

微生物加固技术研究进展

王楠, 王琼, 叶为民, 陈永贵, 许龙, 苏薇

Research progress of microbial reinforcement technology

WANG Nan, WANG Qiong, YE Weimin, CHEN Yonggui, XU Long, and SU Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究

An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology

袁波, 邵吉成, 骆嘉成, 叶宏峰 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 66-74

玄武岩封存CO₂技术方法及其进展

Research progress on key technologies of CO₂ storage in basalts

李万伦, 徐佳佳, 贾凌霄, 马冰, 陈晶 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 164-173

基于iTOUGH2的生物降解模型全局敏感性时变分析

Temporal variation of global sensitivity analysis for biodegradation model using iTOUGH2

杜建雯, 施小清, 徐红霞, 吴吉春 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 35-42

瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀试验研究

An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess

杨万里, 石玉玲, 穆鹏雪, 贾卓龙, 曹怡菡 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 117-124

生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究

Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme

董辉, 程子华, 刘禹岐, 朱宪明 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 84-94

地下水位波动带三氮迁移转化过程研究进展

Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone

刘鑫, 左锐, 王金生, 何柱锟, 李桥 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 27-36



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401013

王楠, 王琼, 叶为民, 等. 微生物加固技术研究进展 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 231-244.

WANG Nan, WANG Qiong, YE Weimin, et al. Research progress of microbial reinforcement technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 231-244.

微生物加固技术研究进展

王楠¹, 王琼¹, 叶为民¹, 陈永贵¹, 许龙², 苏薇¹

(1. 同济大学土工程学院, 上海 200092; 2. 合肥工业大学资源与环境工程学院,
安徽合肥 230009)

摘要: 生物加固是工程地质领域近年来发展起来的一个新分支, 微生物诱导碳酸钙沉淀 (microbially induced calcite precipitation, MICP) 加固技术是常用的方法之一。MICP 加固技术是借助自然界广泛存在的微生物, 利用其代谢活动诱导产生具有胶结作用和充填作用的碳酸钙沉淀, 从而达到提高土体强度、降低土体渗透性、改善土体工程性能的目的。近 20 年来, MICP 加固技术在理论研究、模型试验及现场试验方面已取得了许多重要成果。为推进对 MICP 加固技术的认识及研究, 文章基于 MICP 加固技术目前取得的研究进展, 进行了文献调研与分析, 系统介绍了 MICP 技术的加固机理及影响因素, 归纳分析了 MICP 加固技术的应用实例, 在此基础上深刻分析了 MICP 技术目前存在的问题和挑战。结果如下: (1) MICP 的加固机理是在微生物诱导矿化作用基础上产生的碳酸钙沉淀对土体的充填作用、覆膜作用和胶结作用; (2) MICP 固化效果的影响因素主要有: 菌液及胶结液的性质、pH 值、温度、土体类型、注入技术等, 以上影响因素均可以通过影响碳酸钙的形成及胶结效果来影响 MICP 的固化效果; (3) MICP 加固技术在土体加固、抗裂防渗、防风抗蚀、修复污染水土等方面展现出了巨大的潜力; (4) MICP 加固技术目前仍存在一些问題, 包括固化均匀性、土体耐久性、经济效益、环境安全与可持续性等方面, 为解决这些问题, 需要进一步综合微生物学、土力学、材料科学、环境科学等多个学科进行深入研究。相关探讨有助于加深对 MICP 加固技术的理解, 推动 MICP 加固技术在工程地质领域的发展及应用推广。

关键词: 微生物固化; 微生物诱导碳酸钙沉淀; 加固机理; 工程应用

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0231-14

Research progress of microbial reinforcement technology

WANG Nan¹, WANG Qiong¹, YE Weimin¹, CHEN Yonggui¹, XU Long², SU Wei¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Biological reinforcement is a new branch that has developed in the field of engineering geology in recent years, among which, the microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) reinforcement technology is an effective method. MICP reinforcement technology utilizes the metabolic activity of widely existing microorganisms in nature to induce the precipitation of calcium carbonate with cementing and filling effects, thereby improving the strength of soil, reducing its permeability, and enhancing its engineering performance. Over the past two decades, significant progress has been made in theoretical research, model

收稿日期: 2024-01-08; 修订日期: 2024-03-14

投稿网址: www.swdggcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509900); 国家自然科学基金项目(42172298; 42002289; 41907231); 中央高校基本科研业务费项目(22120230229)

第一作者: 王楠(1992—), 女, 博士研究生, 主要从事非饱和土工程地质及地质灾害防治研究。E-mail: wangnan@tongji.edu.cn

通讯作者: 王琼(1982—), 女, 博士, 教授, 主要从事非饱和土工程地质及地质灾害防治研究。E-mail: qiong.wang@tongji.edu.cn

experiments, and field trials of MICP reinforcement technology. To promote a deeper understanding of MICP reinforcement technology, this paper systematically introduced the reinforcement mechanism and influencing factors of microbial-induced calcium carbonate reinforcement technology based on the current research on MICP reinforcement technology. In addition, the application of MICP reinforcement technology was discussed thoroughly. The current problems and challenges of MICP technology were analyzed in depth. The results show that the strengthening mechanism of MICP is formed based on microbial-induced mineralization, which includes the filling and cementation of soil pores by calcium carbonate precipitation. The influencing factors of the solidification effect of MICP mainly are the properties of bacterial solution and cementing solution, pH, temperature, soil type, and reinforcement method, by influencing the formation of calcium carbonate and cementing effect. The MICP reinforcement technology has shown great potential in soil reinforcement, crack resistance, impermeability, wind erosion resistance, and remediation of contaminated water/soil. At present, the MICP reinforcement technology still has some problems, including solidification uniformity, soil durability, economic benefits, environmental safety, and sustainability. To solve these problems, it is necessary to further integrate microbiology, soil mechanics, materials science, environmental science, and other disciplines to conduct in-depth research, which will help deepen the understanding of MICP reinforcement technology, promote MICP technology to achieve more comprehensive development in the engineering geological field, and further promote application of this technology.

Keywords: microbial reinforcement; MICP; strengthening mechanism; engineering application

随着社会经济的快速发展,城市中大型基础设施不断增加,工程地质问题也随之发生,如边坡失稳^[1]、砂土液化^[2]、土体污染^[3]、结构侵蚀^[4]、固废处置^[5]等。针对这些问题,学者们进行了大量土体加固方面的研究。传统的治理方法包括物理加固(如夯实^[6]、预压^[7]、换填^[8]、排水^[9]等)和化学加固(如添加水泥^[10]、石灰^[11]、粉煤灰^[12]、高分子材料^[13]等)。然而,这些方法往往存在工作量大、工期长、环境友好性差、通用性低等局限性。因此,需要深入分析传统方法中存在的问题,寻找新的解决方法,以兼顾工程需求、降低成本、减少对环境的影响。

近年来,关于微生物诱导碳酸钙沉淀(microbially induced calcite precipitation, MICP)加固技术的研究在全球工程地质领域引起了广泛的关注。李俊等^[14]通过研究冻融循环对 MICP 加固土性能的影响,发现 MICP 加固技术能够有效减少雨水渗透,提高土体的抗侵蚀性和强度,从而提高边坡的稳定性。Arpajirakul 等^[15]利用 MICP 加固技术来改性黄土,发现 MICP 能够明显改善黄土的工程性质。Liu 等^[16]研究了 MICP 加固技术在古黏土墙面侵蚀控制方面的适用性,结果表明 MICP 保护层能够有效减缓古黏土墙面的风化。MICP 作为一种微生物矿化技术,与传统的物理/化学加固技术相比,具有加固效率高、通用性好、能耗低

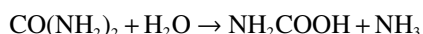
和对环境影响小的优点。此外, MICP 加固技术所使用的菌液和胶结液具有较低的黏度^[17],相较于传统注浆浆液更易在土体中渗透,也更易于处理较大厚度和较深层次的土体。

目前, MICP 加固技术在理论研究、模型试验及现场试验方面已取得了许多重要成果。为推进对 MICP 加固技术的进一步认识与研究,本文基于 MICP 加固技术目前取得的研究进展,归纳总结了目前国内外学者对 MICP 技术加固机理及影响因素的研究成果,概述了 MICP 加固技术在工程中的应用实例,同时,对当前存在的问题进行了分析,并展望了 MICP 加固技术未来的研究方向,以期推动 MICP 加固技术在工程地质领域的发展及应用。

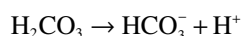
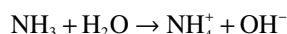
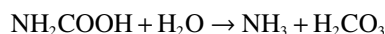
1 MICP 加固机理

自然界中存在大量的微生物,其中约 66% 的微生物均能够通过矿化作用产出碳酸钙晶体^[18]。常见的可参与矿化的微生物有产脲酶细菌、硫酸盐还原细菌、反硝化细菌等。其中产脲酶细菌具有成本低、反应机制简单、矿化效率高、反应过程可控等优点^[19]。以产脲酶细菌为例, MICP 的矿化机理是利用尿素水解产生的碱性环境诱导产生碳酸钙沉淀,其矿化过程如下。

首先,产脲酶细菌将尿素水解成氨基甲酸和氨:



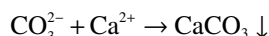
然后,氨基甲酸与水反应,分解成了氨和碳酸。一方面,产生的氨与水反应得到铵离子和氢氧根离子,提高了整个体系的 pH 值,使得整个体系产生碱性环境。另一方面,碳酸分解为水溶性的碳酸氢根离子,并释放出氢离子:



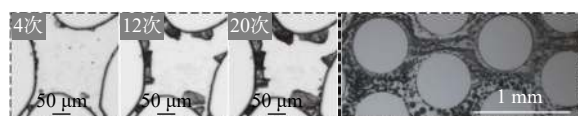
紧接着,碳酸氢根离子会与体系中的氢离子和氢氧根离子反应得到碳酸根离子和水:



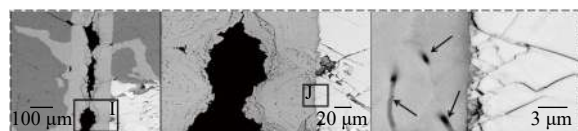
最后,伴随着钙离子的加入,带负电荷的微生物细胞将钙离子吸附聚集在细胞壁上,与产脲酶作用产生的碳酸根离子反应,生成碳酸钙晶体沉淀:



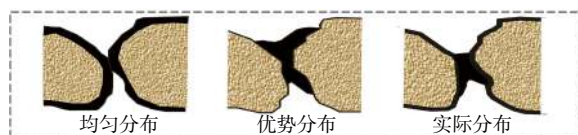
碳酸钙晶体的沉淀导致土体孔隙结构发生变化。Wang 等^[20]通过微流控技术开展了 MICP 矿化试验,结果表明随着胶结液注入次数的增加,生成碳酸钙晶体面积与孔隙面积的比值逐渐增加,见图 1(a)左。Xiao 等^[21]也通过该技术探究了 MICP 动态矿化过程,表征了碳酸钙晶体在多孔介质中的沉淀特征,见图 1(a)右。此外,Tobler 等^[22]通过对花岗岩预制裂隙进行 MICP 注浆修复,发现经 MICP 技术处理后的



(a) 孔隙结构中碳酸钙晶体填充特征



(b) 裂隙结构中碳酸钙晶体填充特征



(c) 碳酸钙晶体在孔隙中的分布方式

图 1 碳酸钙晶体填充胶结模式图^[20-22]

Fig. 1 Diagram of calcium carbonate crystal filling and cementing mode^[20-22]

试样裂隙空间减少了 67%。进一步研究表明,在应用 MICP 技术修复裂隙的过程中,碳酸钙晶体首先在裂隙表面形成黏结层,然后通过碳酸钙晶体持续生长逐渐桥接完成修复,见图 1(b)。MICP 技术通过生成的碳酸钙沉淀,填充了土体的孔隙,减小了孔隙度,密实了土体。

碳酸钙晶体的空间分布直接决定了 MICP 加固技术的有效性。碳酸钙晶体在孔隙中的分布如图 1(c)所示,理论上碳酸钙晶体在土颗粒间可能呈等厚度沉淀的均匀分布模式,理想状态下有可能呈现只在颗粒接触处沉淀的优势分布模式,而实际上碳酸钙晶体沉淀是介于均匀分布和优势分布之间的状态:既有覆膜包裹,也在颗粒接触处沉积胶结。这是由微生物的运动特点以及颗粒间孔喉对碳酸钙的过滤作用决定的^[23]。MICP 的加固机理实际是在微生物诱导矿化作用基础上产生的碳酸钙沉淀对土体的填充作用、覆膜作用和胶结作用。

2 MICP 加固效果的影响因素

MICP 加固技术受到多种因素的制约,这些因素直接影响了 MICP 固化效果。影响 MICP 固化效果的因素主要有:菌液及胶结液的性质、pH 值、温度、土体类型、固化方法等,以上影响因素均可以通过影响碳酸钙晶体的沉淀量、晶体形貌、分布均匀性及胶结特性来影响加固土体工程性质。

2.1 菌液及胶结液的性质

菌液的性质涉及到细菌的类型和浓度等方面。可以产生脲酶的微生物主要包括球形芽孢杆菌、巴氏芽孢八叠球菌、巨大芽孢杆菌、迟缓芽孢杆菌和巴氏芽孢杆菌等^[24-25]。在相同条件下,使用不同种类的菌株尿素水解速率会有差异,进而导致在一定时间内的碳酸钙产出量不同。在 MICP 加固土体方面,巴氏芽孢杆菌被认为是最具有潜力的尿素水解细菌,具有产酶能力高、比表面积高、环境适应性强等优点^[26-27]。此外,细菌浓度对 MICP 固化效果也具有重要影响。Okwadha 等^[28]的研究结果表明,细菌浓度与尿素分解速率、碳酸钙生成量分别呈正相关。多数研究认为,菌液浓度增大,碳酸钙生成量增加,固化效果显著提升^[29-30]。然而,高浓度的菌液也可能会导致有限的注/渗入距离,从而影响加固土体的均匀性,进而导致加固效果不显著^[31]。此外,菌液浓度还对碳酸钙晶体大小及形态具有调控作用。成亮等^[32]研究了细菌浓度与碳酸钙形貌的联系。发现在低细菌浓度下,碳酸钙

晶体尺寸较大且呈菱面体或长方体,而在高细菌浓度下,碳酸钙晶体尺寸较小且呈球形(图 2)。Wang 等^[33]进一步研究发现,在低细菌浓度下有助于在早期便形成稳定的碳酸钙晶体(方解石),但需要较长的沉淀时间;而在高细菌浓度下形成的碳酸钙晶体会很快形成不稳定的无定形碳酸钙,再由不稳定状态缓慢过渡至稳定状态,即遵循无定形碳酸钙—球霏石—文石—方解石序列。因此,可以根据细菌浓度与碳酸钙晶体产量及性质的相关性,对不同工况进行相应的 MICP 加固设计。

胶结液的性质包括胶结液成分和浓度等方面,直接影响着碳酸钙晶体的生成过程。胶结液的基本成分是尿素- Ca^{2+} 的混合液。胶结液中钙盐的类型影响着碳酸钙晶体的类型和形态,从而影响固化效果(图 3)。在室内试验研究中,通常钙源有氯化钙、乳酸钙、醋

酸钙、硝酸钙等。Zhang 等^[34]发现不同的钙盐可以诱导产生不同大小的晶体,氯化钙处理后形成的碳酸钙晶体类型为表面光滑的六面体方解石,硝酸钙处理后形成的碳酸钙晶体类型为表面粗糙的正六面体方解石,而醋酸钙处理后形成的碳酸钙晶体类型主要是针状文石。Gorospe 等^[35]研究了氯化钙、醋酸钙、乳酸钙和葡萄糖酸钙为钙源的 MICP 成矿效果,结果表明,使用氯化钙作为钙源时,形成的碳酸钙晶体形貌与 Zhang 等^[34]的研究结果相一致。当以醋酸钙为钙源时,碳酸钙晶体为片状球霏石,而当以乳酸钙和葡萄糖酸钙为钙源时,生成的碳酸钙晶体为球状球霏石。在一定条件下,以氯化钙为钙源的固化试样稳定性较高,因此也通常被认为是 MICP 的最佳钙源^[36-37]。此外,胶结液的浓度也影响着碳酸钙晶体的形成,进而对加固土体的工程性质产生影响。Al Qabany 等^[38]使用了 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 mol/L 4 个浓度的尿素-氯化钙混合溶液固化砂样,探究了不同胶结液浓度影响下的固结砂样强度及渗透特征,结果表明使用低浓度胶结液加固的土样具有更高的强度,另外,使用高浓度胶结液加固的土样,其渗透性仅在试验前期能快速降低,相较之下使用低浓度胶结液加固的土样渗透性降低速率更均匀,这也与 Soon 等^[39]的研究结果相一致。Mujah 等^[40]发现,较低的胶结液浓度(0.25 mol/L)和较高的细菌浓度配比,或较高的胶结液浓度(0.5 mol/L 或 1 mol/L)和较低的细菌浓度配比,对土体强度的影响更大。因此,选择合适的胶结液浓度及胶结液/菌液的配比对 MICP 固化效果有重要影响。

2.2 pH 和温度

以 pH、温度为代表的环境因素对细菌的生命活动、碳酸钙沉淀及胶结过程具有重要影响。把 pH 值设定在合适范围内,可以有效地提高脲酶活性,促进尿素水解反应。Yi 等^[41]研究发现,在 pH 值为 7~9 时,巴氏芽孢杆菌脲酶的活性随着 pH 值的升高而增大,脲酶呈高活性,但在 $\text{pH} \geq 9$ 时,脲酶活性下降。Zheng 等^[42]的研究表明,初始 pH 值为 9~10 时,细菌生长良好,当 pH 值达到 13 时,细菌几乎不能生长。Lai 等^[43]探究初始 pH 值为 4~8 时, MICP 固化砂柱中碳酸钙晶体的沉积及分布情况,结果表明当 pH 值为 4 时,不会发生尿素水解;当 pH 值控制在 4~7 时, pH 值对碳酸钙产量及纵向的分布情况影响不大(图 4)。pH 值的变化还会对碳酸钙的沉淀量产生影响。袁亮^[44]的研究发现,当初始 pH 值为 8.5 时,碳酸钙晶体的生成效率较高。Cheng 等^[45]研究了 pH 值在中性、酸性、碱

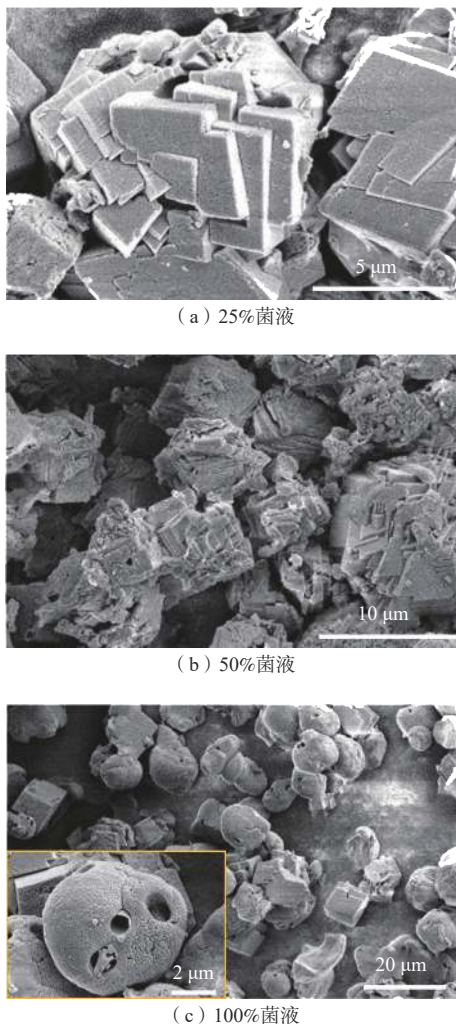


图 2 不同菌液浓度下碳酸钙晶体的形貌特征^[32]

Fig. 2 Morphological characteristics of calcium carbonate crystals under different bacterial solution concentrations^[32]

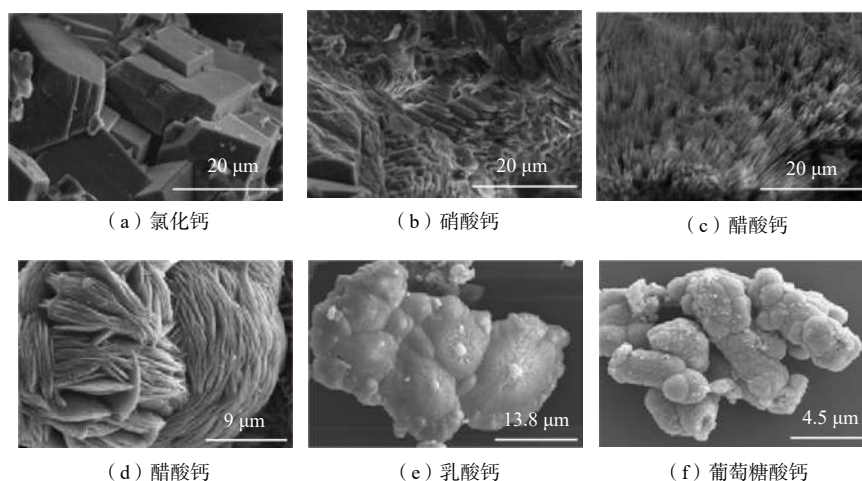


图 3 不同钙源作用下碳酸钙晶体的形貌特征^[34-35]

Fig. 3 Morphological characteristics of calcium carbonate crystals under the influence of different calcium sources^[34-35]

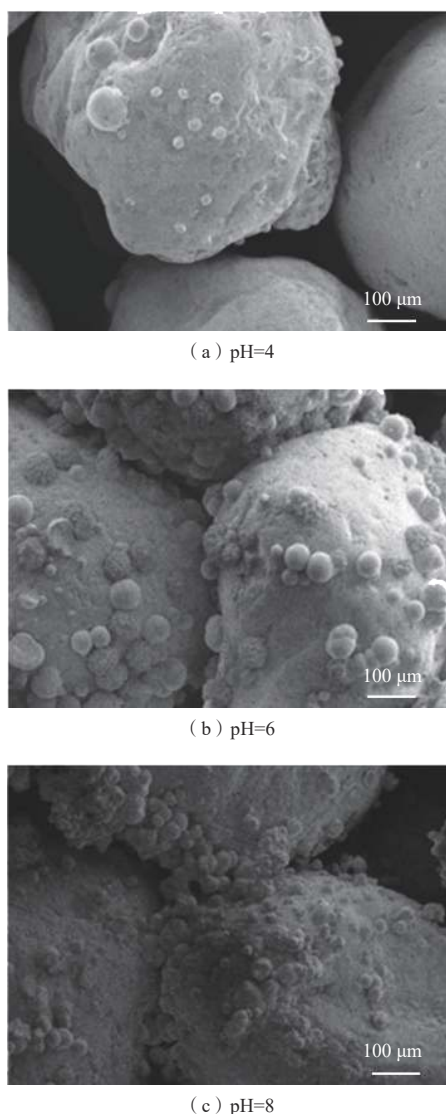


图 4 不同初始 pH 值下碳酸钙晶体的形貌特征^[43]

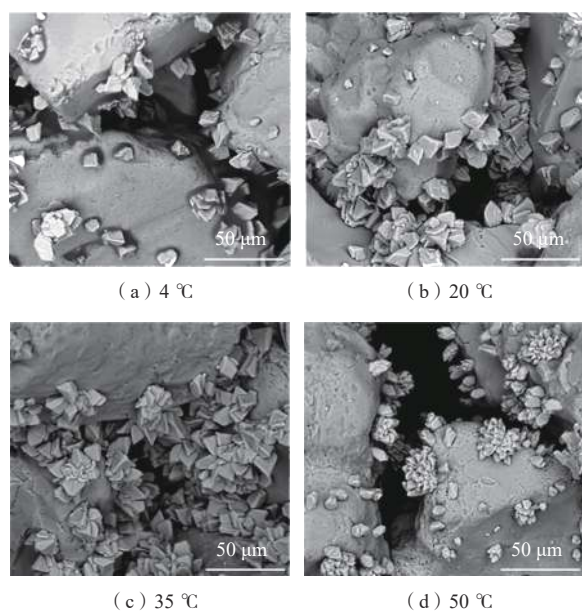
Fig. 4 Morphological characteristics of calcium carbonate crystals under different initial pH conditions^[43]

性条件下形成的固化样中碳酸钙生成量及无侧限抗压强度特征,结果发现相比于中性条件下,酸性和碱性条件下生成的固化样虽具有较高的碳酸钙生成量,但强度性能低,固化效果差。考虑常用的产脲细菌适宜在碱性环境中生长, MICP 加固技术最佳 pH 值应控制在 7~9 之间的偏碱性环境。

温度也是影响 MICP 加固效果的关键因素之一。适宜的温度有助于提高微生物的代谢和脲酶的活性,从而促进碳酸钙的形成。Sun 等^[46]研究了温度在 15~30 °C 范围下巴氏芽孢杆菌和巨大芽孢杆菌对碳酸钙生长方式、酶活性及沉淀速率的影响,研究表明温度升高会促进细菌生长,提高脲酶活性、增大碳酸钙沉淀率。彭劫等^[47]对 10~25 °C 环境下 MICP 加固效果进行了研究,结果发现温度越高,加固土体强度越高,渗透性越低。Wang 等^[48]探究了在 4, 20, 35, 50 °C 条件下 MICP 的加固效果,结果表明从 4 °C 升高到 35 °C 时,碳酸钙晶体产出量及尺寸逐渐增加,但在 50 °C 时,碳酸钙晶体产出量及尺寸显著下降。此外,在 35 °C 条件下处理的样品的峰值强度和残余强度最高,其次是 20 °C,而较低和较高温度下处理的样品强度较低(图 5)。Cheng 等^[45]在 25, 50 °C 2 个温度条件下进行了 MICP 加固试验,结果表明 25 °C 下的固化试样具有更高的无侧限抗压强度值。综上所述, MICP 加固技术最适宜的温度范围应控制在 20~35 °C 之间,这个范围接近自然气候的温度范围,也显示了 MICP 在自然环境工程中应用的巨大潜力。

2.3 土的性质

土的性质是影响 MICP 加固效果的关键因素。MICP 加固过程中需要考虑土的性质,特别是土颗粒粒径、

图 5 不同温度条件下碳酸钙晶体的形貌特征^[48]Fig. 5 Morphological characteristics of calcium carbonate crystals under different temperature conditions^[48]

分布、相对密度、饱和度等因素。Rebata-Landa^[49]使用 MICP 方法对 11 种不同颗粒粒径的土进行了固化试验,研究了碳酸钙产出量随颗粒粒径的变化规律,结果表明在粒径约为 100 μm 的细砂样品中,产生了碳酸钙沉淀量的最高峰值,而高岭土、粗砂以及砾石的样品出现了未固结或固结效果较差的现象(图 6)。Liang 等^[50]对 4 种不同级配的砂进行了 MICP 固化试验,探究了不同级配砂样固化后的力学性能,结果显示级配良好的砂样具有较高的抗压强度和较低的渗透系数,在碳酸钙用量相同的情况下,细砂的单轴抗压强度高于粗砂。研究表明细菌直径约 0.5 ~ 3 μm ,过小的土颗粒会限制细菌的自由迁移,导致孔隙堵塞,

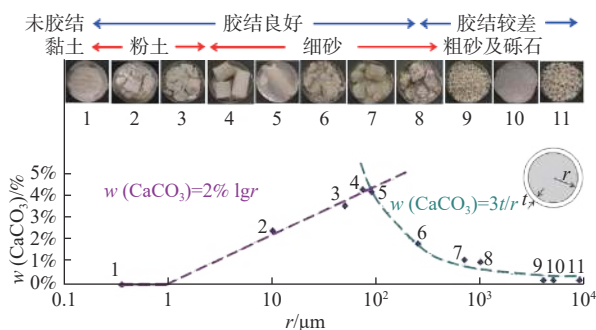


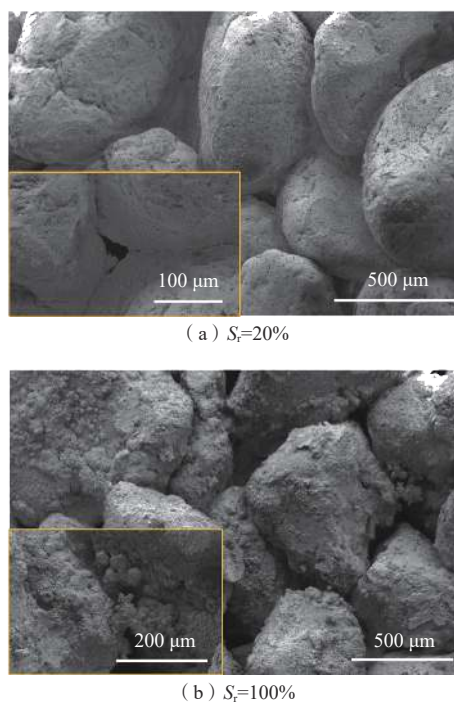
图 6 土颗粒粒径与碳酸钙晶体产出量关系(据文献[49]修改)

Fig. 6 Relationship between soil particle size and the production of calcium carbonate crystals (modified after Ref.[49])

注: t ——碳酸钙沉淀厚度/ μm ; r ——土颗粒粒径/ μm ;
 $w(\text{CaCO}_3)$ ——碳酸钙产出量/%。

进而引起碳酸钙的不均匀分布,而较大的土颗粒(如粗砂、砾石)导致孔隙过大,会减弱土颗粒与碳酸钙之间的结合^[51]。Mahawish 等^[52]研究发现,向粗颗粒中加入细颗粒可以增加颗粒间的有效胶结,进而影响固化试样的力学性能。因此,在实际工程中可以通过优化土的粒径级配来提高 MICP 固化效果。

此外,土的相对密度和饱和度也是影响 MICP 固化效果的重要因素。Qabany 等^[53]探究了石英砂的相对密度与 MICP 固化试样无侧限抗压强度的关系,发现石英砂的固化强度与其相对密度呈正相关关系。Rowshanbakht 等^[54]的研究结果表明,随着压实度的增加,试样单轴抗压强度增加,渗透系数降低,但是较高的压实度也可能由于土体孔喉变小,造成加固效果的不均匀。Cheng 等^[55]研究了不同饱和度条件下生物胶结砂土的土体特性(图 7),结果显示在完全饱和($S_r=100\%$, S_r 为土体饱和度)条件下,产生的碳酸钙晶体比低饱和($S_r=20\%$)条件下更多;然而,由于在较低饱和度和条件下颗粒间接触点形成的碳酸钙晶体更为密集,因此低饱和度条件下生成的胶结试样具有更高的强度。

图 7 不同初始饱和度下碳酸钙晶体的形貌特征^[55]Fig. 7 Morphological characteristics of calcium carbonate crystals under different initial saturation levels^[55]

2.4 固化方法

固化方法是指将选定的菌液和胶结液通过一定

方式加入到土体的方法。根据不同的加固目的采用合适的固化方法,不仅有助于提高碳酸钙晶体的产出量,还能增加加固试样的均匀性,对 MICP 技术固化的效果具有重要影响。目前,常用的固化方法主要有:浸泡法、表面喷淋法、拌和法、注入法等。

浸泡法是指将样品完全浸泡在微生物培养基或胶结液中,利用自然渗透作用逐渐在试样中生成碳酸钙沉淀的方法。Li 等^[56]对比了不同浸没次数对 MICP 技术加固试样抗压强度的影响,结果表明多次浸没的试样具有更高的抗压强度。喷淋法是在土体表面喷洒细菌溶液和胶结溶液,溶液通过重力和毛细管力渗入。Dagliya 等^[57]采用喷淋法进行了 MICP 固化钙质砂研究,试验结果表明喷淋法可以有效地促进沙漠土颗粒间碳酸钙晶体的形成,缓解风蚀作用。Qian 等^[58]对浸泡法、喷淋法、刷层法 3 种方法进行 MICP 处理后的水泥砂浆体表面进行了扫描电子显微镜分析,结果表明 3 种方法均产生了碳酸钙晶体的析出,但是每个方法形成碳酸钙晶体的形貌存在差别:浸泡法生成的碳酸钙晶体呈不规则球体,尺寸较大(直径可达 100 μm);喷涂法生成的碳酸钙晶体尺寸相对较小,平均直径为 10 μm 左右;刷层法生成的碳酸钙晶体尺寸最小且基本集中在表层(图 8)。拌和法是先将菌液与土颗粒预混合,然后通过浸泡或者注入的方式将胶结液加入到试样中的一种固化方法,该方法一般适用于细粒土。郭红仙等^[59]采用拌和法对钙质砂进行固化,探究了固化样的一维固结特征,结果表明固化后钙质砂样的压缩性显著降低。Lu 等^[60]通过一系列试验研究了制样方法和注浆工艺对 MICP 型尾砂加固效果的影响,结果表明将菌液与土颗粒预混合,能够避免土体内部细菌分布不均匀的情况,从而强化加固效果。注入法是将细菌溶液和胶结液以一定方式注入土体中形成固化体的方法。常用的注入法有单相法、两相法、分段多次注入法等。Shahrokhi-Shahraki 等^[61]对单相注入、两相注入和分段多次注入 3 种方法处理后的石英砂固化样进行了比较分析,结果表明分段多次注入法固化效果最好。崔明娟等^[62]研究了单一浓度和多浓度相结合的注入方法对砂土无侧限抗压强度的影响,结果表明多浓度相结合的处理方式能够以较少的灌浆次数获得较高强度的试样。此外,注浆压力^[63]、注浆流速^[64]、处理时间^[65]及次数^[66]等因素也会对 MICP 固化效果产生影响。

通过对 MICP 加固技术影响因素进行总结分析,大致得到如下认识:(1)不同种类的菌株,矿化能力不

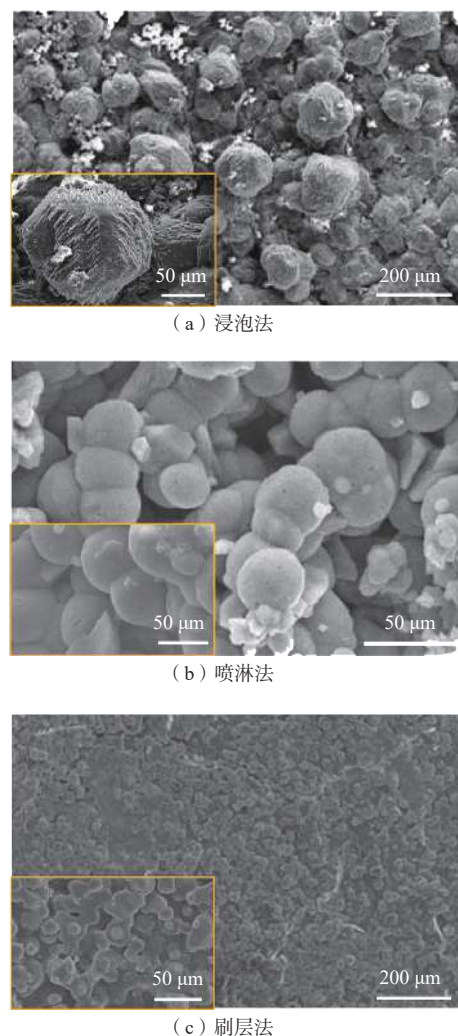


图 8 不同固化方法下碳酸钙晶体形貌特征^[58]

Fig. 8 Morphological characteristics of calcium carbonate crystals under different solidification methods^[58]

同,巴氏芽孢杆菌被认为是最具有潜力的尿素水解细菌。胶结液中钙盐的类型影响着碳酸钙晶体的形貌特征,其中氯化钙被认为是 MICP 的最佳钙源。菌液及胶结液的浓度对脲酶活性、碳酸钙生成量及性质具有调控作用,将菌液/胶结液进行多浓度搭配能够取得较好的加固效果。(2)环境因素的影响主要体现在脲酶活性及碳酸钙生成量及晶体大小方面,对碳酸钙晶体类型的影响不大。MICP 加固技术最佳的 pH 值应控制在 7~9 之间的偏碱性环境,最适宜的温度范围应控制在 20~35 $^{\circ}\text{C}$ 之间。(3)MICP 加固土体的有效粒径为 10~1 000 μm 之间,可以通过优化颗粒级配,适当地增加压实度及降低饱和度来增强 MICP 的加固效果。(4)根据不同加固目的,可以选择不同的固化方法。表面喷淋法和刷层法形成的碳酸钙晶体多集中在表层位置,因此多用于文物遗迹修复及防风固

沙。拌和法和浸泡法通常被结合起来使用,固化样均匀性比较好,但由于现场操作难度较大,目前多用于室内试验研究。注入法是目前室内及现场试验中使用最普遍的方法,使用分段多次注入法和多浓度相结合注入法能够获得较好的加固效果。

3 MICP 加固技术的应用

目前, MICP 加固技术在工程地质领域的研究主要集中在土体固化、抗裂防渗、防风抗蚀、污染水/土修复等方面。

3.1 土体固化

MICP 加固技术利用微生物诱导碳酸钙沉淀,通过充填胶结土体孔隙,增强土体的力学性质及稳定性,在地基、边坡等土体的加固等方面具有显著潜力。目前, MICP 固化土体类型多以砂土、砾石居多。Star 等^[67]前后通过开展室内单元试验、模型试验、现场试验,利用 MICP 加固技术对砾石进行了固化,结果表明 MICP 固化后的砾石具有足够的强度和稳定性,证实了 MICP 用于实际工程的可行性。Cui 等^[68]通过排水三轴试验和扫描电子显微镜观察,多方面分析了 MICP 固化砂土的强度特性,试验结果表明,沉淀的碳酸钙能有效填充粒间孔隙,黏结相邻颗粒,从而提高钙质砂的剪切强度。Sharma 等^[69]对在不同冻融循环条件下, MICP 固化河砂的剪切强度和剪切模量进行了研究,结果发现即使在发生 20 次冻融循环的情况下,所有试样均能保持较高的抗液化能力。此外,对黄土^[70]、红黏土^[71]、膨胀土^[72]等特殊土体的 MICP 固化研究也逐渐开展起来。

3.2 防渗与补裂

微生物诱导碳酸钙沉淀作用会使碳酸钙晶体填充土体孔隙,从而改善岩土体的孔隙率和渗透性。目前, MICP 加固技术在防渗与补裂研究方面主要涉及了砂土渗透性处理,细粒土、岩体、混凝土裂隙的修复等方面。Yang 等^[73]利用 MICP 方法在砂土中建造了一个蓄水池,砂土经 MICP 表面处理后,形成一层具有低渗透性、高抗弯强度的不透水层。Wu 等^[74]研究了生物浆液对岩石裂隙的抗渗效果,研究表明 MICP 处理后 2 d 试样的渗透率降低了 3 个数量级。Liu 等^[75]开展了 MICP 技术修复黏性土裂隙的试验研究,结果表明黏性土裂隙参数随着 MICP 处理次数的增加而显著减小。Sun 等^[76]利用 MICP 方法修复了混凝土裂隙(0.05 ~ 0.15 mm),使试样的无侧限抗压强度提升了 20% 以上,且裂隙修复效果受入渗深度影响,裂隙越

宽入渗越深,修复效果越好。

3.3 抗侵蚀处理

侵蚀作用是指波浪、潮流、风等外营力对地表或建筑物表面造成的磨损和破坏。这种作用可以导致河海岸的破坏、沙漠的扩展、建筑物的腐蚀和损坏等。微生物诱导碳酸钙沉淀形成的致密结构,使 MICP 固化体能够更有效地抵御外部冲击力,表现出较强的抗侵蚀性。Devrani 等^[77]通过风洞试验对比研究 MICP 加固土体的抗风蚀能力,风蚀试验结果表明, MICP 处理后的土体质量损失率大幅下降,证明了 MICP 固化对抗风蚀的高效性,证实了 MICP 技术在防风固沙方面的应用前景。Clarà Saracho 等^[78]对 MICP 处理后的细砂进行了冲蚀试验,结果表明 MICP 固化能够有效改善细砂的抗冲刷性能,且抗冲刷的有效性与碳酸钙的产出量及微观结构特征关系密切。Wang 等^[79]通过渗透试验和降雨侵蚀试验对 MICP 技术处理后生成的土体结壳的侵蚀情况进行了评价,结果表明 MICP 处理后使土体渗透率和侵蚀率分别降低了 90.9% 和 95.2%。

3.4 污染水/土修复

重金属是存在于土、水和空气环境中的微量元素。随着社会经济的发展,由工业活动产生的重金属污染问题越来越严峻。MICP 技术能够有效修复自然环境中的重金属污染,并且在修复土体污染的同时改善土体性质。Zhao 等^[80]比较了 MICP 技术和生物吸附法去除镉的效果,发现 MICP 技术去除镉的效率比生物吸附法高 11%,这表明 MICP 技术是一种高效、环保的原位修复技术。Kim 等^[81]从重金属污染土和尾矿中分离出 3 株本地菌株,通过一系列试验,证明了这些菌株可以有效通过水解尿素酶沉淀土体和尾矿中的重金属,并在重金属的稳定化过程发挥显著作用。Zeng 等^[82]开展了 MICP 处置污水污泥的试验研究,发现 MICP 不仅阻止了离子态镉从污泥向上清液的转移,还使可交换态铅、镉的溶解态含量分别减少了 100% 和 48.54%,残留态含量分别增加了 22.54% 和 81.77%,证实了产脲酶芽孢杆菌 ML-2 在污泥处理中的优良性能。

4 MICP 加固技术存在的问题

近些年来,基于 MICP 加固技术的研究已经积累了大量的研究成果,显示了 MICP 技术的广泛应用前景。尽管如此, MICP 技术到成熟应用尚存在一些需要进一步研究讨论的问题。

4.1 固化均匀性问题

目前, MICP 技术的加固效果受到多种因素的制约, 其中固化效果在空间上分布不均匀是普遍存在的问题。微生物矿化生成的碳酸钙总是倾向在注浆口附近优先沉淀, 因此对深部土体加固效果不理想。目前也有较多研究是从降低 pH、降低温度、调整灌浆方式等手段, 探索提高 MICP 矿化均匀性的方法。尽管如此, 但这些研究多局限于室内试验, 在大尺度及现场试验中能否适用是 MICP 加固技术面临的一大挑战。

4.2 土体耐久性问题

MICP 加固技术的耐久性也是需要关注的问题。一方面, MICP 固化土体存在脆性破坏特征。尽管已有学者将 MICP 加固技术与不同技术手段(如添加纤维^[83]、聚合物^[84]等)结合来改善固化体脆性破坏特征, 但相关研究仍显不足, 需要更多的试验验证和理论探讨, 以找到最有效的改进方法。另一方面, 在实际工程中冻融循环、干湿循环、加载循环等因素会影响 MICP 加固体的耐久性。然而, 关于这些环境因素对 MICP 固化土耐久性的影响机理和长期稳定性影响的研究还相对不足。因此, 有必要加强对 MICP 加固体耐久性试验及机理研究, 以全面评估其长期稳定性和耐久性。

4.3 经济效益问题

与传统的土体加固方式相比, MICP 加固技术在成本上并未表现出明显的优势。这是因为固化反应物(包括碳源、钙源和微生物)在培养制备、储存和施工工艺等方面需要昂贵的成本, 这也是限制 MICP 加固技术大规模应用的主要原因。基于经济成本和时间成本的考虑, 一些学者已经开始探索解决方案, 例如探索寻找低成本的营养液^[85]、碳源^[86]和钙源^[87], 激发土体中原有细菌的活性^[88]等方法。因此, 降低原料成本, 寻求经济环保的 MICP 加固方法, 也是未来需要改进和突破的方向之一。

4.4 环境安全与可持续性问题

环境安全与可持续性问题主要体现在以下几个方面: 首先, MICP 加固技术大多数的研究方法是向土体中引入特定的细菌菌株, 这可能会导致本地微生物种群发生重大变化, 影响土体生态系统的平衡和稳定性; 其次, MICP 加固技术还会改变土体的孔隙结构和渗透性, 从而影响土体的持水性和透气性, 进而影响土体生态系统的功能性; 最后, MICP 过程中使用的尿素水解会产生氨副产物, 这可能对环境造成伤害; 为

解决这些问题, 还需要进行大量的室内和现场试验来检验和优化 MICP 加固技术。

5 结语

(1) 基于脲酶水解的 MICP 加固技术的研究获得了较广泛的关注, 其矿化机制是尿素水解产生的碳酸根离子与溶液中的钙离子发生反应, 生成碳酸钙沉淀的过程。而 MICP 的加固机理实际是在矿化作用基础上产生的碳酸钙沉淀对岩土体的填充作用、覆膜作用和胶结作用。

(2) MICP 固化效果的影响因素主要有: 菌液及胶结液的性质、pH 值、温度、土体类型、固化方法等。以上影响因素均可以通过影响碳酸钙晶体的沉淀量、晶体形貌、分布均匀性及胶结特性对加固土体工程性质产生影响。目前, 巴氏芽孢杆菌和氯化钙被广泛认为是最佳的尿素水解细菌和钙源。一般认为, MICP 的最佳环境条件为: pH 值 7~9, 温度 20~35℃, 有效土体粒径为 10~1 000 μm。通过多种方法, 如菌液/胶结液的多浓度搭配、颗粒级配的优化、压实度的增加、饱和度的降低以及分段多次处理, 可以提高 MICP 加固效果。

(3) MICP 技术在岩土工程和环境地质领域的研究非常广泛, 特别是在土体加固、抗裂防渗、防风抗蚀、污染水/土修复等方面, MICP 技术都展现出了巨大的潜力。MICP 加固可以提高土体的强度和稳定性, 控制裂隙发展, 降低土体渗透性, 增强土体抗侵蚀性, 修复受污染的水土, 为工程地质领域提供了新的技术手段。

(4) MICP 技术在成熟应用过程中仍存在一些问題, 包括固化均匀性、土体耐久性、经济效益、环境安全与可持续性等方面。这些问题需要未来进一步综合微生物学、土力学、材料科学、环境科学等多个学科进行深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 叶为民, 孔令伟, 胡瑞林, 等. 膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1295 - 1309. [YE Weimin, KONG Lingwei, HU Ruilin, et al. New prevention and treatment techniques and their applications to landslides and engineering slopes of expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1295 - 1309. (in Chinese with English abstract)]

- [2] PADMANABHAN G, SHANMUGAM G K. Liquefaction and reliquefaction resistance of saturated sand deposits treated with sand compaction piles[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2021, 19(11): 4235 – 4259.
- [3] 息朝庄, 张鹏飞, 吴林锋, 等. 贵州惠水耕地土壤重金属污染调查与评价 [J]. 地质通报, 2023, 42(7): 1228 – 1239. [XI Chaozhuang, ZHANG Pengfe, WU Linfeng, et al. Investigation and evaluation of heavy metal pollution in cultivated land in Huishui County, Guizhou Province. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(7): 1228 – 1239.(in Chinese with English abstract)]
- [4] LI Xiaoyuan, XU Fang, CHEN Baoguo, et al. Investigation on the chloride ion erosion mechanism of cement mortar in coastal areas: From experiments to molecular dynamics simulation[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 350: 128810.
- [5] Wang Qiong, Meng Yuhong, Su Wei, et al. Cracking and sealing behavior of the compacted bentonite upon technological voids filling[J]. *Engineering Geology*, 2021, 292: 106244.
- [6] 张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 等. 基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 117 – 125. [ZHANG Junjian, LI Peng, YIN Kunyu, et al. An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 117 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [7] NI J J, LIU S S, WANG Y C, et al. Synergistic influence of lime and straw on dredged sludge reinforcement under vacuum preloading[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 421: 135642.
- [8] 邓铭江, 蔡正银, 郭万里, 等. 换填及排水改造对北疆输水渠道稳定性的影响 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 789 – 794. [DENG Mingjiang, CAI Zhengyin, GUO Wanli, et al. Influences of filling replacement and drainage modification on stability of water conveyance canals in North Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(5): 789 – 794. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 袁帅, 王君, 吴朝峰, 等. 虹吸排水法处理软土地基的水位与沉降计算模型 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 208 – 218. [YUAN Shuai, WANG Jun, WU Zhao Feng, et al. Calculation model for water level and settlement of soft foundation treated by siphon drainage[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(1): 208 – 218. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 盛明强, 邹淳, 乾增珍, 等. 水泥固化剂提高风积沙承载性能试验 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 147 – 153. [SHENG Mingqiang, ZOU Chun, QIAN Zengzhen, et al. Experiments on the bearing capacity of aeolian sand stabilized by cement stabilizers[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(2): 147 – 153. (in Chinese with English abstract)]
- [11] NAN J Y, CHANG D, LIU J K, et al. Investigation on the microstructural characteristics of lime-stabilized soil after freeze-thaw cycles[J]. *Transportation Geotechnics*, 2024, 44: 101175.
- [12] 陈忠清, 朱泽威, 吕越. 粉煤灰基地聚物加固土的强度及抗冻融性能试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 100 – 108. [CHEN Zhongqing, ZHU Zewei, LYU Yue. Laboratory investigation on the strength and freezing-thawing resistance of fly ash based geopolymer stabilized soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 100 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王家全, 刘宏志, 林志南, 等. 聚丙烯酸钠改性红黏土工程特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 110 – 117. [WANG Jiaquan, LIU Hongzhi, LIN Zhinan, et al. Experimental study on engineering properties of red clay modified by sodium polyacrylate[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(3): 110 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李俊, 张伟丽, 陈宗武, 等. 冻融循环对 MICP 加固土性能的影响 [J/OL]. 地质科技通报, (2023-12-20) [2024-01-04]. [LI Jun, ZHANG Weili, CHEN Zongwu, et al. Experimental study of the freeze-thaw resistance of MICP-treated soil [J/OL]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, (2023-12-20) [2024-01-04]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=su5nt4ZpZVQhnjJs3G1K-WQOHdX-juh7JKKf3E7faUbTpUtnKHidMbeJTZPm5lhUtdrW8dLStVs6SblC3NCvQ_byNd5XbNjUgkY1uVnpX9HTR4kj1my1JcG3RI3GNTW6j4nsYhH7hn774cv9s6tRt3jpw9obZPClZ7iZqrIa2_Rww8pwNi7k5a3yPDEGfoP9dNa7yJHq1IHAFeGwtuiJlpPCb44h1vDA_ixjEh5kgCMqS6ZQqV9ntEZGCpMn-0ZzYPr4KDmLcwTcx5TyEkw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese with English abstract)]
- [15] ARPAJIRAKUL S, PUNGRASMI W, LIKITLERSUANG S. Efficiency of microbially-induced calcite precipitation in natural clays for ground improvement[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 282: 122722.
- [16] LIU Shiyu, WANG Runkai, YU Jin, et al. Effectiveness of the anti-erosion of an MICP coating on the surfaces of

- ancient clay roof tiles[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 243: 118202.
- [17] 肖维民, 林馨, 钟建敏, 等. 岩石节理微生物诱导碳酸钙沉积封堵渗流演化规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(10): 2798 – 2808. [XIAO Weimin, LIN Xin, ZHONG Jianmin, et al. Experimental study on rock joint permeability evolution during plugging process by microbially induced calcite precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(10): 2798 – 2808. (in Chinese with English abstract)]
- [18] CHENG Liang, SHAHIN M A. Stabilisation of oil-contaminated soils using microbially induced calcite crystals by bacterial flocs. *Géotechnique Letters*, 2017, 7(2): 146 – 151.
- [19] DHAMI N K, REDDY M S, MUKHERJEE A. Application of calcifying bacteria for remediation of stones and cultural heritages[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2014, 5: 304.
- [20] WANG Yuze, SOGA K, DEJONG J T, et al. A microfluidic chip and its use in characterising the particle-scale behaviour of microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP) [J]. *Géotechnique*, 2019, 69(12): 1086 – 1094.
- [21] XIAO Yang, HE Xiang, WU Wei, et al. Kinetic biomineralization through microfluidic chip tests[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(10): 3229 – 3237.
- [22] TOBLER D J, MINTO J M, EL MOUNTASSIR G, et al. Microscale analysis of fractured rock sealed with microbially induced CaCO_3 precipitation: Influence on hydraulic and mechanical performance[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(10): 8295 – 8308.
- [23] DEJONG J, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 197 – 210.
- [24] DE MUYNCK W, VERBEKEN K, DE BELIE N, et al. Influence of temperature on the effectiveness of a biogenic carbonate surface treatment for limestone conservation[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97(3): 1335 – 1347.
- [25] DHAMI N K, REDDY M S, MUKHERJEE A. Biomineralization of calcium carbonate polymorphs by the bacterial strains isolated from calcareous sites[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2013, 23(5): 707 – 714.
- [26] 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.
- [27] 王延宁, 李子仪, 孟智祥, 等. 微生物诱导碳酸盐沉淀改良残积土坡面水力学特性研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(12): 158 – 165. [WANG Yanning, LI Ziyi, MENG Zhixiang, et al. Study on hydraulic characteristics of microbial induced carbonate precipitation improved residual soil slope[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 51(12): 158 – 165. (in Chinese with English abstract)]
- [28] OKWADHA G D O, LI Jin. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation[J]. *Chemosphere*, 2010, 81(9): 1143 – 1148.
- [29] ZHAO Qian, LI Lin, LI Chi, et al. Factors affecting improvement of engineering properties of MICP-treated soil catalyzed by bacteria and urease[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(12): 4014094.
- [30] CHOU C W, SEAGREN E A, AYDILEK A H, et al. Biocalcification of sand through ureolysis[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(12): 1179 – 1189.
- [31] VAN PAASSEN L A. Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation[D]. Arizona: Arizona State University. 2009.
- [32] 成亮, 钱春香, 王瑞兴, 等. 碳酸岩矿化菌诱导碳酸钙晶体形成机理研究[J]. *化学学报*, 2007, 65(19): 2133 – 2138. [CHENG Liang, QIAN Chunxiang, WANG Ruixing, et al. Study on the mechanism of calcium carbonate formation induced by carbonate-mineralization microbe[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2007, 65(19): 2133 – 2138. (in Chinese with English abstract)]
- [33] WANG Yuze, SOGA K, DEJONG J T, et al. Effects of bacterial density on growth rate and characteristics of microbial-induced CaCO_3 precipitates: A particle-scale experimental study[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(6): 04021036.
- [34] ZHANG Yihui, GUO Hongxian, CHENG Xiaohui. Influences of calcium sources on microbially induced carbonate precipitation in porous media[J]. *Materials Research Innovations*, 2014, 18(sup2): S2-79 – S2-84.
- [35] GOROSPE C M, HAN S H, KIM S G, et al. Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2013, 18(5): 903 – 908.
- [36] ACHAL V, PAN Xiangliang. Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by *Bacillus* sp. CR2[J]. *Applied Biochemistry and*

- Biotechnology, 2014, 173(1): 307 – 317.
- [37] LYU Chao, TANG Chaosheng, ZHANG Junze, et al. Effects of calcium sources and magnesium ions on the mechanical behavior of MICP-treated calcareous sand: Experimental evidence and precipitated crystal insights[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(5): 2703 – 2717.
- [38] AL QABANY A, SOGA K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils[M]//LALOUI L, ed. Bio- and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering. Publisher: ICE Publishing, 2014: 107 – 115.
- [39] SOON N W, LEE L M, KHUN T C. Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(5): 04014006.
- [40] MUJAH D, CHENG Liang, SHAHIN M A. Microstructural and geomechanical study on biocemented sand for optimization of MICP process[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(4): 04019025.
- [41] YI Haihe, ZHENG Tianwen, JIA Zhirong, et al. Study on the influencing factors and mechanism of calcium carbonate precipitation induced by urease bacteria[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2021, 564: 126113.
- [42] ZHENG Tianwen. Bacteria-induced facile biotic calcium carbonate precipitation[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2021, 563(2): 126096.
- [43] LAI Hanjiang, CUI Mingjuan, CHU Jian. Effect of pH on soil improvement using one-phase-low-pH MICP or EICP biocementation method[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(6): 3259 – 3272.
- [44] 袁亮. 微生物碳酸酐酶诱导 CaCO_3 沉淀的影响因素及生成机理 [J]. 生物技术通报, 2020, 36(8): 79 – 86. [YUAN Liang. Influencing factors and formation mechanism of CaCO_3 precipitation induced by microbial carbonic anhydrase[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2020, 36(8): 79 – 86. (in Chinese with English abstract)]
- [45] CHENG Liang, SHAHIN M A, CORD-RUWISCH R, et al. Soil stabilisation by microbial-induced calcite precipitation (MICP): Investigation into some physical and environmental aspects[C]//7th international congress on environmental geotechnics. Melbourne: Engineers Australia, 2014.
- [46] SUN Xiao, MIAO Linchang, TONG Tianzhi, et al. Study of the effect of temperature on microbially induced carbonate precipitation[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(3): 627 – 638.
- [47] 彭劼, 何想, 刘志明, 等. 低温条件下微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1769 – 1774. [PENG Jie, HE Xiang, LIU Zhiming, et al. Experimental research on influence of low temperature on MICP-treated soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1769 – 1774. (in Chinese with English abstract)]
- [48] WANG Yuze, WANG Yong, KONSTANTINOU C. Strength Behavior of Temperature-Dependent MICP-Treated Soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2023, 149(12): 04023116.
- [49] REBATA-LANDA V. Microbial activity in sediments: Effects on soil behavior[M]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [50] LIANG Shihua, CHEN Juntao, NIU Jiuge, et al. Using recycled calcium sources to solidify sandy soil through microbial induced carbonate precipitation[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2020, 38(4): 393 – 399.
- [51] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological considerations in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(10): 1222 – 1233.
- [52] MAHAWISH A, BOUAZZA A, GATES W P. Effect of particle size distribution on the bio-cementation of coarse aggregates[J]. *Acta Geotechnica*, 2018, 13(4): 1019 – 1025.
- [53] QABANY A 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.
- [54] ROWSHANBAKHT K, KHAMEHCHIYAN M, SAJEDI R H, et al. Effect of injected bacterial suspension volume and relative density on carbonate precipitation resulting from microbial treatment[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 89: 49 – 55.
- [55] CHENG Liang, CORD-RUWISCH R, SHAHIN M A. Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(1): 81 – 90.
- [56] LI Yang, WEN Kejun, LI Lin, et al. Experimental investigation on compression resistance of bio-bricks[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120751.
- [57] DAGLIYA M, SATYAM N, SHARMA M, et al. Experimental study on mitigating wind erosion of calcareous desert sand using spray method for microbially induced calcium carbonate precipitation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022,

- 14(5): 1556 – 1567.
- [58] QIAN Chunxiang, WANG Ruixing, CHENG Liang, et al. Theory of microbial carbonate precipitation and its application in restoration of cement-based materials defects[J]. *Chinese Journal of Chemistry*, 2010, 28(5): 847 – 857.
- [59] 郭红仙, 李东润, 马瑞男, 等. MICP 拌和固化钙质砂—维固结试验 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(8): 593 – 600. [GUO Hongxian, LI Dongrun, MA Ruinan, et al. Oedometer test of calcareous sands solidified using the MICP mixing method[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2019, 59(8): 593 – 600. (in Chinese with English abstract)]
- [60] LU Ting, WEI Zuoan, WANG Wensong, et al. Experimental Investigation of sample preparation and grouting technology on microbially reinforced tailings[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 312: 125458.
- [61] SHAHROKHI-SHAHRAKI R, ZOMORODIAN S M A, NIAZI A, et al. Improving sand with microbial-induced carbonate precipitation[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2015, 168(3): 217 – 230.
- [62] 崔明娟, 郑俊杰, 章荣军, 等. 化学处理方式对微生物固化砂土强度影响研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 392 – 396. [CUI Mingjuan, ZHENG Junjie, ZHANG Rongjun, et al. Study of effect of chemical treatment on strength of bio-cemented sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S1): 392 – 396. (in Chinese with English abstract)]
- [63] ZHANG Xinlei, SUN Yue, CHEN Yumin, et al. Uniformity of microbial injection for reinforcing saturated calcareous sand: A multi-test approach [J]. *Biogeotechnics*, 2024: 100105.
- [64] TIAN Kanliang, WANG Xiaodong, ZHANG Shican, et al. Effect of reactant injection rate on solidifying aeolian sand via microbially induced calcite precipitation[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(10): 04020291.
- [65] AKOĞUZ H, ÇELİK S, BARIS O. Effect of biocementation on the engineering properties of sand soils under different flow rates and treatment durations[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 20(10): 11437 – 11450.
- [66] WANG Zhao, ZHANG Nan, JIN Yong, et al. Application of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) in sand embankments for scouring/erosion control[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(12): 1459 – 1471.
- [67] STAR W R L V D , WIJNGAARDEN W K V , PAASSEN L A V , et al. Stabilization of gravel deposits using microorganisms[C]//*Proceedings of the 15th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Amsterdam : IOS Press, 2011: 85–90.
- [68] CUI Mingjuan, ZHENG Junjie, CHU Jian, et al. Bio-mediated calcium carbonate precipitation and its effect on the shear behaviour of calcareous sand[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(5): 1377 – 1389.
- [69] SHARMA M, SATYAM N, REDDY K R. Effect of freeze-thaw cycles on engineering properties of biocemented sand under different treatment conditions[J]. *Engineering Geology*, 2021, 284: 106022.
- [70] SUN Xiaohao, MIAO Linchang, CHEN Runfa, et al. Liquefaction Resistance of Biocemented Loess Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2021, 147: 04021117.
- [71] 王连锐, 陈筠, 杨恒, 等. 微生物对红黏土强度的改良效应及机理研究 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39(5): 125 – 131. [WANG Lianrui, CHEN Jun, YANG Heng, et al. Effectiveness and mechanism of improving strength of red clay by microorganism[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(5): 125 – 131. (in Chinese with English abstract)]
- [72] 张宽, 唐朝生, 刘博, 等. 基于新型单相 MICP 技术改性黏性土力学特性的试验研究 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 306 – 316. [ZHANG Kuan, TANG Chaosheng, LIU Bo, et al. Mechanical behavior of clayey soil treated by new one-phase micp technique[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 306 – 316. (in Chinese with English abstract)]
- [73] YANG Yang, CHU Jian, LIU Hanlong, et al. Construction of water pond using bioslurry-induced biocementation[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(3): 06021009.
- [74] WU Chuangzhou, CHU Jian, WU Shifan, et al. Quantifying the permeability reduction of biogROUTED rock fracture[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 947 – 954.
- [75] LIU Bo, ZHU Cheng, TANG Chaosheng, et al. Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP)[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105389.
- [76] SUN Xiaohao, MIAO Linchang, WU Linyu, et al. The method of repairing microcracks based on microbiologically induced calcium carbonate precipitation[J]. *Advances in Cement Research*, 2020, 32(6): 262 – 272.
- [77] DEVRANI R, DUBEY A A, RAVI K, et al. Applications

- of bio-cementation and bio-polymerization for aeolian erosion control[J]. *Journal of Arid Environments*, 2021, 187: 104433.
- [78] CLARÀ SARACHO A, HAIGH S K, EHSAN JORAT M. Flume study on the effects of microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) on the erosional behaviour of fine sand[J]. *Géotechnique*, 2021, 71(12): 1135 – 1149.
- [79] WANG Yanning, LI Sikan, LI Ziyi, et al. Exploring the application of the MICP technique for the suppression of erosion in granite residual soil in Shantou using a rainfall erosion simulator[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(6): 3273 – 3285.
- [80] ZHAO Yue, YAO Jun, YUAN Zhimin, et al. Bioremediation of Cd by strain GZ-22 isolated from mine soil based on biosorption and microbially induced carbonate precipitation[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(1): 372 – 380.
- [81] KIM J H, LEE J Y. An optimum condition of MICP indigenous bacteria with contaminated wastes of heavy metal[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2019, 21(2): 239 – 247.
- [82] ZENG Yong, CHEN Zezhi, LYU Qingyang, et al. Microbiologically induced calcite precipitation for in situ stabilization of heavy metals contributes to land application of sewage sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 441: 129866.
- [83] 谢约翰, 唐朝生, 尹黎阳, 等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 675 – 682. [XIE Yuehan, TANG Chaosheng, YIN Liyang, et al. Mechanical behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP)-treated soil with fiber reinforcement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(4): 675 – 682. (in Chinese with English abstract)]
- [84] YAO Dunfan, WU Jiao, NIU Shuang, et al. An anionic biopolymer γ -polyglutamate enhanced the microbially induced carbonate precipitation for soil improvement: Mechanical behaviors and underlying mechanism[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(10): 4485 – 4496.
- [85] FANG Chaolin, HE Jing, ACHAL V, et al. Tofu wastewater as efficient nutritional source in biocementation for improved mechanical strength of cement mortars[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2019, 36(6): 515 – 521.
- [86] Chen Liuxia, Song Yuqi, Fang Hao, et al. Systematic optimization of a novel, cost-effective fermentation medium of *Sporosarcina pasteurii* for microbially induced calcite precipitation (MICP) [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 348: 128632.
- [87] KULANTHAIVEL P, SOUNDARA B, SELVAKUMAR S, et al. Application of waste eggshell as a source of calcium in bacterial bio-cementation to enhance the engineering characteristics of sand[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(44): 66450 – 66461.
- [88] BURBANK M, WEAVER T, LEWIS R, et al. Geotechnical tests of sands following bioinduced calcite precipitation catalyzed by indigenous bacteria[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(6): 928 – 936.

编辑: 宗 爽