

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.06.001

MICP 技术研究进展及在海洋岩土工程的应用展望

许万强¹, 林文彬^{2,3}, 罗承浩¹, 姜乃灿⁴, 高玉朋², 林威², 吴文亭²

- (1. 福建永强岩土股份有限公司, 福建 龙岩 364000;
2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;
3. 福建工程学院 地球科学与工程研究所, 福建 福州 350118;
4. 福建嘉力建设工程发展有限公司, 福建 平潭 350400)

摘要: 介绍了基于尿素水解的微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP)基本原理;总结了 MICP 技术在土体加固、文物保护、混凝土裂缝修复、金属污染土修复和海洋岩土工程等领域的室内和现场试验研究;分析了环境 pH 值、温度、钙盐种类、加固土体颗粒粒径和灌浆方法等因素对 MICP 技术的影响。MICP 技术在岩土工程领域具有广阔的应用前景,但该技术在试验及在实际工程应用领域,特别是在海洋岩土工程领域还存在均匀性、环境适应性、耐久性、经济适用性等方面问题,未来需要对这些问题进行深入的探讨和研究。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀技术;碳酸钙;土体加固;海洋岩土工程

中图分类号: TU4

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)06-0511-09

Research progress on microbially induced carbonate precipitation technology and prospects of its application in marine geotechnical engineering

XU Wanqiang¹, LIN Wenbin^{2,3}, LUO Chenghao¹, JIANG Naican⁴, GAO Yupeng², LIN Wei², WU Wenting²

- (1. Fujian Yonking Geotechnical Co., Ltd., Longyan 364000, China;
2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
3. Institute of Earth Sciences and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
4. Fujian Jiali Construction Engineering Development Co., Ltd., Pingtan 350400, China)

Abstract: The basic principle of microbial-induced carbonate precipitation technology (MICP technology) based on urea hydrolysis was introduced in detail, and the laboratory and field tests research of MICP technology in soil reinforcement, cultural relic protection, concrete crack repair, metal contaminated soil repair and marine geotechnical engineering were systematically summarized. The effects of environmental pH value, temperature, calcium salt type, particle size of reinforced soil and grouting method on MICP technology were analyzed. MICP technology has broad application prospects in the field of geotechnical engineering, but it still has problems in terms of uniformity, durability, and economic applicability in tests and practical engineering applications, especially in the field of marine geotechnical engineering. These issues need in-depth discussion and research in the future.

Keywords: MICP; calcium carbonate; soil reinforcement; marine geotechnical engineering

微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP 技术)属于可持续发展技术,是岩土工程领域一个前沿研究课题,被用于解决环境污染、建筑结构和岩土工程等问题。在自然界中,有超过 60 种矿物(如碳

收稿日期: 2022-07-11

基金项目: 福建省科技计划项目(2021H1004;2020J05183);福建工程学院科研启动基金(GY-Z20091);大学生创新创业训练计划项目(202210388021)

第一作者简介: 许万强(1973—),男,福建龙岩人,教授级高级工程师,研究方向:岩土工程。

酸盐、硅酸盐等)是由微生物成矿作用形成的,其中,碳酸盐矿物分布最广泛也是研究最深入的^[1]。受此启发,岩土工程师联合微生物学家、地质学家对这一自然过程加以运用,形成了一门新兴的交叉学科,即微生物岩土工程学。目前,在诸多微生物诱导碳酸盐沉淀技术中,基于尿素水解的 MICP 技术是研究最多、应用最为广泛的生物矿化技术,不仅应用于土木工程中的地基处理,还在重金属污染治理、砂土液化防治、土石砖类文物建筑修复、混凝土裂缝修复和智能自修复混凝土、抑制扬尘等多个领域中有不俗的应用效果^[2]。

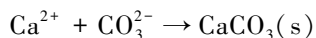
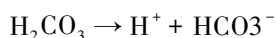
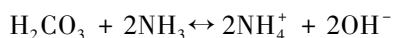
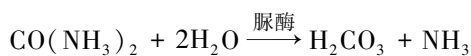
2004 年,Whiffin 等^[3]研究了巴氏芽孢杆菌的最大脲酶活性环境与生理条件,并将其应用于处理松散砂颗粒,提高了砂土的强度与刚度等物理力学性质。随后 MICP 技术受到了广泛的关注,国内外许多科研人员开始对该技术进行研究。

本研究首先对产脲酶 MICP 的原理进行介绍,总结该技术在土体加固、岩土文物修复、重金属治理和海洋岩土工程中的研究进展和应用情况,分析该技术的影响因素。最后,对该技术存在的问题提出研究建议和展望,以期推动国内微生物岩土工程研究领域的发展。

1 MICP 反应原理

基于尿素水解的 MICP 技术基本原理是利用产脲酶细菌在新陈代谢等生理活动中产生大量的高活性脲酶,在富含尿素的环境下进行分解尿素,生成二氧化碳与铵根离子。二氧化碳在中性或碱性溶液环境中会进行水解作用,导致溶液碳酸根离子浓度升高并与一些金属离子产生沉淀。细菌本体将会作为成核位点,将碳酸盐沉淀固定,从而达到所需要的效果^[4]。

产脲酶微生物诱导碳酸钙沉积中发生的复杂的化学反应可以简化为:



MICP 矿化作用所形成的碳酸钙能够填充孔隙,将颗粒与颗粒胶结在一起,达到减液化、改善

土体物理力学性质的作用。如图 1 所示,细菌首先会吸附在土颗粒之间,在进行生理活动的过程中产生脲酶,随后分解尿素生成碳酸根,碳酸根与钙离子形成沉淀并将松散的土颗粒胶结形成一个整体^[4]。

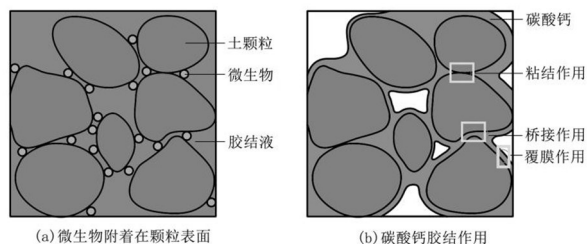


图 1 MICP 胶结沙土示意图

Fig.1 Schematic diagram of MICP cemented sandy soil

2 MICP 技术的应用现状

2004 年,Whiffin^[3]首次提出可以利用 MICP 技术进行土体加固后,众多学者围绕该技术展开大量试验研究。经历了十多年的发展,该技术的研究方向和应用领域从岩土体加固扩展到重金属污染土治理、岩土类文物修复、混凝土裂缝修复和海洋岩土工程应用等方面。

2.1 土体加固

土的原位物理性质(如剪切强度、刚度、可压缩性、渗透性等)往往不满足工程建设的需求。改善这些土体物理性质的方法主要有 3 种,即机械压实、化学灌浆和生物技术(如生物灌浆)^[5]。其中,MICP 灌浆技术被认为是一种很有前途的新技术,因为它更环保、更经济,并且不会机械/化学地破坏基础设施。过去十几年,许多学者探究了 MICP 加固土体的可行性。

Whiffin 等^[3]首次使用高产脲酶的巴氏芽孢杆菌对松散砂土进行处理,处理后的砂土抗剪强度达到 1.8 MPa,刚度达到 250 MPa,与未固结砂相比,强度提高了 8 倍。之后,国内外学者在实验室内对 MICP 技术加固土体进行了大量的研究(如表 1 所示),证实了该技术可以显著改善硅质砂、钙质砂(珊瑚砂)、沙漠风积砂、黏性土、粉土与淤泥土等砂土的物理力学性质,如无限限抗压强度、抗剪强度、压缩系数等^[6-12]。

2010 年,荷兰代尔夫特理工大学首次将 MICP 灌浆技术应用于现场砂砾土稳固工程

中^[13-14]。他们利用微生物灌浆加固地下砂砾土层来稳定水平定向钻孔,加固结束后砂砾胶结体中方解石含量高达 6%,并且在进行水平定向施工作业时,砂砾层保持稳定,未发生坍塌事故。之后,也有部分学者探索了 MICP 技术在加固砾石

和砂土场地、地基处理和抗风蚀等较大应用尺度上的可行性(如表 2)。然而该技术的实际工程应用也有众多亟待解决的问题,如均匀性、耐久性和经济性等^[15-16]。

表 1 微生物灌浆技术在不同砂土加固中的应用研究

Tab.1 Application researches of microbially grouting technology in reinforcement of different sandy soils			
应用	土体类型	应用效果	文献来源
土体加固	硅质砂	经过 MICP 技术加固处理后的硅砂与原样硅砂相比强度提高了 8 倍	[3]
	钙质砂、珊瑚砂	试样的抗剪强度及残余强度分别达到未加固试样的 1.8 倍及 1.6 倍;无侧限抗压强度最高为 2.04 MPa	[6] [7]
	沙漠风积砂	渗透系数降低 97.5% 以上,无侧限抗压强度可达 18 MPa	[8]
	砂质黏性紫色土	MICP 处理后,强度提高 1.30~1.79 倍	[9]
	海相粉土	原状无侧限抗压强度为 60kPa,MICP 处理后为 850~1 250 kPa	[10]
	粗颗粒盐渍土	不同含盐量情况下无侧限抗压强度稳定在 1.2~1.4 MPa	[11]
	淤泥土	无侧限抗压强度最高可提高 24%,含水率降低范围在 5.2%~10.9%	[12]

表 2 微生物土体改良技术在不同尺度砂土加固中的应用

Tab.2 Application of microbial soil improvement technology in soil reinforcement			
应用场合	主要结论	不足之处	文献来源
1 000 m ³ 砂基	土体强度增加,地下输气管道成功铺设	地电阻率测量显示碳酸钙分布不均	[13]
100 m ³ 砂基	形成与流场形状有关的胶结体,体积为 40 m ³ ,固化后方解石含量约 0.8%~24%,平均剪切波速 300 m/s,UCS 为 0.7~12.4 MPa	碳酸钙分布不均,导致砂土剪切强度分布不均,注射点附近碳酸钙含量低	[14]
900 m ² 土壤	固化平均厚度为 13.2 mm,肖氏硬度为 24.6度。在抗风蚀试验和雨水侵蚀实验中,质量损失分别降低了 2 570 g/(m ² ·h)和 690 g/(m ² ·h),残余肖氏硬度仍保持雨水侵蚀前的 90%以上	固化厚度较小	[15]
4 块面积分别为 2.4 m×4.9 m 的砂土场地	动力触探试验发现,场地贯入阻力明显提高,结壳厚度在 0.64~2.5 cm 之间,结壳表面碳酸钙含量为 2.1%左右	碳酸钙含量在深度 10 cm 左右仅为 0.5%;试验 318 d 之后加固场地强度有一定退化现象	[16]

2.2 岩土文物修复

相较于传统的物理加固方式和化学灌浆加固方式,MICP 技术对文物本体损伤小,生成物较为环保,因此可以用于岩土文物(土质和石质)的修复。刘士雨等^[17]用 MICP 技术加固保护夯土建筑,在三合土表面形成碳酸钙耐水层从而缓解土遗址表面的风化^[18]。他们也通过 MICP 技术修

复三合土墙体裂缝,实验结果表明经过 MICP 技术修复的三合土墙体的平均抗弯强度和抗剪强度恢复率分别为 79.92%和 88.54%。

与岩土文物不同,石质文物的修复需要更高的强度。杨钻等^[19]通过多次微生物注浆的方式,获得了强度为 2 MPa 到 55 MPa 的微生物砂浆,并成功修复了西藏布达拉宫砖石文物。谭谦

等^[20]和 Minto 等^[21]用大理石作为充填试样来修复大理石材质的文物,并且对有裂缝的石梁和破碎的石块进行修复和粘结。何建宏等^[22]用 MICP 技术修复汉白玉断裂石梁,使得修复后的试样强度达到修复前强度的 35%。张建伟等^[23]使用 MICP 技术在胶结液中添加脱脂奶粉对古建砖石进行修复加固,研究发现脱脂奶粉作为添加剂可改变碳酸钙晶型,抗折强度能达到原砖石的 121.69%。

2.3 混凝土裂缝修复和覆膜

MICP 技术在结构裂缝修复与覆膜方面也有不俗的应用效果。张越^[24]使用灌浆的方法将水泥试块成功粘结,抗折强度达到 350 kPa;使用涂刷的方法在试块表面进行覆膜处理,有效降低了试块的吸水率。王瑞兴等^[25]使用 MICP 技术对水泥石表面进行覆膜处理,可生成 100 μm 厚的碳酸钙膜,表面吸水率可降低为原来的 15%;随后对水泥石进行裂缝修复,28 d 抗压强度恢复至 84%。

Jongvivatsakul 等^[26]对开裂混凝土采用 MICP 技术修复,使其抗压强度提高了 43%,而且 MICP 产生的碳酸钙有助于降低混凝土吸水率。Sun 等^[27]采用 MICP 技术修复了宽 0.05~0.15 mm 的混凝土裂隙,使其无侧限抗压强度提升了 20% 以上,MICP 技术在修复裂缝的同时,还增强了疏水性。

2.4 重金属治理

根据 MICP 技术的原理,微生物不仅可以对钙离子进行反应沉淀,对其他重金属阳离子也同样有效^[28]。基于此,关于 MICP 技术处理重金属

污染也有了不少研究。实验结果表明,MICP 方法可有效降低土体或水体中 As、Pb、Cd、Zn、Ni 和 Cu 重金属可交换态含量(如表 3 所示)。

表 3 MICP 技术处理重金属的研究成果
Tab.3 Research results of treatment of heavy metals using MICP technology

细菌	元素	环境	元素沉淀 固化率/%	文献 来源
<i>Sporosarcina ginsengisol</i>	As	溶液	96.0	[29]
<i>Sporosarcina ginsengisol</i>	As	土壤	96.0	[29]
<i>Exiguobacterium undae</i>	Cd	溶液	84.0	[30]
<i>Exiguobacterium undae</i>	Cd	土壤	90.0	[30]
<i>Sporosarcina koreensis</i>	Cu	溶液	93.5	[31]
<i>Kocuria flava</i>	Cu	土壤	96.0	[32]
<i>Terrabacter tumescens</i>	Ni	溶液	91.0	[31]
<i>Sporosarcina</i> sp. R - 31323	Zn	溶液	大于 99.0	[31]

2.5 MICP 技术在海洋岩土工程中的应用

传统地基加固主要是用机械振动密实、土工织物或水泥/环氧树脂固化等物理或化学方法,这些方法在海底使用均受较大限制,存在成本高、施工环境差、污染海洋环境等缺点。因此研究开发一种绿色环保新型的海洋岩土加固方法迫在眉睫。MICP 技术作为一种高效且具有环境友好特点的地基加固方式,近年来逐渐进入海洋工程建设领域研究者的视线。为了更好地将微生物加固技术应用到海洋砂土工程中,学者根据海底砂土性质和实际赋存环境,开展了一些相关的研究(如表 4 所示)。

表 4 MICP 技术在海洋岩土工程中的研究情况
Tab.4 Research progress of MICP technology in marine geotechnical engineering

土体类型	环境	加固效果	文献来源
钙质砂	天然海水	使用天然海水代替去离子水进行 MICP 灌浆加固钙质砂,处理后的试样无侧线抗压强度最高可达 1.7 MPa	[33]
钙质砂	天然海水	使用海水进行三梯度和五梯度驯化后的细菌所灌浆加固钙质砂柱无侧限抗压强度分别最高可达约 3.5 MPa 和 4.0 MPa,较淡水环境下分别提高了 20.86%~36.78%和 38.17%~58.19%	[34]
钙质砂	模拟海水	模拟海水环境下进行了胶结液中不同尿素浓度对 MICP 技术灌浆加固钙质砂,在尿素浓度为 1.0 mol/L 时效果最佳,且海水试样的无侧限抗压强度达到淡水试样的 2.66 倍	[35]

续表			
土体类型	环境	加固效果	文献来源
滨海粉细砂	模拟海水	模拟海水环境 MICP 灌浆加固滨海粉细砂试样的无侧线抗压强度是淡水环境下的 2.14 倍且生成的碳酸钙含量更高	[36]
		模拟海水环境 MICP 浸泡法加固珊瑚砂试样的无侧限抗压强度低于淡水环境下加固的试样,随着时间增长,砂柱试样在海水环境下强度不断提升	
珊瑚砂	模拟海水		[37]

李昊等^[35]使用模拟海水环境下进行胶结液中不同尿素浓度对 MICP 技术加固钙质砂效果影响的试验研究,发现 MICP 技术适用于模拟海水环境,在尿素浓度为 1.0 mol/L 时效果最佳。肖瑶等^[34]设计并进行了模拟海水环境下对巴氏芽孢杆菌的人工驯化,研究发现,驯化后的巴氏芽孢杆菌浓度可以达到淡水下的 97% 以上,且驯化后的菌种具有良好的温度适应能力,在 10~30℃ 就能够达到加固效果,并且具有更好的 MICP 性能。刘渊等^[36]在模拟海水的环境下进行了 MICP 固化滨海粉细砂的试验研究,发现在模拟海水环境下 MICP 技术对于加固粉细砂是有效的,海水的弱碱性能促进微生物诱导碳酸钙沉淀的效率。

综上,MICP 在人工模拟海水的环境下的表现都比较好,也有一些学者对其在天然海水环境的使用效果开展了研究。杨司盟等^[38]发现海水中存在的金属离子可以作为 MICP 中的胶结液成分,但海水中的离子浓度比胶结液低,因此提出使用浓缩海水作为胶结液进行砂土加固试验研究。研究结果表明,在将海水浓缩 3 倍后钙离子浓度可以达到 0.33 mol/L,再添加尿素溶液作为胶结液灌浆,可以达到一定的加固效果,加固后试样的单轴抗压强度可达到 635 kPa。董博文等^[33]使用天然海水进行产脲酶微生物的培养并进行了 MICP 加固钙质砂的试验,发现在培养过程中,微生物的生长出现了滞后期,但在进入平衡期后,使用海水进行培养的微生物在在生物量、酶活上与淡水条件的相差并不大(如图 2);且使用天然海水进行加固的钙质砂,加固效果也与淡水条件下的相差不大,都能降低渗透系数且提高钙质砂的强度。

3 MICP 技术的影响因素

MICP 技术的早期研究主要围绕着脲酶活性、环境 pH 值、钙盐种类、灌浆方法、灌浆温度等一系列环境因素对微生物诱导碳酸钙的影响。

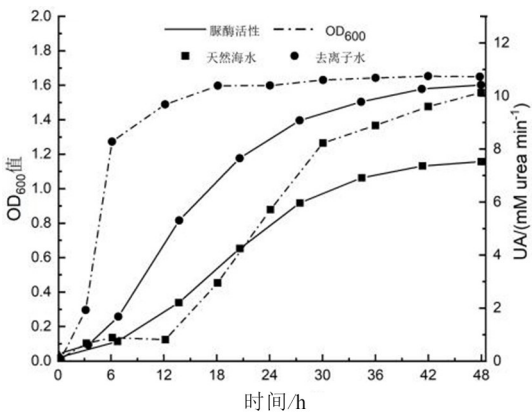


图 2 不同环境下微生物 OD₆₀₀ 和脲酶活性的变化^[33]
Fig.2 Changes of microbially OD₆₀₀ and urease activity in different environments^[33]

pH 值和温度主要通过影响细胞活性、酶活性、反应物成分的溶解度和电离常数等热力学性质而改变矿化过程中的成核作用和碳酸钙晶体的生长速率^[39]。研究表明,环境温度对细菌的生长繁殖和新陈代谢有着重要影响,在不同温度下,细菌的脲酶活性差异性较大,因此会在很大程度上影响微生物砂浆的性质。岩土材料 MICP 加固较为适宜的温度为 20~37℃,在这个温度范围内可以生成胶结质量较高的微生物砂浆^[40]。

图 3 为不同温度下微生物砂浆单轴抗压强度与碳酸钙含量的关系,可以看出当碳酸钙含量一致或者相近时,环境温度为 25℃ 时微生物砂浆强度最高;结合扫描电镜的结果可知,在 25℃ 下形成较多的方解石,对微生物砂浆性能提高具有关键作用^[40]。

然而,实际工程应用中不可避免存在低温环境。因此,为适应不同应用场景下的环境温度,研究人员对细菌进行驯化,使其在低温环境下可以持续并且高效率的产生脲酶,但与温度驯化有关的研究还处于初步探究阶段^[34]。

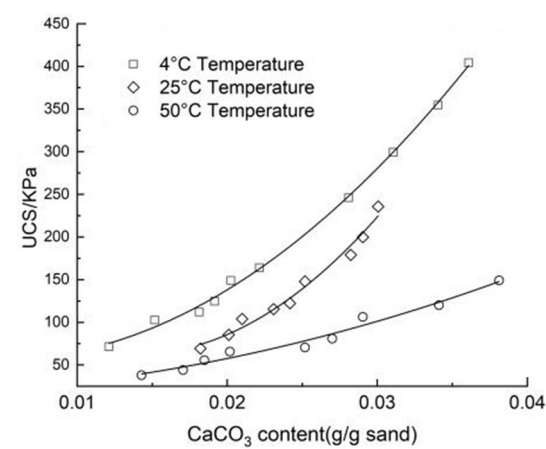


图 3 不同温度下微生物砂浆单轴抗压强度和
碳酸钙含量的关系^[40]

Fig.3 Relationship between uniaxial compressive strength
and calcium carbonate content of microbial
mortar at different temperatures^[40]

Rebatalanda^[41]研究孔径几何限制和细菌细胞与土壤颗粒之间的机械相互作用,在颗粒粒径

较小的细粒土中,孔隙与渗流路径较小,将会限制微生物的转移,导致碳酸钙在上部累积,固化效果较差。陈适等^[42]选取颗粒粒径、脲酶活性、底物浓度、配比作为变量因素,对微生物固化珊瑚砂进行研究,结果表明,对加固强度影响强弱的顺序为粒径、酶活、底物配比、底物浓度,而对于干密度影响的强弱顺序为酶活、粒径、底物配比、底物浓度。崔明娟^[43]使用化学处理方式采用单一浓度与多浓度相结合进行注射胶结液,研究化学处理方式对微生物固化砂土的影响,结果表明化学处理方式对强度有较大影响,但并不影响破坏的模式和碳酸钙含量。Gorospe 等^[44]使用 4 种不同钙盐进行微生物加固试验,发现添加任何钙盐对巴氏芽孢杆菌的脲酶活性都有负面影响,并通过扫描电镜观察了生成碳酸钙的形态和结构差异,虽然不同的钙盐在 MICP 加固效果存在差异,但都能将砂土进行胶结。影响 MICP 技术加固效果的不仅是材料,还有其固化方式。目前的固化方式主要为拌合法、浸泡法、单相注浆法、分步注浆法(如表 5)。

表 5 MICP 技术固化方法

Tab.5 Soil reinforcement methods of MICP technology

固化方法		研究结果	文献来源
灌注方式	蠕动泵依次向试样中注入菌液和营养盐,得到较高强度的的微生物砂浆		[45]
喷洒方式	菌液和营养盐的渗入深度有限,碳酸钙易形成在砂样表面,经常用于土体抗风蚀处理和边坡表面的加固方面		[46]
浸泡方式	生成的碳酸钙晶体可以在微生物砂浆中较为均匀的分布,但目前仅限于实验室尺度		[47]
拌合法	拌合所生成的碳酸钙晶体较少,导致所得到的微生物砂浆强度较低。		[48]

4 讨论及进一步研究方向

近年来,尽管 MICP 技术已经取得很多新的进展,但该技术在试验实施过程中及在实际工程应用特别是在海洋岩土工程领域的应用,还存在以下几个方面的问题,有待于进一步研究:

4.1 MICP 技术的均匀性

MICP 技术在实际操作过程中,诱导产生的新矿物会出现分布不均匀现象,导致加固均匀性较差。为解决加固不均匀问题,研究人员使用多种方法进行改善,如改进注浆加固方式、使用外加剂提高微生物在土体中的分布均匀性、调整胶结

液配方等。这些方法能在一定程度上改善 MICP 技术的均匀性,但仅限于室内试验,且效果并不十分理想。当微生物砂浆应用尺寸扩大时,这种不均匀性会更为明显。因此,均匀性问题需要进一步加强研究。

4.2 环境对 MICP 技术的影响

目前 MICP 技术主要通过室内试验进行研究,但是在应用中微生物受到环境的影响较大,如环境温度、酸碱度、离子种类和浓度等。这些环境因素会影响 MICP 技术的应用效果。下一步需要加大现场试验来降低各种环境因素对 MICP 技术应用效果的影响。

4.3 MICP 技术的耐久性

MICP 技术在短时间内能起到加固效果,其诱导出的碳酸盐矿物或许难以长期稳定地在特殊环境中存在。研究表明,冻融循环前后砂柱的抗压强度损失率高达 52.1%^[48]。此外, MICP 固化砂土的耐酸抗侵蚀性的研究也存在不足。因此,需要进一步研究 MICP 技术的耐久性问题。

4.4 MICP 技术的经济性

目前,大部分 MICP 在实验室的研究都是建立在强度可以满足应用要求且可控的基础上,主要通过提高菌液酶活性、灌入的菌液和营养液量以及改变营养盐的浓度,使细颗粒介质中生成足够多的碳酸钙结晶来提高微生物砂浆的强度。尽管灌注方式可以得到强度相对较高的微生物砂浆,但是需要消耗大量的水、尿素、钙盐和其他资源。因此,研究如何用更少的原材料获得更高的微生物砂浆强度是将 MICP 技术应用到工程中的又一关键。若大规模在实际工程中应用 MICP 技术,则需要菌液发酵罐进行大规模的培养微生物,未来仍需要对微生物的培养过程与工艺进行优化,以提高该技术的经济性。

4.5 MICP 技术在海洋岩土工程领域的研究

由于实验室条件有限,大部分研究人员采用人工模拟海水环境来研究 MICP 技术在海洋岩土工程领域应用的可行性。然而,人工模拟海水

环境与天然海水环境差别较大,天然海水中存在较多微生物以及金属和非金属离子等,这些对菌液培养和 MICP 技术实际处理效果有较大影响。此外,海水环境培养巴氏芽孢杆菌会出现明显的生长滞后期,说明海水环境会抑制巴氏芽孢杆菌的生命活动。因此,下一步需要在实验室探讨使用天然海水作为胶结液水源的 MICP 技术的可行性,并在未来实际海洋环境中进行论证和优化研究。

5 总结

通过以上的文献综述表明,微生物诱导碳酸盐沉淀的生成速度及胶凝强度可控,达到了土木工程应用中黏结材料的基本标准,且具有流动性好、渗透性强等优点。此外,该技术绿色环保,将促进可持续发展,为减少碳排放做出贡献,是土木工程领域未来研究的热点。目前,微生物岩土工程技术已经被广泛应用于岩土体加固、砂土液化防治、重金属污染治理、土石砖类文物建筑修复、混凝土裂缝修复和智能自修复混凝土等多个领域中。然而,该项技术在实际应用,尤其是在海洋岩土工程领域的应用中还存在均匀性、耐久性、环境适应性和经济性等方面问题,未来需要结合微生物学、地质学、材料学和岩土工程学等学科针对这些问题进行更深入的探究。

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,2000:19-28.
- [2] 钱春香,王安辉,王欣.微生物灌浆加固土体研究进展[J].岩土力学,2015,36(6):1537-1548.
- [3] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement[D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [4] DE MUYNCK W, DE BELIE N, VERSTRAETE W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2):118-136.
- [5] IVANOV V, CHU J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil insitu[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2008, 7(2):139-153.
- [6] 陈育民,张书航,丁绚晨,等.微生物加固钙质砂强度演化过程的环剪试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(4):10-17.
- [7] 余振兴.南海岛礁陆域高盐环境珊瑚砂微生物固化技术[D].泉州:华侨大学,2019.
- [8] 李多.微生物诱导碳酸钙沉淀固化沙漠风积砂的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [9] 沈泰宇,汪时机,薛乐,等.微生物沉积碳酸钙固化砂质黏性紫色土试验研究[J].岩土力学,2019,40(8):3115-3124.
- [10] 赵志峰,孔繁浩.土体环境对微生物诱导碳酸钙沉积加固海相粉土的影响研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(4):608-614,692.
- [11] 王博. MICP 加固粗颗粒盐渍土试验及机理分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [12] 刘建兴,李金柱,谢新宇,等. MICP 固化淤泥土的强度试验研究[J].低温建筑技术,2020,42(5):17-20.

- [13] VAN PASSEN L A. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications[J]. Proceeding of Geo-Frontiers; Advances in Geotechnical Engineering, 2011: 4099-108.
- [14] VAN PASSEN 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.
- [15] ZHAN Q W, QIAN C X, YI H H. Microbial-induced mineralization and cementation of fugitive dust and engineering application[J]. Construction and Building Materials, 2016, 12:437-444.
- [16] GOMEZ MG, MARTINEZ B C, DEJONG J T, et al. Field-scale bio-cementation tests to improve sands[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2015, 168(3): 206-216.
- [17] 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.
- [18] LIU S Y, YU J, PENG X Q, et al. Preliminary study on repairing tabia cracks by using microbially induced carbonate precipitation[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248:118611.
- [19] YANG Z, CHENG X H, LI M. Engineering properties of MICP-bonded sandstones used for historical masonry building restoration[C]. //Geo-frontiers Congress, March 13-16, 2011, Dallas, Texas, USA. Reston, VA, USA American Society of Civil Engineers 2011: 4031-4040.
- [20] 谭谦. 微生物用于石质文物破损修复的试验研究[D]. 北京:清华大学, 2017.
- [21] MINTO J M, TAN Q, LUNN R J, et al. 'Microbial mortar'-restoration of degraded marble structures with microbially induced carbonate precipitation[J]. Construction and Building Materials, 2018, 180:44-54.
- [22] 何建宏, 郭红仙, 谭谦, 等. 微生物诱导碳酸钙修复汉白玉石梁裂缝试验研究[J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(6): 46-53.
- [23] 张建伟, 黄小山, 边汉亮, 等. 基于脱脂奶粉联合诱导碳酸钙沉淀技术的古建筑修复加固[J]. 中国科技论文, 2021, 16(10): 1035-1039, 1054.
- [24] 张越. 微生物用于砂土胶凝和混凝土裂缝修复的试验研究[D]. 北京:清华大学, 2014.
- [25] 王瑞兴, 钱春香. 微生物沉积碳酸钙修复水泥基材料表面缺陷[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4): 457-464.
- [26] JONGVIVATSAKUL P, JANPRASIT K, NUAKLONG P, et al. Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method[J]. Construction and Building Materials, 2019, 212:737-744.
- [27] SUN X, MIAO L, WU L, et al. The method of repairing microcracks based on microbiologically induced calcium carbonate precipitation[J]. Advances in Cement Research, 2020, 32(6): 262-272.
- [28] LIN WB, LIN W, CHENG X H, et al. Microbially induced desaturation and carbonate precipitation through denitrification: a review[J]. Applied Sciences, 2021, 11(17): 7842.
- [29] ACHAL V, PAN X L, FU Q L, et al. Biomineralization based remediation of As(III) contaminated soil by *Sporosarcina ginsengisoli*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 201-202:178-184.
- [30] KUMARI D, PAN X L, LEE D J, et al. Immobilization of cadmium in soil by microbially induced carbonate precipitation with *Exiguobacterium undae* at low temperature[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 94:98-102.
- [31] LI M, CHENG X H, GUO H X. Heavy metal removal by biomineralization of urease producing bacteria isolated from soil[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, 76:81-85.
- [32] ACHAL V, PAN X L, ZHANG D Y, et al. Bioremediation of Pb-contaminated soil based on microbially induced calcite precipitation[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2012, 22(2): 244-247.
- [33] 董博文, 刘士雨, 俞缙, 等. 基于微生物诱导碳酸钙沉淀的天然海水加固钙质砂效果评价[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1104-1114.
- [34] 肖瑶, 邓华锋, 李建林, 等. 海水环境下巴氏芽孢杆菌驯化及钙质砂固化效果研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 395-404.
- [35] 李昊, 唐朝生, 刘博, 等. 模拟海水环境下 MICP 固化钙质砂的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1931-1939.
- [36] 刘渊, 张友良, 胡晋宁, 等. 模拟海水环境下 MICP 固化滨海粉细砂的试验研究[J]. 海南大学学报(自然科学版),

- 2021, 39(4):390-396.
- [37] 彭劫, 田艳梅, 杨建贵. 海水环境下 MICP 加固珊瑚砂试验[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(1):58-62.
- [38] 杨司盟, 彭劫, 温智力, 等. 浓缩海水作为钙源在微生物诱导碳酸钙加固砂土中的应用[J]. 岩土力学, 2021, 42(3):746-754.
- [39] CHENG L, SHAHIN M, MUJAH D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(1).
- [40] TANG C S, YIN L Y, JIANG N J, et al. Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil;a review[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(5):1-23.
- [41] REBATA-LANDA V. Microbial activity in sediments: effects on soil behavior[M]. Georgia Institute of Technology, 2007:59-104.
- [42] 陈适, 方祥位, 申春妮, 等. 珊瑚砂微生物固化条件优化的正交试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3):125-131.
- [43] 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(S1):392-396.
- [44] 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.
- [45] PAN X H, CHU J, YANG Y, et al. A new biogrouting method for fine to coarse sand[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(1):1-16.
- [46] ZHAO Q, LI L, LI C, et al. A full contact flexible mold for preparing samples based on microbial-induced calcite precipitation technology[J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(5):917-921.
- [47] WEN K J, LI Y, LIU S H, et al. Development of an improved immersing method to enhance microbial induced calcite precipitation treated sandy soil through multiple treatments in low cementation media concentration[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(2):1015-1027.
- [48] 谭谦, 郭红仙, 程晓辉. 微生物水泥砂浆的强度及耐久性试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(7):42-47.

(责任编辑:方素华)