

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.125



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



MICP 加固砂土方法对比研究

张锦程¹, 李俊^{2a}, 肖鹏^{2a,2b,3}, 刘汉龙^{2a,2b}, 吴焕然^{2a,2b}

(1. 重庆市地质灾害防治中心, 重庆 400015; 2. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 3. 重庆铁路投资集团有限公司, 重庆 400023)

摘要:微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术是新兴的岩土工程绿色加固技术,在散粒土加固方面具有良好的应用前景。MICP加固砂土的均匀性和力学表现是目前存在的重要问题,为优化MICP加固方法,改善加固后砂土的综合表现,开展MICP加固砂土方法对比试验研究。详细介绍了传统两相法、pH法及温控法MICP加固方案,利用传统两相法、pH法及温控法开展砂柱试样的MICP加固试验,从加固试样的碳酸钙分布均匀性、反应液中钙离子利用率及加固试样的无侧限抗压强度等3个方面对比分析3种MICP加固方法的综合表现。结果表明:在试验条件下,传统两相法在3方面均表现最差;pH法和温控法整体表现较好,其中温控法反应液利用率较高,在高加固程度时强度略高,综合表现最优。

关键词:微生物加固;无侧限抗压强度;反应液利用率;温控法

中图分类号: TU441 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)06-0151-07

Comparative study on MICP-treatment schemes for sands

ZHANG Jingcheng¹, LI Jun^{2a}, XIAO Peng^{2a,2b,3}, LIU Hanlong^{2a,2b}, WU Huanran^{2a,2b}

(1. Geohazard Prevention Center of Chongqing, Chongqing 400015, P. R. China; 2a. School of Civil Engineering; 2b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. Chongqing Railway Investment Group Co. Ltd., Chongqing 400023, P. R. China)

Abstract: Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) is a new green ground improvement technique in geotechnical engineering and has a promising prospect in reinforcing granular soils. The uniformity and the mechanical performance of MICP-treated sands are important issues in the MICP method. To optimize the MICP-treatment scheme and improve the overall performance of MICP-treated sands, a comparative experimental study on different MICP-treatment schemes for sands was carried out. Firstly, the MICP-treatment schemes, including the conventional two-phase method, the pH method and the temperature-controlled method, were introduced in detail. Then, a series of MICP-treatment experiments on sand columns were conducted, following the three different schemes, respectively. Finally, the three different schemes were

收稿日期: 2022-08-23

基金项目: 重庆市规划和自然资源局科研项目(KJ-2021048); 重庆英才计划优秀科学家项目(cstc2021ycjh-bgzxm0051); 国家自然科学基金(41831282、52108303)

作者简介: 张锦程(1986-), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治研究, E-mail: 88659503@qq.com。

吴焕然(通信作者), 男, 博士, E-mail: hwucqu@163.com。

Received: 2022-08-23

Foundation items: Chongqing Planning and Natural Resources Bureau (No. KJ-2021048); Chongqing Talents Program (No. cstc2021ycjh-bgzxm0051); National Natural Science Foundation of China (No. 41831282, 52108303)

Author brief: ZHANG Jincheng (1986-), senior engineer, main research interest: prevention and control of geological hazards, E-mail: 88659503@qq.com.

WU Huanran (corresponding author), PhD, E-mail: hwucqu@163.com.

compared in terms of the distribution of CaCO_3 in the post-treatment specimens, the utilization rate of reaction solutions and the unconfined compressive strength of the post-treatment specimens. Under the testing conditions in this paper, the conventional two-phase method has the worst performance in the three aspects; the pH method and the temperature-controlled method generally perform well; in comparison with the pH method, the temperature-controlled method has a higher utilization rate of reaction solutions and a higher strength under high-treatment conditions; the temperature-controlled method has the best overall performance.

Keywords: microbial reinforcement; unconfined compressive strength; utilization rate of reaction solution; temperature-controlled method

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术是近年来提出的一种新型加固技术,其原理是利用微生物的新陈代谢活动,通过生化反应生成碳酸钙,碳酸钙晶体沉积在砂颗粒间的孔隙中,可产生粒间胶结、孔隙填充效应,从而改善砂土的物理力学性能^[1],如强度^[2-3]、渗透性^[4]等。由于MICP技术具有环境相容性好、施工简便等优点,目前已被广泛用于多个领域,如岛礁地基加固^[5]、堤坝防渗^[6]、文物修复^[7]、沙漠治理^[8]、重金属污染防治^[9-10]和扬尘治理^[11]等。

MICP技术在室内试验及现场应用中均取得了一定的效果,但仍面临一些挑战。其中,MICP加固砂土的均匀性和力学性能是当前制约MICP技术推广应用的一个重要问题。目前,较常见的MICP加固砂柱试样方法为两相法,已有许多学者利用两相法开展了MICP加固砂土相关试验研究。Whiffin^[12]最早提出利用巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*)进行砂土固化,但利用该方法得到的试样均匀性很差,灌浆口易出现堵塞现象。为了得到更加均匀的加固试样,学者们进行了许多尝试,如采用不同的灌浆手段^[13]、添加固定剂^[14]、改变注浆压力^[15]等。Cheng等^[16]研究发现,由于巴氏芽孢杆菌为嗜碱菌,低pH值环境会抑制细菌的活性,细菌新陈代谢缓慢,溶液中脲酶含量低,此时将反应液和菌液混合,不会立刻产生碳酸钙沉淀。Cheng等^[16]基于此提出了低pH值环境下的一相注浆方法,即“pH法”,利用该方法得到的混合液最长可以实现35 min不产生碳酸钙絮凝。Van Paassen^[17]发现,当温度低于10℃时,细菌溶液基本不产生水解反应,脲酶活性基本为零;当温度在10~45℃范围时,脲酶活性随温度的升高而线性增长,这为提高固化试样的均匀性提供了新思路。基于脲酶活性随温度的变化,Xiao等^[18-19]提出了温控MICP加固方案,即“温控法”,并探究了温控法加固石英砂试样的静力学特性;Xiao等^[20]还探究了温控法加固钙质砂试样的动力学特性。目前,采用传统两相法、pH法和温控法等单一方法进行砂土MICP加固的研究较多,

但鲜有学者聚焦于多种方法加固砂土效果的横向对比。

为进一步分析各MICP加固砂土方法的特点,为MICP加固方案的比选设计提供参考,笔者选择传统两相法、pH法和温控法3种典型MICP加固方法开展对比试验研究。首先详细介绍传统两相法、pH法和温控法MICP加固砂柱试样的加固过程;然后设计试验方案,分别采用3种方法开展MICP加固砂柱试验;最后系统地比较固化试样的碳酸钙分布均匀性、反应液利用率和无侧限抗压强度等指标,对比分析3种MICP加固方法的综合表现。

1 试验材料、试样制备与试验方案

1.1 试验材料

为了得到MICP过程生成的碳酸钙含量,分析MICP加固效率与均匀性,需要对试样进行酸洗处理,所用试验材料不能与盐酸发生反应,故试验所用材料为石英砂,其主要成分为二氧化硅,相对密度为2.79。试验用砂主要物理参数如表1所示。

表1 试验用砂主要物理参数

Table 1 Main physical parameters of the testing sand

e_{\max}	e_{\min}	$D_{60}/$ mm	$D_{10}/$ mm	$D_{30}/$ mm	$\rho_d/$ (g/cm^3)	C_u	C_c
0.83	0.51	0.22	0.13	0.17	1.687	1.69	1.01

1.2 试样制备

试验所用试样为直径40 mm、高度80 mm的砂柱,相对密实度为80%。试验所用菌株为购买于中国普通微生物菌种保藏管理中心的巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*),细菌编号1.3687。试验所用反应液(CS)由尿素溶液与氯化钙溶液按体积比1:1配成,反应液中二者浓度均为0.5 mol/L;菌液(BS)浓度量级为 $\sim 10^7$ cells/mL。

1.2.1 两相法MICP加固

两相法MICP注浆系统及加固过程如图1所示。利用两相法加固砂柱试样的具体步骤为:1)打

开阀门 V1、V5、V6,开启蠕动泵,从试样底端泵入足量去离子水,使试样饱和,试样饱和后关闭所有阀门;2)打开阀门 V3、V5、V6,以 0.67 mL/min 的速度从试样底端缓慢注入 60 mL 菌液(约 1.2 V_p , V_p 为试样孔隙体积),菌液灌注结束后关闭所有阀门和蠕动泵,静置 6 h,使菌液充分附着于砂土颗粒上;3)打开阀门 V2、V4、V7 和蠕动泵,以 0.67 mL/min 的速度从试样顶端灌入 100 mL 反应液(约 2 V_p),注浆结束后关闭所有阀门和蠕动泵,保持试样在 26 °C 环境下静置养护 12 h,以使反应充分,此为完成一次 MICP 加固;4)按上述方法完成试验计划加固次数后,从试样顶端泵入超过 250 mL 去离子水(大于 5 V_p)清洗砂柱,以除掉残留在试样内部的反应液;5)将试样静置 6 h 后,放到 110 °C 烘箱中烘 24 h,烘干后放置于干燥密封袋中,留待取用。

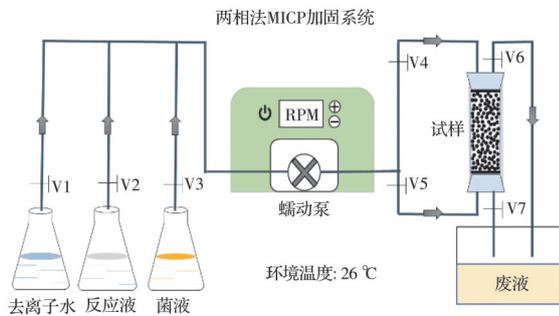


图 1 两相法 MICP 加固系统
Fig. 1 Experimental setup for the two-phase MICP treatment

1.2.2 pH 法 MICP 加固

pH 法 MICP 注浆系统及加固过程如图 2 所示。利用 pH 法加固砂柱试样的具体步骤为:1)打开阀门 V1、V4、V5,开启蠕动泵,从试样底端泵入足量去离子水,直至试样饱和,试样饱和后关闭所有阀门;2)按体积比 1:5 分别准备好菌液和反应液,用浓度为 1 mol/L 的盐酸溶液将菌液的 pH 值调节至 4.0 左右,随后将两种溶液一同加入锥形瓶并搅拌,分 6 次共得到混合液(MS)120 mL;3)打开阀门 V2、V3、V6 和蠕动泵,以 0.67 mL/min 的速度从试样顶端缓慢灌入 120 mL 混合液(约 2.4 V_p),使混合液充满试样孔隙,注浆完成后关闭所有阀门和蠕动泵,保持试样在 26 °C 环境下静置养护 12 h,以使反应充分,此为完成一次 MICP 加固;4)完成所有加固次数后,从试样顶部泵送超过 250 mL 去离子水(超过 5 V_p)清洗砂柱,以除掉残留在试样内部的反应液;5)将试样静置 6 h 后,放到 110 °C 烘箱中烘 24 h,烘干后放置于干燥密封袋中,留待取用。

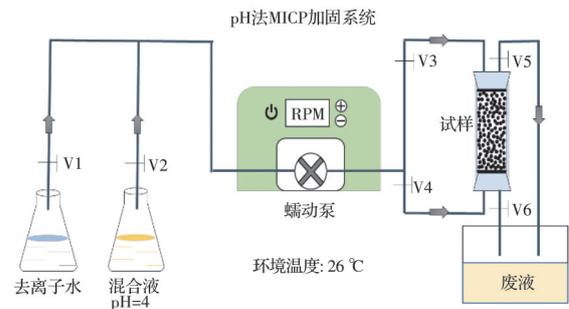


图 2 pH 法 MICP 加固系统
Fig. 2 Experimental setup of the pH-based MICP treatment

1.2.3 温控法 MICP 加固

温控法 MICP 注浆系统及加固过程如图 3 所示。利用温控法加固砂柱试样的具体步骤为:1)打开阀门 V1、V3、V4,开启蠕动泵,泵入足量去离子水,直至试样饱和,试样饱和后关闭所有阀门;2)将温度为 4 °C 的菌液和反应液从冰箱取出,按体积比 1:5 将菌液和反应液混合,得到 20 mL 混合液,然后将混合液放入 4 °C 恒温水浴锅中;3)打开阀门 V2、V3、V4 并开启蠕动泵,以 0.67 mL/min 的速度泵入混合液,直至恒温水浴锅中的混合液消耗完全;4)重复步骤 2)、3),至累计泵完 120 mL 混合液(约 2.4 V_p),注浆完成后关闭所有阀门和蠕动泵,保持砂柱试样在 26 °C 环境下静置养护 12 h,以使反应充分,此为完成一次 MICP 加固;5)完成所有加固次数后,从试样顶部泵送超过 250 mL 去离子水(大于 5 V_p)清洗砂柱,以除掉残留在试样内部的反应液;6)将试样静置 6 h 后,放到 110 °C 烘箱中烘 24 h,烘干后放置于干燥密封袋中,留待取用。

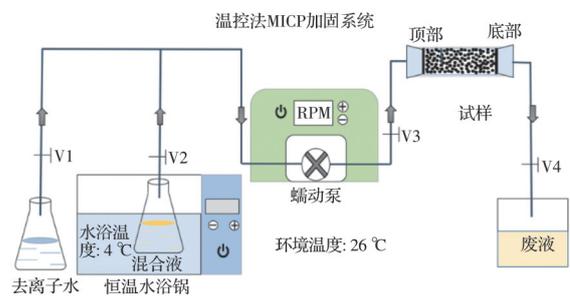


图 3 温控法 MICP 加固系统
Fig. 3 Experimental setup of the temperature-controlled MICP treatment

1.3 试验方案

为对比不同 MICP 加固方法的加固效果,分别利用两相法、pH 法、温控法 3 种方法对砂柱进行 MICP 加固试验,得到不同加固方法、不同加固次数

下 MICP 加固砂柱试样的碳酸钙生成量和无侧限抗压强度,对比分析不同工况下砂柱试样的均匀性、反应液利用率及砂柱试样的无侧限抗压强度。利用两相法、pH法和温控法进行 MICP 加固砂柱试样的具体工况如表 2 所示。

表 2 试样加固工况

Table 2 The MICP treatment conditions

加固方法	试样编号	反应液浓度/(mol/L)	V _{BS} /mL	V _{CS} /mL	加固次数	碳酸钙含量/%
两相法	A1	0.5	60	100	1	1.5
	A2	0.5	60	200	2	2.9
	A3	0.5	60	400	4	5.8
	A4	0.5	60	600	6	8.7
pH法	B1	0.5	20	100	1	1.6
	B2	0.5	60	300	3	4.7
	B3	0.5	100	500	5	7.9
温控法	C1	0.5	20	100	1	1.7
	C2	0.5	60	300	3	5.0
	C3	0.5	100	500	5	8.3

2 结果与讨论

2.1 试样均匀性

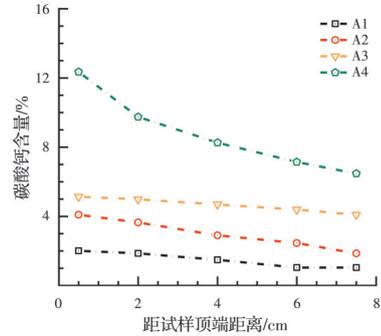
为研究 MICP 加固生成的碳酸钙沿砂柱轴向分布的均匀性,分别在距试样顶端不同距离处截取高度约 0.5 cm 的试样进行酸洗,通过酸洗前后的质量差得到试样不同位置的碳酸钙含量,碳酸钙含量计算如式(1)所示。

碳酸钙含量 =

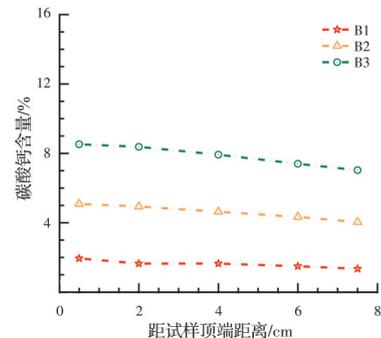
$$\frac{\text{试样酸洗前干重} - \text{试样酸洗后干重}}{\text{试样酸洗后干重}} \times 100\% \quad (1)$$

图 4 分别给出了 3 种不同 MICP 加固方法加固的砂柱试样中碳酸钙含量随距试样顶端距离的变化规律。由图 4(a)可以看出,采用两相法加固的砂柱试样,其碳酸钙含量随距试样顶端距离的增大而逐渐减小;MICP 加固程度越高,其内部生成的碳酸钙越多,不同区域的碳酸钙含量差异也越大。对于试样 A4,其顶部与底部的碳酸钙含量差异最明显,顶部接近底部的 2 倍,其分布表现出明显的不均匀性。从图 4(b)可以看出,采用 pH 法加固的砂柱试样 MICP 加固程度对碳酸钙含量分布的影响较小。同时,碳酸钙含量随距试样顶部距离的增大略微减小,试样底部的加固效果略次于顶部,这表明 pH 法加固得到的砂柱试样总体较均匀。从图 4(c)可以

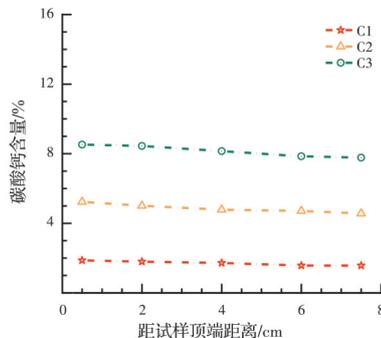
看出,采用温控法加固的砂柱试样,其碳酸钙含量分布规律和随加固程度的变化规律与 pH 法加固的试样基本一致,试样底部(远离注浆口一端)的加固效果较顶部(靠近注浆口一端)略差,其中试样 C3 底部的碳酸钙含量为顶部的 91%。



(a) 两相法



(b) pH法



(c) 温控法

图 4 MICP 加固砂柱试样中碳酸钙含量分布情况
Fig. 4 The distribution of CaCO₃ in MICP-treated sand columns

2.2 反应液利用率

反应液利用率是指 MICP 加固过程中实际生成碳酸钙的物质的量与反应液所含钙离子物质的量的比值。反应液利用率反映了 MICP 过程中细菌对化学物质的利用效率,对评价加固方法和控制试验成本具有重要意义。

图 5 给出了不同 MICP 加固方法和不同加固程度下砂柱试样反应液利用率和均值。从图中可以

看出,两相法的反应液利用率明显低于另外两种方法,其平均反应液利用率仅为 47.3%,而 pH 法和温控法的反应液利用率比较接近,平均分别为 63.5%、67.4%,可以看出,温控法比 pH 法略高。同时,随着 MICP 加固程度的提高,两相法的反应液利用率有一定的降低趋势;而随着 MICP 加固程度的提高,pH 法和温控法反应液利用率变化不明显。表明在整个试验过程中,与两相法相比,pH 法和温控法始终保持着较高和较稳定的反应液利用率。因此,根据试验结果,为减少浪费,得到更高的反应效率,推荐使用温控法进行 MICP 加固。

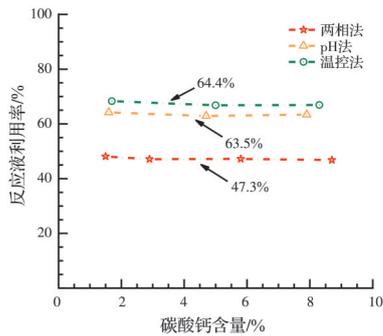


图 5 MICP 加固砂柱试样反应液利用率
Fig. 5 The utilization rate of MICP schemes

2.3 无侧限抗压强度

为比较 3 种 MICP 加固方法的加固效果,并保证数据的可比性,分别取碳酸钙含量较接近的两组试样进行无侧限抗压强度对比分析,其中 1 组包括砂柱试样 A3、B2 和 C2,2 组包括砂柱试样 A4、B3 和 C3,两组试样的无侧限抗压强度对比如图 6 所示。

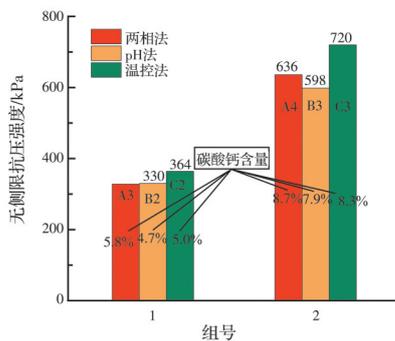


图 6 MICP 加固砂柱试样无侧限抗压强度

Fig. 6 The unconfined compression strength of MICP-treated sand columns

从第 1 组结果可以看出,两相法加固的试样 A3 碳酸钙含量最高,pH 法和温控法加固的试样 B2、C2 碳酸钙含量分别为试样 A3 的 81.0%、86%;但后两者无侧限抗压强度分别为试样 A3 的 100.6%、

111.0%;同样地,在第 2 组中,pH 法和温控法加固试样 B3、C3 的碳酸钙含量分别为两相法加固试样 A4 的 90.8%、95.4%;而前两者的无侧限抗压强度分别为两相法加固试样的 94.0%、113.2%。结果表明,当碳酸钙含量相同时,与其他两种方法相比,砂柱试样两相法加固的无侧限抗压强度明显较低。同时,对比第 1 组、第 2 组中利用 pH 法和温控法加固的试样,试样 B2、B3 的碳酸钙含量分别为试样 C2、C3 的 94%、95.1%,而无侧限抗压强度分别为试样 C2、C3 的 90.7%、83.1%;结果表明,在相同碳酸钙含量下,MICP 加固程度较低时,pH 法和温控法加固砂柱试样的无侧限抗压强度差别不大;而 MICP 加固程度较高时,温控法加固砂柱试样的无侧限抗压强度较 pH 法略高。

2.4 讨论

从加固试样中碳酸钙分布均匀性、反应液利用率及加固试样的无侧限抗压强度 3 个方面对温控法、传统两相法和 pH 法 3 种 MICP 加固方法进行对比。在试验条件下,传统两相法加固试样中碳酸钙分布最不均匀,而 pH 法和温控法均匀性整体较好。就反应液利用率而言,pH 法和温控法显著高于两相法,而温控法又略高于 pH 法。取碳酸钙含量相近的加固后试样进行比较发现,相同含量的碳酸钙在两相法加固试样中产生的强度明显低于其他两种方法,即加固效率较低;对于 pH 法和温控法,低加固程度时,两者加固效率相近,而高加固程度时,温控法加固效率略高于 pH 法。因此,在试验条件下,pH 法和温控法表现显著优于两相法,而温控法综合表现最优。

温控法和 pH 法均采用一相注浆,使得菌液和反应液在 MICP 反应前能够充分混合均匀,加固过程比两相法更加简便。与 pH 法相比,温控法加固过程中无须添加额外化学试剂,且采用的 4℃ 低温环境对细菌活性的抑制作用是可逆的。此外,在两相法、pH 法中,试样竖直放置^[12],模拟从顶部注浆的工况;而温控法中,试样水平放置^[18-19],模拟浆液水平流动为主的工况;试验结果一定程度上反映了注浆过程对加固效果的影响。需要注意的是,试验仍存在局限,如只使用一种石英砂作为试验材料,3 种加固方法在不同级配、不同矿物成分的砂土中的应用效果仍需进行更多试验研究;仅针对实验室加固砂柱情况进行研究,3 种加固方法在现场应用中的表现仍需更多试验研究。

3 结论

详细阐述了使用两相法、pH法和温控法进行砂柱试样MICP加固的过程,通过对比试验,探究3种加固方法在碳酸钙分布均匀性、反应液利用率和无侧限抗压强度方面的表现,发现温控法在试验条件下综合表现最优。两相法加固砂柱试样中碳酸钙含量随距注浆口距离和加固程度变化较大、试样内部均匀性较差,pH法和温控法加固试样的均匀性整体较好。温控法的反应液利用率最高,pH法次之,两相法最低;两相法反应液利用率随MICP加固次数的增加逐渐降低,而pH法和温控法的反应液利用率变化较小。取碳酸钙含量相近的试样比较无侧限抗压强度,发现两相法的加固效率明显低于pH法和温控法;在加固程度较低时,pH法和温控法的加固效率相近,而加固程度较高时,温控法的加固效率略高于pH法。

参考文献

- [1] 刘汉龙,肖鹏,肖杨,等.微生物岩土技术及其应用研究新进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(1):1-14.
LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [2] HARKES M P, VAN PAASSEN L A, BOOSTER J L, et al. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 112-117.
- [3] LIU L, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(10): 1502-1513.
- [4] STABNIKOV V, NAEIMI M, IVANOV V, et al. Formation of water-impermeable crust on sand surface using biocement [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(11): 1143-1149.
- [5] 刘汉龙,马国梁,肖杨,等.微生物加固岛礁地基现场试验研究[J].地基处理,2019,1(1):26-31.
LIU H L, MA G L, XIAO Y, et al. In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands [J]. Chinese Ground Improvement, 2019, 1(1): 26-31. (in Chinese)
- [6] 谈叶飞,郭张军,陈鸿杰,等.微生物追踪固结技术在堤防防渗中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):521-526.
TAN Y F, GUO Z J, CHEN H J, et al. Study on application of microbial tracing consolidation technology in the seepage prevention of earth bank [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6): 521-526. (in Chinese)
- [7] 刘汉龙,韩绍康,陈卉丽,等.潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(6):219-220.
LIU H L, HAN S K, CHEN H L, et al. Microbial reinforcement and repair method of sandstone grottoes in humid environment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 219-220. (in Chinese)
- [8] 李驰,王硕,王燕星,等.沙漠微生物矿化覆膜及其稳定性的现场试验研究[J].岩土力学,2019,40(4):1291-1298.
LI C, WANG S, WANG Y X, et al. Field experimental study on stability of bio-mineralization crust in the desert [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1291-1298. (in Chinese)
- [9] ACHAL V, PAN X L, ZHANG D Y. Remediation of copper-contaminated soil by *Kocuria flava* CR1, based on microbially induced calcite precipitation [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(10): 1601-1605.
- [10] 许燕波,钱春香,陆兆文.微生物矿化修复重金属污染土壤[J].环境工程学报,2013,7(7):2763-2768.
XU Y B, QIAN C X, LU Z W. Remediation of heavy metal contaminated soils by bacteria biomineralization [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(7): 2763-2768. (in Chinese)
- [11] NAEIMI M, CHU J. Comparison of conventional and bio-treated methods as dust suppressants [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(29): 23341-23350.
- [12] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement [D]. Western Australia: Murdoch University, 2010.
- [13] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [14] QIAN C X, PAN Q F, WANG R X. Cementation of sand grains based on carbonate precipitation induced by microorganism [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(8): 2198-2206.
- [15] CHENG L, SHAHIN M A. Urease active bioslurry: A

- novel soil improvement approach based on microbially induced carbonate precipitation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(9): 1376-1385.
- [16] CHENG L, SHAHIN M A, CHU J. Soil biocementation using a new one-phase low-pH injection method [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 615-626.
- [17] VAN PAASSEN L A. Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation [D]. the Netherlands: Delft University of Technology, 2009.
- [18] XIAO Y, WANG Y, DESAI C S, et al. Strength and deformation responses of biocemented sands using a temperature-controlled method [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(11): 04019120.1-04019120.10.
- [19] XIAO Y, WANG Y, WANG S, et al. Homogeneity and mechanical behaviors of sands improved by a temperature-controlled one-phase MICP method [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(5): 1417-1427.
- [20] XIAO P, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Effect of relative density and biocementation on cyclic response of calcareous sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56: 1849-1862.

(编辑 王秀玲)