

# 不同加固工艺对微生物诱导碳酸钙沉积的影响研究

牟亚清, 钟志韬, 吴旭恒

重庆科技学院建筑工程学院, 重庆  
Email: 467946403@qq.com

收稿日期: 2021年2月23日; 录用日期: 2021年3月11日; 发布日期: 2021年3月29日

## 摘要

微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)是一种新型的绿色加固技术,在岩土工程领域中具有强大的应用潜力。然而,关于微生物诱导碳酸钙沉积的加固工艺方面研究较少。为了确定MICP加固试验中的最佳加固工艺,通过不同加固工艺的MICP加固试验,研究了不同加固工艺下MICP加固砂土效果。研究表明:采用双相加固工艺能够使得MICP反应更充分,碳酸钙沉淀更均匀的填充于砂样孔隙间,显著提高砂样的结构强度,具有较好的适应性。该研究结果对于提升MICP加固效果和均匀性方面有较大的参考意义。

## 关键词

MICP, 加固工艺, 碳酸钙, 结构强度

# Study on the Effect of Different Reinforcement Processes on Microbial Induced Carbonate Precipitation

Yaqing Mou, Zhitao Zhong, Xuheng Wu

School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing  
Email: 467946403@qq.com

Received: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Mar. 11<sup>th</sup>, 2021; published: Mar. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Microbial Induced Carbonate Precipitation is a new green reinforcement technology, it has great

application potential in the field of geotechnical engineering. However, there are few studies on the reinforcement technology of Microbial Induced Carbonate Precipitation. In order to determine the best reinforcement technology in MICP reinforcement test, through the MICP strengthening tests of different strengthening technologies, the effects of different strengthening technologies on sand reinforcement are studied. The results show that the two-phase reinforcement process can make MICP reaction more sufficient, calcium carbonate precipitation more evenly filled in the pores of sand samples, significantly improve the structural strength of sand samples, and has good adaptability. The research results have great reference significance for improving the reinforcement effect and uniformity of MICP.

## Keywords

MICP, Reinforcement Technology, Calcium Carbonate, Structural Strength

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

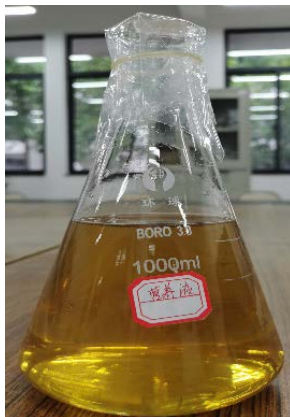
目前生物工程领域中,可以利用自然土壤中某些特定的微生物的新陈代谢或酶化作用结合环境中的钙离子源生成碳酸钙,这一反应过程也被称为微生物诱导碳酸钙沉积(Microbial Induced Carbonate Precipitation, 即 MICP) [1]。MICP 加固技术生成的碳酸钙与一般化学反应中的碳酸钙不同,这种微生物诱导的碳酸钙矿化材料是一种新型的材料,其具有良好的胶结能力,可以将松散的砂砾加固成坚硬的砂柱。该材料最早应用于多孔介质材料的堵漏[2],随后应用于石质材料的表面裂缝修复[3] [4] [5]。目前,国内外学者在微生物种类[6]、微生物浓度[7]、反应液浓度[8] [9]等方面开展了较为全面的研究,探讨了 MICP 加固的可行性及适用性,但这些研究主要集中在 MICP 溶液浓度方面,对于加固工艺研究较少[10],为此,本文以 MICP 不同加固工艺为研究对象,利用 MICP 技术对中国标准砂进行加固,对比分析不同加固工艺对 MICP 加固效果的影响。

## 2. 试验情况

### 2.1. 微生物试验

试验选用从中国普通微生物菌种保藏管理中心(CGMCC)购买的巴氏生孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*), CMGMCC 编号为 1.367。首先对该微生物进行活化,用酒精加热装有微生物的安瓿瓶上部,之后滴上水滴使之破裂,用镊子取出内管,打开棉塞。利用无菌移液枪吸取 1 ml 液体培养基注入内管,使呈冻干粉状态的细菌溶解。将溶解后的细菌倒入含有培养液的培养管中,轻微振荡使之混合均匀。之后利用接种环以平板划线法将细菌接种至固体培养基在微生物恒温培养箱内进行培养,待平板培养基内生长出白色菌落后,在 30℃ 恒温无菌环境下挑出单菌落于液体培养基内(图 1),将其放置于恒温振荡培养箱内以 30℃ 和 200 r/min 条件培养 24 h,液体培养基会由清澈变得浑浊,如图 2 所示,产生该现象的原因是微生物在液体培养基内大量繁殖。取部分活化后的菌液在 4℃ 环境中用离心机中以 4000 r/min 速度离心 20 min,离心后的菌液如图 3 所示,然后倒掉上清液,取下部沉淀放入甘油中-80℃ 冷冻保存备用。本试验培养基配方如下:酵母提取物 20 g/L,氯化铵 10 g/L,硫酸锰 10 mg/L,氯化镍 24 mg/L,蒸馏水 1000 g/L, (平板培养基配方中需加入琼脂 15 g/L),用浓度为 1 mol/L 氢氧化钠溶液调节培养基 pH 值为 9.0。

采用电导率仪测量菌液单位时间内电导率变化值, 根据 Whiffin [11]得出的经验公式换算出菌液脲酶活性, 本试验所用菌液脲酶活性为  $1.1 \text{ mM urea} \cdot \text{min}^{-1}$ 。利用分光光度计测量吸光度, 本试验菌液吸光度  $\text{OD}_{600}$  为 0.633。



**Figure 1.** Liquid medium  
**图 1.** 液体培养基



**Figure 2.** Turbid liquid medium  
**图 2.** 液体培养基变浑浊



**Figure 3.** Bacteria liquid after high speed centrifugation  
**图 3.** 高速离心后的菌液

## 2.2. 反应液的配置

本试验中反应液采用尿素和氯化钙混合溶液，尿素在 MICP 反应中提供碳酸根离子源，氯化钙在 MICP 反应中提供钙离子源，参考文献[8]设置尿素浓度为 1 mol/L，氯化钙浓度为 1 mol/L，反应液中尿素和氯化钙体积之比为 1:1。

## 2.3. MICP 加固砂柱试验

试验砂选取中国标准砂，主要成分为二氧化硅，以对半剖开的透明 PVC 管作为反应模具，在剖开两侧粘贴泡沫条，利用喉箍将模具箍紧，在模具底部塞入带孔橡皮塞，橡胶塞孔上接带有变径接头的橡胶管作为排水通道，在导管上设置流速调节阀调节液体排出流速。

试验装置如图 4 所示，在模具底部放入厚棉花，主要作用为防止砂样被液体带出，堵塞导管，之后装入 250 g 中国标准砂，砂样高度为 11 cm，然后在砂样顶部放入厚棉花，减小溶液对砂样的扰动。为了研究不同加固方式对微生物反应的影响，本次试验采用单相加固和双相加固方式进行比较。单相加固方式为：首先将蒸馏水通入模具内，排除砂间空气，使其进入饱和状态。砂样饱和后，向其注入 100 mL 菌液和反应液的混合溶液，菌液与反应液体积之比为 1:1，打开流速调节阀，让混合溶液在重力作用下缓慢排出，排出的混合液重复上述步骤 2~3 次，采用循环反应法使 MICP 在砂样颗粒间充分反应。以上步骤为 1 次完整的 MICP 加固试验，试样加固重复 8 次。双相加固方式为：首先将蒸馏水通入模具内，排除砂间空气，使其进入饱和状态。砂样饱和后，向其注入 50 mL 菌液静置 1 h 后打开流速调节阀，让菌液在重力作用下排出。反复通入菌液 2~3 次，使巴氏生孢八叠球菌均匀吸附在砂样颗粒表面。然后向砂样通入 50 mL MICP 反应液，打开流速调节阀，使反应液在重力作用下缓慢排出，反复通入反应液 2~3 次，采用循环反应法使 MICP 在砂样颗粒间充分反应。以上步骤为 1 次完整的 MICP 加固试验，试样加固重复 8 次。MICP 反应完成后将砂样静置 1 d 后再从砂样顶部通入清水进行过水处理，以除掉残留在试样内部的菌液和反应液。



Figure 4. MICP reactor  
图 4. MICP 反应装置

为了控制温度对微生物反应速率的影响，所有试验过程均在 30℃ 的环境内进行，本试验加固砂样有两组，A 组采用单相加固方式进行 MICP 加固试验，B 组采用双相加固方式进行 MICP 加固试验。每组

三个试样，试验固化次数为 8 次，加固完成后拆模烘干后，利用电液伺服万能试验机进行单轴压缩试验，设置加载速率为 1 mm/min。

### 3. 试验结果与分析

#### 3.1. 砂样加固效果

由图 5 可以看出，随着 MICP 反应的进行，松散的砂粒逐渐被加固成具有一定强度的砂柱。A 组试样顶端和低端较不平整，凹凸不平，砂柱完整性较差，砂柱表面能看见由碳酸钙形成的硬化薄层，但其表面的砂砾掉落现象较为严重。从图 6 科院看出，B 组试样顶端和低端较为平整，砂柱完整性较好，砂柱表面可看见由碳酸钙形成的硬化薄层，砂柱表面较少砂砾掉落现象。



Figure 5. Group A sample  
图 5. A 组试样



Figure 6. Group B sample  
图 6. B 组试样

### 3.2. 砂样的无侧限抗压强度

根据《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)将烘干后的试样切割成 80 mm 长的标准试样,然后采用电液伺服万能试验机进行单轴压缩试验,由图 7 可知,A 组试样无侧限抗压强度为 310 kPa,B 组试样无侧限抗压强度为 436 kPa。由于 B 组试样采用双相加固方式进行 MICP 加固试验,在灌入菌液后静置一段时间使得更多的微生物附着在砂样颗粒表面,也使得灌入的反应液能充分反应,生成大量碳酸钙填充砂样孔隙。A 组试样采用单相加固方式进行 MICP 加固试样,从图 4 左边试样可以看出,将菌液和反应液混合后灌入砂柱中,大约五分钟后混合液变成乳白色,这是由于菌液产生的脲酶快速分解了尿素,并在短时间内迅速与氯化钙发生反应,产生白色的碳酸钙沉淀。由于单相加固方式导致 MICP 加固反应过快,在混合液还未完全渗透砂样时产生的碳酸钙便填充了颗粒孔隙,因此砂样底部未能完全进行 MICP 加固反应,造成砂样加固不均匀,也导致 A 组砂样的无侧限抗压强度较低。

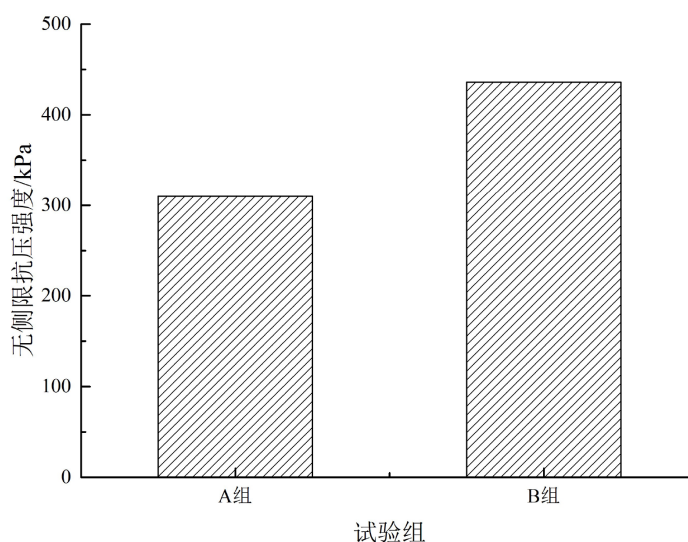


Figure 7. Unconfined compressive strength  
图 7. 无侧限抗压强度

## 4. 结论

1) 双相加固方式能使 MICP 加固反应更加充分,菌液和反应液能充分渗透砂样内部,使之生成的碳酸钙更加均匀的填充于砂样孔隙中,从而提高砂样整体强度。

2) 单相加固方式使得 MICP 加固反应过于激烈,导致其还没完成渗透砂样时生成碳酸钙,此时碳酸钙堵塞砂样上部孔隙,造成混合液渗透变慢,从而影响了砂样整体加固的均匀性。因此,双相加固方式更适用于 MICP 加固反应中。

## 基金项目

重庆科技学院科技创新计划项目(微生物矿化材料干湿循环和冻融循环的耐久性研究),项目批准号:YKJ CX1920610。

## 参考文献

- [1] Dejong, J.T., Soga, K., Kavazanjian, E., *et al.* (2013) Biogeochemical Processes and Geotechnical Applications: Progress, Opportunities and Challenges. *Geotechnique*, **63**, 287-301. <https://doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.017>

- 
- [2] Rong, H. and Qian, C.X. (2013) Microstructure Evolution of Sandstone Cemented by Microbe Cement Using X-Ray Computed Tomography. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, **28**, 1134-1139. <https://doi.org/10.1007/s11595-013-0833-z>
- [3] 徐晶, 王先志. 低碱胶凝材料负载微生物应用于混凝土的开裂自修复[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(8): 601-606.
- [4] 李萌, 由士权, 康绍斌, 等. 砂土中混凝土裂缝的微生物封堵试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(8): 614-618.
- [5] 刘士雨, 俞缙, 曾伟龙, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀修复三合土裂缝效果研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 191-204.
- [6] 张家广, 许顺顺, 冯涛, 等. 不同矿化微生物对混凝土裂缝自修复效果影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(8): 607-613.
- [7] 李捷, 方祥位, 张伟, 等. 菌液脲酶活性对珊瑚砂微生物固化效果的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(6): 88-91+96.
- [8] 李洋洋, 方祥位, 欧益希, 等. 底物溶液比对微生物固化珊瑚砂的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 52-56.
- [9] 宋亚卿. 不同胶结配比微生物胶结砂土材料矿化试验研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(3): 103-106+87.
- [10] 郭红仙, 李东润, 马瑞男, 等. MICP 拌和固化钙质砂一维固结试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(8): 593-600.
- [11] Whiffin, V.S. (2004) Microbial CaCO<sub>3</sub> Precipitation for the Production of Biocement. Doctoral Dissertation, Murdoch University, Western Australia.