

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201905003

MICP技术加固岩石节理的力学机理试验研究*

陈寅圳¹, 丁玮珂¹, 詹 阔¹, 张佩佩², 汤子枫¹, 王润东¹

(1. 四川农业大学土木工程学院, 四川 都江堰 611830; 2. 四川农业大学建筑与城乡规划学院, 四川 都江堰 611830)

摘要: 微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)是近年国内外兴起的一种微生物岩土技术,即利用微生物新陈代谢的矿化作用诱导产生碳酸盐沉淀,在土体抗液化、堤坝加固等领域得到广泛实验和应用,相较传统边坡加固手段,其绿色环保的特点更符合可持续发展理念。为探究MICP技术在完全分离的岩石节理试件中的胶结效果,通过一种可采用流体分阶段胶结岩石节理面的实验装置,实现MICP胶结液对岩石节理试件的胶结,在不同法向应力下探究其抗剪强度。结果表明:(1)MICP技术对岩石节理具有一定胶结作用;(2)随剪切位移的增加,MICP胶结实验组与无充填对照组的剪切强度维持一致,即二者抗剪残余应力基本相等;(3)胶结养护7 d的抗剪强度可达无充填对照组的85%。

关键词: MICP技术; 岩石节理; 胶结加固; 新型试验装置; 抗剪强度

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0504-07

Experimental Study on Mechanical Mechanism of Rock Joints Strengthened by MICP Technology

CHEN Yinzhen¹, DING Weike¹, ZHAN Kuo¹, ZHANG Peipei², TANG Zifeng¹, WANG Rundong¹

(1.School of Civil Engineering, Sichuan Agriculture University, Dujiangyan 611830, China;

2.School of Architecture and Urban-Rural Planning, Sichuan Agriculture University, Dujiangyan 611830, China)

Abstract: Microbial induced carbonate precipitation (MICP) is a new microbial geotechnical technology that has been developed at home and abroad in recent years. MICP, which causes carbonate precipitation through mineralization of microbial metabolism, has been widely used in soil anti-liquefaction and dam reinforcement. Compared with traditional slope reinforcement methods, microbial reinforcement is more environmentally friendly and in line with the concept of sustainable development. In order to explore the cementing effect of MICP technology in completely separated rock joint specimens, an experimental device that can use fluid to cement rock joints in stages is adopted to realize the cementing effect of MICP cementing fluid on joint specimens. The shear strength of joints was investigated under different normal stresses, and the results show that: (1) The MICP technology had a certain cementing effect on rock joints; (2) With the increase of shear displacement, the shear strength of the MICP cementing group and the control group without filling remained consistent, that is, the residual shear stress of the two groups was basically equal; (3) The shear strength of cementing cur-

* 收稿日期:2019-05-02;修回日期:2019-06-09

基金项目:国家级大学生创新训练计划项目(201810626016)资助

作者简介:陈寅圳(1998—),男,硕士研究生。主要从事微生物岩土工程、可恢复摇摆结构体系的整体可靠度抗震性能设计研究。E-mail: chenyzhen907@163.com

ing for 7 days can reach 85% of the control group without filling.

Keywords: MICP technology; rock joint; cementing and reinforcement; new experimental equipment; shear strength

引言

自然界中富含大量微生物,研究发现某些微生物的代谢产物有助于岩石的形成^[1]。对岩土体进行原位加固是地基处理与边坡防护工程中的一类重要技术手段,传统的土体加固方法有预压固结、化学灌浆等,普遍存在工期长、能耗大、成本高等不足,化学灌浆法中的大多数浆液也对环境有害。

E. Boquet等^[1]最早发现土体中某些细菌能诱导碳酸钙晶体沉积,并证明土壤微生物中的碳酸钙沉积是一个普遍现象。S. Stocks-Fischer等^[2]发现巴氏芽孢杆菌可较快沉淀出碳酸钙并对砂土颗粒间产生胶结作用。王瑞兴等^[3-4]发现改变若干环境反应条件(pH、温度、Ca²⁺浓度等),沉淀结晶形态和颗粒形貌均发生不同程度的改变。张越等^[5]发现(CH₂COO)₂Ca作为钙源时,碳酸盐沉淀对试样有较大的强度提高及较好的分布。程晓辉等^[6]通过标准动三轴及小型振动台试验,证明了微生物灌浆加固砂柱及模型地基的抗液化性能相比传统的液化地基加固方式,其效果得到显著提高。钱春香等^[7]提出MICP诱导的碳酸钙沉淀可作为一种新颖的生物胶凝材料:微生物水泥。刘璐等^[8]证明MICP技术加固堤坝模型表层可有效提高其抗侵蚀力,并提高其强度和抗渗能力,以改善堤坝表层砂的力学性能,从而抵抗水力冲刷。

目前国内对MICP技术的研究多见于砂土试样,对其作为裂隙充填物的研究较少,其原因即岩体裂隙相比于砂土的孔隙在尺度上存在显著差异,导致其充填效果不同^[9]。申帆等^[9]使用预制的类岩石试样进行了MICP注浆试验,结果表明裂隙粗糙度对于碳酸钙充填的均匀性和产量会产生影响,且MICP在粗糙度适中的试样中具有更好的效果。

岩体方向的MICP技术应用多见于国外研究团队,如A. J. Phillips等^[10]为提高油气开发等活动的安全性,研究了一种封堵裂隙的MICP技术。M. O. Cuthbert等^[11]提出一种基于注入和抽提钻孔的实验,并进行水力特性研究,这是首次利用MICP技术封堵地下裂隙岩体的现场试验。S. G. Choi等^[12]

对20个筒形砂浆试样进行劈裂,得到不同尺寸的裂缝,采用MICP技术对砂浆裂缝进行修复,从而显著降低了试样的透水性。C. Z. Wu等^[13]认为生物浆液可代替化学浆液实现微裂缝灌浆,MICP原位生成的碳酸钙胶凝剂可封堵岩体中较深的微裂缝。

基于国内外针对MICP技术在土体和岩体的加固、防渗及封堵研究,本文就MICP技术在岩石节理面间的胶结加固机理展开研究,证明MICP技术除了在固化土壤、岩石裂缝封堵和防渗等方面具有较高的研究和应用意义,还对胶结完全分离的岩石节理面有一定作用,并探究其抗剪强度的变化。

1 MICP沉积原理

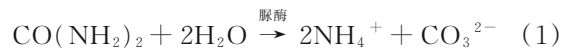
MICP在自然界中有多种形成方式:尿素水解、氨基酸代谢、反硝化作用、有机酸羧酸反应等。由于反硝化细菌生长周期长、繁殖慢,会造成较多前期培养费用,而尿素水解机制相对简单,反应易控制,且在较短时间内可产生大量CO₃²⁻,因此,尿素水解是MICP技术中被广泛应用的一种方式。

巴氏芽孢八叠球菌是一种存在于土壤中的嗜碱性细菌,在酸碱、高盐度等恶劣环境中能保持较强的生物活性。该菌凭其在多孔介质中生长和繁殖等特性,在富含钙离子的碱性环境中,产生高活性脲酶,借助尿素、蛋白胨等作为能源,可在其自身代谢过程中促使尿素水解生成NH₄⁺和CO₃²⁻,其中CO₃²⁻与Ca²⁺结合生成性质稳定的碳酸钙晶体。

灌注钙盐溶液时,由于微生物特殊的细胞壁结构,其表面一般带有大量负离子基团(如羟基、胺基、酰胺基、羧基等),能够吸附钙盐溶液中的Ca²⁺,在微生物通过新陈代谢将CO₃²⁻运输到细胞表面后,这些被吸附的Ca²⁺与CO₃²⁻结合形成碳酸钙晶体。

MICP的技术原理主要分为两部分:

(1)将具有分解尿素能力的巴氏芽孢八叠球菌与尿素溶液一同注入,微生物新陈代谢产生脲酶,水解尿素生成NH₄⁺和CO₃²⁻:



(2)注入含有Ca²⁺的溶液,Ca²⁺会和已经生成的

CO₃²⁻发生反应,生成CaCO₃沉淀:



由于MICP技术在土中形成的是自然矿物(方解石),有良好的环境友好性和可持续性。

2 试验材料及装置

2.1 菌种制备

本实验采用巴氏芽孢八叠球菌^①,革兰氏阳性,具少数鞭毛运动,芽孢圆形(直径0.5~1.5 μm),化能异养菌,严格好氧,在培养基上的细胞为乳酪色变为橙色菌落。

采用液体和固体两种培养基分别进行活化、增殖培养。取0.3 mL的液体培养基滴入安瓿瓶中,使其呈悬浮状,吸取全部悬浮液移植于盛有4 mL液体培养基试管中,置于恒温培养箱中培养2 d后,吸取少量已活化菌种使用稀释涂布平板法接种至固体培养基,在30 ℃恒温条件下摇床培养2 d。

使用液体培养基在30 ℃恒温条件下进行增殖;采用斜面保藏法将菌种保藏至4 ℃的冰箱中备用。

经过在液体培养基中于30 ℃恒温培养箱中培养2 d、7 d,分别采用UV-4802S型紫外可见分光光度计测定其透光值(trans, T值)分别为0.156 2、0.269 3,计算得其OD₆₀₀值分别为0.806 3、0.569 8。即宜在培养2 d时进行灌浆,此时菌种生长较为旺盛。

2.2 胶结液制备

胶结液由菌液(含液体培养基)、CaCl₂溶液(1 M)和CO(NH₂)₂溶液(1 M)组成。

其浓度配比的依据为:预实验“探究同浓度、同体积的菌液在组合同体积、不同浓度的CaCl₂溶液和CO(NH₂)₂溶液混合产生的沉淀量和清液体积”。取4个容积为50 mL的烧杯,分别滴入5 mL培养相同时间的菌液,配制浓度分别为1 mol/L、2 mol/L的CaCl₂溶液和浓度分别为1 mol/L、2 mol/L的CO(NH₂)₂溶液,按表1的组合进行混合。

第一次将菌液和CO(NH₂)₂溶液混合,2 h后加入CaCl₂溶液,立即反应生成白色沉淀,5 min即开始分成下部沉淀和上层清液,待12 h后反应完全,进行数据处理,见表2。

表1 溶液组合配比

组合序号	菌液		CO(NH ₂) ₂ 溶液		CaCl ₂ 溶液	
	培养时间	V/mL	c/(mol·L ⁻¹)	V/mL	c/(mol·L ⁻¹)	V/mL
①		5	1	5	1	5
②	摇床培养	5	1	5	2	5
③	48 h	5	2	5	1	5
④		5	2	5	2	5

表2 清液与沉淀的数据处理

组合序号	清液体积与占比		沉淀质量/g
	体积/mL	占比/%	
①	2.8	18.67	1.351
②	5.5	36.67	0.687
③	—	—	—
④	6.0	40	1.632

其中③号实验组始终未形成可以分层的状态,而处于浑浊液体状态,无法进行数据统计,其内因有待后续研究。

得出结论:①组配比可以使沉淀质量较大,同时清液体积较小,其菌液利用率最高。故后续实验的CaCl₂溶液和CO(NH₂)₂溶液浓度均为1 mol/L。

2.3 岩石节理试样制备

岩石节理试件采用水灰比为0.44的净水泥浆制备的模拟岩石节理试件,如图1所示。其节理面为巴顿标准JRC节理面轮廓线的第10条曲线(粗糙度系数为18~20),如图2所示。

单个试件尺寸为200 mm×100 mm×100 mm,单轴抗压强度为σ_c=28.3 MPa,在进行剪切试验时,施加的最大法向应力不超过0.8σ_c,分三级加载:



图1 模拟岩石试件

Fig.1 Simulated rock specimens

① 拉丁学名: Sporosarcina, pasteurii, 购自中国普通微生物菌种保藏管理中心(CGMCC), 菌种编号1.3687。



图2 10号标准JRC节理面轮廓线
Fig.2 No.10 standard JRC curves profile

$0.1\sigma_c$ 、 $0.3\sigma_c$ 、 $0.5\sigma_c$ 。

2.4 试验装置

目前使用数值模拟研究岩石节理面剪切变形和破坏机制不够直观和客观,为直接观察探究岩石节理面胶结过程,得到岩石节理面胶结试样,本文试验采用一种可采用流体分阶段胶结岩石节理面的试验装置,如图3所示。

装置主体以10 mm厚亚克力板粘接拼接而成,分为I区窄盒部分(净宽15 mm)和II区宽盒部分(净宽80 mm),19 mm×19 mm方形钢管作为支撑构件及阻隔件。专门针对5 mm及以下宽度的裂隙进行流体胶结试验,一次最多可同时进行9组岩石节理试样的胶结,同时具有良好的可观察性。



图3 试验装置
Fig.3 Test apparatus

3 胶结岩石节理面试样

3.1 岩石节理试样安装及密封

将岩石试样安装在试验装置的水平承台上,按照图2所示对向放置每组试样,利用游标卡尺控制节理面宽度为1 mm,如图4所示。

由于试验装置和岩石节理试样制作误差,导致试样安装时存在不同尺寸的缝隙,故采用密封胶封堵全部缝隙,如图5所示。该密封胶不会与胶结液中任何一种成分发生反应,也不会影响胶结过程和脱模;经测试不漏水后进行后续灌浆。

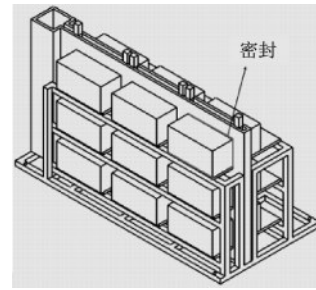


图4 试样安装
Fig.4 Installation of samples



图5 缝隙密封局部示意
Fig.5 Partial diagram of the sealing of gaps

3.2 第一阶段灌浆

试验装置设计目的之一即节约胶结液用量,保证其利用率,由于装置制作要求,其底部留空,为节约胶结液用量,最底层试样下方用琼脂填充,如图8所示。经过计算,每层(3组)试样单次胶结所需胶结液体积为1.25 L。按体积比1:1注入摇床培养2 d的菌液和1 mol/L的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 溶液,反应6 h以上,使菌液在岩石节理试样间进一步增殖,并适应溶液pH上升的环境;与土体灌浆不同,岩石节理试样间灌浆不受颗粒阻碍,第一阶段灌浆无灌浆压力和流量的控制,仅保证浸没全部节理面即可。

3.3 第二阶段灌浆

为保证反应完全,第二阶段需将0.5倍体积的1 mol/L CaCl_2 溶液均匀分布地同时注入,注入速率控制在50~60 mL/min,由于已经将胶结液的用量控制到较低水平,故采用简易的虹吸原理进行注浆,反应30 min后,沉淀充分,随后上下移动橡胶软管,同样采用虹吸原理排出上层清液,如图6所示。

重复以上两阶段注浆,直至沉淀将节理面空隙充填完全,如图7所示。

3.4 干燥恒温养护

在30 °C恒温条件下干燥静置沉淀72 h,期间通

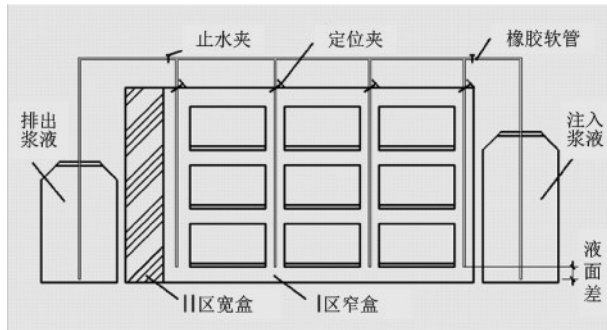


图6 试验装置操作示意

Fig.6 The operation diagram of the test apparatus

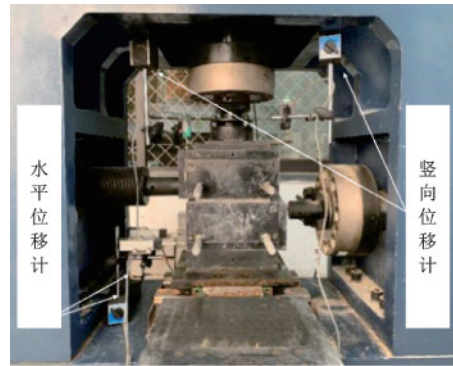


图10 YZW50岩石剪切试验机

Fig.10 YZW50 rock shear testing machine



图7 CaCO₃沉淀浸没节理面

Fig.7 Joints immersed by calcium carbonate precipitation

过Ⅱ区宽盒取样观察CaCO₃沉淀脱水情况,如图8所示。待沉淀不再下沉且完全干燥后,进行试样脱模,从装置长承台处(图7)平行平稳推出胶结好的试样,其目的为避免胶结处因受到自重引起的垂直试样长方方向的剪力而提前破坏。

在干燥、常温(20℃)条件下养护7d,如图9所示。

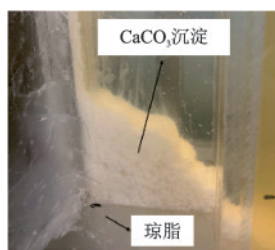


图8 CaCO₃取样

Fig.8 Sampling of calcium carbonate



图9 养护试样

Fig.9 Curing the samples

4 直剪试验

4.1 剪切破坏面

通过YZW50岩石剪切试验机确定试件的抗剪强度,如图10所示。

上剪切盒沿纵向安置两个竖向位移计(观察是否发生剪胀破坏,若有则停止剪切),下剪切盒安置两个水平位移计(控制水平剪切位移,达到25mm即停止)。

分四步骤进行剪切:即法向力预控制为10kN、法向力控制为 $i \times \sigma_c / 10$ ($i=1, 3, 5, \sigma_c=28.3 \text{ MPa}$)、切向力预控制为2kN、剪切位移控制为25mm。

剪切前的MICP充填实验组以及无充填对照组如图11所示。



(a) MICP充填实验组 (b) 无充填剪切对照组

图11 MICP充填实验组以及无充填对照组

Fig.11 MICP theory used in the experimental group and unfilled control group

剪切位移达到3~6mm时出现切向力峰值;随后的2~3mm处于切向力减小阶段,下降速率减慢;剩余约15mm的剪切过程中,切向力基本不再减小。

MICP充填与无充填在不同法向力作用下的剪切破坏面对比如图12所示。

随法向应力的增加,剪切破坏面的磨损情况愈加严重,对比MICP充填实验组与无充填对照组,可看出MICP充填对节理面具有一定程度的保护作用,其表面磨损程度较对照组更小。

生物成因碳酸钙的抗压性较好,在受到法向压

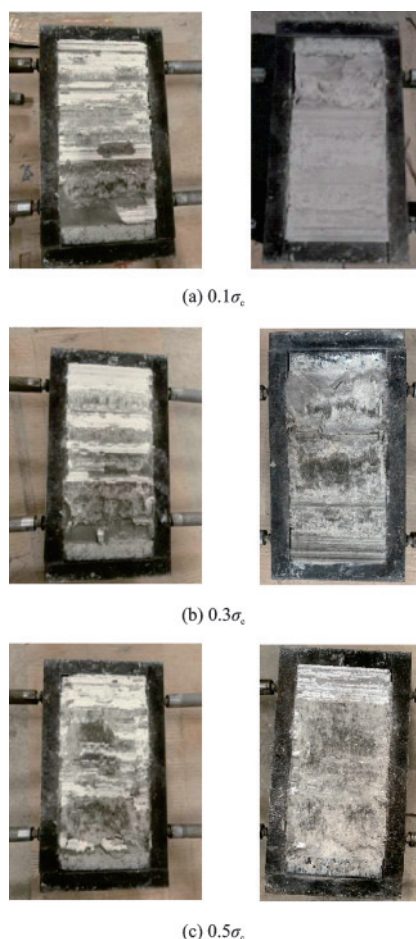


图 12 不同法向力作用下 MICP 填充与无填充的剪切破坏面对比(左:MICP 填充,右:无填充)

Fig.12 Comparison of shear failure surfaces with or without MICP filled under different axial forces (left: MICP filled, right: unfilled)

力时,其结构基本保持完整,宏观上无破坏迹象。

4.2 抗剪强度

MICP 填充实验组与无填充对照组的剪切应力随剪切位移变化的曲线如图 13 所示。由图可见,无论施加多大法向应力值, MICP 填充实验组的抗剪强度均为无填充对照组的抗剪强度的 85% 左右,即 MICP 胶结 7 d 可使岩石节理面的抗剪强度达到无填充对照组的 85%。

切向力达到峰值后,随剪切位移增加, MICP 胶结实验组与无填充对照组的残余抗剪强度值维持在相同的水平,即说明 MICP 成因碳酸钙对于提高节理面抗剪残余应力有一定积极作用。

在探究养护时间对抗剪强度是否具有积极作用时,实验发现养护 2 d 试验组的抗剪强度可达到

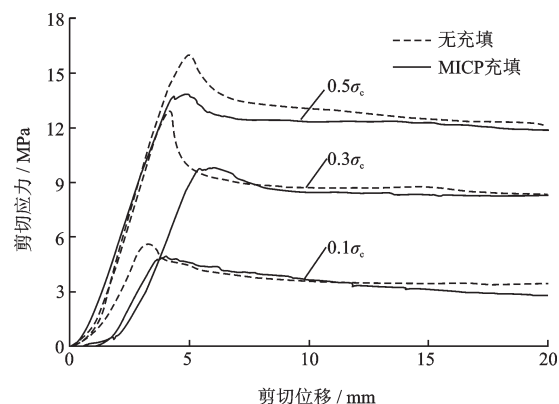


图 13 MICP 填充/无填充剪切应力随剪切位移变化曲线
Fig.13 Curves of shear stress and displacement for MICP filled/unfilled samples

对照组的 79%, 而 7 d 可达 85%。即 MICP 胶结试样的强度与节理面间碳酸钙的强度和含量存在一定关系。随着在空气中暴露干燥的时间越久, MICP 胶结节理面的抗剪强度有增加的趋势,抗剪强度随时间增加的速度和峰值有待后续研究。

5 结 论

(1)区别于现有在岩石自身裂缝方面的研究,就 MICP 技术在完全分离岩石节理面间的胶结性能展开探究。发现养护 7 d 的强度可达无填充对照组的 85%。

(2)随岩石节理试样的剪切位移增加, MICP 胶结实验组与无填充对照组的残余应力基本相同,即 MICP 胶结具有一定的延性。

(3)试验中应用的可采用流体胶结岩石节理面的试验装置,适用于与岩石节理面胶结系列相关实验,该装置可在节省胶结液的前提下保证实验所需的胶结面积,同时具有良好的可观察性,但装置就密封性、自动性等方面还有待后续改进。

(4)试验未对微生物层面的代谢条件影响及营养液成分不同的影响展开详细探究,预测随碳酸钙含量增加,其强度会随之增加,即通过生物活性、酶活性以及溶液配比等方面控制碳酸钙产量。

(5)实验室模拟情况异于野外环境的岩体边坡。实际无法达到理想效果,雨水冲刷会影响碳酸钙沉积过程,故胶结前的预保护需进一步探究,并在养护期间通过添加其他物质加强沉淀整体性。

参考文献:

- [1] Boquet E, Boronat A, Cormenzana R. A production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a common phenomenon [J]. *Nature*, 1973, 246 (5434) : 527-529.
- [2] Stocks-Fischer S, Galinat J K, Bang S S. Microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(11):1563-1571.
- [3] 王瑞兴, 钱春香. 微生物沉积碳酸钙修复水泥基材料表面缺陷 [J]. *硅酸盐学报*, 2008, 36(4):457-464.
Wang R X, Qian Ch X. Restoration of defects on the surface of cement-based materials by microbiologically precipitated CaCO_3 [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 36(4):457-464. (in Chinese)
- [4] 王瑞兴, 钱春香, 王剑云. 微生物沉积碳酸钙研究 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2005, 35(增1):191-195.
Wang R X, Qian Ch X, Wang J Y. Study on microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2005, 35 (Sup 1):191-195. (in Chinese)
- [5] 张越, 郭红仙, 程晓辉, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积技术治理某地下室渗漏的现场试验 [J]. *工业建筑*, 2013, 43 (12):138-143.
Zhang Y, Guo H X, Cheng X H, et al. Field experiment of microbial induced carbonate precipitation technology in leakage treatment of a basement [J]. *Industrial Construction*, 2013, 43(12):138-143. (in Chinese)
- [6] 程晓辉, 麻强, 杨钻, 等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(8): 1486-1495.
Cheng X H, Ma Q, Yang Z, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8):1486-1495. (in Chinese)
- [7] 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 Ch 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)
- [8] 刘璐, 沈扬, 刘汉龙, 等. 微生物胶结在防治堤坝破坏中的应用研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(12):3410-3416.
Liu L, Shen Y, Liu H L, et al. Application of bio-cement in erosion control of levees [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12):3410-3416. (in Chinese)
- [9] 申帆, 唐礼忠, 彭述权, 等. 裂隙粗糙度对 MICP 充填效果的影响 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(6):1036-1039.
Shen F, Tang L Zh, Peng Sh Q, et al. Influence of fracture roughness on the filling effect of MICP [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2018, 49 (6) : 1036-1039. (in Chinese)
- [10] Phillips A J, Cunningham A B, Gerlach R, et al. Fracture sealing with Microbially-Induced Calcium carbonate precipitation: a field study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 4111-4117.
- [11] Cuthbert M O, McMillan L A, Handley-Sidhu S, et al. A field and modeling study of fractured rock permeability reduction using microbially induced calcite precipitation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(23):13637-13643.
- [12] Choi S G, Wang K J, Wen Zh Y, et al. Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation method [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 83: 209-221.
- [13] Wu Ch Z, Chu J, Wu Sh F, et al. Quantifying the permeability reduction of biogROUTED rock fracture [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52 (3) : 947-954.

(本文责编:赵霞)