

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.012



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 基于大型三轴试验的原位激发微生物矿化 加固土剪切特性研究

李坤瑶<sup>a</sup>, 赵航行<sup>a</sup>, 杨文保<sup>a</sup>, 赵子华<sup>a</sup>, 崔昊<sup>a</sup>, 肖杨<sup>a,b,c</sup>

(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; c. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045)

**摘要:**作为一种绿色新型土体加固方法,微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)加固技术近年来发展迅速。传统 MICP 加固存在成本高、外源矿化菌的环境适应性差以及引入外源菌可能带来潜在环境风险等问题,而利用土壤土著脲酶菌进行 MICP 加固的原位激发方法能有效降低加固成本和环境风险。采用原位激发微生物技术加固土体,对未加固与加固后的土样开展大型三轴固结排水剪切试验,对比分析两者的剪切特性,并探究微生物加固土样中碳酸钙的分布特征及加固机理。结果表明:原位激发微生物加固主要生成菱面体形碳酸钙,其在土体中沉积能显著提升土样的强度与刚度,并显著降低体积应变;土样中碳酸钙含量随深度的增加呈下降趋势,导致试样易在底部发生剪切破坏。

**关键词:**微生物诱导碳酸钙沉淀;土体加固;原位激发;大型三轴试验;剪切特性;碳酸钙分布

**中图分类号:** TU411.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)03-0041-07

## Shear characteristics of biostimulated MICP-treated soil based on large-scale triaxial tests

LI Kunyao<sup>a</sup>, ZHAO Hanghang<sup>a</sup>, YANG Wenbao<sup>a</sup>, ZHAO Zihua<sup>a</sup>, CUI Hao<sup>a</sup>,  
XIAO Yang<sup>a,b,c</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education; c. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** As a novel environmentally friendly reinforcement method, the microbially induced carbonate precipitation (MICP) reinforcement technique has developed rapidly in recent years. The traditional MICP reinforcement method is limited by high reinforcement cost, poor environmental adaptability of exogenous mineralizing bacteria, and potential risks associated with the introduction of exogenous bacteria. The biostimulated MICP method using indigenous urease bacteria contained in soil can effectively reduce reinforcement cost and potential risks. In this paper, the biostimulated MICP method was used to reinforce the soil, and large-scale triaxial con-

**收稿日期:** 2024-12-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(52078085)

**作者简介:** 李坤瑶(2002-), 男, 主要从事微生物加固土体力学特性研究, E-mail: xslkyao@163.com。

赵航行(通信作者), 男, 博士生, E-mail: zhaohh1999@163.com。

**Received:** 2024-12-06

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 52078085)

**Author brief:** LI Kunyao (2002-), main research interest: mechanical properties of biotreated soils, E-mail: xslkyao@163.com.

ZHAO Hanghang (corresponding author), PhD candidate, E-mail: zhaohh1999@163.com.

solidation drained shear tests were carried out on specimens before and after treatment to compare and analyze the shear characteristics of the treated and untreated specimens. Moreover, the distribution and reinforcement mechanism of calcium carbonate in the biotreated soil specimen were also investigated. The results show that the biostimulated MICP treatment primarily generates rhombohedral-shaped calcium carbonate, which is deposited in the soil, leading to a significant increase in strength and stiffness, as well as a significant reduction in volumetric strain. The content of calcium carbonate in the soil specimen decreases with the increase of specimen depth, which leads to shear failure at the bottom of the specimen.

**Keywords:** microbially induced carbonate precipitation (MICP); soil reinforcement; biostimulation; large-scale triaxial test; shear characteristics; calcium carbonate distribution

因具有环境友好的特点,微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)加固技术已成为当前研究热点。该技术主要通过脲酶菌分泌的脲酶水解尿素生成碳酸根离子,再与环境中的钙离子结合,形成稳定性较高的碳酸钙沉淀<sup>[1]</sup>。该过程产生的碳酸钙可填充砂土孔隙与岩石裂隙,并在土颗粒间形成胶结作用,从而达到改善岩土体工程性质的目的。目前,研究者已采用MICP技术开展了多尺度研究,包括微观尺度的扫描电镜测试<sup>[2]</sup>与微流控试验<sup>[3]</sup>、中观尺度的颗粒胶结试验<sup>[4]</sup>与单元试验<sup>[5]</sup>以及宏观尺度的模型试验<sup>[6]</sup>与现场试验<sup>[7]</sup>等。采用MICP加固土体时,通常需多次向土体注入预先培养的菌液,以保证土体中持续产生脲酶,进而实现理想的加固效果<sup>[8]</sup>。然而,该过程会提高加固成本,且外源菌与土著细菌竞争生长时不具备明显优势,外源菌液的注入还可能带来潜在的环境风险<sup>[9]</sup>。

近年来,利用场地中土著脲酶菌进行的原位激发微生物加固技术受到广泛关注。该技术通过营造适宜的环境激活土体中的土著脲酶菌,并利用激活后的菌群实现MICP加固。该方法不仅能降低微生物培养与运输成本<sup>[10]</sup>,还能使土著脲酶菌更好地适应当地环境<sup>[11]</sup>,从而避免外源细菌引发的潜在环境问题。目前,已有研究者围绕原位激发微生物加固技术开展了相关研究。Fan等<sup>[9]</sup>对比了常规MICP法与原位激发法的土体加固效果,结果表明,原位激发微生物加固法更加环保、经济且作用温和,采用该方法加固后试样的碳酸钙含量、剪切波速和无侧限抗压强度均高于常规MICP法加固试样。王逸杰等<sup>[12]</sup>对原位激发微生物加固钙质砂开展了直剪试验与一维压缩试验,结果表明,原位生物激发MICP技术可在钙质砂中形成有效胶结,胶结率最高可达6.26%;加固后试样的最大应力、最大

剪胀角等力学参数显著增大,压缩性显著降低。张宇等<sup>[13]</sup>利用原位激发MICP技术处理铅污染土发现,加固后土体强度大幅提高,且重金属离子浸出浓度明显降低。目前,针对原位激发MICP加固土体的室内试验多以小砂柱为研究对象,试样加固均匀性较易控制。但在现场应用中,待加固土体的尺寸远大于室内砂柱试样。因此,采用原位激发微生物技术加固大尺寸土样时的加固均匀性及其对力学性能的影响值得深入研究。

为探究原位激发法加固大尺寸土样的剪切特性,采用原位激发微生物技术加固土样,并开展大型三轴固结排水试验,对比分析加固前后土样的强度与变形特性,研究加固土样中碳酸钙的分布规律。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用土样取自重庆市嘉陵江沿岸。该区域土壤中微生物赋存丰富,有利于提高原位激发微生物的成功率。取回的土样经初步筛分后,人工剔除树枝等杂物。参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[14]</sup>,测定土样的基本物理参数,结果如表1所示。

### 1.2 生物激发溶液与胶结溶液

参考Fan等<sup>[9]</sup>的研究,采用的生物激发液配方为:20 g/L酵母提取物、0.01 g/L六水氯化镍、10 g/L尿素、10 g/L氯化铵。用去离子水定容后加入适量的氢氧化钠溶液,将pH值调至9.0。反应液由0.75 mol/L尿素、0.75 mol/L氯化钙和0.5 g/L酵母提取物配制而成。由于加固过程中未向土样中额外添加微生物,反应液中的酵母提取物能维持土样中土著细菌的活性<sup>[15]</sup>。常规MICP加固反应液中不含酵

表 1 试验用土的主要物理参数

Table 1 Main physical parameters of the test soil

天然含水率 $w_0/\%$	最小干密度 $\rho_{dmin}/(g/cm^3)$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g/cm^3)$	平均粒径 $D_{50}/mm$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	比重 $G_s$
4.0	1.27	1.58	0.15	2.71	1.34	2.67

母提取物<sup>[16]</sup>,这也是原位激发微生物法与常规MICP加固法的主要区别。

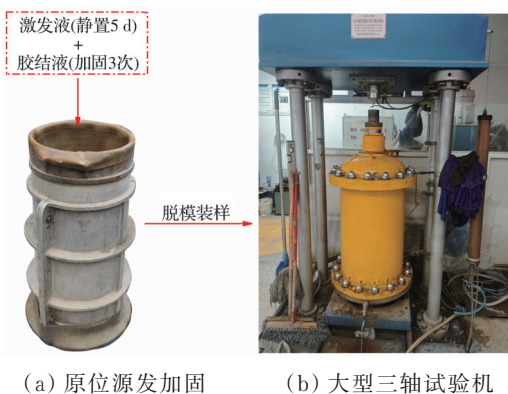
### 1.3 试样制备与原位激发微生物加固

如图1(a)所示,采用刚性模具套住橡皮膜,按照20%相对密实度,运用欠压实法<sup>[17]</sup>将土样分8层装入橡皮膜中。试样直径为300 mm、高为600 mm,刚性模具总高为800 mm。使用土工布(材质:聚酯纤维;规格:100 g;等效孔径:0.06~0.2 mm;顶破力度:5.6 kN/m<sup>2</sup>;受拉力度:820 N)覆盖试样顶部与底部,顶部的土工布防止溶液倾倒时破坏土样表面,底部的土工布防止土样随溶液流失。

采用表面渗透法对土样进行原位微生物激发与加固<sup>[8]</sup>。首先,在试样上部倒入1.5倍孔隙体积(32.422 L)的生物激发溶液,利用重力使其渗入土样孔隙。参考Cheng等<sup>[18]</sup>的研究,将试样置于自然环境中激发5 d。随后,每天向试样顶部倒入1.5倍孔隙体积的胶结溶液,在重力作用下渗透加固,共加固处理3次。

### 1.4 大型三轴固结排水剪切试验

试验采用YS30-3B型应力路径三轴剪切试验机(图1(b)),该仪器的最大轴向荷载为1 500 kN,最大周围压力为4 MPa,最大反压力为1 MPa,轴向剪切行程为125 mm。土样加固完成后,将其连同模具一同移至该试验机内,先拆模再固定。随后采用水头饱和法和法对试样进行饱和处理,当试样的B值(孔隙压力系数)达到0.9及以上时视为饱和完成。试验过程中设定有效围压为300 kPa,待试样固结完成后,以0.5 mm/min的恒定速率进行剪切试验。



(a) 原位源发加固 (b) 大型三轴试验机

图1 原位激发加固过程与大型三轴试验机

Fig. 1 Biostimulated MICP treatment process and large-scale triaxial testing machine

### 1.5 碳酸钙含量的测定

为探究原位激发微生物加固土体沿高度的均匀性,剪切试验结束后,按高度将试样分为8层,每层取3块土样用于碳酸钙含量测量,测量方法采用

酸洗法<sup>[19]</sup>。为确保原始土样中的矿物不干扰测定结果,对土样进行稀盐酸处理后发现,处理前后土样的质量无明显变化。酸洗法测定碳酸钙含量的具体步骤为:将土样烘干后称量,质量记为 $m_1$ ;将烘干土样置于烧杯中,加入稀盐酸溶解碳酸钙,直至无气泡产生;称量定量滤纸质量,记为 $m_2$ ,将烧杯中的混合物倒入滤纸过滤;过滤后将滤纸放入烘箱烘干,测量其烘干后的质量,记为 $m_3$ 。土样的碳酸钙含量 $C_c$ 由式(1)计算<sup>[19]</sup>。

$$C_c = \frac{m_1 - m_3 + m_2}{m_1} \quad (1)$$

### 1.6 微观形貌表征

试验采用美国赛默飞世尔公司制造的Quattro S型环境扫描电子显微镜(ESEM)观测原位激发微生物加固土样的微观形貌。首先取加固后的土样,用去离子水浸泡24 h,随后置于55 °C烘箱内烘干,以清洁试样表面。将清洁后的土样一面打磨平整,并用导电胶将其固定于样品台上。由于土样自身不具备导电性,测试前需对其进行溅射镀膜处理。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 碳酸钙含量

原位激发微生物加固土样的碳酸钙含量分布如图2所示。各段土样的碳酸钙含量均大于0,表明原位激发微生物加固能在整个试样内生成碳酸钙。对比不同位置的碳酸钙含量可知,试样顶部的碳酸钙含量显著高于底部,最大差值达24.5%。该分布规律与经典两相MICP注浆方法的研究结果一致<sup>[20]</sup>,这是由于重力渗透加固下碳酸钙优先在试样顶部沉积。值得注意的是,距试样顶部约35 cm处碳酸钙含量离散性较大,且距试样顶部30 cm以内土样的碳酸钙含量均在21%以上,此后快速下降,表明采用表面渗透法进行原位激发微生物加固时,在距表面30 cm范围内具有良好的加固效果。

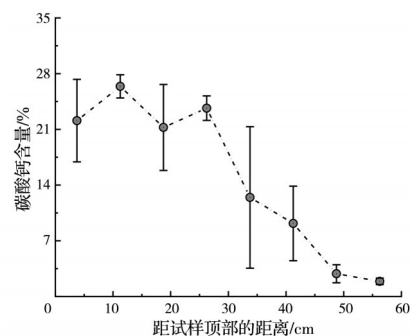


图2 原位激发微生物加固土样的碳酸钙含量

Fig. 2 Calcium carbonate content of biostimulated MICP-treated soil specimen

## 2.2 应力-应变曲线

在 300 kPa 有效围压下,原位激发微生物加固前后土样的偏应力与轴向应变关系如图 3 所示。该曲线形态与方祥位等<sup>[21]</sup>使用 MICP 加固珊瑚砂得到的三轴试验曲线相似:随着轴向应变的增大,两组试样的偏应力不断增大,具有明显的应变硬化特征。经原位激发微生物加固后,土样的初始刚度与峰值强度显著增大,在轴向应变为 5.26% 时,两组试样的偏应力差值最大,约 440 kPa,表明原位激发微生物加固能够显著增加土体的刚度和剪切强度。

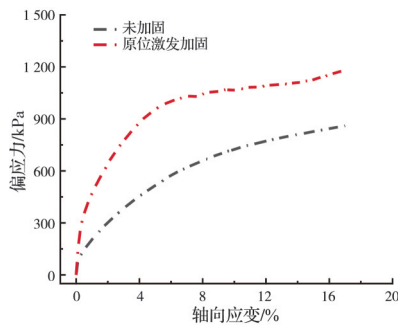


图 3 原位激发微生物加固前后土样的偏应力变化图

Fig. 3 Deviatoric stress variation of soil specimens before and after biostimulated MICP treatment

## 2.3 体积应变

在 300 kPa 有效围压下,原位激发微生物加固前后土样的体积应变与轴向应变关系如图 4 所示,试验中规定体积应变为正表示试样剪缩,为负表示试样剪胀。由图 4 可知,随着轴向应变的增大,两个试样的体积应变均为正,且持续增大,表明试样在剪切过程中体积不断减小,均呈剪切收缩特征。对比加固与未加固试样的体积应变可知,加固后试样的体积应变显著小于未加固试样。当轴向应变达到 17% 时,加固后试样的体积应变较未加固时减少了 2.93%。该变化规律与 MICP 加固砂土的变化趋势一致,这可能是由颗粒接触处的局部膨胀及颗粒表面粗糙度的增加所致<sup>[22]</sup>。然而,经原位激发微生物加固后的试样并未表现出剪胀行为,这可能是由于试样破坏主要发生在底部加固效果较弱的区域。总体而言,原位激发加固生成的碳酸钙填充了土体部分孔隙,使土体结构更加致密。这不仅降低了土体的体积压缩性,还提高了土体的刚度与剪切强度。

## 2.4 割线模量

土的割线模量是反映土体工程特性的重要指标,其定义为土体法向偏应力与对应轴向应变之比( $E_s = q/\epsilon_a$ )。在 300 kPa 的有效围压下,原位激发微生物加固前后土样的割线模量与轴向应变关系如

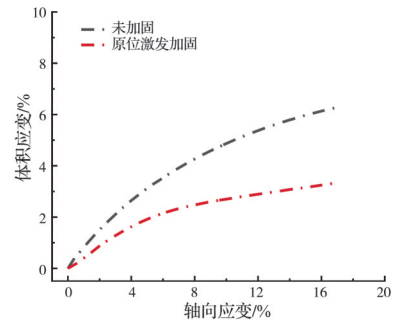


图 4 原位激发微生物加固前后土样的体积应变变化图

Fig. 4 Volumetric strain variation of soil specimens before and after biostimulated MICP treatment

图 5 所示。随着轴向应变的增大,两个试样的割线模量均呈下降趋势,与 Liu 等<sup>[23]</sup>针对 MICP 加固钙质砂开展的三轴排水试验结果一致。对比加固前后土体的割线模量可知,加固后试样的割线模量高于未加固试样,表明原位激发微生物加固能有效提高土体的刚度,增强土体的抗变形能力。原位激发微生物加固能使土体颗粒间产生胶结作用,使加固后试样的初始割线模量较未加固试样提升了 24.84%。

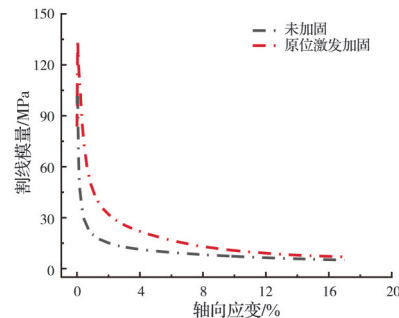


图 5 原位激发微生物加固前后土样的割线模量变化图

Fig. 5 Secant modulus variation of soil specimens before and after biostimulated MICP treatment

## 2.5 破坏模式

在 300 kPa 有效围压下,原位激发微生物加固前后土样的破坏模式如图 6 所示。尽管两个试样在剪切过程中均表现为剪缩特征,但其破坏模式存在显著差异。在较低相对密实度下,未加固土样在剪切过程中发生土颗粒压密,使土样呈现整体轴向压缩的破坏特征,并导致橡皮膜向外鼓出(图 6(a))。加固试样中存在碳酸钙沉积不均匀现象,主要表现为试样顶部较为密实、底部较为松散(图 6(c))。碳酸钙的不均匀分布使得试样在剪切过程中易在底部发生破坏,并形成明显的剪切带(图 6(b))。对比加固前后土样的破坏模式可知,加固前土样的抗剪强度较低,难以承受较大的剪切应力,因而发生鼓胀破坏;而加固后土样的顶部碳酸钙含量较高,整体性较强,不易被压缩,当应力传递至碳酸钙含量

较低的底部区域时,试样发生剪切破坏。

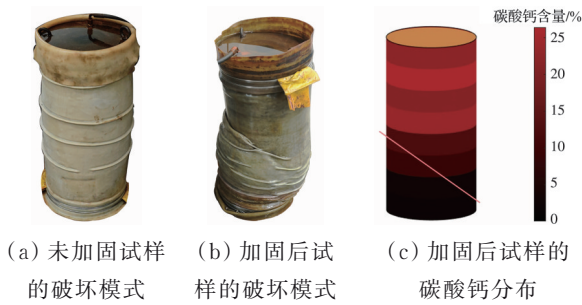


图6 原位激发微生物加固前后土样的破坏模式图  
Fig. 6 Failure mode of soil specimens before and after biostimulated MICP treatment

## 2.6 微观机理分析

原位激发微生物加固土样的表面微观形态如图7所示。由图7可知,碳酸钙以菱面体形态均匀地分布于土颗粒之间,该现象与Fan等<sup>[9]</sup>的观察结果一致。碳酸钙在土颗粒孔隙内的沉积会使土样更为致密,降低土样孔隙率,进而使其在三轴试验中的体积应变显著减小。此外,由图7可知,碳酸钙不仅沉积于土颗粒孔隙内,还在土颗粒表面以及土颗粒接触点处沉积,分别形成填充、涂层和胶结3种沉积模式<sup>[24]</sup>。这些沉积模式能提高土颗粒间的摩擦力与胶结力,使土样在三轴试验中的抗剪强度与刚度显著提升。

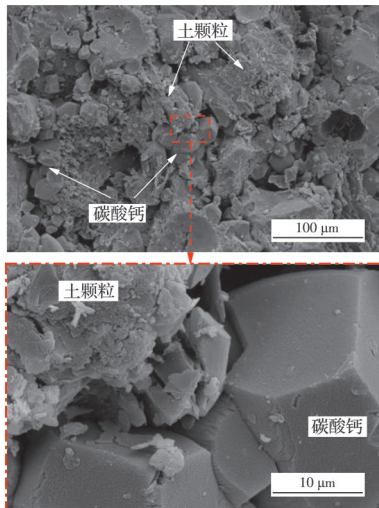


图7 原位激发微生物加固土样的SEM图  
Fig. 7 SEM images of the soil specimen after biostimulated MICP treatment

## 2.7 讨论与展望

相较于常规MICP方法,原位激发微生物加固技术省去了细菌培养、运输与注入环节,大幅降低了加固成本,具有良好的应用潜力。采用表面渗透法进行原位激发加固能在30 cm深度范围内取得良好的加固效果,显著提升土体强度;但30 cm深度以

下的土样仍易在外部荷载作用下发生剪切破坏。室内小尺寸三轴试验通常仅能显示浅层加固土的特性(如剪胀性),尽管试样同样表现出胶结分布不均匀性<sup>[25]</sup>,但不如大三轴试验中的明显,表明原位激发微生物加固引发的土体不均匀性仍是限制该技术应用难题,未有效加固的底层土在工程中易引起路基不均匀沉降、边坡滑坡等灾害。在后续研究中,可通过改进原位激发溶液配方、优化加固方法等途径解决当前该技术存在的不均匀性问题。同时,应进一步基于原位激发微生物加固技术开展更大尺度的模型试验或现场试验研究,为该技术的实际应用提供参考。

## 3 结论

采用表面渗透法对土体进行原位激发微生物加固,通过大型三轴固结排水试验探究加固前后土体的剪切特性,分析试样中碳酸钙的分布规律,得到如下主要结论:

1)原位激发微生物加固能通过碳酸钙沉积来提升土体的整体性。加固后土样中的碳酸钙含量随高度的降低而减小,该方法对距试样表面30 cm范围内的土体加固效果显著,碳酸钙含量可达21%以上。

2)原位激发微生物加固能填充土体孔隙,改善其力学特性。加固后土体的抗剪强度显著高于未加固土体,这主要是由于微生物加固在土体内部形成了有效胶结结构,减少了孔隙体积,使加固后土样的体积应变降低2.93%,初始割线模量提高24.84%。

3)原位激发微生物加固过程中主要生成菱面体形态的碳酸钙,其沉积于土颗粒表面、土颗粒接触点以及土颗粒孔隙内,降低土样孔隙率,增强土颗粒间的摩擦力与胶结力,从而显著提高土样的抗剪强度和刚度。

## 参考文献

- [1] 刘汉龙, 赵常, 肖杨. 微生物矿化反应原理、沉积与破坏机制及理论: 研究进展与挑战[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7): 1347-1358.  
Liu H L, Zhao C, Xiao Y. Reaction principles, deposition and failure mechanisms and theories of biomineralization: Progress and challenges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1347-1358. (in Chinese)
- [2] 张茜, 叶为民, 刘樟荣, 等. 基于生物诱导碳酸钙沉淀的土体固化研究进展[J]. 岩土力学, 2022, 43(2):

- 345-357.  
Zhang Q, Ye W M, Liu Z R, et al. Advances in soil cementation by biologically induced calcium carbonate precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2): 345-357. (in Chinese)
- [3] 何想, 刘汉龙, 韩飞, 等. 微生物矿化沉积时空演化的微流控芯片试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(10): 1861-1869.  
He X, Liu H L, Han F, et al. Spatiotemporal evolution of microbial-induced calcium carbonate precipitation based on microfluidics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(10): 1861-1869. (in Chinese)
- [4] Xiao Y, Xiao W T, Wu H R, et al. Fracture of interparticle MICP bonds under compression[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(3): 04022316.
- [5] 马国梁, 何想, 路桦铭, 等. 高岭土微粒固载成核微生物固化粗砂强度[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(2): 290-299.  
Ma G L, He X, Lu H M, et al. Strength of biocemented coarse sand with Kaolin micro-particle improved nucleation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(2): 290-299. (in Chinese)
- [6] 史金权, 王磊, 张轩铭, 等. 微生物加固钙质砂地基电阻率特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(2): 244-253.  
Shi J Q, Wang L, Zhang X M, et al. Experimental study on electricity resistivity of MICP-treated calcareous sand foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(2): 244-253. (in Chinese)
- [7] 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]. *Journal of Ground Improvement*, 2019, 1(1): 26-31. (in Chinese)
- [8] Cheng L, Cord-Ruwisch R. Upscaling effects of soil improvement by microbially induced calcite precipitation by surface percolation[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2014, 31(5): 396-406.
- [9] Fan W J, Xiao Y, Cao B F, et al. Comparison of bioaugmentation and biostimulation approaches for biocementation in soil column experiments[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 82: 108335.
- [10] Graddy C M R, Gomez M G, Dejong J T, et al. Native bacterial community convergence in augmented and stimulated ureolytic MICP biocementation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(15): 10784-10793.
- [11] Graddy C M R, Gomez M G, Kline L M, et al. Diversity of sporosarcina-like bacterial strains obtained from meter-scale augmented and stimulated biocementation experiments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(7): 3997-4005.
- [12] 王逸杰, 蒋宁俊. 原位激发微生物成矿加固钙质砂的剪切与压缩特性研究[J]. *高校地质学报*, 2021, 27(6): 662-669.  
Wang Y J, Jiang N J. Direct shear and compressibility behavior of bio-stimulated MICP treated calcareous sand [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, 27(6): 662-669. (in Chinese)
- [13] 张宇, 张庆, 王逸杰, 等. 原位激发微生物矿化处理铅污染土的工程特性与环境安全性研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(11): 2352-2360.  
Zhang Y, Zhang Q, Wang Y J, et al. Engineering properties and environmental safety of biostimulated MICP-treated lead-contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(11): 2352-2360. (in Chinese)
- [14] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].  
GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. (in Chinese)
- [15] Gomez M G, Anderson C M, Graddy C M R, et al. Large-scale comparison of bioaugmentation and biostimulation approaches for biocementation of sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(5): 04016124.
- [16] 张锦程, 李俊, 肖鹏, 等. MICP加固砂土方法对比研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(6): 151-157.  
Zhang J C, Li J, Xiao P, et al. Comparative study on MICP-treatment schemes for sands[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(6): 151-157. (in Chinese)
- [17] Ladd R S. Specimen preparation and liquefaction of sands [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1974, 100(10): 1180-1184.
- [18] Cheng L, Shahin M A, Cord-Ruwisch R. Surface percolation for soil improvement by biocementation utilizing in situ enriched indigenous aerobic and anaerobic ureolytic soil microorganisms[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2017, 34(6): 546-556.
- [19] Ma G L, He X, Jiang X, et al. Strength and permeability of bentonite-assisted biocemented coarse sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021, 58(7): 969-981.
- [20] 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.

- [21] 方祥位, 李晶鑫, 李捷, 等. 珊瑚砂微生物固化体三轴压缩试验及损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊1): 1-8.  
Fang X W, Li J X, Li J, et al. Study of triaxial compression test and damage constitutive model of biocemented coral sand columns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup 1): 1-8. (in Chinese)
- [22] Nafisi A, Montoya B M, Evans T M. Shear strength envelopes of biocemented sands with varying particle size and cementation level[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(3): 04020002.
- [23] 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.
- [24] 刘汉龙. 生物建造体系与展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(4): 1-22.  
Liu H L. Biogenic construction: system and perspectives [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(4): 1-22. (in Chinese)
- [25] Wang Y J, Chen W B, Yin J H, et al. Role of biochar in drained shear strength enhancement and ammonium removal of biostimulated MICP-treated calcareous sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2024, 150(2): 04023140.

(编辑 朱备)