

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2019.12.014

裂缝尺寸对微生物修复混凝土强度的影响^①

潘建勋, 谢春燕, 杨莉莉, 符超, 吴达科

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 为研究微生物在不同宽度、深度的裂缝尺寸下对混凝土强度的修复效果, 选用巴氏芽孢杆菌为裂缝修复剂, 在宽度为 0.75, 1.0, 1.25 mm 及深度为 15, 30, 45, 60, 75, 90 mm 的不同裂缝下对混凝土进行修复, 通过混凝土抗压试验, 测出未修复和修复的试块抗压强度. 结果表明: (1) 微生物在不同裂缝尺寸下的修复对混凝土强度都有提升作用; (2) 裂缝深度对混凝土修复强度的影响更大; (3) 在同一裂缝宽度下, 修复效果出现了先上升后降低的趋势, 在深度为 30 mm 和 45 mm 的时候, 修复效果最佳.

关键词: 混凝土; 裂缝; 微生物; 抗压强度

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)12-0083-05

混凝土材料相比其它建筑材料, 由于其抗压强度高、耐久性好、成本较低等特点, 被广泛地应用于现代土木工程建筑结构中. 然而混凝土因其抗拉强度低的特点, 在变形和各种外荷载的作用影响下, 容易在表面产生一些肉眼可见的微裂缝. 微裂缝是普通混凝土几乎不可避免的特征, 这些微裂缝会对混凝土的强度和耐久性造成不利影响, 严重的会危及结构的安全^[1-3]. 因此裂缝应及时修复, 以保证混凝土结构的强度、延长其使用寿命. 基于微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)的裂缝修复技术不但能满足混凝土裂缝修复的要求, 而且相比于传统修复方式, 其反应条件温和、能耗低, 不会对结构及环境造成不可逆反应, 符合绿色环保的理念.

微生物诱导碳酸钙沉淀的形成一般有两种方法: 一种是一些如巴氏芽孢杆菌、球形杆菌类的嗜碱微生物细菌可以通过自身的新陈代谢将尿素水解为铵根离子与碳酸根离子, 而这些碳酸根离子与混凝土中的钙离子结合生成碳酸钙沉淀, 这些沉淀就会填补裂缝以达到修复效果. 另一种是通过微生物的呼吸作用, 当裂缝产生时, 氧气与水进入混凝土裂缝中就会激活处于休眠期的细菌使细菌具有活性, 呼吸产生的 CO₂ 也与混凝土中的钙离子结合生成碳酸钙沉淀, 但这种方式产生的碳酸钙沉淀远远少于第一种^[4-6]. Abo-El-Enein^[7] 等人通过研究不同钙源对微生物砂浆性能的影响, 试验结果表明采用氯化钙作为钙源的抗压强度高于醋酸钙和硝酸钙的抗压强度; Martinez^[8] 等人采用间歇式注浆和连续注浆两种方式对 0.5 m 砂柱进行 MICP 加固, 试验结果表明, 间歇式注浆加固更加均匀; 李沛豪^[9] 等通过人工裂缝修复的混凝土试件抗压试验, 发现在不同深度的试验条件下其强度最大能提升 15.3%; Varenym Achal^[10] 将菌液与砂子拌合后填入 3 mm 宽的裂缝中, 并在含有尿素和氯化钙的营养盐中养护, 试验结果表明, 裂缝深度为 27.2 mm 的试块 28 d 的抗压强度提高了 37%; 任立夫^[11] 通过对不同宽度裂缝平均自修复率分析得出, 随着裂缝宽度的增加, 修复剂的修复效果降低; 姜欢^[12] 通过对不同宽度裂缝采取不同处理方式进行防渗封堵试验, 对细小裂缝进行灌注细菌和营养盐方式进行处理, 能够快速对裂缝进行封堵. 上述的裂缝修复研究侧重于裂缝

① 收稿日期: 2019-06-04

基金项目: 中央高校基金科研业务费项目(XDJK2018C038).

作者简介: 潘建勋(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事混凝土结构修复研究.

通信作者: 吴达科, 博士, 副教授.

的封堵,对裂缝修复后结构强度研究尚少,因此有必要系统地对裂缝修复后强度变化进行研究。

为此,本研究选用巴氏芽孢杆菌这一嗜碱微生物,以氯化钙作为钙源进行微生物诱导碳酸钙沉积修复混凝土裂缝试验。通过立方体抗压试验,研究裂缝尺寸对微生物修复混凝土强度的影响,确定直接灌菌对混凝土强度提升较好时的裂缝尺寸,为微生物修复混凝土的工程应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 微生物的选用及培养

微生物修复剂应满足耐碱的特性,因而选用的嗜碱微生物购买自上海瑞楚生物科技有限公司的巴氏芽孢杆菌的冻干粉 ATCC11859。按照好氧微生物的激发活性、常规接种、培养方法,先将冻干粉中细菌激活制成斜面培养基保存,再接种到液体培养基中对巴氏芽孢杆菌进行大规模的培养。按照上海瑞楚生物科技有限公司提供的 CASO AGAR+尿素(20 g/L)培养基,其组成成分为:酪蛋白胨 15 g、黄豆饼粉 5 g、NaCl 5 g、琼脂 20 g、双蒸水 900 mL、20%尿素溶液 100 mL,在震荡箱中经过 30 °C、120 r/min 转速恒温培养 24 h 后,得到菌体浓度能达到 10^8 Cells/cm³ 的巴氏芽孢杆菌菌液。

1.2 混凝土试件材料

试验制备混凝土试件所需材料如下:

- 1) P·O 42.5 级水泥。
- 2) 普通河砂,细度模数为 2.5,属于中砂。
- 3) 粗骨料采用级配良好的碎石,最大粒径为 30 mm。
- 4) 氯化钙,其纯度不低于 96%。
- 5) Q8011 HPWR 高性能减水剂。
- 6) 水均采用自来水。

1.3 试件制作

试件制作所采用的试块为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准试块,用于抗压试验。各组试件的配比如表 1 所示。裂缝长度均为 100 mm,裂缝宽度及深度尺寸如表 2 所示。其中 WF 表示无裂缝的普通混凝土试块,A1—C6 表示裂缝宽度为 0.75,1,1.25 mm,裂缝深度为 15,30,45,60,75,90 mm 的混凝土试块。试块采用小型搅拌机搅拌的方式拌制,用人工填充的方式将混凝土震荡填实在模具中。本试验的裂缝均采用和裂缝尺寸一样的钢板插入到试块中制作。待混凝土试块静置成型 24 h 后脱模、拔掉钢板,然后将其放入混凝土标准养护箱中养护 28 d。

表 1 混凝土配合比设计

水泥/kg	砂子/kg	石子/kg	水/kg	减水剂/kg
400	720	1 130	212	4

表 2 裂缝尺寸设计

序号	裂缝宽度/mm	裂缝深度/mm	序号	裂缝宽度/mm	裂缝深度/mm
WF	0	0	B4	1.00	60
A1	0.75	15	B5	1.00	75
A2	0.75	30	B6	1.00	90
A3	0.75	45	C1	1.25	15
A4	0.75	60	C2	1.25	30
A5	0.75	75	C3	1.25	45
A6	0.75	90	C4	1.25	60
B1	1.00	15	C5	1.25	75
B2	1.00	30	C6	1.25	90
B3	1.00	45			

1.4 试验方法

配制浓度为 1 mol/L 的 CaCl_2 溶液, 尿素按菌液 0.15 g/mL 加入, CaCl_2 溶液与菌液按照 1:1.5 的比例混合, 振荡摇匀后灌入到经标准养护箱养护 28 d 的试验裂缝中, 待其生成的碳酸钙沉淀和水分的流失, 每天灌入 4 次, 总需 3 d. 为了使微生物产生的碳酸钙沉淀有效沉积和硬化, 以便有效测量其抗压强度, 抗压试验在最后一次灌注菌液的 7 d 后进行.

混凝土立方体抗压强度试验采用了 YAD-2000kN 型微机控制全自动压力试验机, 测量的试块都是经混凝土标准养护箱养护了 28 d. 混凝土抗压强度试验的全过程按照 GB/T50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行.

为考察各组试块的微生物修复效果, 选用了强度提升百分比 η 这个参数来表征修复效果. 其中:

$$\eta = \frac{f_t - f_f}{f_f} \times 100\%$$

式中: f_f ——未修复试块抗压强度;

f_t ——修复后试块抗压强度.

2 结果与分析

CaCl_2 溶液和菌液混合后, 通过摇匀振荡灌入裂缝中会发现不断有白色悬浮物 (CaCO_3 沉淀) 析出, 在重力的作用下不断累积. 通过观察裂缝, 发现白色沉淀物附着在混凝土内壁上, 且沿着裂缝宽度方向上呈中间多两边少的现象. 灌菌过程如图 1—图 3 所示.



图 1 灌菌前裂缝状况



图 2 灌菌时裂缝状况

在养护 28 d 后, WF 试块立方体抗压强度可达到 36.42 MPa. 其他试块立方体抗压强度分别如图 4 所示. 试块强度提升百分比如表 3 所示. 从图 4 中可以看出, 未修复试块的立方体抗压强度随裂缝深度增加而降低, 也可发现其强度也会随着裂缝宽度增加而降低; 其中强度降低最多的是 C6 组试件, 数值高达 50.11%. 通过对表 3 分析可以得出, 各种裂缝混凝土抗压强度均有不同程度的提升, 强度提升约在 1~3 MPa. 当裂缝宽度为 0.75 mm, 深度为 45 mm 时, 强度提升值达到最大 3.17 MPa, 提升百分比为 13.64. 裂缝宽度在图 4 这 3



图 3 灌菌结束裂缝状况

个水平上对强度提升的影响相对较小, 而裂缝深度对强度提升的影响更加明显, 在同一裂缝宽度下, 随着裂缝深度的增加, 强度提升百分比出现先上升后降低的趋势.

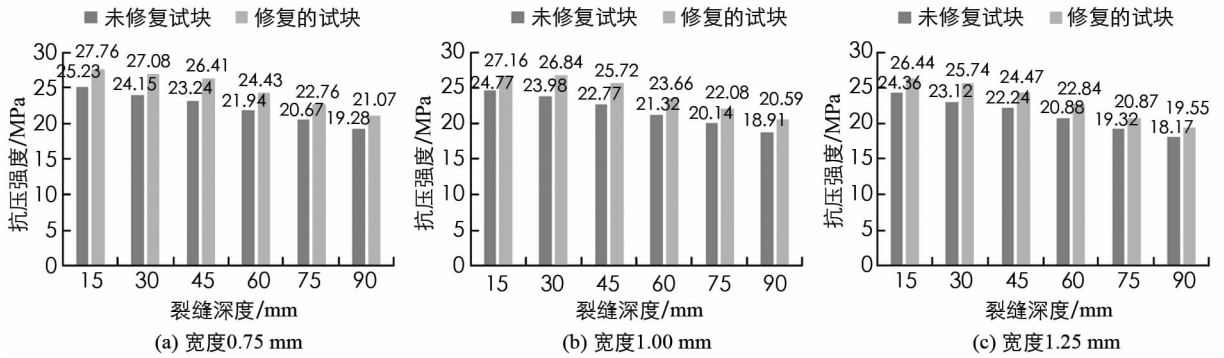


图 4 试块立方体抗压强度

表 3 强度提升百分比

%

宽度/mm	深度/mm						均值
	15	30	45	60	75	90	
0.75	10.03	12.13	13.64	11.35	10.11	9.28	11.09
1.00	9.65	11.93	12.96	10.98	9.63	8.88	10.67
1.25	8.54	11.33	10.03	9.39	8.02	7.59	9.15
均值	9.41	11.80	12.21	10.57	9.26	8.59	

3 讨 论

对试验结果分析可以发现:随着裂缝宽度的增加,强度提升百分比的均值降低,修复效果下降,该规律与任立夫^[8]的研究结果相吻合。对比 0.75 mm 和 1 mm 的裂缝宽度,强度提升百分比均值较为接近;而 1 mm 和 1.25 mm 的裂缝宽度,强度提升百分比均值相差较大,究其原因在于裂缝较小时,沉积的碳酸钙能较为密实地填在裂缝中,使其强度提升较大;当裂缝尺寸较大时,沉积的碳酸钙不易形成“架桥”或封堵的碳酸钙较为松散,造成强度提升幅度不大、修复效果较差。说明直接灌菌修复裂缝的方式,在裂缝宽度为 1 mm 内时能产生较好的修复效果,当裂缝宽度大于 1 mm 时,不宜采取直接灌菌的方式处理。

在深度方向上,15 mm 的裂缝强度提升相对较小,90 mm 的修复效果最差。对强度提升百分比均值分析,可以发现裂缝深度为 30 mm 和 45 mm 时,强度提升幅度较大,修复效果相对较好。在宽度为 0.75、1 mm 时,强度提升百分比最大值均值在深度为 45 mm 出现,而在宽度为 1.25 mm 时,最大值在深度为 30 mm 时出现。根据贾强^[13]对碳酸钙沉积在裂缝内分布状况的研究发现,裂缝的中、下部的碳酸钙沉积较密实,上部比较疏松。当深度较浅时,形成的碳酸钙较为疏松,其黏结性能未完全体现出来;而深度较深时,试块在受压时更易破坏,而沉积的碳酸钙黏结性能有限,强度提升幅度较小,修复效果一般。

4 结 论

- 1) 微生物对裂缝进行修复后,试块强度约有 1~3 Mpa 的提升。
- 2) 通过对强度提升百分比的分析,裂缝深度对混凝土修复强度的影响更大,在同一裂缝宽度下,修复效果出现了先上升后降低的趋势;
- 3) 对深度的提升均值分析,在深度为 30 mm 和 45 mm 的修复效果相对较好;对宽度的提升均值分析,修复效果随着裂缝宽度的增大而下降。其中裂缝宽度为 0.75 mm、深度为 45 mm 时强度提升百分比最高,达到了 13.64%。

参考文献:

- [1] KHALIQ W, EHSAN M B. Crack Healing in Concrete Using Various Bio Influenced Self-Healing Techniques [J]. Construction and Building Materials, 2016, 102(1): 349-357.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] VIJAY K, MURMU M, DEO S V. Bacteria Based Self Healing Concrete-A Review [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152(15): 1008-1014.
- [5] 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.
- [6] 侯明姣. 微生物修复混凝土技术的研究现状与进展 [J]. *山东工业技术*, 2016(2): 83.
- [7] ABO-EL-ENEIN S A, ALI A H, TALKHAN F N, et al. Utilization of Microbial Induced Calcite Precipitation for Sand Consolidation and Mortar Crack Remediation [J]. *HBRC Journal*, 2012, 8(3): 185-192.
- [8] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R, et al. Experimental Optimization of Microbial-Induced Carbonate Precipitation for Soil Improvement [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(4): 587-598.
- [9] 李沛豪, 屈文俊. 细菌诱导碳酸钙沉积修复混凝土裂缝 [J]. *土木工程学报*, 2010, 43(11): 64-70.
- [10] ACHAL V, MUKERJEE A, REDDY M S. Biogenic Treatment Improves the Durability and Remediate the Cracks of Concrete Structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48: 1-5.
- [11] 任立夫. 微生物修复水泥基材料早期裂缝研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [12] 姜欢. 微生物诱导碳酸钙沉积防渗堵漏的试验研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2014.
- [13] 贾强. 微生物灌浆修复混凝土竖向裂缝的试验研究 [C]//《材料导报》杂志社. 第一届先进材料前沿学术会议论文集. 西安, 2016: 153-155, 184.

On Effect of Crack Sizes on Strength of Microbial Repair Concrete

PAN Jian-xun, XIE Chun-yan,
YANG Li-li, FU Chao, WU Da-ke

College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to study the repairing effect of microorganism on concrete strength under different crack sizes of different width and depth, *Bacillus pasteurii* has been selected as the crack repair agent to repair the concrete under different cracks with width (0.75mm, 1.0mm, 1.25mm) and depth (15mm, 30mm, 45mm, 60mm, 75mm, 90mm). Through the concrete cube compression test, the compressive strength of repaired and without repaired specimen has been measured. Then a table of the percentage of strength increase been made and analyzed. The experimental results show that, (1) The microorganism can improve the concrete strength under different fracture sizes. (2) The crack depth has a greater influence on the strength of concrete repair. (3) Under the same crack width, the repair effect was first increased and then decreased trend. At depths of 30mm and 45mm, the results were even better.

Key words: concrete; crack; microorganism; compressive strength