

微生物注浆地基处理技术研究进展

吴创周¹, 楚 剑², 成 亮³, 何 稼⁴

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 310058; 2. 南洋理工大学 土木与环境工程学院, 新加坡 639798;
3. 江苏大学 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 4. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要:生物注浆是近年来兴起的一种新的地基处理方法,微生物注浆技术通过微生物诱导产生碳酸钙沉积(MICP)胶结岩土材料,再现自然界缓慢长期的造岩过程,实现这一过程的快速和工程化。生物注浆在岩土体的孔隙或裂隙进行渗流控制,加注流态的处理材料,包括微生物和反应物,在孔隙或裂隙中生成固化物,增强土体强度。相比于传统注浆材料,微生物注浆具有环境友好、流动性好和机械设备依赖低等优点。因此基于 MICP 微生物注浆地基处理技术在岩土工程具有较好的应用前景。为了促进该技术在地基处理工程中的推广和应用,本文对近几年基于 MICP 技术地基处理研究进展进行了介绍和总结。

关键词: 微生物注浆; 地基处理; 封堵

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)03-181-06

Advances of ground improvement with MICP-based biogrouting

WU Chuang-zhou¹, CHU Jian², CHENG Liang³, HE Jia⁴

(1. Ocean college, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, 50 Nanyang Avenue, 639798 Singapore;

3. School of Environment and safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

4. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Biogrout is a new ground improvement method based on microbially induced precipitation of calcium carbonate (MICP), which reproducing the rock-making process that takes decades or even hundreds of years in nature. Biogrouting can enhance the strength of the soil, and control the seepage by filling the pores or fissures of the rock and soil. Compared with traditional grouting materials, biogrout show advantages in many aspects such as environmental friendliness, good fluidity and low dependence on mechanical equipment. Therefore, the ground treatment technology based on MICP has good application prospects in geotechnical engineering. In order to promote the promotion and application of this technology in foundation treatment engineering, this paper introduces and summarizes the research progress of foundation treatment based on MICP technology in recent years.

Keywords: biogrouting; ground improvement; sealing

1 微生物注浆 (MICP)

微生物岩土技术主要是指利用自然界广泛存在的微生物及其自身的代谢功能与环境中的物质发生一系列生物化学反应,进而形成碳酸盐、硫酸盐等矿物沉淀,从而改善土体的物理力学及工程性质^[1-5]。微生物岩土技术作为岩土工程领域新的分支,逐渐成为一个热门研究方向,近年来,众多学者开展了相关的研究。其中,基于微生物诱导尿素水解

生成碳酸盐沉淀的 MICP 技术 (Microbial Induced Carbonate Precipitation) (图 1) 是目前研究最多、应用最广泛的生物矿化技术^[6-14], 基于 MICP 技术微生物注浆加固岩土材料的生物化学反应可以简化如下:



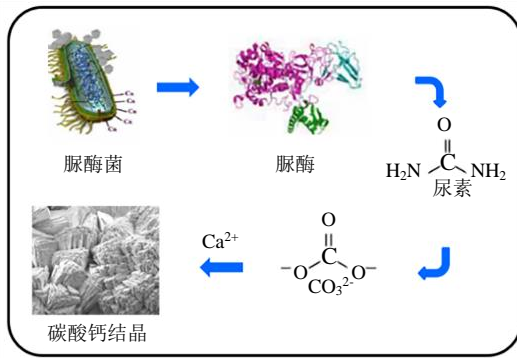


图1 基于 MICP 的微生物矿化机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microbial mineralization mechanism based on MICP (Microbial Induced Carbonate Precipitation)

2 工程应用

2.1 砂性土地基加固

近十几年来,国内外众多学者开展了 MICP 技术加固砂土的室内试验研究。结果显示,加固砂土的抗压强度和剪切波速与碳酸钙含量存在明显的定量关系。通过 MICP 技术,可以有效提高砂土的工程特性^[11-16]。

在模型试验方面, Van Paassen 等^[2,15]开展了室外大尺寸 100 m³ 的 MICP 加固砂土模型试验(图 2)。试验结果表明,细菌可以在砂土地基里传输 5 m 以上的距离,且仍保持一定脲酶活性诱导矿化作用;加固后剪切波速从 100 m/s 增加到最大 400 m/s;静力触探在井口处最大可达 5 MPa;无侧限强度最大达 12.6 MPa。

Wu 等^[17]利用 MICP 加固砂石混合材料的大型室内模型试验,成功将砂子和花岗岩石块牢固胶结在一起,并且降低了砂石混合材料的渗透性(图 3)。

在复合浆液的研究方面,范存彬^[18]研究了添加碳基材料的微生浆加固砂土试验研究,试验结论显示:固菌率、碳酸钙含量和试件的力学性能随着活性炭纤维材料掺量的增加而逐渐提高。郑俊杰等^[19]开展了含玄武岩纤维加筋微生物固化砂土力学特性试验,结果表明:玄武岩纤维加筋能够改善微生物固化砂土的强度和韧性,并得到了最优纤维掺量为 0.3%~0.5%。Cheng 等^[11]利用原位诱导土著脲酶微生物进行了砂土注浆试验,该方法可以有效避免在实际工程应用中往原位土壤引入外源菌种所带来的生物学风险,同时提高微生物矿化工艺的效率和经济性。

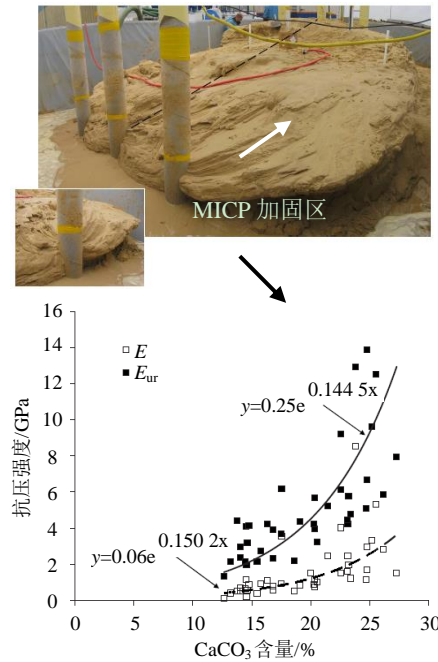
图2 MICP 加固砂土 100 m³ 模型试验

Fig. 2 Model test of sand reinforced by MICP with a volume of 100 m³

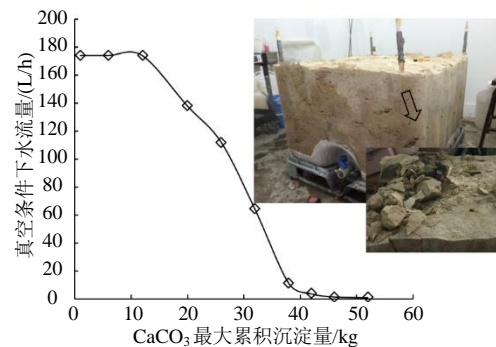
图3 MICP 加固碎石砂土混合材料 1 m³ 模型试验

Fig. 3 Model test of sand and crushed stone mixture reinforced by MICP with a volume of 1 m³

在提高注浆处理效率方面, Cheng 等^[20]和 Wu 等^[14]提出了基于 pH 调节方法的一相注微生物注浆方法。相对传统的两相注方法,新方法避免了传统两相注浆所常见的胶结强度分布不均的难题,降低了注浆次数,同时改善了生物注浆在裂隙中分布的均匀性和酸钙空间分布特征(图 4)。

Wu 等^[14]通过试验发现, pH 调节注浆方法对细颗粒土加固效果具有较明显的提升作用,而对于粗颗粒土来说效果并不明显(图 5)。

2.2 地基抗液化

此外,针对微生物注浆技术 MICP 加固地基的抗液化性能方面,部分学者也展开了室内实验研究。Burbank 等^[21]开展了循环三轴试验,发现 MICP 加

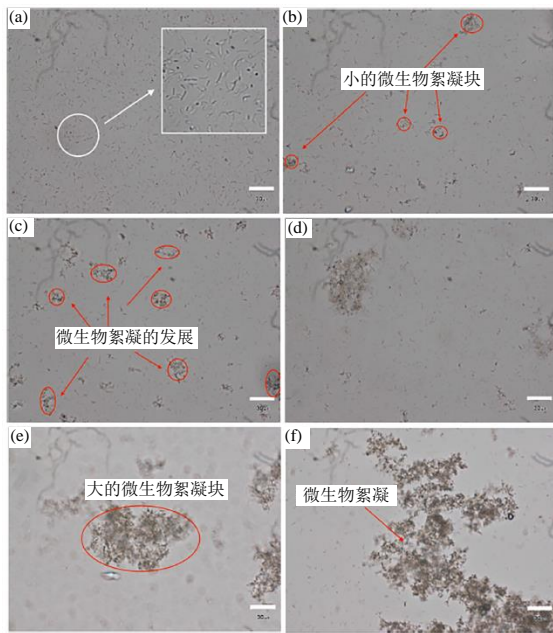


图 4 溶液 pH 对细菌空间分布的影响

Fig. 4 Effect of pH on the spatial distribution of bacteria

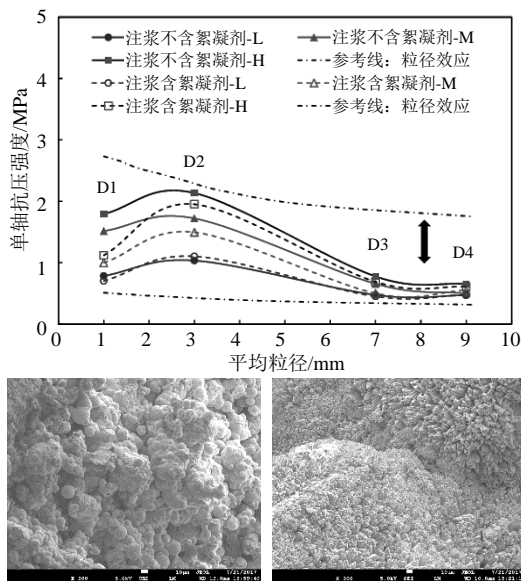


图 5 不同注浆方法对胶结效果及沉积碳酸钙形状的影响

Fig. 5 Effect of different grouting methods on cementation effect and deposited calcium carbonate shape

固以后的石英砂强度显著提高。程晓辉等^[22]利用小型振动台和循环三轴验证了 MICP 可以显著提高砂地基的抗液化性能。Montoya 等^[23]对场地砂土进行了 MICP 加固, 发现随着胶结碳酸钙含量的提高, 其力学行为从“土样”变为“岩样”。动态测试的结果表明, 与未经处理的散砂相比, 经 MICP 处理的砂的耐液化性明显提高。崔明娟等^[24]对不同注浆液加固的砂样进行了动力学性能测试, 结果发现纯/混菌液注射方式能有效提高微生物固化砂土中碳酸钙晶体分布的均匀性, 从而获得碳酸钙含量

较高、动弹性模量较大及耗能能力较强的微生物固化砂土。Feng 和 Montoya^[25]通过实验研究了具有相同碳酸钙含量而碳酸钙空间分布不同的砂土试样, 发现剪切波速 (V_s) 越大的试样, 其抗液化能力越强。Xiao 等^[26]和 Liu 等^[27]通过试验进一步研究了 MICP 碳酸钙含量、相对密实度、动剪应力比等因素对 MICP 加固砂土抗液化性能的影响。试验发现, 加固后的砂土动力特性接近于密砂, MICP 加固的抗液化效果比振冲密实更有效。Darby 等^[28]使用 MICP 处理了一组饱和的渥太华砂模型。对碳酸钙的质量含量分别约为 0.8%、1.4% 和 2.2% 的模型测得的剪切波速度分别为 200 m/s、325 m/s、600 m/s。80 g 的离心振动台试验结果显示圆锥体的渗透阻力和剪切波速度对不同碳酸钙含量的敏感。渗透阻力从 2 MPa 到 5 MPa, 2 MPa 到 10 MPa, 和 2 MPa 到 18 MPa 增加。剪切波速度从 140 m/s 增加至 200 m/s, 从 140 m/s 至 325 m/s, 和 140 m/s 至 660 m/s。Wang 等^[29]通过动三轴实验发现在相同条件下, 经微生物反硝化处理的非饱和砂的抗液化能力相比饱和砂增强了一百倍, 其在动力荷载下的破坏应力状态点落在失稳线与临界状态线之间。

2.3 黏性土加固

MICP 技术除了改善无黏性土颗粒的工程特性以外, 在黏性土加固方面也有一定的作用。近年来, 部分学者也开展了相关的研究。Oliveira 等^[30]采用分层压实对多种土进行了 MICP 加固测试, 试验表面 MICP 加固对粉土有较好的效果, 而对有机质黏土效果较差。彭劫等^[31]采用分层压力灌浆的方法对有机质黏土进行了 MICP 注浆加固测试, 试验表面采用压力多次灌浆的方法可以取得较好的效果, 试验表明灌浆加固以后, 有机质含量可降低 1%~4%, 无侧限抗压强度提高可达 370%, 渗透系数可降低约 1 个数量级。邵光辉等^[32]通过室内试验, 对采用微生物注浆方式固化吹填粉土是有效的。微生物注浆固化粉土的强度形成受其微观胶结结构与 CaCO_3 含量影响, 吹填粉土的孔隙尺寸能够与巴氏芽孢杆菌的菌体尺寸相容, 微生物注浆会显著减少吹填粉土中 10 μm 以上的孔隙。约翰等^[33]采用微生物诱导碳酸钙沉积 (MICP) 技术对黏性土进行改性处理, 以改善其水稳性与抗侵蚀能力。试验表明, 经 MICP 处理以后, 崩解指数降低 50%, 黏性土表面的水稳定性显著提高。刘士雨等^[34]开展了 MICP 修复三合土裂缝试验研究。结果表明, 当裂缝宽度为 5 mm 时, 经过 MICP 修复后试样的平均抗弯强度和抗剪强度恢复率分别为 79.9% 和 88.5%。He

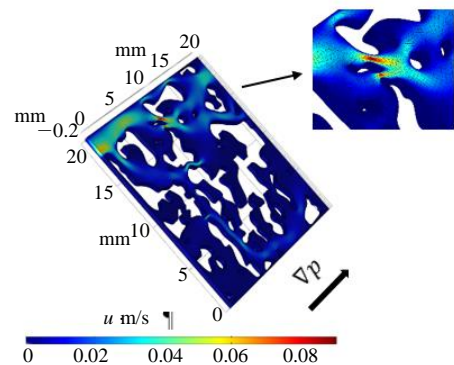
等^[35]和 Gao 等^[36]的近期研究表明,采用从细菌或植物成分(如大豆)中提取的脲酶粗酶液进行细粒土的固化处理,可以取得比用活性细菌更均匀的处理效果和更高的整体强度,这主要是和酶分子的尺寸较小、更适应在细粒土中迁移有关。

2.4 岩土防渗和封堵技术

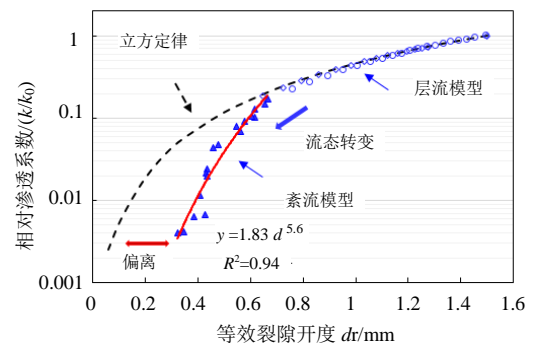
相比生物膜等其他生物技术来说,利用 MICP 技术进行微生物矿化生成的无机物沉淀具有更好的稳定性和力学性能,因此,此类生物封堵技术被认为更有潜力^[4,5,37]。在土体防渗方面,Chu 等^[38]利用 MICP 技术胶结了蓄水池的砂土表面,使砂土的渗透性降低了 3 个数量级 ($10^{-4} \sim 10^{-7}$ m/s),同时取样样品经测试发现抗弯强度为 90~256 kPa,侧壁和池底的无侧限抗压强度为 215~932 kPa。刘璐等^[39]开展了 MICP 加固沙坡模型试验。加固以后的沙坡表面形成了较厚 MICP 硬壳层。对外壳进行三轴渗透试验和无侧压缩试验,发现渗透系数降低接近 3 个数量级,无侧限抗压强度可高达 9 MPa。测试样品的碳酸钙含量占试样重量的 18% 左右。Jang 等^[40,41]对 MICP 加固砂土进行抗渗蚀性能研究。结果表面 MICP 可以明显的增加土体抗渗能力。Proto 等^[42]采用 MICP 对长砂柱进行加固和密封,试验结果表面,经 MICP 处理以后,砂柱的渗透特性降低了 2~3 个数量级。Gao 等^[35]提出了基于 MICP 进行了防渗沟渠建设的的施工方法:首先采用生物注浆加固待修建沟渠场地,然后进行开挖,最后利用生物注浆进行沟渠表面加固。结果表面,该方法有效减小砂土表面渗透系数,满足使用要求。

在裂隙封堵方面,Cuthbert 等^[43]最早进行了微生物注浆现场试验,将 MICP 裂隙封堵技术应用在了地下水污染物密封方面。Phillips 等^[44,45]将微生物注浆用来解决非常规油气开发工程中井眼附近结构缝泄漏问题,并开展了相应的现场测试试验。这些学者都采用了传统两相流方法,即先将脲酶菌(*Sporosarcina pasteurii*)和固定液分别注入到岩体裂隙以固定细菌在裂隙中,随后注入包含氯化钙和尿素的胶结液。在进行了多次的循环注浆以后,裂隙的渗透性得到了显著的降低和控制。E Mountassir 等^[46]针对考虑现场复杂水力环境因素对 MICP 裂隙封堵的影响。在试验水力条件(速度、流速和孔径)裂隙中碳酸钙沉积的影响。实验结果表明,裂隙水力条件影响碳酸钙空间分布,同时碳酸钙空间分布反过来影响了浆液的流动规律。Minto 等^[47]进行了室内大尺寸 MICP 裂隙封堵模型试验 (3.1 m^2),试

验研究了在恒定流动的条件下碳酸钙沉积的规律。实验发现,通过 3 d 连续注浆,裂隙的渗透系数降低了 3 个数量级。同时碳酸钙沉淀具有较高的黏聚力。为了确定裂隙中 MICP 结晶的空间分布和裂隙封堵效果,Wu 等^[5,14]分别研制了一维和二维的微生物注浆装置。通过试验,揭示了在恒定流动条件下(动水环境)碳酸钙在一维和二维裂隙中的沉积机制和以及空间分布特征,探讨了流速、裂隙开度、液体流态等关键因素对碳酸钙空间分布的影响规律。根据实验结果,建立了碳酸钙含量和渗透特性之间的定量关系(图 6)。



(a) MICP 封堵后裂隙渗流模型



(b) 渗透系数演化规律

图 6 基于 MICP 技术封堵裂隙的渗流模型及渗透特性演化规律

Fig. 6 Seepage model and evolution law of permeability of the cracks sealed with MICP technology

3 结论和展望

生物注浆是近年来兴起的一种新的地基处理方法。生物注浆在岩土体的孔隙或裂隙进行渗流控制,加注流态的处理材料,包括微生物和反应物,在孔隙或裂隙中生成固化物,增强土体强度。为了促进该技术在地基处理工程中的推广和应用,本文对近几年基于 MICP 技术地基处理研究进展进行了

介绍和总结, 主要从地基加固处理、地基土抗液化、黏性土和细粒土的加固、岩土体防渗等几方面, 对 MICP 技术进行了分析, 展示了 MICP 的优缺点和潜在应用可行性。

参考文献

- [1] Ivanov V, Chu J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2008, 7(2): 139-153.
- [2] Van Paassen L A, Daza C M, Staal M, et al. Potential soil reinforcement by biological denitrification[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 168-175.
- [3] DeJong J T, Soga K, Kavazanjian E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges[C]//*Bio-and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering: Géotechnique Symposium in Print 2013*. ICE Publishing, 2014: 143-157.
- [4] 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]. *土木建筑与环境工程*, 2019, 41(1): 1-14.
- [5] Wu C, Chu J, Wu S, et al. 3D characterization of microbially induced carbonate precipitation in rock fracture and the resulted permeability reduction[J]. *Engineering Geology*, 2019, 249: 23-30.
- [6] 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.
- [7] Chu J, Ivanov V, Stabnikov V, et al. Microbial method for construction of an aquaculture pond in sand[J]. *Géotechnique*, 2013, 63(10): 871-875.
- [8] Chu J, Ivanov V, Naeimi M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(2): 277-285.
- [9] Al Qabany A, Soga K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils[J]. *Géotechnique*, 2013, 6(4): 331-339.
- [10] He J, Chu J, Ivanov V. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas[C]//*Bio-and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering: Géotechnique Symposium in Print 2013*. ICE Publishing, 2014: 116-124.
- [11] Cheng L, Shahin M A, Mujah D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(1): 04016083.
- [12] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. MICP 胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(1): 38-45.
- [13] 郑俊杰, 吴超传, 宋杨, 等. MICP 胶结钙质砂的强度试验及强度离散性研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(2): 250-256.
- [14] Wu C, Chu J, Cheng L, et al. Biogrouting of aggregates using premixed injection method with or without pH adjustment[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(9): 06019008.
- [15] Van Paassen L A, Ghose R, Van Der Linden T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [16] 何稼, 楚剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(4): 643-653.
- [17] Wu S, Li B, Chu J. Large-scale model tests of biogrouting for sand and rock[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2019: 1-10.
- [18] 范存彬. 微生物联合碳基材料诱导碳酸钙沉淀加固砂土试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [19] 郑俊杰, 宋杨, 吴超传, 等. 玄武岩纤维加筋微生物固化砂力学特性试验[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(12): 73-78.
- [20] Cheng L, Shahin M A, Chu J. Soil bio-cementation using a new one-phase low-pH injection method[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(3): 615-626.
- [21] Burbank M B, Weaver T J, Green T L, et al. Precipitation of calcite by indigenous microorganisms to strengthen liquefiable soils[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2011, 28(4): 301-312.
- [22] 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.
- [23] Montoya B M, DeJong J T, Boulanger R W. Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation[C]//*Bio-and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering: Géotechnique Symposium in Print 2013*. ICE Publishing, 2014: 125-135.
- [24] 崔明娟, 郑俊杰, 赖汉江. 菌液注射方式对微生物固化砂土动力特性影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(11):

- 3173-3178.
- [25] Feng K, Montoya B M. Quantifying level of microbial-induced cementation for cyclically loaded sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(6): 06017005.
- [26] Xiao P, Liu H, Stuedlein A W, et al. Effect of relative density and biocementation on cyclic response of calcareous sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(12): 1849-1862.
- [27] Liu L, Liu H, Stuedlein A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(10): 1502-1513.
- [28] Darby K M, Hernandez G L, DeJong J T, et al. Centrifuge model testing of liquefaction mitigation via microbially induced calcite precipitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(10): 04019084.
- [29] Wang K, Chu J, Wu S, et al. Stress-strain behaviour of bio-desaturated sand under undrained monotonic and cyclic loading[J]. *Géotechnique*, 2020: 1-13.
- [30] Oliveira P J V, Freitas L D, Carmona J P S F. Effect of soil type on the enzymatic calcium carbonate precipitation process used for soil improvement[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(4): 04016263.
- [31] 彭劼, 温智力, 刘志明, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固有机质黏土的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 733-740.
- [32] 邵光辉, 尤婷, 赵志峰, 等. 微生物注浆固化粉土的微观结构与作用机理[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(2): 129-135.
- [33] 谢约翰, 唐朝生, 刘博, 等. 基于微生物诱导碳酸钙沉积技术的黏性土水稳性改良[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(8): 1438-1447.
- [34] 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.
- [35] He J, Gao Y, Gu Z, et al. Characterization of crude bacterial urease for CaCO₃ precipitation and cementation of silty sand[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(5): 04020071.
- [36] Gao Y, Tang X, Chu J, et al. Microbially induced calcite precipitation for seepage control in sandy soil[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2019, 36(4): 366-375.
- [37] Wu C, Chu J, Wu S, et al. Microbially induced calcite precipitation along a circular flow channel under a constant flow condition[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(3): 673-683.
- [38] Chu J, Stabnikov V, Ivanov V. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2012, 29(6): 544-549.
- [39] 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.
- [40] Jiang N J, Soga K. The applicability of microbially induced calcite precipitation (MICP) for internal erosion control in gravel-sand mixtures[J]. *Géotechnique*, 2017, 67(1): 42-55.
- [41] Jiang N J, Soga K, Kuo M. Microbially induced carbonate precipitation for seepage-induced internal erosion control in sand-clay mixtures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(3): 04016100.
- [42] Proto C J, DeJong J T, Nelson D C. Biomediated permeability reduction of saturated sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(12): 04016073.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Phillips A J, Eldring J J, Hiebert R, et al. Design of a meso-scale high pressure vessel for the laboratory examination of biogeochemical subsurface processes[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 126: 55-62.
- [46] E Mountassir G, Lunn R J, Moir H, et al. Hydrodynamic coupling in microbially mediated fracture mineralization: formation of self-organized groundwater flow channels[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(1): 1-16.
- [47] Minto J M, MacLachlan E, El Mountassir G, et al. Rock fracture grouting with microbially induced carbonate precipitation[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(11): 8827-8844.