



基于微生物矿化沉积的再生骨料强化试验研究

张京旭, 陈 萍, 徐 辉, 马美玲, 陶航宇

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 开展微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbial induced calcium carbonate precipitation, MICP)对再生混凝土骨料(Recycled Concrete aggregates, RCA)和再生砖骨料(Recycled brick aggregates, RBA)的强化试验研究,以压碎指标、表观密度和吸水率为强化效果评价指标,通过 SEM、EDS 对表面形貌和沉淀物进行观察和分析,探讨 MICP 强化再生骨料的机理,并分析不同强化方法对再生骨料的强化效果。结果表明:MICP 对 RCA 和 RBA 具有较好的强化作用,7 d 内强化效果随时间逐渐增强,第 10 d 强化效果呈现下降趋势,因此 MICP 强化再生骨料应确定合理的处理时间;砖骨料疏松多孔,MICP 对 RCA 的强化效果优于 RBA;与化学强化和机械强化结果对比,MICP 强化效果接近甚至优于两者。

关键词: 再生混凝土骨料;再生砖骨料;强化;微生物诱导碳酸钙沉淀

中图分类号: TU521

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2020) 01-0122-08

Experimental study on the behavior of recycled aggregates strengthened by microbial induced carbonate precipitation

ZHANG Jingxu, CHEN Ping, XU Hui, MA Meiling, TAO Hangyu

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The recycled concrete aggregates (RCA) and recycled brick aggregates (RBA) were strengthened by using microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP). The apparent density, water absorption rate and crushing index were chosen as the evaluation indexes of strengthening effects. The surface properties and sediments of the samples were analyzed by Scanning Electron Microscopy and Energy Disperse Spectroscopy. The mechanism of MICP strengthening recycled aggregates was discussed, and the strengthening effect of recycled aggregates by the different strengthening methods was analyzed. The result shows that MICP has a good strengthening effect on both RCA and RBA. In the first 7 days, the effect of strengthening was gradually enhanced with time. However, the strengthening effect was weakened in the 10th day. Therefore, it is suggested to determine a reasonable treating timewhen using MICP technology to strengthen the recycled aggregate. MICP presents the better strengthening effect on RCA than on RBA, which is mainly related to the porous structure of RBA. Compared with the chemical and mechanical strengthening methods, the enhancement effect of MICP is close to or even better than the two.

Key words: recycled concrete aggregate; recycled brick aggregate; strengthen; microbial induced calcium carbonate precipitation(MICP)

收稿日期: 2019-07-27 网络出版日期: 2019-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578508); 浙江省-比利时西弗兰德省国际合作项目(2020C04013); 国家自然科学基金项目(41977250)

作者简介: 张京旭(1995—), 女, 浙江台州人, 硕士研究生, 主要从事土木工程材料方面的研究。

0 引言

近年来,由于城镇化发展快速,建筑物的拆旧换新工程导致产生了大量建筑垃圾,中国许多城市面临着严峻的建筑垃圾处置问题^[1]。同时,混凝土行业正以约 50 亿吨/年的速度消耗天然骨料,并呈逐年上升趋势^[2],天然骨料面临价格大幅上涨及短缺问题。若能将建筑垃圾制成再生骨料复用于建筑行业,可同时解决建筑垃圾处置和天然骨料紧缺两大难题,具有重要的社会、环保和经济意义。

再生骨料存在吸水率高、强度低等缺陷,这对其资源化利用产生较大影响和制约^[3]。针对这一问题,国内外很多学者围绕再生混凝土骨料强化开展了一些研究,目前常见的强化方法有机械强化和化学强化。机械强化主要通过外部机械力去除再生骨料表面黏着的水泥砂浆^[4],如破碎、碾磨等,该方法原理简单,但容易对再生骨料产生二次损伤。化学强化根据化学试剂作用原理可分为化学浆液处理和化学表面处理。化学浆液处理通过生成胶凝物质来修复再生骨料表面裂缝,常用的化学浆液有水泥浆液、粉煤灰浆液等;化学表面处理通过浸渍液腐蚀再生骨料表面,激活未完全水化的矿物,对微细裂缝进行填充粘合,如酸性溶液、激活剂等,化学强化法操作简单,但容易对环境造成二次污染^[5]。近年来,微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbial induced calcium carbonate precipitation, MICP)技术在再生骨料强化方面受到关注,脲酶微生物新陈代谢过程分泌的脲酶,可以促进尿素水解生成 CO_3^{2-} ,进而与周围介质中的 Ca^{2+} 发生矿化反应生成碳酸钙,实现对再生骨料表面的微裂缝及孔隙的填充,达到强化效果。

微生物诱导矿化反应温和,生成的碳酸钙本身为一种天然石材,具有优异的环境友好性和耐久性,并且与水泥基材料相容性极佳^[6]。Sarda 等^[7]通过室内试验研究发现, MICP 技术可以减少再生混凝土骨料表面吸水率;付明华^[8]也得到类似结论,经过 MICP 处理后再生混凝土细骨料吸水率和压碎指标降低,并且与 CaNO_3 相比, CaCl_2 作为微生物胶结液的钙源时,再生混凝土骨料的强化效果更好;郝小虎等^[9]通过试验发现,微生物矿化可以有效提高再生混凝土骨料的质量和表观密度。再生骨料的强化效果多以表观密度、吸水率和压碎指标等性能指标作为参考依据,对不同的再生材料, MICP 技术的强化效果存在差异。

中国生产的再生骨料组成主要包含混凝土组分

和砖组分,其中砖组分占比约为 30%~50%^[10]。相比于混凝土组分,砖组分强度更弱,吸水率更高,作为骨料进行再利用的性能更差,更有必要对其强化处理。目前国内外 MICP 技术强化再生骨料的研究主要针对再生混凝土骨料,而对再生砖骨料强化的研究比较欠缺。

鉴于此,本文首先开展了再生混凝土骨料(Recycled concrete aggregates, RCA)和再生砖骨料(Recycled brick aggregates, RBA)的 MICP 强化试验,获得了处理时间为 0~10 d 时,两种再生骨料的表观密度、吸水率和压碎指标值;然后根据试验结果,对比分析不同处理时间下, MICP 技术对两种再生骨料的强化效果;其次通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和能谱仪(energy dispersive spectroscopy, EDS),观测 MICP 处理前后两种再生骨料表面微观形貌的变化和碳酸钙沉淀的生成,对 MICP 强化再生骨料进行了定性分析;最后结合文献数据,对比分析化学处理、机械处理及 MICP 处理对再生骨料强化效果的影响,进一步探讨了再生骨料的强化机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的再生骨料来自杭州市区某拆除工程,建筑拆除垃圾经筛选去杂质、破碎、过 4.75 mm 筛等处理后得到再生砖混骨料,再经人工分拣得到再生混凝土骨料和再生砖骨料(下文分别简称 RCA 和 RBA)。经 24 h 饮用水浸泡后测试, RCA 与 RBA 的表观密度分别为 2443 kg/m^3 和 1822 kg/m^3 ,吸水率分别为 6.1% 和 17.5%,压碎指标分别为 17.6% 和 32.4%。

1.2 MICP 强化试验

采用将再生骨料浸泡于微生物胶结液中的方式实现对再生骨料的 MICP 强化处理。

1.2.1 菌种选择及菌液制备

选用的菌种为巴氏芽胞八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*),其具有产脲酶能力高、生命力强、环境适应性好等特点^[11-12],是目前 MICP 领域中最常用的菌种之一。选用 LB 培养基,其作为富营养类培养基,能够快速培养细菌^[13],是实验室常用的培养基之一^[14-15],培养基配方见表 1。通过平板划线法将菌种移至固体培养基上,置于 37 °C 恒温培养箱中培养 24 h,进行活化。将活化后的细菌接种至液体培养基中,在 30 °C、转速 220 r/min 的恒温摇床中

培养 12 h, 用蒸馏水将菌液稀释至 OD_{600} 值为 0.598。

表1 培养基组成

不同成分含量	培养基	
	固体培养基	液体培养基
蛋白胨/(g·L ⁻¹)	10	10
酵母提取物/(g·L ⁻¹)	5	5
氯化钠/(g·L ⁻¹)	10	10
去离子水/L	1	1
琼脂粉/(g·L ⁻¹)	20	—

1.2.2 微生物胶结液制备

胶结液采用尿素-CaCl₂ 混合液, 其中尿素为微生物生长提供氮源, CaCl₂ 为 MICP 过程提供钙源。首先配置浓度为 3.3 mol/L 的 Urea 溶液和浓度为 3.6 mol/L 的 CaCl₂ 溶液, 然后将 Urea 溶液、CaCl₂ 溶液和菌液按一定比例混合搅拌均匀制成微生物胶结液, 1 L 微生物胶结液包括 60.6 mL Urea 溶液、55.5 mL CaCl₂ 溶液和 883.9 mL 菌液。

1.2.3 MICP 强化再生骨料试验

将 RCA 与 RBA 完全浸入胶结液中, 进行强化处理, 处理时间分别为 3、7 d 和 10 d。考虑到水对骨料的软化作用, 同时设立对照组, 做浸水处理。按照规范《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2001) 进行再生骨料压碎指标、表观密度和吸水率试验。表

观密度测试时, 采用容量瓶排水法, 将再生骨料装入容量瓶中浸泡 24 h, 取出后置于干燥箱中 (105±5)℃ 烘干至恒重; 吸水率测试时, 将已泡水静置 24 h 的再生骨料吹干至饱和表面干状态, 后烘干至恒重。每项试验进行 3 次平行测试, 取 3 次测试结果的平均值作为试验结果。以再生骨料的初始状态为基准, 获得不同处理时间下各项性能指标的变化率, 在相同处理时间下, 将 MICP 处理后再生骨料的性能指标变化率与浸水处理后性能指标的变化率相比, 反映 MICP 处理对再生骨料的强化效果。采用扫描电子显微镜 (SEM, JSM-5 610LV) 观测试样微观形貌, 利用其搭载的能谱仪 (EDS, Phoenix) 对试样微区成分进行定性分析。

2 试验结果与分析

2.1 压碎指标

压碎指标能够较好地反映骨料的强度性能。经浸水和 MICP 强化处理后两种再生骨料压碎指标如表 2 所示。浸水处理后两种再生骨料压碎指标随时间延长逐渐增大, 表明水对两种骨料均有明显的软化作用。尤其是 RCA 骨料, 浸水 10 d 时压碎指标的增长率高达 46%, 这可能与骨料内部存在较多损伤有关。

表2 再生骨料压碎指标试验结果

再生骨料	指标	处理方式	处理时间			
			0 d(初始状态)	3 d	7 d	10 d
RCA	压碎指标/%	浸水处理	17.6(—)	19.9(+13.1%)	21.9(+24.4%)	25.6(+46%)
		MICP 处理	17.6(0%)	15.3(-13.1%)	13.3(-24.4%)	16.7(-5.1%)
	强化指标/%	—	—	-26.1	-48.8	-51.1
RBA	压碎指标/%	浸水处理	32.4(—)	32.6(+0.6%)	32.7(0.9%)	35.7(+10.2%)
		MICP 处理	32.4(0%)	31.4(-3.1%)	28.1(-13.3%)	32.3(-0.3%)
	强化指标/%	—	—	-3.7	-14.2	-10.5

注: 括号中数据表示压碎指标变化率(%), 计算公式为 (处理后压碎指标-初始压碎指标)/初始压碎指标×100; 强化指标由 MICP 处理后压碎指标变化率减去浸水处理后压碎指标变化率得到。

经 MICP 处理后, 两种再生骨料压碎指标呈先减后少许递增的趋势, 两种再生骨料压碎指标在 0~7 d 内均呈减小趋势, 而第 10 d 出现增大趋势, 推测此时 MICP 的强化作用弱于水对骨料的软化作用, 所以导致压碎指标增大。

将 MICP 作用后和浸水处理相同时间后的压碎指标变化率的差值作为强化指标, 以反映 MICP 的实际强化效果。从表 2 可以看出, MICP 对两种骨料均有明显的强化作用, 其中对 RCA 的强化效果更优, 这可能与 RCA 表面裂隙及孔隙较少、生成的碳酸钙沉淀可以相对有效填充或封闭这些孔隙有

关。相反, RBA 表面孔隙及内部连通孔隙较多, MICP 生成的碳酸钙量有限, 起不到足够的填充、密实和封闭作用。综上可知, MICP 对两种再生骨料均有一定的强化作用, 且随时间的延长而增长。但由于受到水的软化作用影响, 处理 7 d 时压碎指标最小, 强化效果最好。

2.2 表观密度

表观密度的变化能够反映碳酸钙的生成情况, 可以表征 MICP 的作用效果。不同处理时间下两种再生骨料的表观密度测试结果如表 3 所示。本文试验通过排水法测再生骨料表观密度, 初始

表观密度(0 d)在浸泡 24 h 后进行测试。两种骨料浸水处理 3 d 内,表观密度均大于初始表观密度,之后变化率较小,说明浸泡 24 h 的再生骨料内

部仍然存在一定量的未吸水饱和的孔隙(或裂隙),继续浸泡 3 d 后再生骨料内部孔隙(或裂隙)基本吸水饱和。

表 3 再生骨料表观密度试验结果

再生骨料	指标	处理方式	处理时间			
			0 d(初始状态)	3 d	7 d	10 d
RCA	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	浸水处理	2443(—)	2556(+4.6%)	2557(+4.6%)	2581(+5.6%)
		MICP 处理	2443(0%)	2608(+6.8%)	2672(+9.4%)	2708(+10.8%)
	强化指标/%	—	—	+2.2	+4.8	+4.2
RBA	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	浸水处理	1822(—)	2421(+32.9%)	2378(+30.5%)	2410(+32.3%)
		MICP 处理	1822(0%)	2514(+37.9%)	2597(+41.9%)	2660(+45.9%)
	强化指标/%	—	—	+5.0	+11.4	+13.6

注:括号中数据表示表观密度变化率(%),计算公式为(处理后表观密度-初始表观密度)/初始表观密度 $\times 100$;强化指标由 MICP 处理后表观密度变化率减去浸水处理后表观密度变化率得到。

MICP 处理后,两种骨料的表观密度随时间延长呈上升趋势,说明 MICP 持续生成碳酸钙沉淀。通过 MICP 作用后和浸水处理后表观密度变化率的差值作为指标可以大致反映碳酸钙的生成情况。从表 3 可以看出,RBA 中碳酸钙的附着量大于 RCA 中的量,说明在 RBA 环境有利于 MICP 的进行。从表观密度的变化率看,3 d 内碳酸钙的生成速度较快,之后逐渐放缓。

2.3 吸水率

吸水率的变化能够反映骨料表面孔隙被沉淀物质填充或封闭情况。两种再生骨料分别经浸水和 MICP 处理后吸水率的变化情况如表 4 所示。浸水处理后两种骨料吸水率随时间的延长逐渐增大,变化规律与浸水引起表观密度的变化规律相吻合。浸水处理 3 d 时,再生骨料孔隙吸水接近饱和,含水率值趋于稳定。

表 4 再生骨料吸水率试验结果

再生骨料	指标	处理方式	处理时间			
			0 d(初始状态)	3 d	7 d	10 d
RCA	吸水率/%	浸水处理	6.1(—)	9.1(+49.2%)	9.9(+62.3%)	10.5(+72.1%)
		MICP 处理	6.1(0%)	5.6(-8.2%)	5.2(-14.8%)	4.6(-24.6%)
	强化指标/%	—	—	-57.4	-77.1	-96.7
RBA	吸水率/%	浸水处理	17.5(—)	19.2(+9.7%)	19.8(+13.1%)	20.3(+16.0%)
		MICP 处理	17.5(0%)	16.9(-3.4%)	16.7(-4.6%)	16.6(-5.1%)
	强化指标/%	—	—	-13.1	-17.7	-21.1

注:括号中数据表示吸水率变化率(%),计算公式为(处理后吸水率-初始吸水率)/初始吸水率 $\times 100$;强化指标由 MICP 处理后吸水率变化率减去浸水处理后吸水率变化率得到。

经过 MICP 处理后,两种再生骨料吸水率均随处理时间的延长而降低,说明 MICP 生成碳酸钙沉淀对再生骨料表面裂缝或孔隙进行了一定的填充修复。通过 MICP 作用和浸水处理后,吸水率变化率的差值作为强化指标可以反映 MICP 对再生骨料裂缝的修复效果。从表 4 可以看出,MICP 对 RCA 的吸水率降低效果更好,可能因为 RBA 结构疏松,表面孔隙不能够有效被碳酸钙沉淀填充封闭,因而水分的渗透没有得到有效阻止。综上可知,MICP 处理可有效降低再生混凝土骨料和再生砖骨料的吸水率,从而达到强化效果。

2.4 SEM 与 EDS 观测结果

MICP 强化处理前 RCA 和 RBA 的电镜扫描结果分别如图 1(a)~(b)所示,两种再生骨料表面均

分布较多的微裂缝和孔结构,其中 RCA 表面以微裂缝较常见,较大微裂缝宽度可达 80 nm,长度可达 4 μm 以上,RBA 表面存在更多孔结构,孔径一般大于 400 nm,形状多样。

经过 MICP 处理后 RCA 和 RBA 的电镜扫描结果分别如图 1(c)~(d)所示。进行 MICP 处理后,RCA 与 RBA 表面均有沉淀物质生成,对标记“+”处的沉淀物质进行 EDS 分析,发现其元素组成主要为 O、C、Ca、Si 等(组成比例见表 5),初步判定该沉淀物质主要为碳酸钙。沉淀物质对再生骨料表面部分微裂缝和孔隙进行了填充,以达到强化再生骨料作用,但生成的沉淀物尚未完全充满或封闭表面孔隙。

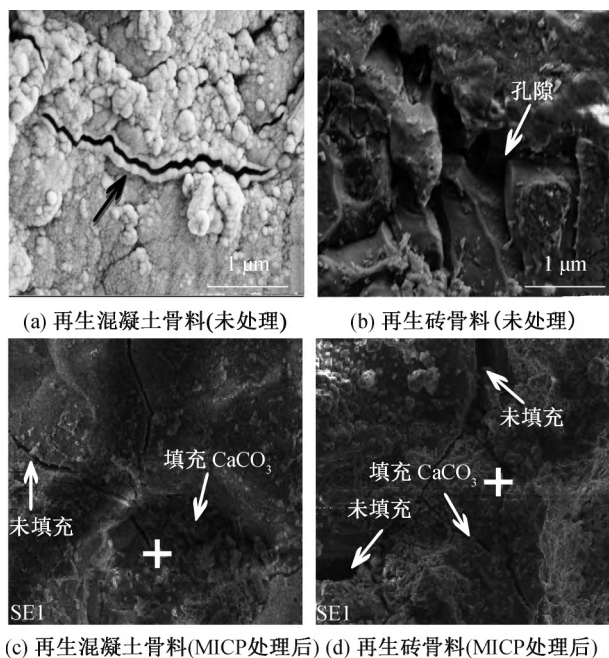


图1 再生骨料的SEM结果

表5 MICP处理后再生骨料的EDS结果 %

元素	RCA		RBA	
	Wt	At	Wt	At
C	5.72	12.5	16.79	33.06
O	29.39	48.21	23.08	34.13
Si	2.14	2.00	6.67	5.62
Ca	48.12	31.51	36.85	21.75

3 讨论

3.1 不同强化方法对再生骨料强化效果对比

对再生骨料,不同学者开展了不同强化方法的研究。为了探讨各方法对再生骨料的强化效果,本文分析了现有文献中不同强化方法下再生骨料的表观密度、吸水率和压碎指标,采用相对变化率对再生骨料的强化效果进行对比分析,并与本文试验结果进行对比。本文根据式(1)计算再生骨料强化后各项性能指标的相对变化率。

$$a_{\lambda} = \frac{V_{\lambda} - V_0}{V_0} \quad (1)$$

其中: a_{λ} 为性能指标相对变化率; λ 为对应的性能指标,用下标 Y 、 ρ 、 w 分别代表压碎指标、表观密度和吸水率; V_{λ} 为试样处理后所对应的性能指标值; V_0 为试样处理前的性能指标值。

对不同强化方法下再生骨料的压碎指标相对变化率进行总结,如图2所示,其中虚线为不同强化方法下骨料压碎指标相对变化率的平均值,变化率为负值时表示压碎指标下降,再生骨料强度增大。化

学浆液处理,再生骨料的压碎指标变化率范围为6%~44%^[16-18],其通过生成胶结物质填充再生骨料孔隙;化学表面处理,再生骨料的压碎指标变化率在-19%~-28%之间^[19-20],其通过浸渍液去除了骨料表面低强度的废旧水泥浆,并与骨料中某些活性成分反应,生成物填充孔隙或将再生骨料的微细裂纹粘合,改善骨料结构;机械处理后,再生骨料的压碎指标变化率为-26%~-90%^[21-23],再生骨料颗粒不规则性降低,减小了再生骨料表面附着砂浆率;MICP处理后,再生骨料的压碎指标变化率在1%~-44%之间^[5-6,8],主要是碳酸钙沉淀对再生骨料微裂缝的填充及覆膜作用,提高骨料强度。从现有的文献看,3种强化方法中,化学处理与MICP处理的强化效果相近,再生骨料压碎指标的平均相对变化率约为-19%,机械处理后再生骨料压碎指标的平均相对变化率约为-50%,再生骨料强度性能的提高效果最好。在本文MICP强化试验中,再生骨料强度提高效果与化学处理方法接近,其中对RCA的改善作用比对RBA好。

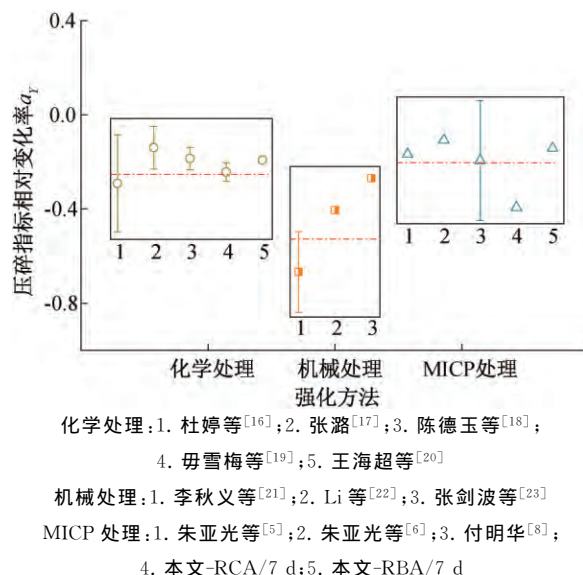
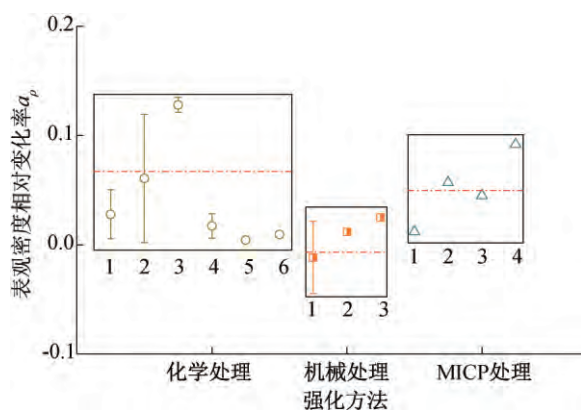


图2 不同强化方法下再生骨料压碎指标相对变化率

对三种不同强化方法下再生骨料表观密度的相对变化率进行总结,如图3所示。虚线为不同强化方法下骨料表观密度相对变化率的平均值,变化率为正值表示再生骨料表观密度增大。化学浆液处理后,再生骨料表观密度增长率介于1%~13%之间^[16-18],骨料表面生成胶结物质,填充孔隙,导致其孔隙率降低,表观密度增大;化学表面处理对骨料表观密度无明显影响^[19-20,24];机械处理后,再生骨料表观密度变化率在1%~6%之间^[21-23],再生骨料表面粘附的多孔砂浆被去掉,导致表观密度增大;MICP

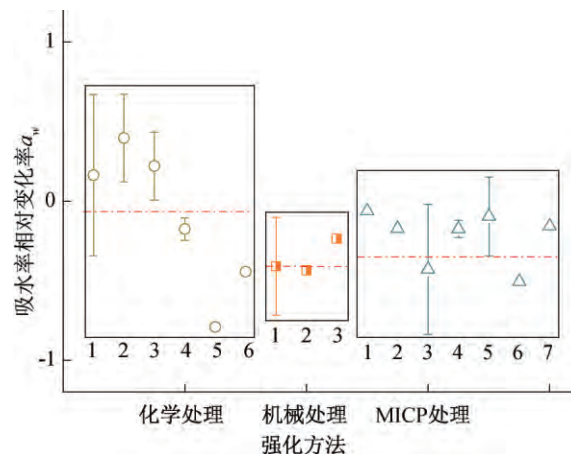
处理后,再生骨料表观密度增长率介于 1%~11% 之间^[5-6],碳酸钙沉淀导致表观密度增大。从现有文献看,3 种强化方法中,化学浆液处理对再生骨料表观密度的提高效果最明显,再生骨料表观密度平均变化率约为 7%;MICP 法次之,表观密度平均变化率约为 5%;机械处理后表观密度平均变化率约为 -1%。本文 MICP 强化试验对 RBA 表观密度的影响大于 RCA。



化学处理:1. 杜婷等^[16];2. 张璐^[17];3. 陈德玉等^[18];
4. 毋雪梅等^[19];5. 王海超等^[20];6. Kou 等^[24]
机械处理:1. 李秋义等^[21];2. Li 等^[22];3. 张剑波等^[23]
MICP 处理:1. 朱亚光等^[5];2. 朱亚光等^[6];
3. 本文-RCA/7 d;4. 本文-RBA/7 d

图 3 不同强化方法下再生骨料的表观密度相对变化率

对不同强化方法下再生骨料吸水率的相对变化率进行总结,如图 4 所示。虚线为不同强化方法下骨料吸水率相对变化率的平均值,变化率为负值表示再生骨料吸水率降低。经过化学浆液处理后,再生骨料的吸水率变化率在 -34%~67%^[16-18],吸水率变动范围较大,如果形成的胶凝物质多孔,则会使吸水率增大;化学表面处理后,再生骨料吸水率变化率在 -80%~-17% 之间^[19-20,24],浸渍液去除再生骨料表面高吸水率的硬化砂浆,并对裂缝进行了填充修复,降低了吸水率;经过机械强化处理后,再生骨料的吸水率变化率为 -67%~-8%^[21-23],机械法通过去除黏附在骨料表面的水泥砂浆来降低吸水率;MICP 通过填充再生骨料表面微裂缝,降低骨料的渗透性,吸水率变化率在 -72%~-1% 之间^[5,6,8,25-26]。3 种强化方法中,化学处理后再生骨料吸水率平均变化率约为 -6%,机械处理后吸水率平均变化率约为 -44%,MICP 处理吸水率平均变化率约为 -34%。在本文 MICP 强化试验中,再生骨料吸水率的改善效果与文献中 MICP 处理方法相近,与机械处理方法相当,优于化学浆液处理,其中对 RCA 吸水率的改善效果优于 RBA。



化学处理:1. 杜婷等^[16];2. 张璐^[17];3. 陈德玉等^[18];
4. 毋雪梅等^[19];5. 王海超等^[20];6. Kou 等^[24]
机械处理:1. 李秋义等^[21];2. Li 等^[22];3. 张剑波等^[23]
MICP 处理:1. 朱亚光等^[5];2. 朱亚光等^[6];3. 付明华^[8];4. Grabiec 等^[25];5. Wang 等^[26];6. 本文-RCA/7 d;7. 本文-RBA/7 d
图 4 不同强化方法下再生骨料吸水率相对变化率

3.2 MICP 强化再生骨料机理讨论

再生骨料表面和内部存在一定数量的微裂缝和孔隙,导致其吸水性增强,结构强度降低,且遇水具有弱化现象。RCA 内部结构较 RBA 而言相对密实,表面存在一定数量的微裂缝和孔隙,微裂缝主要由于加工过程损伤导致;孔隙主要来源于附着的砂浆。RBA 内部结构和表面形态均呈多孔结构,孔隙率远大于 RCA,故表观密度和强度远小于 RCA,而吸水性远大于 RCA。

在 MICP 强化再生骨料前期,微生物具有较高的活性,微生物胶结液中反应物浓度高,微生物的矿化反应正向移动速率快,不断生成碳酸钙沉淀或附着于再生骨料表面,或对骨料表面的部分微裂缝和孔隙进行填充或封闭,如图 5 所示。这一过程将会造成:a) 再生骨料结构得以密实,比重增大^[25],表观密度增大;b) 再生骨料吸水性能降低^[24],渗透能力降低,吸水率下降,同时降低水对骨料的软化作用;c) 再生骨料多孔及裂隙结构得以一定程度的密实或者封闭,从而提高了骨料的强度性能^[27]。

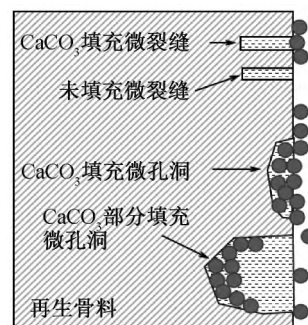


图 5 MICP 强化再生骨料过程示意图

随着处理时间的增长,微生物活性下降,微生物胶结液中反应物不断消耗,碳酸钙沉淀的生成速度减缓,MICP对再生骨料的强化作用逐渐减缓,而随着水分的进一步渗入,软化作用越发突出,导致骨料的强化效果呈现下降趋势,所以通过浸泡方式进行MICP强化处理应注意控制合理的处理时间。另外对于表面孔隙内径相对较大,且孔隙数量较多的材料,如RBA、MICP生成的碳酸钙沉淀不足够填充或封闭表面孔隙,因此在吸水率和压碎指标方面,其强化效果不及RCA。因此根据骨料表面情况采取合理的强化方法和工艺很有必要。

4 结论与建议

本文对RBA与RCA分别进行了0~10 d的MICP强化处理,以压碎指标、表观密度和吸水率三个性能指标反映MICP对不同再生骨料的强化效果,结合试验结果以及文献数据分析了再生骨料强化机理,得到以下结论:

a) MICP对RBA和RCA两种骨料均起到了较好的强化效果,MICP处理7 d时,RCA、RBA的压碎指标分别下降了24.4%、13.3%,表观密度分别提高了9.4%、41.9%,吸水率分别下降了14.8%、4.6%。采用浸泡法对再生骨料进行强化处理,微生物和水同时对再生骨料产生不同的作用效果,随着处理时间的增长,微生物对再生骨料强度的强化作用逐渐减弱,水对再生骨料强度的软化作用逐渐增强,使再生骨料的强化效果受到弱化,当MICP处理时间为10 d时,再生骨料的强化效果呈现下降趋势。按照本文的MICP强化工艺建议将处理时间控制在3~7 d内,可以获得较优的强化效果。

b) 与RCA相比,MICP处理后RBA表观密度的增加率较高,而吸水率和压碎指标的降低率低,整体强化效果RCA较优。RBA结构疏松多孔,孔隙率大,开孔孔隙多,孔径大,MICP生成的碳酸钙沉淀不足以有效填充或封闭表面开口孔隙,表面裂缝相对填充修复率较低。

c) 通过与现有文献中化学、机械法对再生骨料的强化效果比对,MICP对再生骨料吸水率的改善效果与机械强化效果相当,优于化学强化,对再生骨料强度的提高效果接近化学强化效果,优于机械强化。

d) 在实际工程中加工生产或再利用的再生骨料基本都是混凝土骨料和砖骨料的混合物,且砖骨

料占比较大。根据木桶效应,在强化再生骨料的研究和实践中,尤其要注意对性能更差的再生砖骨料的强化,建议加强对再生砖骨料的强化技术研究,这有利于提高建筑垃圾的资源化利用。

参考文献:

- [1] 廖春林,王玲,邓建,等.废弃混凝土再生利用探讨[J].国外建材科技,2007,28(4):67-69.
- [2] 杨飞华,郝利炜,程海丽.水玻璃改性废混凝土再生粗骨料对混凝土强度及抗冻性影响试验研究[J].江西建材,2015,165(12):43-45.
- [3] 王智威.不同来源再生骨料的基本性能及其对混凝土抗压强度的影响[J].新型建筑材料,2007,34(7):57-60.
- [4] Shima H, Tateyashiki H, Nakato T, et al. New technology for recovering high quality aggregate from demolished concrete [J]. Proceedings of International Symposium on Recycling Concrete, 2000(6):11-12.
- [5] 朱亚光,吴春然,吴延凯,等.微生物矿化沉积改善再生骨料性能的研究进展[J].混凝土,2018(7):88-92.
- [6] 朱亚光,吴延凯,吴春然.微生物矿化沉积对再生细骨料性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2017,12:93-96.
- [7] Sarda D, Choonia H S, Sarode D D, et al. Biocalcification by *Bacillus pasteurii* urease: A novel application[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2009, 36(8):1111-1115.
- [8] 付明华.拆除混凝土再生细骨料的改性与应用研究[D].南京:东南大学,2016:39-40.
- [9] 郝小虎,张家广,李珠,等.基于巴氏芽孢杆菌矿化沉积的再生骨料改性试验研究[J].混凝土,2018(10):70-73.
- [10] 刘庆东,张信龙,秦文萍,等.废弃砖再生骨料的强化及其应用研究[J].混凝土,2018(2):42-45.
- [11] 陈歆,韩依璇,张国荣,等.巴氏生孢八叠球菌用作混凝土裂缝愈合剂的活性研究[J].建筑材料学报,2018,21(3):484-489.
- [12] Bhaduri S K, Debnath N, Mitra S K, et al. Microbiologically induced calcite precipitation mediated by *Sporosarcina pasteurii* [J]. Journal of Visualized Experiments, 2016, 110:e53253.
- [13] 胡元森,李翠香,孙富林,等.不同培养基组合提高土壤细菌可培养性的研究[J].微生物学报,2007,47(5):882-887.
- [14] Al-Salloum Y, Abbas H, Sheikh Q I, et al. Effect of some biotic factors on microbially induced calcite precipitation in cement mortar [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2017, 24(2):286.
- [15] 董天志,缪林昌,孙潇昊,等.低温条件微生物沉积碳酸钙试验研究[J].硅酸盐通报,2018 37(5):

- 1509-1514.
- [16] 杜婷, 李惠强, 吴贤国. 混凝土再生骨料强化试验研究[J]. 新型建筑材料, 2002, 29(3): 6-8.
- [17] 张璐. 不同强化条件下的再生骨料强化探讨[J]. 煤炭技术, 2012, 31(1): 249-251.
- [18] 陈德玉, 刘欢, 唐凯靖. 再生骨料混凝土的抗冻性研究[J]. 施工技术, 2011, 40(11): 58-61.
- [19] 毋雪梅, 高耀宾, 杨久俊. 浸渍法强化再生骨料配制再生混凝土的试验[J]. 河南建材, 2009(1): 56-57.
- [20] 王海超, 陈晨, 夏玉峰. 再生骨料强化作用的机理试验研究与分析[J]. 混凝土, 2017(12): 95-98.
- [21] 李秋义, 朱亚光, 高嵩. 机械强化对再生骨料性能的影响[C]//中国土木工程学会. 第三届全国再生混凝土学术交流会论文集. 青岛, 2012: 131-138.
- [22] Li Q Y, Li Y X, Zhu C J. Influence of a particle shape correcting technique in properties of recycled coarse aggregate [J]. Materials Science and Technology, 2005, 13(6): 579-502.
- [23] 张剑波, 吴勇生. 再生骨料的强化研究[J]. 中国资源综合利用, 2010, 28(11): 58-60.
- [24] Kou S C, Poon C S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8): 649-654.
- [25] Grabiec A M, Klama J, Zawal D, et al. Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 145-150.
- [26] Wang J Y, Vandevyvere B, Vanhessche S, et al. Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156: 355-366.
- [27] Bang S S, Galinat J K, Ramakrishnan V. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii* [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2001, 28(4/5): 404-409.

(责任编辑:康 锋)