

DOI: 10.11779/CJGE2020S1049

基于 MICP 技术的淤泥质土固化试验研究

蔡红, 肖建章*, 王子文, 李洁

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

摘要: 当前微生物诱导碳酸钙 (MICP) 固化技术主要用于易于灌注的大孔隙、易连通的砂土, 应用于低渗透性淤泥质土还鲜见报道。基于 MICP 固化砂土的相关研究结果, 使用巴氏芽孢杆菌进行淤泥质土固化试验, 抗剪强度指标随着龄期增加提升明显, 固化过程中淤泥质土含水率也有较大降低, 淤泥固化后力学性质明显改善, 表明采用 MICP 技术对淤泥质土进行固化是可行和有效的。为了解巴氏芽孢杆菌对淤泥质土的固化机理, 通过矿化分析和电镜技术等技术手段, 对比淤泥质土在固化前后矿物成分含量变化, 确定巴氏芽孢杆菌在淤泥质土固化过程中与营养盐、淤泥质土中的矿物离子等的化学反应关系, 揭示了淤泥质土微生物固化的增强机制和作用机理。

关键词: 微生物固化; 淤泥质土; 固化机理; 固化反应式

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S1-0249-05

作者简介: 蔡红(1968—), 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: caihong@iwhr.com。

Experimental study on solidification of soft clay based on MICP

CAI Hong, XIAO Jian-zhang, WANG Zi-wen, LI Jie

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower

Research, Beijing 100048, China)

Abstract: At present, the microbial-induced calcium carbonate (MICP) solidification technology is mainly used in porous sand which is easy to be grouted and connected, but rarely used in low-permeability silt. Based on the results of MICP solidification of sandy soil, using *Sporosarcina pasteurii* to solidify soft clay, the shear strength index increases obviously with the increase of curing time, the water content decreases greatly during the solidification process and the mechanical properties are improved obviously after solidification, which shows that it is feasible and effective to solidify soft clay by using the MICP technology. In order to understand the solidification mechanism of *Sporosarcina pasteurii* on the soft clay, the change rules of mineral composition before and after solidification are compared by means of XRD and SEM, and the chemical reaction relationship between *Sporosarcina pasteurii* and nutrient salts, mineral ions in the soft clay during solidification was determined, and revealed the strengthening mechanism of microbial solidification.

Key words: microbial solidification; soft clay; solidification mechanism; solidification reaction

0 引言

微生物是地球表层最强大的地质营力之一, 许多元素的分异、聚集、迁移及成矿都与微生物活动有密切联系, 对土力学及工程性质带来影响^[1-3]。绝大多数微生物能很快适应新的环境条件, 能在快速矿化和析出碳酸钙结晶颗粒, 通过与周围土体胶凝可以改变材料强度、刚度与渗透性^[4-6]。

当前MICP技术主要用于易于灌注的孔隙大、连通性好的砂土中^[7-11], 微生物在处理地下室渗漏中通过在背水面墙体形成覆盖于裂缝表面碳酸钙膜取得较好效果^[12]; 基于微生物诱导碳酸钙实现对岩土材料渗透特性的改变, 实现防渗和封堵^[13-16]; 经过微生物砂砾土层灌注试验处理后的砂砾层结构稳定, 有效提高了

地基强度与承载力^[17]。

淤泥质土是在静水或非常缓慢流水环境中沉积形成的未固结软弱细粒或极细粒土, 在中国分布广泛, 具有含水率高、强度低等不良特性, 利用晾晒、热处理等方法处理周期长, 成本也高; 采用水泥、石灰或粉煤灰等处理的效果也不甚理想, 水泥固化土干缩系数和温缩系数较大、易开裂, 石灰固化土强度增长慢, 影响施工进度。由于淤泥质土的低渗透性, 采用灌注方法难以实现菌液扩散, MICP技术在淤泥质土固化实践中受到一定限制。

基金项目: 中国水利科学研究院基本科研业务费项目 (GE0145B512016)

收稿日期: 2020-06-05

*通信作者 (E-mail: xiaojz@iwhr.com)

表 1 MICP 固化试验淤泥质土物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of solidified MICP-treated soft clay					
土样名称	密度 ρ $/(g \cdot cm^{-3})$	含水率 w $/\%$	渗透系数 $k/(cm \cdot s^{-1})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$
青弋江淤泥质土	1.82	40	1.0×10^{-6}	32.1	20.4

本文基于淤泥质土的材料特性，采用拌和制样法对淤泥质土进行了MICP固化试验研究，在效果分析基础上探讨了淤泥质土在固化过程中矿化成分的演化规律，揭示了MICP固化淤泥质土机理，为淤泥质土微生物固化处理与应用积累研究经验。

1 试验设计

1.1 淤泥质土选择

淤泥质土可分为河相、湖相和海相等沉积类型，图1为16条不同成因淤泥质土颗分曲线，颗粒基本分布在0.001~1 mm，粒径大于0.1 mm颗粒质量小于总质量20%。尽管沉积类型不同，颗分曲线并没有明显分区。试验选用颗分曲线位于上下包线中间的安徽青弋江淤泥质土，物理力学参数见表1。

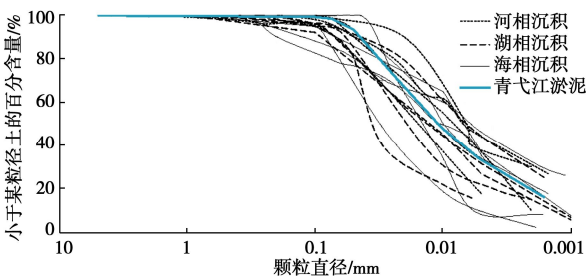
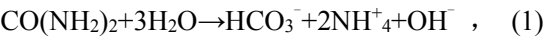


图 1 国内不同沉积类型典型淤泥质土颗分曲线统计

Fig. 1 Statistics of gradation curves of typical soft clay in China

1.2 微生物选择

巴氏芽孢杆菌具有尿素水解机制简单、自由能变化量低、产脲酶能力高的优点，分布广泛，在微生物诱导生成碳酸钙研究中广为采用，反应式如下



可以看出，巴氏芽孢杆菌在代谢过程中能消耗被固化材料中水分，考虑淤泥质土高含水率特点，试验采用了巴氏芽孢杆菌。

1.3 试样制备与试验

(1) 菌液制备选用优化培养基，每1.0 L水中添加20.0 g酵母粉，10.0 g硫酸铵，1.0 mL氯化镍，将培养基的pH值调整为9.0，用高压蒸汽灭菌锅在121℃灭菌20 min，接种完成后培养24 h。

(2) 营养液制备营养液为等摩尔浓度钙源和尿素混合溶液，营养液浓度依次为0.5，1.0，1.5，2.0，3.0 mol/L。

(3) 试样含水率含水率控制在40%。

(4) 试样制备采用性拌和法制备试样，即将淤泥质土晾晒烘干，碾成细粉状，将菌液、营养盐和试验用水配置成所需含水率，均匀拌合10 min后装入剪切盒养护，通过直剪试验测试抗剪强度，并制备未添加任何菌液和营养液、含水率相同的试样来对比固化效果。

2 固化强度特征分析

菌液OD₆₀₀为4.12，脲酶活性为1.62 mS/cm/min，营养液浓度为0.5，1.0，1.5，2.0，3.0 mol/L，养护龄期为0.5，1，2，3，5和7 d，各组试验测得强度、含水率以及干密度结果如下。

2.1 固化强度与营养液浓度

7 d龄期固化淤泥质土内摩擦角随营养盐浓度提高增加达到最大值后再逐渐降低(图2)，试验在营养盐浓度1.5 mol/L时取得固化效果最优，营养盐浓度大于1.5 mol/L时，内摩擦角而逐渐降低，表明营养盐浓度过高对巴氏芽孢杆菌有抑制作用，合理菌液与营养盐配比是影响固化效果因素之一。

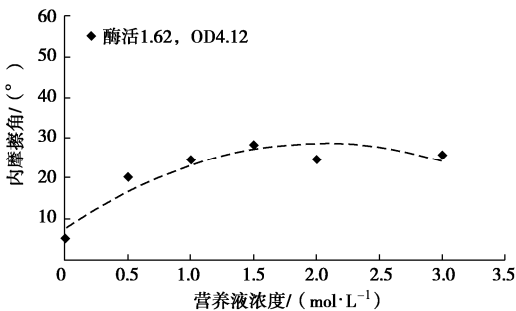


图 2 固化淤泥质土内摩擦角与营养液浓度关系(7 d)

Fig. 2 Relationship between internal friction angle and nutrient solution concentration (7 d)

2.2 固化强度与龄期

营养盐浓度 1.5 mol/L 条件下，固化淤泥质土内摩擦角与龄期的关系如图 3 所示，可以看出固化反应主要发生在试验初期，固化 12 h 试样的内摩擦角比未固化 5° 提高到 20°，达固化 7 d 测得 28.10° 的 65%，养护 7d 后内摩擦角提高幅度为 5.52 倍，作用明显。

2.3 固化强度与含水率

淤泥质土含水率降低主要发生在固化初期(图 4)，12 h 含水率从 40%降至 33.43%，7 d 降至 33.29%，绝对降幅 6.71%，相对降幅达 16.78%。这里，水分变

表 2 MICP 固化前后淤泥质土的矿物 X-射线衍射分析
Table 2 X-ray diffraction analysis of before and after MICP-treated soft clay

土类	石英/%	钾长石/%	斜长石/%	白云石/%	角闪石/%	黏土矿物总量/%
未固化淤泥质土	48.5	3.5	9.8	3.1	1.8	33.3
MICP 固化淤泥质土	48.0	3.5	9.8	5.9	4.0	28.8

化直接影响着力学强度, 采用巴氏芽孢杆菌固化淤泥质土提高强度的同时, 也从内部实现水分降低, 对淤泥质土有重要的工程意义。

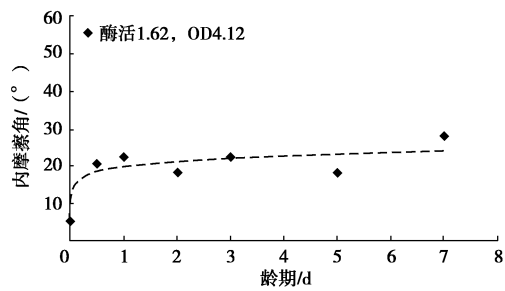


图 3 固化淤泥质土内摩擦角与龄期关系

Fig. 3 Relationship between internal friction angle and curing age

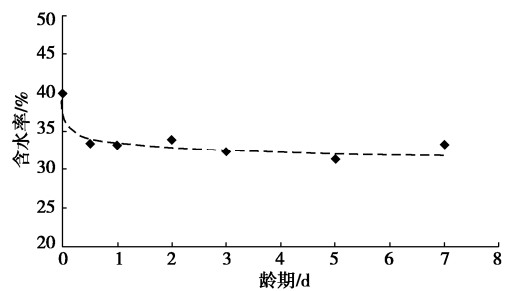


图 4 固化淤泥质土含水率随龄期变化曲线 (7 d)

Fig. 4 Relationship between water content and curing age (7 d)

2. 4 固化强度与干密度

7 d 龄期淤泥质土固化试样干密度从 1.35 g/cm³ 增加到 1.41 g/cm³, 增幅为 4.44%, 表明微生物诱导碳酸钙胶结物逐渐累积能充填和挤密孔隙, 提高淤泥质土固化强度 (图 5)。

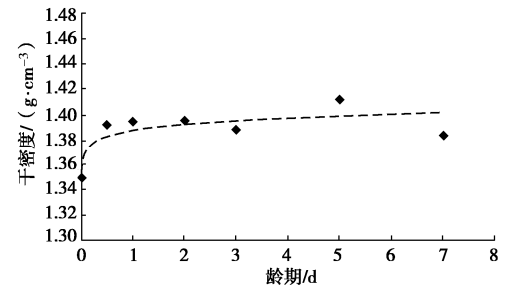


图 5 固化淤泥质土干密度随龄期变化曲线 (7 d)

Fig. 5 Relationship between dry density and curing age (7 d)

3 矿物测定与固化机理分析

为揭示淤泥质土中巴氏芽孢杆菌诱导生成碳酸钙反应及固化机理, 采用 X 射线衍射和电镜扫描对矿物成分及结晶情况进行测试分析。

3. 1 XRD 测试

微生物个体很小, 仅 1 μm 左右, 诱导生成碳酸钙粒径基本也在微米级别, 为了解固化矿物成分改变, 采用 XRD 对淤泥质土固化前后矿物组成进行测定, 如图 6 和表 2 所示。

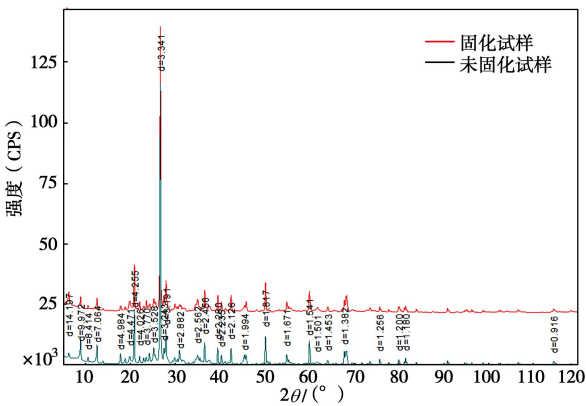


图 6 微生物固化前后淤泥质土试样 X 射线衍射对比

Fig. 6 Comparison of X-ray diffraction patterns of MICP-treated soft clay

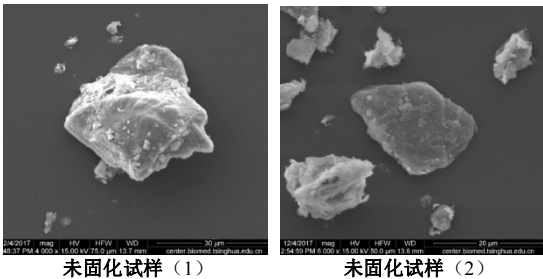
MICP 固化后淤泥质土试样中白云石含量由 3.1% 提高到了 5.9%, 角闪石由 1.8% 提高到了 4.0%, 表明淤泥质土自身包含有少量镁、铁、钠、钾和钙等也参与到 MICP 矿化过程中, 不仅生成了常见的方解石 Cell-CaCO_3 , 也生成了白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 和角闪石 $\text{NaCa}_2\text{Fe}_3(\text{AlSi})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_7$ 。

3. 2 SEM 测试

采用 SEM 分别测定不同龄期的原状和固化淤泥质土, 如图 7, 8 所示。

可以看出, 微生物固化后土颗粒表面细小晶体会随着龄期增加而增多, 说明微生物诱导碳酸钙成矿过程是逐渐发展的 (图 7)。

微生物诱导形成矿物晶体中明显存在孔洞 (图 8), 验证了微生物在淤泥质土 MICP 过程中充当晶核作用, 表明微生物确实发挥了作用。



未固化试样 (1)

未固化试样 (2)

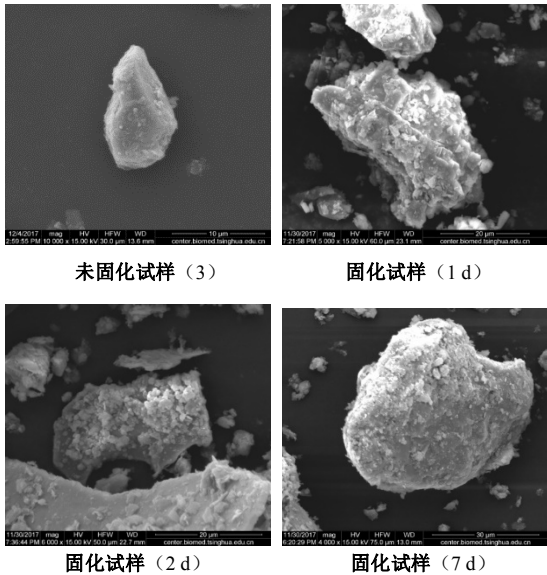


图 7 固化前后淤泥质土电镜扫描对比
Fig. 7 Images of MICP-treated soft clay under SEM

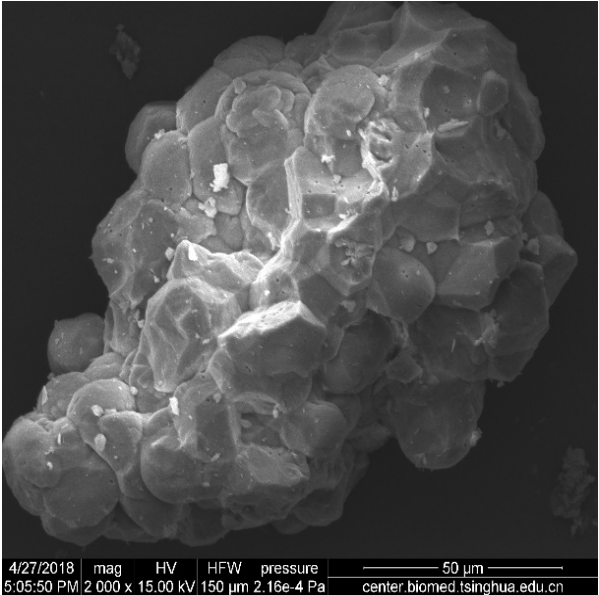
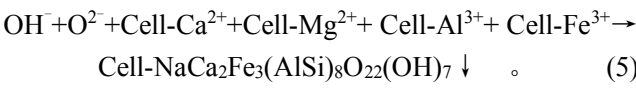
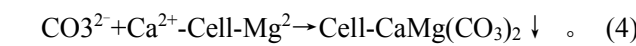
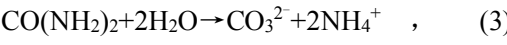


图 8 微生物固化淤泥质土形成的晶体孔洞

Fig. 8 Crystal holes formed by microbial solidification of soft clay

3.3 固化反应式

试验中添加的营养盐中只有钙离子,没有镁离子,菌液除与营养盐中的钙离子生成常见的 Cell-CaCO_3 (方解石) 外,白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 和角闪石 $\text{NaCa}_2\text{Fe}_3(\text{AlSi})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_7$ 的增加必然是菌液与营养盐中的钙离子及淤泥质土中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Na^+ 、 Al^{3+} 等共同反应结果,即巴氏芽孢杆菌在进行微生物固化过程中,微生物代谢产物胞外聚合物中含有的负离子基团能更快地吸附 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Na^+ 、 Al^{3+} 等其它矿物,而生成白云石和更为复杂的角闪石,矿化反应描述如下:



3.4 表观变化与固化机理

营养盐浓度不同,微生物诱导生成碳酸钙也不尽相同。养护 7 d 后,试样表面生成了白色圆点或团絮状斑点(图 9),浓度为 1.5 mol/L 试样表面斑点最密集;浓度 3.0 mol/L 试样表面未出现明显的白色斑点。

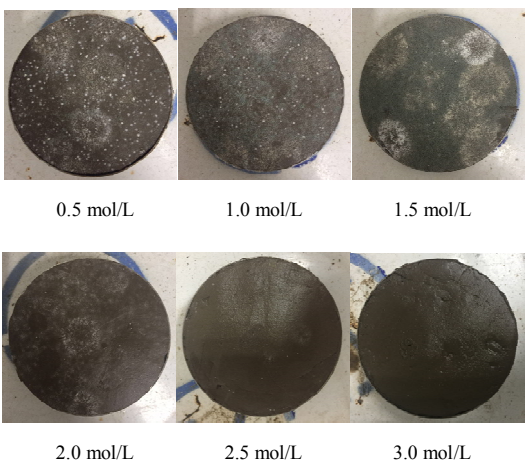


图 9 试样表观变化情况 (7 d)

Fig. 9 Apparent change of sample (7 d)

淤泥质土在不同的地质环境中形成多种板、絮状结构,颗粒组成主要为粉粒和黏粒,粒径与巴氏芽孢杆菌单体尺寸在一个数量级上。

由于巴氏芽孢杆菌固化生成方解石、白云石和角闪石的粒径与淤泥质土结构中的粉粒和黏粒相当,微观结构组成和机理可以概化为图 10 所示。

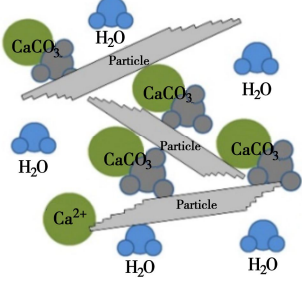


图 10 巴氏芽孢杆菌固化淤泥质土机理示意图

Fig. 10 Mechanism of *Sporosarcina pasteurii* on MICP-treated soft clay

4 结 论

(1)采用巴氏芽孢杆菌诱导生成碳酸盐来固化淤泥质土强度提高来源于生成碳酸盐胶结填充孔隙,以及微生物代谢过程中消耗土体中的水分。7 d 龄期内摩擦角由未固化 5° 提高到 28.10° ,含水率由 40%降低为 33.29%。

(2) 菌液和营养盐浓度对固化效果有重要影响, 本次试验在菌液 OD_{600} 为 4.12、脲酶活性为 1.62 mS/cm/min 条件下, 营养盐浓度 1.5 mol/L 时固化效果最优。

(3) 本次试验, 试样干密度从 1.35 g/cm³ 增加到 1.41 g/cm³, 表明土体干密度增加也是强度增加的主要原因。

(4) XRD 和 SEM 表明巴氏芽孢杆菌固化过程中生成的产物除方解石外, 还有白云石和角闪石, 表明淤泥质土中矿物离子也参与了微生物矿化。

(5) 淤泥质土颗粒细小、含水率高, 适合采用拌合法制样。

参考文献:

- [1] 阎葆瑞, 张锡根. 微生物成矿学[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (YAN Bao-rui, ZHANG Xi-gen. Microbial Metallogeny[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [2] 程晓辉, 杨 钻, 李 萌, 等. 岩土材料微生物改性的基本方法综述[J]. 工业建筑, 2015, 45(7): 1 - 7. (CHENG Xiao-hui, YANG Zuan, LI Meng, et al. Microbial modified geomaterials: a methodology review[J]. Industrial Construction, 2015, 45(7): 1 - 7. (in Chinese))
- [3] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ BC, et al. Bio-mediated soil improvement[J]. Ecol Eng, 2010, 36(2): 197 - 210.
- [4] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417 - 423.
- [5] MORTENSEN B M, HABER M J, DEJONG J T, et al. Nelson. Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of Applied Microbiology, 2011, 111(2): 338 - 49.
- [6] AL Q A, SOGA K, SANTAMARINA C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8): 992 - 1001.
- [7] MÁRCIA A S, KATIA K, VANDERLEY M J, et al. Sand bioconsolidation through the precipitation of calcium carbonate by two ureolytic bacteria[J]. Materials Letters, 2011, 65(11): 1730 - 1733.
- [8] CHOU C W, SEAGREN E A, AYDILEK A H, et al. Biocalcification of sand through ureolysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 127(12): 1179 - 1189.
- [9] AZADI M, GHAYOONI M, SHAMSKIA N, et al. Physical and mechanical properties of reconstructed bio-cemented sand[J]. Soils Found, 2017, 57(5): 698 - 706.
- [10] AAMIR M, ABDELMALEK B, WILL P G. Unconfined compressive strength and visualization of the microstructure of coarse sand subjected to different Biocementation levels[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2019, 145(8): 04019033
- [11] 张 越, 郭红仙, 程晓辉, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀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 Yue, GUO Hong-xian, CHENG Xiao-hui, 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))
- [12] 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 Xiao-hui, MA Qiang, YANG Zuan, 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))
- [13] 张贺超, 郭红仙, 李 萌, 等. 砂土介质中微生物诱导封堵技术试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 139 - 142. (ZHANG He-chao, GUO Hong-xian, LI Meng, et al. Experimental research of microbial-induced clogging in sands[J]. Industrial Construction, 2015, 45(1): 139 - 142. (in Chinese))
- [14] 李 萌, 郭红仙, 程晓辉, 等. 自源型微生物在地基渗漏封堵过程中的群落变化分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(7): 13 - 18. (LI Meng, GUO Hong-xian, CHENG Xiao-hui, et al. Analysis of the changes of microbial communities in process of biosealing grounds[J]. Industrial Construction, 2015, 45(7): 13 - 18. (in Chinese))
- [15] LEON A V P, RANAJIT G, THOMAS J M V D L, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogROUT experiment[J]. Geotech Geoenviron Eng, 2010, 136(12): 1721 - 1728.

(编校: 黄贤沙)