较差,与水泥基材料相容性较差且价格较高,难以实现工程化应用。与上述材料相比,再生骨料具有优异的物理性能、相容性以及显著的价格优势;同时再生骨料表面附着多孔的旧水泥砂浆和微裂缝,能够为微生物提供适宜的生长空间和新陈代谢场所,因此,可用其固载微生物制备裂缝自修复混凝土^[8,13-14]。Liu等^[8]利用再生骨料固载巴氏芽孢杆菌制备自修复混凝土,经过28d养护后裂缝平均修复宽度达到了0.28mm,Han等^[14]通过负压法将自行筛选的好氧嗜碱混菌固载至再生骨料缺陷处,制备的自修复混凝土经过28d浸水养护后最大修复裂缝宽度达到0.57mm。但再生骨料本身的缺陷会影响混凝土的工作性能和力学性能,且界面过渡区较为薄弱,因此,部分学者采用增强再生骨料固载微生物制备自修复混凝土,即再生骨料矿化增强后用于制备自修复混凝土,再生骨料表面缺陷能够被沉淀物晶体填充、覆盖,实现再生骨料力学性能提升以改善自修复混凝土的工作性能和

力学性能,且再生骨料表面沉淀物可为微生物提供进一步保护来抵抗混凝土基体内部恶劣环境;混凝土基体开裂后水分、空气进入裂缝,增强再生骨料固载的微生物开始矿化沉积碳酸钙填补混凝土裂缝,以实现裂缝的自我修复,如图1所示。花素珍等^[15]以增强再生骨料固载微生物制备自修复混凝土,抗压强度和坍落度提高了12.9%和20%;与普通混凝土相比,裂缝平均修复宽度和完全闭合率分别提高了47.4%和50%以上。然而,目前学者并未依据再生骨料增强时间对混凝土力学性能和裂缝自修复性能的影响规律确定合理的再生骨料增强时间。

笔者以增强再生骨料固载混菌制备裂缝自修复混凝土,有效解决微生物载体力学性能差、费用高及与水泥基材料相容性差等问题。通过研究再生骨料增强时间对混凝土抗压强度和自修复性能的影响确定再生骨料合理增强时间,以确保混凝土具备良好力学性能的同时兼具一定的裂缝自修复能力;结合SEM分析和XRD分析揭示再生骨料增强机理和混凝土裂缝自修复机理。

1 试验概况

1.1 微生物及培养基

使用的微生物为自行筛选的好氧嗜碱混菌,以山西省晋中市污水处理厂活性污泥和花园土壤作微生物源,以乳酸为底物在碱性、好氧的条件下富集筛选12个周期,具体的筛选过程详见参考文献[14],筛选完成后,利用甘油将混菌在-80℃的环境下保存。选用自行筛选的好氧嗜碱混菌作矿化微生物的原因为其具有高效的矿化沉积效率、优异的矿化鲁棒性以及显著的经济效益^[16]。目标混菌通过微生物群落间的物质交换与电化学信号传递协同

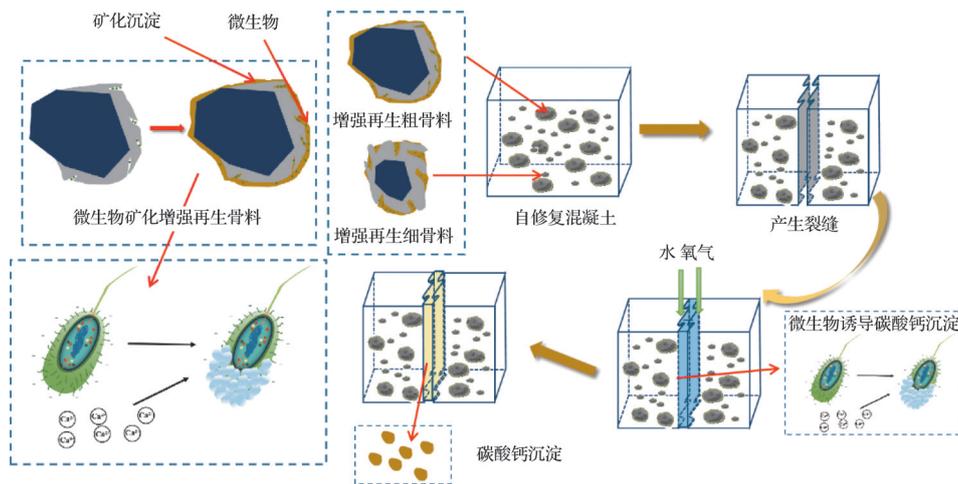


图 1 混凝土裂缝自修复原理图

Fig. 1 Self-healing schematic diagram of concrete cracks

诱导碳酸钙沉淀,成矿过程中的主要生物-化学反应如图 2 所示,通过前期工作研究混菌的无机碳转化率可达到 70% 以上。图 3 为好氧嗜碱混菌的微观形貌图,从图中可以看出,好氧嗜碱混菌由多种形态的微生物群落组成,其中包括杆状、球状等。侧面证实了与纯菌诱导碳酸钙沉淀的机理不同,好氧嗜碱混菌是由多菌落协同矿化沉积碳酸钙。好氧

嗜碱混菌的培育过程参考好氧型微生物常规接种和培养方法。采用的培养基每升溶液中包含:10 g 氯化钠、10 g 胰蛋白胍和 5 g 酵母浸粉,并用 2 mol/L 的 NaOH 溶液将其 pH 调节至 7.0。在 33 °C、130 r/min 的恒温振荡培养箱中培育 2 d 后,对其进行离心处理获得菌泥,然后用 5 g/L 的灭菌酵母浸粉溶液重悬菌泥至 OD₆₀₀ 值为 1.2 备用。

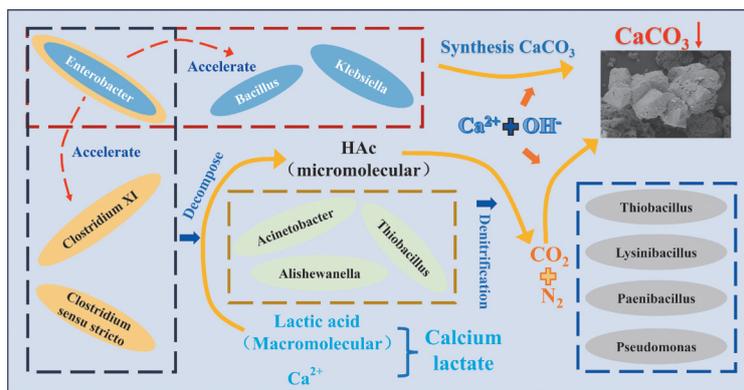


图 2 好氧嗜碱混菌诱导矿化碳酸钙的主要生物-化学过程

Fig. 2 Main biochemical processes of calcium carbonate mineralization induced by aerobic acidophilic mixed bacteria

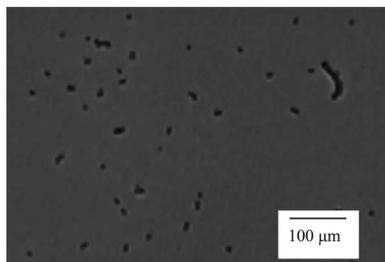


图 3 好氧嗜碱混菌形态特征图

Fig. 3 Micromorphology of aerobic acidophilic mixed bacteria

1.2 再生骨料增强处理

再生骨料购买自山西省晋中市某再生骨料厂,依据参考文献[15]和《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)、《混凝土和砂浆用再生细骨料》

(GB/T 25176—2010)筛分得到粒径 4.75~19 mm 的再生粗骨料和 1.18~4.75 mm 的再生细骨料。再生粗骨料和再生细骨料的吸水率分别为 5.7% 和 9.7%,压碎指标分别为 14.7% 和 18.3%。再生骨料的增强处理过程为:将再生骨料放置于真空桶中,利用抽气泵将桶压抽至-0.06 MPa,将制备后的菌液利用压强差吸附至桶中,在-0.06 MPa 的压强下保持 20 min,然后将固载微生物的再生骨料取出放置于 65 g/L 的乳酸钙溶液(NaOH 溶液调节 pH 值为 7.0)中。采用乳酸钙作营养物质的主要原因为:一方面,乳酸钙可提供碳酸钙诱导沉积过程中所需的钙离子;另一方面,乳酸根离子可作为微生物新陈代谢诱导沉积碳酸盐的营养物质。为保证

微生物矿化增强效果,向营养物质溶液中通入氧气维持溶解氧浓度恒定并保持溶液环境的温度恒定,在预设的时间下将再生骨料取出。

1.3 自修复混凝土制备

水泥为太原市某水泥厂42.5级普通硅酸盐水泥;砂子为太原市某厂的普通河砂,含泥量为0.3%;减水剂为聚羧酸高性能减水剂;水为自来水;营养物质为乳酸钙,配合比如表1所示。其中,NC组采用天然骨料;Control组用再生粗骨料等质量代替100%天然骨料、再生细骨料等质量代替30%的砂子,再生骨料不做任何处理;SHC-U组在

Control组的基础上再生骨料吸附混菌20 min作微生物载体;SHC-E3组、SHC-E7组、SHC-E10组及SHC-E15组中再生骨料吸附混菌20 min后分别增强3、7、10、15 d作微生物载体,所有试件的拌和用水采用乳酸钙溶液。用于混凝土裂缝自修复效果测试的各组试件为直径100 mm、高50 mm的圆柱体,用于自修复混凝土抗压强度测试的各组试件为边长100 mm的立方体,每组试件制备3个。混凝土拌和后装入模具,静置48 h后脱模,然后在温度(20±2)℃、湿度95%的标准条件下养护28 d。

表1 自修复混凝土配合比

Table1 Mixing proportion of the self-healing concrete

编号	配合比/(kg/m ³)							
	天然骨料	再生粗骨料	砂子	再生细骨料	水泥	水	减水剂	乳酸钙
NC	1 140	0	588	0	457	215	3.63	9.68
Control	0	1 140	412	176	457	215	3.63	9.68
SHC-U	0	1 140	412	176	457	215	3.63	9.68
SHC-E3	0	1 140	412	176	457	215	3.63	9.68
SHC-E7	0	1 140	412	176	457	215	3.63	9.68
SHC-E10	0	1 140	412	176	457	215	3.63	9.68
SHC-E15	0	1 140	412	176	457	215	3.63	9.68

1.4 性能测试方法

为考察混菌增强处理时间对再生骨料吸水率和压碎指标、自修复混凝土性能的影响,在再生骨料矿化增强3、7、10、15 d后,将其放入105℃的烘箱中烘干至恒重,依据《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2022)对再生骨料吸水率、压碎指标进行测试,吸水率计算式为

$$W = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100$$

式中:W为吸水率;G₁为饱和面干试样的质量;G₂为烘干后试样的质量。

压碎指标计算式为

$$Q_c = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100$$

式中:Q_c为压碎指标;G₁为试样质量;G₂为压碎试验后筛余的试样质量。

自修复混凝土经过28 d的养护后,依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行抗压强度测试;按照文献[11]的方法制作裂缝,沿裂缝方向间隔1 cm设置1个裂缝观测点并进行标记,各测试组大约选取20条初始宽度在0.3~1.0 mm的裂缝作为自修复监测点,然后放置在水中浸泡养护,分别在修复7、14、28、56 d时对裂缝愈合情况进行观测。裂缝自修复效果采用裂缝愈合率H_p、平均修复宽度D_i和完全闭合率H_{pc}

进行评价。裂缝愈合率计算式为

$$H_p = \frac{w_t}{w_0} \times 100$$

式中:w_t为养护t d时监测点裂缝修复宽度;w₀为初始裂缝宽度。

裂缝平均修复宽度计算式为

$$D_i = \frac{\sum w_t}{N} \times 100$$

式中:N为各测试组监测点裂缝的总条数。

完全闭合率计算式为

$$H_{pc} = \frac{N_c}{N} \times 100$$

式中:N_c为各测试组监测点裂缝完全修复的条数。

2 试验结果与讨论

2.1 增强再生骨料的吸水率、压碎指标及混凝土抗压强度

图4为再生骨料经混菌不同矿化增强时间的吸水率和压碎指标。由图4可见,吸水率、压碎指标随增强时间的延长呈现先降低后升高的变化趋势;再生骨料经10 d的矿化增强后吸水率和压碎指标最低分别为4.53%和13.3%,与未增强的再生骨料相比,降幅分别为20.5%和9.5%;当增强时间超过10 d时,再生骨料的吸水率和压碎指标增大。这可能是因为增强早期微生物在再生骨料旧水泥砂

浆的微裂缝、孔洞部位进行矿化沉积来修复缺陷,微生物数量较多,沉淀物晶体之间的排列相对致密;随着增强时间的延长,微生物逐渐被自身矿化的沉淀物晶体包裹,导致微生物数量减少,后续矿化的沉淀物晶体之间排列相对松散形成新的孔洞,宏观上表现为吸水率和压碎指标的增大。

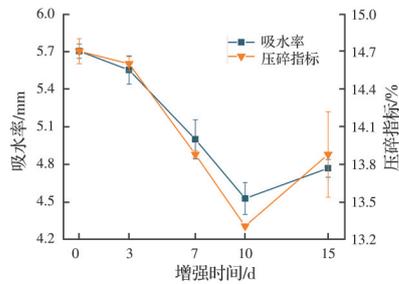


图 4 增强再生骨料吸水率和压碎指标

Fig. 4 Water absorption and crush index of enhanced recycled concrete aggregates

图 5 为以增强再生骨料制备自修复混凝土的抗压强度。由图 5 可见,与 NC 测试组相比,SHC-U 组的抗压强度下降了 38.4%,表明直接以未增强再生骨料固载微生物会显著降低混凝土抗压强度。与 SHC-U 组相比,SHC-E7 组和 SHC-E10 组的抗压强度分别提高了 8.6% 和 28.5%;可见以混菌矿化增强再生骨料作载体提高自修复混凝土的抗压强度。同时可见,自修复混凝土的抗压强度变化规律与再生骨料物理力学性能变化规律保持一致,呈现先增加后降低的趋势。造成该现象的原因为:一方面,再生骨料本身物理力学性能下降,造成再生混凝土抗压强度下降;另一方面,相较于增强处理 10 d 的再生骨料,增强处理 15 d 的再生骨料表面沉淀物晶体之间排列疏松、相互堆积形成新的孔洞、裂缝,

因此制备再生混凝土会在再生骨料-矿化沉淀-水泥基材料界面形成薄弱区,对混凝土力学性能产生不利影响。

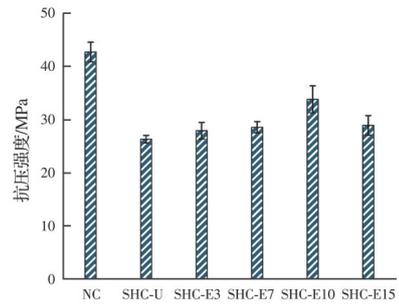


图 5 混凝土抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of concrete

2.2 混凝土裂缝自修复效果分析

图 6 为混凝土经不同修复时间下的裂缝修复表现图。从图中可见,经 28 d 的修复,Control 组的裂缝仅发生了部分修复,原因为未水化的水泥颗粒接触到水分后进一步水化实现裂缝的修复,但这种裂缝自修复能力有限。掺加微生物的自修复混凝土 SHC-U 组、SHC-E3 组、SHC-E7 组、SHC-E10 组及 SHC-E15 组的裂缝被沉淀物填充修复。其中,SHC-U 组、SHC-E3 组和 SHC-E7 组的裂缝在修复 14 d 时已被完全修复;而 SHC-E10 组和 SHC-E15 组裂缝仅部分区域被沉淀物填充,当修复时间延长至 28 d 时,整个裂缝区域被完全修复。这可能是由于再生骨料经较长时间增强后固载在缺陷部位的微生物被自身矿化的沉淀物包裹,当混凝土基体开裂后,暴露在裂缝区域内的微生物数量减少,在早期的养护过程中难以实现有效的修复;随着修复时间延长,其他裂缝部位的微生物迁移至该裂缝部位进行矿化沉积,以实现裂缝的修复。

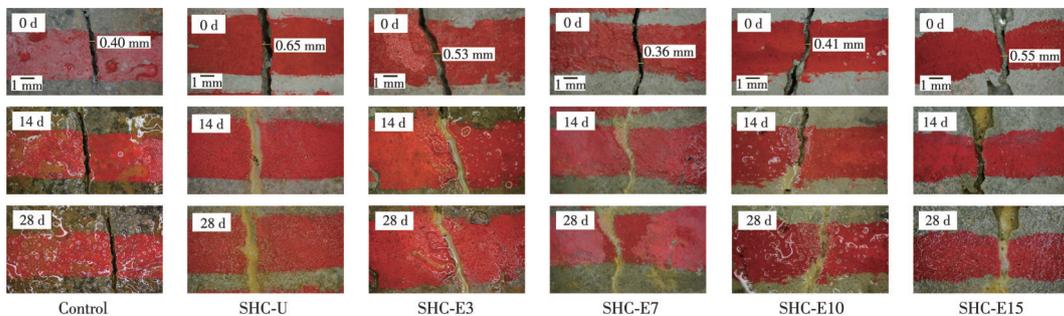


图 6 混凝土裂缝自修复过程表现图

Fig.6 Microscopic images of crack-healing process in concrete

不同修复时间下混凝土裂缝自修复效果量化分析见图 7。从图 7 可见,随着修复时间的延长,各测试组裂缝的愈合率逐渐上升且完全修复的裂缝数量逐步增加。经 56 d 修复后,普通再生混凝土

Control 组裂缝平均修复宽度和完全闭合率分别为 0.31 mm 和 52%;再生骨料直接固载混菌的 SHC-U 组裂缝平均修复宽度和完全闭合率分别达到了 0.58 mm 和 89.7%,与 Control 组相比,分别提高了

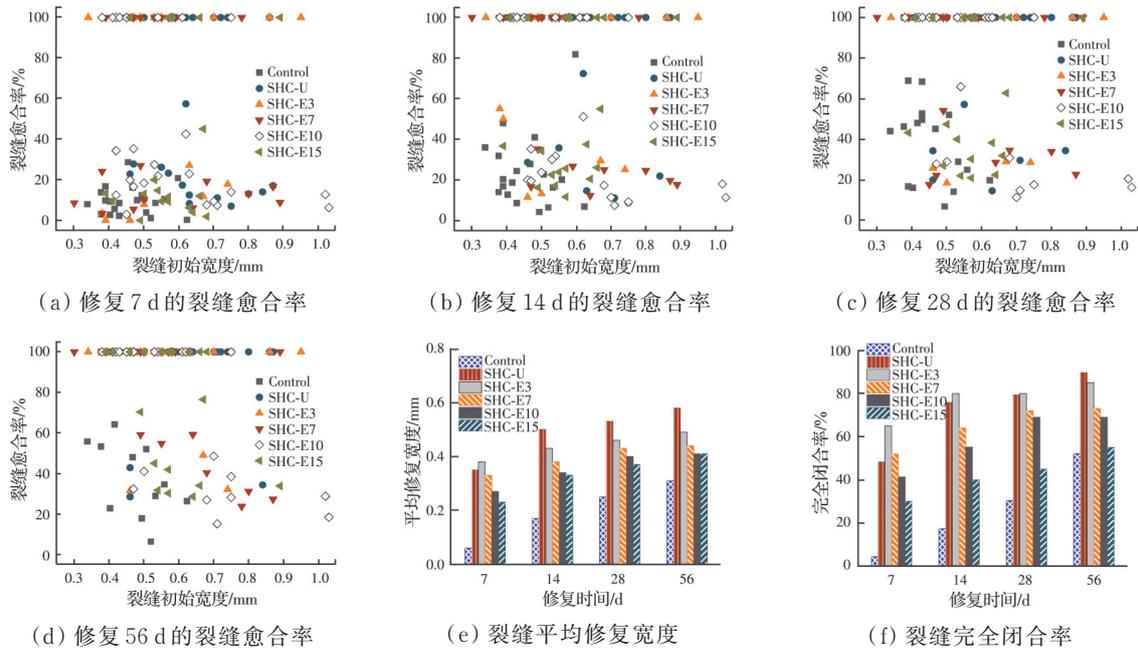


图 7 不同修复时间下混凝土裂缝自修复效果

Fig. 7 Self-healing effects in concrete cracks at different healing times

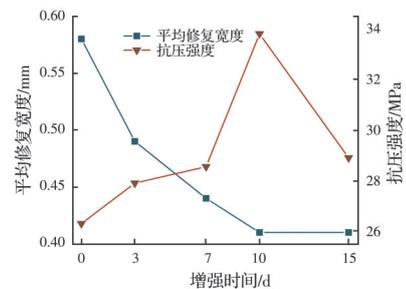
87% 和 72.5%，证明了混菌矿化可以显著改善混凝土的裂缝自修复效果。以增强再生骨料固载微生物制备自修复混凝土，再生骨料矿化增强时间与混凝土裂缝自修复效果近似呈反比，即再生骨料增强时间越长，各个阶段的裂缝自修复效果越差；经 7 d 修复后，SHC-U 组裂缝平均修复宽度和完全闭合率分别为 0.35 mm 和 48.3%，SHC-E15 组裂缝平均修复宽度和完全闭合率分别为 0.23 mm 和 30%，与 SHC-U 组相比，降低幅度分别达到了 34.3% 和 37.9%；SHC-E15 组经 56 d 养护后裂缝平均修复宽度和完全闭合率分别为 0.41 mm 和 55%，与 SHC-U 组相比，降低幅度分别达到了 29.3% 和 38.7%；再生骨料经短时间增强后固载微生物对混凝土裂缝自修复效果的影响较小，经 7 d 修复后，SHC-U 组和 SHC-E3 组的裂缝平均修复宽度分别为 0.35、0.38 mm，且经 56 d 修复后 SHC-U 组和 SHC-E3 组的裂缝完全闭合率分别为 89.7% 和 85%。

综上，以增强再生骨料固载混菌可改善混凝土裂缝自修复效果且再生骨料矿化增强时间与自修复效果近似呈反比例关系。这可能是随着再生骨料增强时间的延长，混菌在再生骨料缺陷部位矿化沉积修复填补孔洞、微裂缝且自身逐渐被沉淀物晶体包裹，导致混凝土开裂后，暴露在单位裂缝区域内的混菌数量降低，从而会一定程度地降低混凝土的裂缝自修复能力。

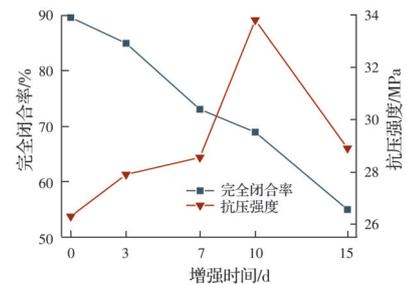
2.3 再生骨料合理增强时间确定

图 8 为基于混凝土抗压强度和裂缝平均修复宽度、完全闭合率判定再生骨料合理增强时间。由图

8 可见，以混菌矿化增强再生骨料固载微生物作载体制备自修复混凝土，随着再生骨料增强时间的延长，混凝土裂缝平均修复宽度和完全闭合率逐渐降低，抗压强度呈现先升高后降低的趋势。当再生骨料增强时间为 7 d 时，由其制备的混凝土裂缝平均修复宽度、完全闭合率和抗压强度变化曲线存在交



(a) 基于混凝土裂缝平均修复宽度和抗压强度判定



(b) 基于混凝土裂缝完全闭合率和抗压强度判定

图 8 再生骨料合理增强时间判定

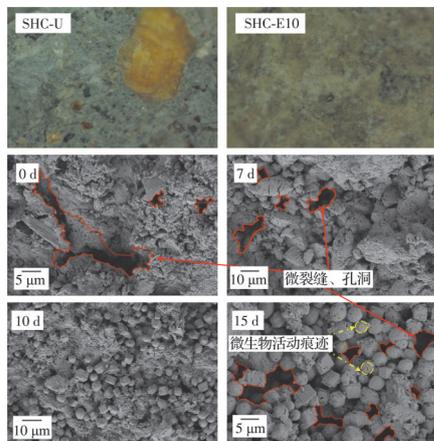
Fig.8 Reasonable enhancement time of recycled aggregates

点,与基于未处理再生骨料制备的混凝土相比,抗压强度提高了 8.6%,经 56 d 修复后裂缝平均修复宽度和完全闭合率分别提高了 41.9% 和 40.4%,混凝土在确保力学性能的同时兼具一定的裂缝自修复能力。

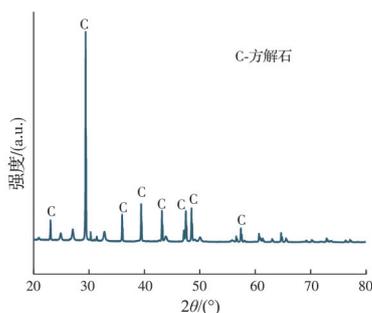
2.4 混菌矿化沉淀物微观结构和物相分析

2.4.1 增强再生骨料表面沉淀物

图 9 为再生骨料经混菌矿化增强处理后表面沉淀物的 SEM 图和 XRD 分析图谱。由图 9 可见,未处理再生骨料表面呈现蓝灰色,是旧水泥砂浆与天然骨料的颜色;而可以清晰地观察到好氧嗜碱混菌增强处理后的再生骨料表面覆盖着一层淡黄色沉淀。通过 SEM 分析看出,当混菌未增强处理时,再生骨料表面存在明显的微裂缝、孔洞等缺陷;经混菌增强处理后,再生骨料表面缺陷被方形、菱形的晶体填充、覆盖;再生骨料经 10 d 矿化增强后表面沉淀物晶体分布均匀、堆积密实,再生骨料的原始缺陷被有效地修复,力学性能可以得到有效的提高。增强时间为 15 d 时,再生骨料表面的沉淀物晶体之间排列疏散、相互堆积形成新的孔洞、裂缝,宏观上表现为吸水率和压碎指标的升高;沉淀物晶体



(a) 微观形貌分析



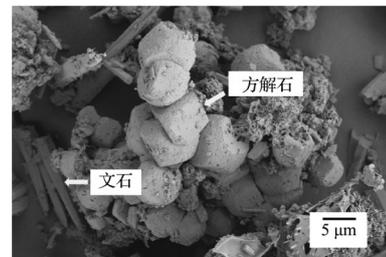
(b) XRD 图谱分析

图 9 再生骨料表面微观分析
Fig.9 Analysis of precipitations on surface of recycled concrete aggregates

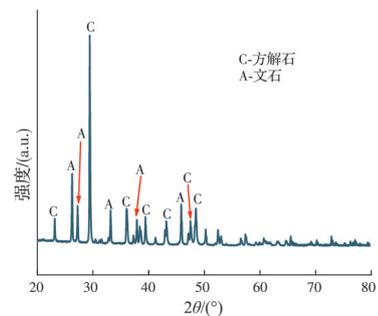
表面可见微生物生长繁殖、矿化沉积的活动痕迹。沉淀物晶体的 XRD 谱强峰 2θ 值为 29.40° ,与纯方解石的峰值吻合良好,其余峰值与纯方解石峰值基本一致,表明再生骨料表面混菌矿化沉淀物为方解石型碳酸钙。微生物矿化沉积碳酸钙晶体的过程受到矿化沉积环境的影响。再生骨料旧水泥砂浆微裂缝、孔洞等区域与混凝土基体裂缝区域在 pH 值、微生物接触到的氧气含量、营养物质质量以及成核位点等方面的差异导致了碳酸钙晶体类型的差异。

2.4.2 混凝土裂缝部位沉淀物

图 10 为混凝土裂缝部位混菌矿化沉淀物的 SEM 图和 XRD 分析图谱。由图 10 可见,裂缝部位沉淀由方形、菱形晶体以及部分针簇状晶体相互堆积形成,单个方形、菱形晶体的粒径大多数为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$;单个晶体与水泥水化产物之间能够相互聚集、连接,形成较大的晶体团,证实矿化沉淀物与水泥基材料的相容性良好。沉淀物的 XRD 分析谱最强峰 2θ 值为 29.43° ,与纯方解石 XRD 分析谱最强峰对应良好;其余峰值中 C 标号峰值与方解石分析谱相吻合,A 标号峰值与纯文石分析谱对应强峰吻合良好;表明裂缝部位混菌矿化沉淀物为方解石型和文石型碳酸钙,这一结果与先前的研究结果保持一致^[16]。



(a) 微观形貌分析



(b) XRD 图谱分析

图 10 混凝土裂缝部位沉淀物分析

Fig.10 Analysis of precipitations in concrete crack

3 结论

1)随着混菌矿化处理时间的延长,再生骨料吸

水率和压碎指标呈现先降低后升高趋势,经10 d矿化处理后再生骨料吸水率和压碎指标降幅最大,分别降低了20.5%和9.5%,裂缝自修复混凝土抗压强度提高幅度可达到28.5%。

2)以增强再生骨料固载混菌作微生物载体,随着再生骨料增强处理时间的延长,混凝土的裂缝自修复效果逐渐降低;经过56 d的修复后,基于增强15 d再生骨料固载混菌的混凝土裂缝平均修复宽度和完全闭合率分别为0.41 mm和55%,与基于再生骨料直接固载混菌的混凝土相比分别下降了29.3%和38.7%。

3)再生骨料合理矿化处理时间为7 d,相应的混凝土抗压强度比基于再生骨料未增强的混凝土提高了8.6%;裂缝平均修复宽度和完全闭合率分别达到了0.44 mm和73%,与普通混凝土相比可分别提高41.9%和40.4%。

4)再生骨料表面混菌矿化沉淀物为方解石型碳酸钙且吸水率、压碎指标降低幅度越大,碳酸钙沉淀物晶体的排列、堆积越致密;在裂缝部位矿化的沉淀物为方解石型和文石型碳酸钙且与水泥基材料相容性良好。

参考文献

- [1] YAZDANBAKHSI A, BANK L C, CHEN C. Use of recycled FRP reinforcing bar in concrete as coarse aggregate and its impact on the mechanical properties of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121: 278-284.
- [2] KHALIQ W, EHSAN M B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102: 349-357.
- [3] 钱春香, 任立夫, 罗勉. 基于微生物诱导矿化的混凝土表面缺陷及裂缝修复技术研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(5): 619-631.
- QIAN C X, REN L F, LUO M. Development of concrete surface defects and cracks repair technology based on microbial-induced mineralization [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 43(5): 619-631. (in Chinese)
- [4] GARCÍA-GONZÁLEZ J, RODRÍGUEZ-ROBLES D, WANG J Y, et al. Quality improvement of mixed and ceramic recycled aggregates by biodeposition of calcium carbonate [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 1015-1023.
- [5] 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.
- [6] 钱春香, 王欣, 於孝牛. 微生物水泥研究与应用进展[J]. *材料工程*, 2015, 43(8): 92-103.
- QIAN C X, WANG X, YU X N. Research and application development of microbe cement [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(8): 92-103. (in Chinese)
- [7] LUO M, QIAN C X, LI R Y. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 87: 1-7.
- [8] LIU C, XU X Y, LV Z Y, et al. Self-healing of concrete cracks by immobilizing microorganisms in recycled aggregate [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2020, 18(4): 168-178.
- [9] ZHANG J G, LIU Y Z, FENG T, et al. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148: 610-617.
- [10] XU J, TANG Y H, WANG X Z, et al. Application of ureolysis-based microbial CaCO_3 precipitation in self-healing of concrete and inhibition of reinforcement corrosion [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120364.
- [11] WANG J Y, SOENS H, VERSTRAETE W, et al. Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores [J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 56: 139-152.
- [12] 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.
- [13] WANG X Z, XU J, WANG Z P, et al. Use of recycled concrete aggregates as carriers for self-healing of concrete cracks by bacteria with high urease activity [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 337: 127581.
- [14] HAN R K, XU S S, ZHANG J G, et al. Insights into the effects of microbial consortia-enhanced recycled concrete aggregates on crack self-healing in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 343: 128138.
- [15] 花素珍, 张家广, 高沛, 等. 增强再生骨料固载混菌的混凝土裂缝自修复性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(11): 6299-6310.
- HUA S Z, ZHANG J G, GAO P, et al. Self-healing of concrete cracks by immobilizing non-axenic bacteria with enhanced recycled aggregates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(11): 6299-6310. (in Chinese)
- [16] 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.