

doi: 10.12052/gdutxb.230187

微生物诱导碳酸钙沉淀技术的工程应用进展与评述

梁仕华¹, 谢运鹏¹, 邓尤术²

(1. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 中铁隧道集团三处有限公司, 广东 广州 510006)

摘要: 基于微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Calcium carbonate Precipitation, MICP)技术的土体胶结固化技术是21世纪以来岩土工程、地质工程领域研究的热点之一。本文系统阐述了MICP技术的加固机理, 从MICP加固效果和应用实践的角度出发, 对MICP技术工程应用的研究现状进行评述。结果表明: MICP固化后的场地强度呈现出均匀性明显、碳酸钙含量分布随深度递减的趋势; 沙漠环境中, 原位提取的菌种诱导生成的碳酸钙覆膜较传统的巴氏芽孢杆菌, 具有更好的强度表现和稳定性; 新型MICP技术应用(如微生物水泥、微生物砖)在强度、耐久性上表现出良好的应用前景, 有望为实现我国双碳目标注入新的活力。基于MICP技术碳酸钙沉淀特质的影响因素, 现场尺度下如何提高碳酸钙分布的均匀性以及在不同环境下的碳酸钙骨架的耐久性、不同环境下的固化效率改进方案应该成为日后研究的重中之重。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 固化效果影响因素; 工程应用

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2024)02-0011-12

Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation Technique Progress and Review of Engineering Applications

Liang Shi-hua¹, Xie Yun-peng¹, Deng You-shu²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. China Railway Tunnel Group three Co., Ltd., Guangzhou 510006, China)

Abstract: Soil cementation and solidification, based on microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technology, has emerged as research hotspots in geotechnical engineering and geological engineering since the 21st century. In this research, the reinforcement mechanism of MICP technology and the research status of the engineering application and the reinforcement effect and application practice are systematically described and reviewed. The results show that the strength of the site after MICP solidification shows an obvious non-uniformity, and the distribution of calcium carbonate content decreases with depth. In desert environment, the calcium carbonate coating induced by in-situ extraction of bacteria demonstrates superior strength and stability to the traditional *Bacillus pasteurii*. The application of new MICP technology, such as microbial cement and microbial brick, shows promising prospects in terms of strength and durability, and new vitality into the realization of China's double carbon goal. Addressing the factors affecting the precipitation characteristics of calcium carbonate by MICP technology, the uniformity of calcium carbonate distribution at field scale is enhanced, the durability of calcium carbonate skeleton under seasonal changes ensured, and curing efficiency under different environments improved, which should all be prioritized in future research.

Key words: microbial induced calcium carbonate precipitation; influencing factors of curing effect; engineering application

当今,在全球气候变暖的大背景下,世界各国已陆续设立了符合各国国情的双碳目标。我国也做出

了2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和的承诺。我国作为基建大国,传统的以水泥基材料为基础的注

收稿日期: 2023-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078142); 广东省自然科学基金资助项目(2022A1515011047); 广州市科技计划项目(202002030194)

作者简介: 梁仕华(1976-),男,教授,博士,主要研究方向为环境岩土及地下空间工程, E-mail: shihua_l@gdut.edu.cn

浆加固技术,制作水泥的过程中将产生大量的 CO_2 ,不利于我国碳减排目标的实现,节能减排迫在眉睫。近十年来,通过微生物学、地球化学和土木工程的跨学科交叉研究,开发了一种新型土体固化技术:微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP)技术^[1],胶结土粒,填充孔隙,在改善土体工程性能的同时,实现生物固碳。

微生物诱导碳酸钙沉淀技术作为一种应用技术,在工程领域内的研究非常广泛^[2],在岩土工程领域内具有巨大的潜能,涉及的领域包括软基加固^[3-5]、覆膜固沙^[6-8]、土工材料制备^[9-14]等等。国内外学者对微生物本身的工程特性及其可能产生的危害等方面做了大量的研究;在小尺寸试样上,诸多学者开展了相应的室内试验研究,从细菌种类、脲酶活性、胶凝液性质、土体基本性质、固化工艺等方面,分析了各种因素对固化土体的固化均匀性、渗透性、强度、剪切波速等方面的影响。在大尺寸试样上,现场试验屡见不鲜,研究人员从碳酸钙含量、贯入试验、耐久性、融冻性、质量损失等多方面评价固化土体的工程应用价值。虽然目前MICP在土体固化方面的研究较多,但从成本上考量,昂贵的价格是限制MICP技术发展的一道门槛。与此同时,细菌的制备包含一系列复杂的操作,这些操作无形中增加了人工成本;大型现场环境中的固化土体耐久性、带来的生态安全问题也限制着MICP技术的工程应用^[14]。

近几年,一种新型的酶诱导碳酸钙沉淀技术^[15-19](Enzyme Induced Carbonate Precipitation, EICP)被广泛用于土体改良等方面,EICP技术直接使用脲酶,替代产脲酶细菌的代谢过程,避免了外部环境因素对细菌活性、分裂及生长的影响,无需消耗氧气的同时蕴含着良好的固碳潜能,有望为深部土体固化处理提供的理论及技术支持。

为此,本文基于微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术的固化机理,从MICP加固效果的影响因素和应用实践的角度出发,对MICP技术工程应用的研究现状进行评述,分析MICP技术工程应用的最新进展,归纳MICP加固效果的影响因素,介绍MICP加固技术的应用场景,讨论当前MICP工程应用的困难和挑战,同时给出并探讨具有针对性的研究建议,以期MICP技术的工程应用提供新的思考和思路。

1 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术及加固机理

1.1 MICP生物化学加固机理

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术依赖于微

生物的代谢活动,通过利用广泛存在于自然界中的高产脲酶嗜碱性细菌,如:巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*, DSMZ33, ATC5199,曾用名*Bacillus pasteurii*)新陈代谢促进尿素水解,产生大量的 CO_3^{2-} ,通过与环境中大量游离的钙离子结合生成碳酸钙沉淀。产脲酶菌通过吸附在土颗粒或砂石颗粒,在合成碳酸钙沉淀过程中,对砂颗粒或土体颗粒进行胶结(如图1所示^[20])、填充土体中的孔隙,进而达到提高土体强度和刚度的目的^[21-25]。

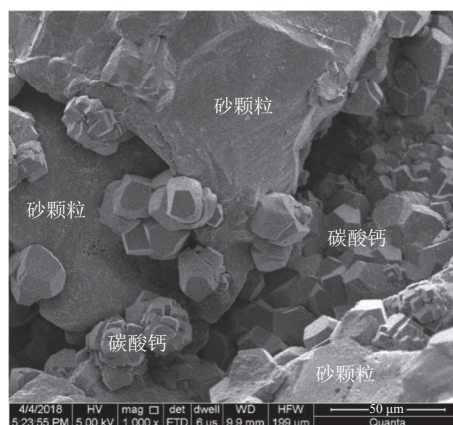
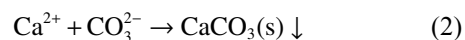


图1 碳酸钙晶型^[20]

Fig.1 Calcium carbonate crystal type^[20]

目前,国内外学者在MICP过程中大多采用的产脲酶菌为巴士芽孢杆菌,在适当浓度的尿素环境下,将尿素水解为 NH_4^+ 和 CO_3^{2-} ,这个过程将伴随着大量 OH^- 的产生,为碳酸钙的沉淀提供碱性环境(如图2、图3所示)。研究表明,碳酸钙沉淀的形成主要受温度、pH、钙离子浓度、可溶性无机碳的浓度、成核位点等关键因素控制。

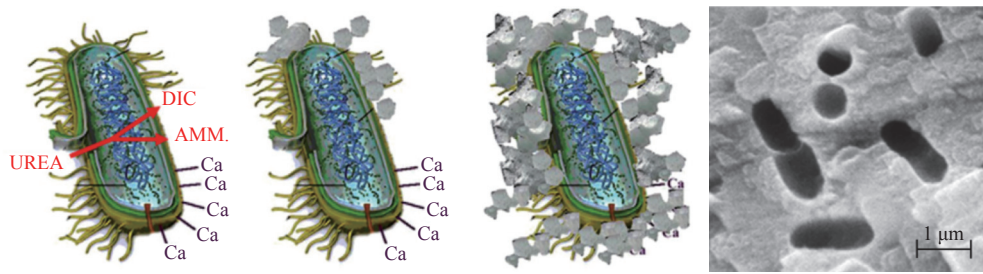
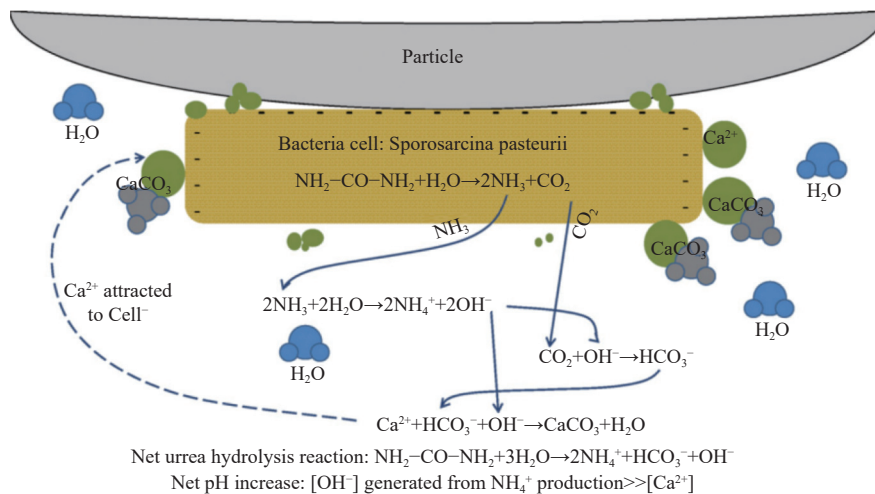
脲酶菌诱导碳酸盐结晶的生物化学加固机理可描述为



在上述反应过程中,脲酶菌主要起到以下2个作用:(1)代谢产物逐步释放有助于尿素水解的脲酶,提高环境pH值,促进碳酸根离子形成。(2)为碳酸钙的沉淀结晶提供成核节点,促进碳酸钙等一系列碳酸盐反应结晶。最终形成的产物(碳酸钙)将作为土或砂石颗粒间孔隙的填充物质,起到颗粒胶结及加固土体的作用。

1.2 MICP生物物理加固机理

对于MICP中深层次的生物物理胶结机理,一些学者展开了一系列研究。

图2 微生物诱导钙盐沉积示意图^[21]Fig.2 Microbially induced calcium salt deposition^[21]图3 颗粒表面微生物诱导碳酸盐沉积过程示意图^[26]Fig.3 Schematic diagram showing the microbiologically induced calcium carbonate precipitation on the surface of particles^[26]

王绪民等^[27]基于X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、X射线能谱分析(EDS)、直接剪切等试验测试胶结试样,分析了胶结试样微观结构及力学性能的变化,并对其生物物理机理进行研究,结果表明,选用直径为0.25~1 mm的20 g重塑泥岩环刀样,在相同浓度营养盐条件下采用一次浸泡菌液的方式可以在试样中形成方解石型碳酸钙晶体;碳酸钙晶体沉积在颗粒接触处或填充在孔隙中形成“胶结桥”,产生胶结效果而增强试样的力学性能。

李春等^[28]对不同固化时间下巴氏芽孢杆菌诱导碳酸盐沉积加固的砂土进行了共振试验、阻尼试验及电镜扫描试验,从固化砂土的动力特性及微观孔隙特征两方面分析了加固效果砂土动力特性与其孔隙结构存在密切的关系,结果表明:随着固化时间的增加,砂土最大动剪切模量表现为先加速增加后减速增加直至平缓,最小阻尼比表现为先加速减小后减速减小至平缓,两者的变化符合指数函数规律;砂土内部微观孔隙分形维数和孔隙率均呈下降趋势,其变化规律可采用 Boltzmann 函数表达;基于微观孔隙分形维数和孔隙率建立的固化砂土动力特性方

程能较好地表达固化作用下砂土动力特性与其微观孔隙间的联系。

梁仕华等^[29]将颗粒粒径范围为0.074~2.000 mm的砂土分成颗粒级配良好与颗粒级配不良4组,分别测试了固化后砂样的无侧限抗压强度、渗透系数、孔隙率,碳酸钙沉淀量,从宏观角度对比了颗粒级配对微生物固化砂土的物理力学性质影响。结合电镜扫描,从微观角度分析了颗粒级配对微生物固化砂土的影响机制。从生物物理层面分析,相比于颗粒级配不良的砂土,颗粒级配良好的砂土碳酸钙沉淀量与均匀性更好,孔隙率与渗透系数更小,从而增加了试样的无侧限抗压强度。

通过微观层面上的技术分析,MICP固结砂颗粒主要原因有:(1) MICP作用过程中形成氢键,松散的砂粒被生物方解石黏合在一起,起到了搭桥的作用。(2) MICP改变了砂土中硅原子的微电子环境,促进了氢键的形成,可以有效发挥砂颗粒与沉积碳酸钙间的范德华力,宏观表现为砂土颗粒中形成紧密的胶结作用,进而提高砂土颗粒的强度。

2 微生物加固在工程中的应用研究进展与评述

2.1 微生物固化软弱地基研究进展与评述

中共十八大作出了建设海洋强国的重大部署,大规模软土地层、岛礁工程建设势在必行、刻不容缓。在华南、南海等软土富集及岛礁地区进行工程建设,往往需要预先进行场地处理,以增加软土的承载力和改善其变形性能。

国内外学者在利用微生物进行地基处理领域开展了相关室内研究及现场试验。van Paassen团队^[30]历经5年时间(2003~2008年)开展了砂柱大小规模的室内试验直至 100 m^3 规模的大型现场试验(如图4所示),在12 d的时间内生物固化了约 43 m^3 的砂土,对这些大型实验的样品进行测试,结果表明:(1)加固后砂土的剪切波速从 100 m/s 增加到最大 400 m/s ;静力触探试验可得井口处最大强度可达 5 MPa ;对固化后的砂土试样进行无侧限强度测试,不同部位无侧限强度差异较大,最大达 12.6 MPa 。(2)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^[31]。(3)尽管获得了显著的强度提高,但因为工程性质在整个胶结砂体过程中采用的是—侧灌浆—侧抽浆的方式,注浆呈平行于流动方向的分层分布^[32],导致经过MICP处理后的场地不均匀性较为明显,靠近注浆口侧生成的碳酸钙含量较多,可达 23.5% ;随着距离增大,远离出浆口侧碳酸钙含量下降明显,仅为 3.7% 。

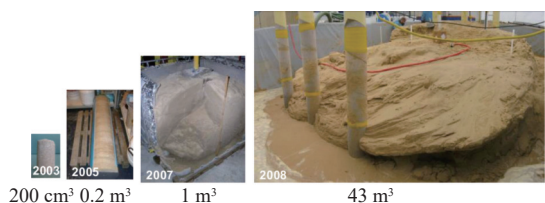


图4 基于微生物诱导碳酸盐沉淀的地基改良试验成果^[30]
Fig.4 Experimental results of foundation improvement based on microbial induced carbonate precipitation^[30]

近年来,刘汉龙团队^[33]选取了南海某吹填岛礁,开展了人工吹填岛礁钙质砂地基现场微生物加固试验研究(如图5所示)。选取了4块 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ (约 1.125 m^3)的钙质砂土地基作为试验区域,采用倾倒入法对试验区域进行MICP加固。结果表明:(1)钙质砂地基在经过3~4次加固后可以检测出地基强度提升;经过9次加固处理后地基表面强度大于 10 MPa ,最高可达 20 MPa 。(2)加固后的砂基无侧限抗压强度表现出较大差异,部分加固区取得的试样的无侧限抗压强度

值最大为 821 kPa ,最小为 231 kPa ,相差 590 kPa ,这个结果明显地反映出加固后地基强度的不均匀性。(3)通过倾倒入法的处理,地基加固深度达 70 cm ,说明倾倒入法具有良好的垂直分布特点。

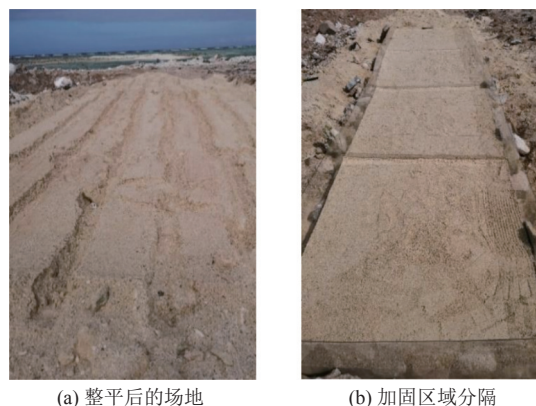


图5 试验现场及地基分隔^[33]
Fig.5 Test site and separation of the foundation^[33]

为了研究现场表面固砂的可行性、稳定性以及植被可恢复性,Gomez等^[3]在加拿大一矿区附近开展了MICP固化砂土的现场试验,如图6所示。试验区包括4块不同MICP反应液浓度的加固区域(如图6(a)所示),每块面积 $2.4\text{ m}\times 4.9\text{ m}$,设计处理深度为 0.3 m 。表面处理结束后,肉眼可见场地胶结出微生物结壳,经测量结壳厚度在 $0.64\sim 2.5\text{ cm}$ 之间(如图6(b)所示),后续通过动力触探试验发现,固化后的场地贯入阻力明显提高。取部分结壳表面做碳酸钙含量分析,可得出生成的碳酸钙随着深度增加而降低,表面处碳酸钙含量为 2.1% 左右,但在深度 10 cm 左右仅为 0.5% 。随后对场地进行了长期标准贯入试验,以检

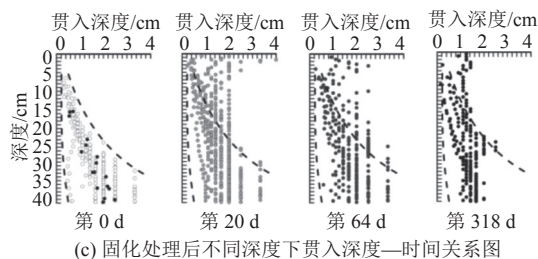
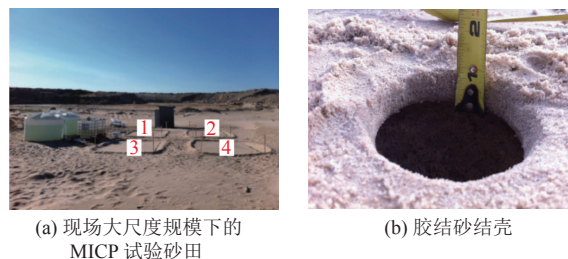


图6 MICP固化表层砂现场试验^[3]

Fig.6 Field test of MICP solidified surface sand^[3]

测加固区域的耐久性(如图6(c)所示)。试验发现,短期内(20 d以及64 d)场地强度没有明显退化现象;但在试验第318 d后再检测,发现加固场地强度有一定退化现象,原因可能是由于寒冬冰雪融冻的影响,微生物胶结产物耐久性降低。

MICP固化砂土地基过程中相关参数(如菌液浓度、流速等)控制着 CaCO_3 晶体胶结的现场分布,目前试验研究对相关参数的正确理解仍然不够,因此,这是微生物加固地基技术进一步发展的最大挑战。

陈适等^[4]着眼于新型桩应用,开发了一种利用微生物固化技术将珊瑚砂固化成桩的成桩技术(如图7所示),通过微生物珊瑚砂桩单桩复合地基模型试验,研究了褥垫层厚度和桩间珊瑚砂相对密度对微生物珊瑚砂桩单桩复合地基承载特性的影响。室内试验结果表明:在所研究的褥垫层厚度范围内,褥垫层厚度增加,地基承载力将得到明显提高,微生物砂桩复合地基模型建议采用0.6倍桩径厚度褥垫层;桩间砂越密实,地基承载力及桩侧摩阻力相应得到提高;桩侧最大摩阻力出现于距离桩顶部约1/3~1/2处。试验结果同时也表明:这种通过微生物固化技术预制成桩埋入地基后形成复合地基,改善砂层或软弱地基的方式具有一定的发展潜力。

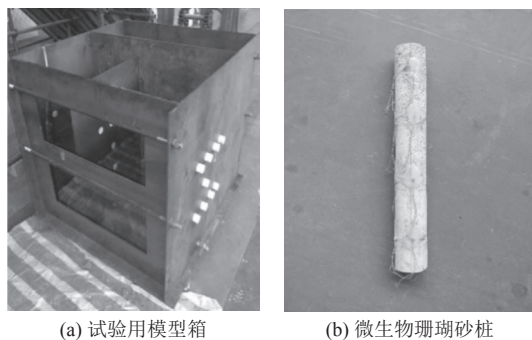


图7 室内试验模型箱及模型桩^[4]

Fig.7 The model box and model pile for indoor test^[4]

章懿涛等^[5]在前人研究的基础上对不同含水状态下的微生物珊瑚砂桩单桩复合地基进行了研究。实验过程为:首先,采用低pH法对珊瑚砂桩的固化过程进行改良,得到了固化均匀、强度较高的微生物珊瑚砂桩,无侧限强度可达14 MPa。后续试验过程中将预制砂桩置于模型箱内,分3种工况(干燥状态、饱和和水位状态、水位升降状态)测试其复合地基承载力、单桩桩身轴力、沉降及土压力传递规律等特性。试验结果表明:干燥状态下的珊瑚砂桩地基相较于饱和状态下的地基承载力提高约43.75%;干燥状态下珊瑚砂桩桩身轴力和桩土应力比受桩间砂密实度

影响较大,随相对密实度增大而减小,饱和状态相对于干燥状态最大桩身轴力和桩侧摩阻力减小,桩土应力比增大;水位升降状态对微生物珊瑚砂桩单桩复合地基的承载特性影响较小。通过模具固化、预制成桩,将微生物砂桩埋入地基的技术方法简单、易于操作,能作为一种竖向增强体改善软弱砂土地基的承载力,具有良好的应用前景。

综上所述,微生物处理软土地基在岩土工程领域有着广泛的应用前景,MICP技术处理易液化的砂土、边坡加固及生物封堵均有着显著的社会经济价值。然而,就对目前MICP技术现状而言,存在一些亟待解决的难题。(1) MICP固化后的土样的工程性质(无侧限强度、渗透性等)研究较为深入,但其耐久性、抗冲刷性能鲜有研究,作为一种应用技术,MICP技术需要适配出在复杂工程环境下的适应性。(2) MICP技术的经济效应还有待探讨。大规模应用时需要考虑廉价的钙源,与此同时固化时产生的气态、固态副产物处理也是MICP实际应用的一大挑战。

2.2 微生物固化沙漠风积沙研究进展与评述

我国是世界上受荒漠化和沙化影响最严重的国家之一,沙漠集中分布在新疆、内蒙古、甘肃、宁夏等西北干旱地,若能因地制宜,借助科技创新,将风积沙应用到实际工程中,不仅能够减轻对于河沙的依赖,而且可以解决风积沙的处理难题,具有巨大的社会、环境及经济效益。长久以来,研究人员采用化学方法加固沙漠风积沙,即向风积沙中注入化学浆液,利用黏性材料把沙粒粘结成具有一定力学强度的沙粒聚集体。李驰等^[34]对运用MICP技术矿化沙漠风积沙的可行性进行了试验验证。当岩土基质具有较大的孔隙率且级配良好时,MICP矿化过程更加充分,MICP矿化砂土试样呈现出更好的强度特性。为完备微生物固化沙土的现场原位数据,探究绿色生物技术与沙漠治理相结合背景下特殊土改良技术的新突破,李驰等^[35]进一步在中国内蒙古乌兰布和沙漠地区进行了原位微生物矿化覆膜现场试验。在现场建立3个试验区域(如图8(a)所示),其中2个试验区域(TP1和TP3),尺寸均为1.65 m×1.30 m,采用不同的微生物菌种进行诱导矿化试验;另一个为原土对照区域(TP2),尺寸为1.65 m×0.30 m。试验分别选择葡萄球菌(TP1)及巴氏芽孢杆菌(TP3),在 $V_{\text{菌液}}:V_{\text{钙源}}=1:10$; $V_{\text{菌液}}:V_{\text{风积沙}}=1:2.5$ 的比例下,交替喷洒43.5 L微生物菌液与108.75 L钙源溶液(如图8(b)所示),实验过程共持续4 d。覆膜试验结束后,对场地进行贯入试验测试其覆膜层强度随时间的发展规律(如图8(c)所示),同

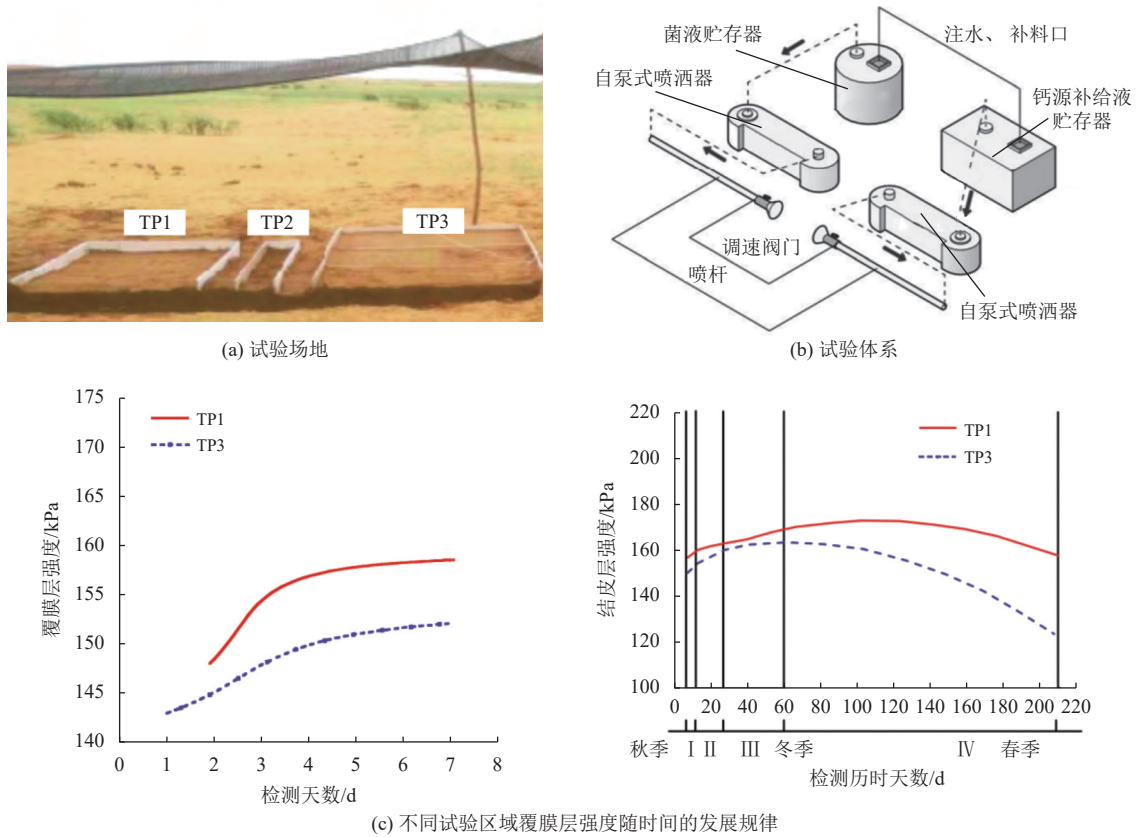


图8 MICP固化表层砂现场试验^[5]

Fig.8 Field test of MICP solidified surface sand^[5]

时测定覆膜内的碳酸钙含量,时长共210 d。矿化第7 d,覆膜层的平均结厚度为2~2.5 cm,碳酸钙含量14%左右。矿化第210 d,TP1(葡萄球菌处理)表面覆膜厚度降低约0.2 cm,碳酸钙含量降低1%;TP3表面覆膜厚度降低约1.5 cm,碳酸钙含量降低约4%。TP1(葡萄球菌处理)与TP3(巴氏芽孢杆菌处理)的表面覆膜在贯入深度2 cm时,贯入阻力从2N提高到24.3 N和20.3 N,且经过210 d后,贯入阻力仍能保持稳定。试验表明,自行提取的葡萄球菌经诱导生成的矿化覆膜较传统的巴氏芽孢杆菌,具有更好的强度表现和沙漠现场环境中工作的稳定性。但值得关注的是,覆膜层受昼夜温差变化以及冬春季节性影响的原因,试验区域内覆膜层强度都有不同程度的降低。

葛鑫^[6]采用不同固化方式处理沙漠风积沙,以浸泡法固化沙土,发现以高浓度浸泡液处理的沙土其碳酸钙多沉积在沙粒接缝处,处理后的沙块无侧限抗压强度最大可达到3.61 MPa。高瑜等^[7]以乌兰布和沙漠风沙土为岩土基质,对基于MICP技术诱导矿化风沙土的紫外侵蚀特性进行微观试验研究,微观电镜扫描显示MICP矿化试件在紫外线长时间照射下,碳酸钙晶体出现孔洞,此现象证明了紫外线的长期照射侵蚀弱化了碳酸钙的性能。赵志杰等^[8]采取

MICP矿化覆膜联合超旱生植物种植技术,研究微生物矿化覆膜与植物联合固沙效果(如图9所示),结果显示采用巴氏芽孢杆菌作为矿化菌种,菌液浓度OD₆₀₀值为0.8,胶结液浓度为0.1 mol/L时,矿化覆膜对风沙土颗粒的矿化加固效果最优,在联合固沙的同时,矿化覆膜还具有良好的保水性,两次矿化覆膜的土体含水量比单次覆膜和未覆膜的分别高1.7%和4%左右。

综上所述,MICP固化沙漠风积沙的前景可期,

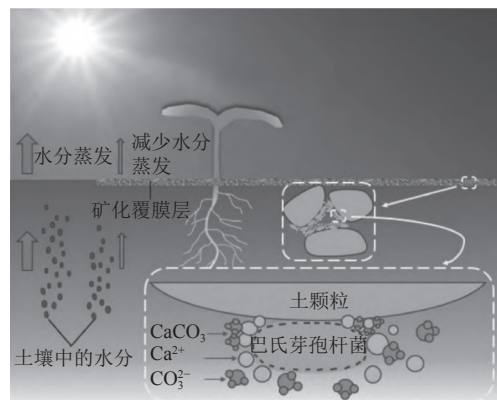


图9 矿化覆膜保水性效果图^[8]

Fig.9 Effect diagram of water retention of mineralized film mulching^[8]

其矿化覆膜工程应用上也有着良好的生态环境优势,但固化后沙质的均匀性,不同部位间的胶凝效果仍有讨论的空间,单元尺度试验结果分析(如碳酸钙含量、无侧限抗压强度、SEM/XRD测试)有待进一步完备,以期工程应用提供进一步的参考意义。

2.3 微生物细菌砖及混凝土原位修复技术工程应用及评述

迄今为止,混凝土是全世界使用最广泛的建筑材料。传统的混凝土需要用到水泥(必须加热到1 500 °C以上),以及大量不可再生的砂填料。文献[36]以砂子、碎石、玻璃、砾石或回收的建筑废料作为原材料,从中提取出的聚集体颗粒,结合微生物水泥生长成晶格结构,采取微生物固化的方式与周围的骨料颗粒结合,控制混合料的特性(如密度、渗透性和结构性能等)以形成一种固体水泥复合材料:生物混凝土细菌砖(如图10所示),这种生物水泥制备成的微生物细菌砖具有投入物廉价,原料丰富,可以从废物副产品中获取等特点。该材料不是在燃料密集型熔炉中铸造,而是在环境温度下生长。用于输送胶结剂的水成分在闭环系统中循环使用,并在制造过程中重复使用。



图10 微生物细菌砖^[37]
Fig.10 Microbial brick^[37]

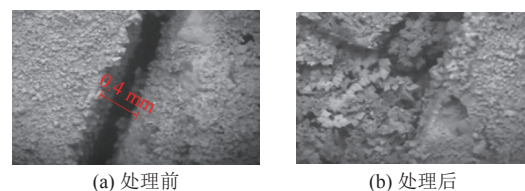
近年来,美国空军采用生物技术,把泥沙倒入模块,加入细菌,浇入营养液,细菌很快变成碳酸钙结晶,把沙子紧紧地粘合到一起,最后变成持久耐用的块状。并且用这些结晶块状在北卡罗来纳杜伦开展了大型现场试验,固化了一条约230 m²的跑道原型(如图11所示),实践证明微生物水泥固化跑道试验在实验室外也是完全可行的。

如今,混凝土作为最广泛使用的建筑材料,由于应力作用产生的裂缝给混凝土结构的耐久性和完整性带来了极大的负面影响,难以保证其使用寿命。混凝土微生物原位修复技术^[9]是一种廉价、有效、绿色的方式。其修复机理是,裂缝产生后,由于微生物新陈代谢导致以碳酸钙为代表的难溶性矿物产生,这

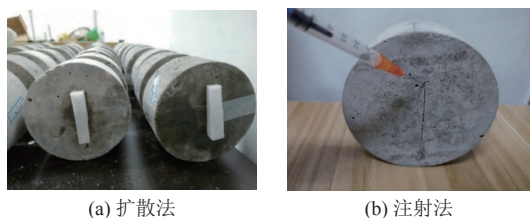


图11 微生物固化飞机跑道^[9]
Fig.11 Microbial solidification of airstrips^[9]

些矿物与混凝土的相容性极高,使裂缝得以修复^[34]。领域内诸多学者对此开展了研究,Algaifi等^[10]在人造混凝土裂缝中填充了球形芽胞杆菌、营养物和钙源,经X射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)分析(见图12),微生物矿化沉积物质为碳酸钙,70 d后宽度0.4 mm的裂缝被完全修复。在实验的基础上,Algaifi等^[10]进一步讨论了混凝土裂缝中尿素水解引起的方解石沉淀动力学的理论模型,采用有限元法和有限差分法对时间和空间上的常微分方程和二阶偏微分方程进行数值求解。该理论模型适用于大型MICP工程应用,最后利用扫描电镜(VP-SEM)和能量色散X射线分析(EDX)对预测的裂纹愈合结果进行了验证,两者具有较高的相似性,相关系数 $R=0.99$ 。Zhan等^[11]为实现海洋环境中混凝土裂缝自愈和固定侵入裂缝的有害离子的目标,开展了微生物矿化和无机矿物水化协同作用的研究。结果表明,由于 Cl^- 离子及 SO_4^{2-} 离子被双金属氢氧化物有效固定,并结合海水形成水化产物堆积在裂缝深部区域,降低了环境中的pH值,导致微生物的生长得到促进,无机矿物的水化作用与微生物的矿化作用可以起到良好的协同作用,形成叠加修复区,从而扩大修复范围。试验结果可为海洋环境下建筑物混凝土裂缝自修复和防腐提供参考。领域内学者利用不同注浆工艺对混凝土裂缝修补也开展了诸多研究。李锤奥等^[12]分别采用扩散法、注射法(如图13所示)对竖向裂缝宽度为0.1、0.2和0.4 mm的混凝土试件进行了MICP修复,并从微观(生成物成分及形貌)和宏观(耐久性能和力学性能)两个角度对裂缝修复效果进行了评价和对比分析。试验结果



(a) 处理前 (b) 处理后
图12 混凝土裂缝修补^[10]
Fig.12 Repair of cracks in concrete^[10]

图13 裂缝修复方法^[12]Fig.13 Fracture repair method^[12]

表明:与注射法相比,扩散法中的海绵条不仅可以存储胶凝溶液,还能为碳酸钙沉积提供附着点,这使得经扩散法修复后的3种裂缝宽度的混凝土试件的防水性能和抗氯盐侵蚀性能更好,这两种性能的平均提升系数分别达到了79.7%、60.9%,但劈裂抗拉强度的提升不明显。上述研究结果表明,采用扩散法修复混凝土构件中非受力状态下的竖向裂缝是有效的,可供实际工程应用参考。

综上所述,MICP技术处理后的建筑材料有着广泛的应用前景,但建筑领域环境复杂,影响微生物矿化沉积的因素较多,故MICP技术在建筑领域的应用尚存在一些问题亟需解决:(1)脲酶型微生物是MICP技术中运用最为广泛的一类菌种,但尿素水解过程中对温度有着较为严格的要求。同时反应过程中产生的氨类物质将对混凝土结构和环境造成影响,在工程应用时需引起重视。(2)强碱环境下,嗜碱型微生物表现出较低的酶活性,提高微生物在碱性环境下的适应性会是MICP在建筑领域发展的突破口。

2.4 MICP石质文物修补技术应用及评述

我国拥有丰富的文化遗产资源,历史上各个时期遗留下的大量石质建筑构件、基址、碑刻等文物几经风霜,亟待修复和保护。MICP技术加固修复技术

在对石质文物的耐久性、材料相容性、反应可控性、外观和谐性上均有显著优势。微生物诱导技术本身可控性较强,通过条件控制可选择性诱导产生与文物本体质地相近的材料,能充分发挥无机矿物材料耐老化性能优良、寿命长的优势,无论是应用于内部的灌浆加固、裂隙填补还是外部的断裂黏接、缺失补全都具有极佳的发展前景,对于国内石质历史建筑和遗迹的保护具有重要意义。目前国内学者将MICP技术应用在文物修复方面开展了相应研究。李沛豪等^[13]开展大理石历史建筑保护系列实验,在试样表面诱导矿化沉积2~3 d形成碳酸钙薄层,并对碳酸钙薄层进行了微观层面(X射线衍射仪、扫描电镜、压汞注射仪器、超声波分析)的分析,结果表明:MICP处理后生成的人工层与大理石基层可形成有效粘结,并对大理石表层结构形成有效保护。竹文坤等^[38-39]对四川乐山的红色砂岩进行了微生物处理。同时采用涂覆法和入浸法两种方法进行对比试验。试验中发现,样品产生碳酸钙颗粒大小为1~10,并形成一层致密的矿化膜,其厚度为50~100 μm 。从试验结果来看,浸入法要优于涂覆法。Willem De Muynck等^[40]对5种不同孔隙结构的法国石灰石使用浸泡的方法进行了微生物处理,发现试验中部分矿化层植入深度大于2 mm。何建宏等^[41]通过对比汉白玉石梁修复前后破坏荷载和强度的变化以及CT扫描技术可视化非贯通裂缝修复过程来评价修复效果(如图14所示)。试验结果表明:修复后石梁裂缝表面致密光滑,颜色与母材相近,整体美观性好;非贯通裂缝修复后破坏荷载均有所增加,贯通裂缝修复后的抗折强度能恢复到原有强度的35.12%,均值为3.684 MPa,最高能达到5.234 MPa;CT扫描结果定性和定量均表明胶凝体密度随修复进行而增加,接触面修复质量弱于其他位置。

图14 贯通裂缝石梁修复前后的石梁外观对比图^[41]Fig.14 Appearance comparison of the marble beams with through cracks before and after restoration^[41]

我国的东南沿海部有着较为密集的福建土楼建筑群,由于其自身材料和长年受到南方风雨的侵蚀,导致土楼墙体出现大量的裂缝,而在雨水的渗透下会进一步扩大,影响土楼的安全性。微生物灌浆加固

应用于福建土楼裂缝修补时,相比起传统灌浆材料(水泥、环氧树脂、石灰),有着材料性能相近、复原性好的优点。刘士雨等^[42]以修复三合土的裂缝为研究目标,利用MICP技术修复预先破坏的三合土试样,

并验证其修复效果(如图15所示)。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79.92%和88.54%。但恢复率随着裂缝宽度的增加呈现下降的趋势。另外,静态接触角试验结果说明,MICP不但修复了裂缝,同时还增强了裂缝的疏水性。MICP技术可作为修复三合土裂缝的有效方法。在此基础上,曾伟龙^[43]对经过抗弯和抗剪破坏的夯土试样进行微生物灌浆修复,裂缝设置为5,10和15 mm,对修复后的夯土试样重新进行抗弯和抗剪测试,以及裂缝处土样表面的静态接触角测试,分析抗弯和抗剪强度恢复率、修复后的破坏形式和土样表面接触角,得出伴随着裂缝宽度的变大,抗弯和抗剪强度恢复率下降,土样的耐水性虽然有所下降,但是下降并不明显,而裂缝处土样的耐水性与夯土试样本身的耐水性相比,显著提高。

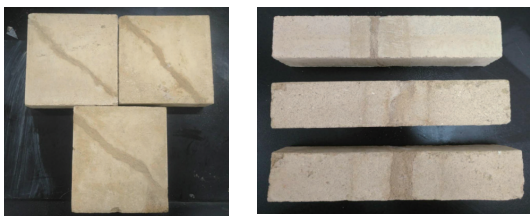


图15 经MICP修复后的不同尺寸的夯土试样^[42]

Fig.15 Rammed earth samples of different sizes after MICP restoration^[42]

综上所述,在文物修复工程应用上,MICP作为一种文物保护的全新方法技术有着相容性好、可较好地恢复其本体的完整性、结构稳定以及保证文物的外在美观性的优势。但MICP技术相较于黏接加固剂,仍有一些应用问题需要解决:(1)修复过程中多采用注射粘结加固的工艺,在面对一些长期风化易破碎的遗址时,需密切关注遇水渗流作用导致的土样破坏,减小对文物的影响。(2)注射修复过程中,单次贯入的菌液及营养液浓度、速率仍未有一定的标准,针对MICP技术应用与文物修复的相关标准的制定是未来文物保护工程的一大重任。

2.5 酶诱导碳酸钙沉淀技术应用及评述

近年来,虽然MICP技术的研究已取得十足的进展,但由于MICP加固过程中细菌培养困难、成本较高、细菌尺寸较大难以渗透孔隙率较低的土体等工程实际应用问题^[44],使得MICP技术的大规模运用有着一定的困难。于是有学者^[15,45]提出若直接采用酶诱导碳酸钙沉淀加固土体,这样可以克服一些MICP的局限性,更加适合实际应用。

国外关于EICP的应用研究较多,在防风固沙、

扬尘治理、加强软弱地基、加固边坡、土钉墙、裂缝修补等很多方面进行研究。Kavazanjian等^[46]选用了2种不同级别的硅质砂,采用EICP的方式进行砂柱固化试验,结果显示砂柱的抗压强度可以超过500 kPa,证明了利用EICP胶结砂柱进行土壤改良的可行性。Ossai等^[47]在实验室规模水平下,取EICP溶液浓度及硅质砂种类为变量,对固化处理后砂质土壤的径流侵蚀进行了评估,取得了良好的应用效果。Dakhane等^[48]进行了植物源脲酶催化尿素水解反应进行砂浆裂缝愈合实验。对预制的混凝土裂缝,加入EICP溶液进行修复。试验结果从缺口附近收集的样品的X-射线衍射和热分析清楚地表明在裂缝中的碳酸钙的存在。用0.5 mol/L CaCl₂制成的EICP溶液处理的砂浆,其抗弯强度提高约33%,而湿固化砂浆的抗弯强度提高了约33%,断裂韧性提高了一倍。

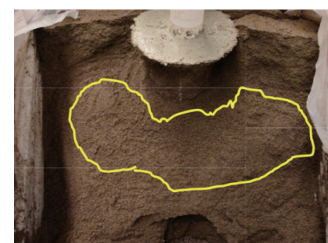
Kavazanjian等^[49]进行了大尺度的EICP试验,采用19 L桶和1 m³土壤箱作为EICP反应场地,布置直径为51 mm和76 mm的垂直穿孔塑料管对土壤进行改良。EICP溶液通过一个9.5 mm直径的穿孔管注入,以模拟土钉注浆。在EICP溶液全部注入后,这些桶用保鲜膜包裹,放置26 d。结果显示,19 L桶中岩土体在注射管上附着胶结效果较好的连续的环状形胶结,如图16(a)所示。1 m³土壤箱中进行了垂直柱状胶结试验,在1 000 kg的原生土壤中单次灌浆注射约33 L的EICP溶液,14 d后第2次注射40 L的EICP溶液,试验结束后观察,土壤呈现出鞍状、轻度胶结的状态,如图16(b)、图16(c)所示。



(a) 19 L 桶试验



(b) 1 m³ 模型箱



(c) 鞍状胶结体

图16 19 L及1 m³大尺寸试验^[49]

Fig.16 Large scale test of 19 L and 1 m³^[49]

Martin 等^[50]在一个 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ 的模型箱中采用 EICP 技术胶结了一个直径为 0.3 m , 长度为 0.9 m 的砂柱。由于注浆管的存在, 砂柱的尺寸小于模型箱。EICP 处理过后砂柱尺寸跟目标尺寸直径误差在 10% 之内, 长度比预期增加 20%。分析长度的增加可能是灌入过多的处理液所致。后续进行贯入度试验(如图 17(c)所示), 砂柱的无侧限抗压强度值可以达到 500 kPa 。但下部的无侧限抗压强度值偏低, 平均为 150 kPa , 产生强度分布不均匀的原因是注射的胶结液分布不均匀所致。这次试验结果表明 EICP 技术可减小松散砂体的沉降, 作为一种地基加固技术运用在实际工程中。



图 17 模型箱胶结土样^[50]

Fig.17 Cemented soil sample of model box^[50]

EICP 在地基基础加固, 提高砂土强度, 裂缝修复等众多岩土领域的应用, 显示 EICP 可作为一种可持续的、环保的技术大范围应用于工程实践。然而, 从实际来看, EICP 技术运用于工程仍需克服已有的许多挑战: (1) EICP 成核点位的缺失可能会导致碳酸钙沉淀形态紊乱, 难以保证其固化产物的均匀性及质量; (2) 氯化铵副产物带来的环境污染问题; (3) 现场环境条件复杂、不确定性仍是影响 EICP 固化效果好坏的重要因素。总的来说, 仍需进行大量实验, 逐步研究、佐证 EICP 在现场使用的最佳方式、方法, 以求达到最好的固化效果。

3 结论与展望

对微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术领域涉及的固化机理及影响微生物的生物化学反应过程的

因素进行了详细介绍, 并对已开展的室内及现场试验相关研究及应用进行总结与评述, 以促进对微生物诱导碳酸钙沉淀技术在工程应用领域更全面深入的了解。

微生物诱导碳酸钙沉淀作为岩土工程领域的一个多学科交叉的新分支, 已在国内发展十多年, 微生物灌浆技术可在未来建筑、岩土领域实现更多方面的应用, 如控制填海造陆、沙漠绿化、地下隧道管线裂隙等。但由于工程应用上涉及的建筑施工项目通常较为庞大, 涵盖复杂的场地环境、施工工艺等条件, 与此同时微生物自身的物理化学反应仍有待探究。因此, (1) 现场尺度下的 MICP 技术仍需进一步改进, 选取不同的菌种, 并识别、筛选、优化细菌, 以得到适合应用环境的最优细菌及生物活性, 满足生产要求, 孕育出一种可在现场灌注细菌、营养液及胶结液来固化成桩的施工技术。(2) 目前在微生物技术固化效果探究领域已开展较多研究, 但当遇到现场实际施工时, 仍面临着诸多挑战: 与传统的水泥为主的加固方式相比, 微生物技术在固化效果、固化时间、固化成本上有着较大的劣势。上述问题的关键在于需要相关材料学、微生物学等学科的交叉融合, 针对不同环境“对症下药”, 同时结合数值模拟、人工智能、机器学习和大数据融合等手段, 选育出固化能力佳、活性优良的菌种。

总而言之, 微生物诱导碳酸钙技术在工程领域的应用和研究还处于初步阶段, 其应用虽然已被证明具有潜在可行性, 但微生物固化的大规模现场应用仍有许多问题需要各学科、各机构通力合作, 齐心协力去克服。下一阶段需要岩土科研工作者们潜心钻研, 共同迎接并解决实际工程应用中遇到的诸多挑战。

参考文献:

- [1] 钱春香, 王欣, 於孝牛. 微生物水泥研究与应用进展[J]. *材料工程*, 2015, 43(08): 92-103.
QIAN C X, WANG X, YU X N. Research and Application Development of Microbe Cement [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(08): 92-103.
- [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.
QIAN C X, WANG A H, WANG X. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1537-1548.
- [3] GOMEZ M G, 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 Improve-*

- ment, 2015, 168(3): 206-216.
- [4] 陈适, 方祥位, 刘汉龙, 等. 微生物珊瑚砂桩单桩复合地基承载特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1475-1481.
CHEN S, FANG X W, LIU H L, *et al.* Study on bearing behavior of microbial coral sand single pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1475-1481.
- [5] 章懿涛. 不同含水状态下微生物珊瑚砂桩单桩复合地基承载特性[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [6] 葛鑫. 不同灌浆方式对MICP固化沙漠风积沙的影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [7] 高瑜, 姚德, 韩宏伟, 等. 微生物诱导矿化风沙土的紫外侵蚀微观试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S1): 254-258.
GAO Y, YAO D, HAN H W, *et al.* Micro-experiment on MICP-treated Aeolian sandy soil under ultraviolet erosion environment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1): 254-258.
- [8] 赵志杰, 李驰, 亓越, 等. 微生物矿化覆膜联合超旱生植物的综合固沙试验[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 373-378.
ZHAO Z J, LI C, QI Y, *et al.* Comprehensive sand fixation experiment of microbial mineralized coating combined with ultra-xerophyte [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology, 2022, 41(4): 373-378.
- [9] SEIFAN M, SARMAH A K, SAMANI A K, *et al.* Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(10): 4489-4498.
- [10] ALGAIFI H A, ABU BAKAR S, SAM ARM, *et al.* Numerical modeling for crack self-healing concrete by microbial calcium carbonate [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 816-824.
- [11] ZHAN Q W, DONG W Y, FU C H, *et al.* The self-healing of marine concrete cracks based on the synergistic effect of microorganisms and inorganic minerals [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 61: 105-210.
- [12] 李锤奥, 陆春华, 成亮, 等. 扩散法用于微生物矿化修复混凝土竖向裂缝的试验研究[J]. 材料导报, 2023, 37(13): 125-130.
LI Z A, LU C H, CHENG L, *et al.* Experimental study on repairing vertical cracks of concrete by microbial mineralization with diffusion method [J]. Materials Reports, 2023, 37(13): 125-130.
- [13] 李沛豪, 屈文俊, 徐德强, 等. 大理石历史建筑遗产的细菌修复加固[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(9): 36-41.
LI P H, QU W J, XU D Q, *et al.* Remediation of historic marble architectural heritages by bacterially-induced biomineralization [J]. Journal of South China University of Technology Natural Science Edition, 2009, 37(9): 36-41.
- [14] RAN D, KAWASAKI S. Effective use of plant-derived urease in the field of geoenvironmental/geotechnical engineering [J]. Journal of Civil & Environmental Engineering, 2016, 6(1): 1-13.
- [15] YASUHARA H, NEUPANE D, HAYASHI K, *et al.* Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation [J]. Soils and Foundations, 2012, 52(3): 539-549.
- [16] DILRUKSHI R A N, NAKASHIMA K, KAWASAKI S. Soil improvement using plant-derived urease-induced calcium carbonate precipitation [J]. Soils and Foundations, 2018, 58(4): 894-910.
- [17] JAVADI N, KHODADADI T H, HAMDAN N, *et al.* EICP treatment of soil by using urease enzyme extracted from watermelon seeds[C]// Environmental Science, Orlando: Proceedings of IFCEE 2018. ASCE, 2018: 115-124.
- [18] 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.
- [19] AHENKORAH I, RAHMAN M M, KARIM M R, *et al.* Optimization of enzyme induced carbonate precipitation (EICP) as a ground improvement technique[C]// Geo-Congress 2020: Foundations, Soil Improvement, and Erosion. Minneapolis: [s. n.], 2020: 552-561.
- [20] 牛九格. 营养液对微生物诱导碳酸钙沉淀固化砂类土的影响研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [21] OKWADHA, GEORGE D O, LI J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation [J]. Chemosphere, 2010, 81(9): 1143-1148.
- [22] STABNIKOV V, JIAN C, IVANOV V, *et al.* Halotolerant, alkaliphilic urease-producing bacteria from different climate zones and their application for biocementation of sand [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2013, 29: 1453-1460.
- [23] ACHAL V, PAN X. Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by Bacillus sp. CR2 [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 173: 307-317.
- [24] KRAJEWSKA B. Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering [J]. Journal of Advanced Research, 2018, 13: 59-67.
- [25] SUN X, MIAO L, WU L, *et al.* Improvement of bio-cementation at low temperature based on Bacillus megaterium [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103: 7191-7202.
- [26] JASON T D, BRINA M M, BRIAN C M, *et al.* Bio-mediated soil improvement [J]. Ecological Engineering, 2010, 36: 197-210.
- [27] 王绪民, 崔芮, 王铖. 微生物诱导CaCO₃沉淀胶结砂室内试验研究进展[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 153-160.

- WANG X M, CUI R, WANG C. Research progress of laboratory test on CaCO_3 precipitated cemented sand induced by microorganisms [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(9): 153-160.
- [28] 李春, 谭维佳. 微生物诱导加固砂土的动力特性及微观试验研究[J]. *人民长江*, 2022, 53(12): 173-178.
- LI C, TAN W J. Dynamic characteristics and microscopic experimental study of microbiologically induced sand reinforcement [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(12): 173-178.
- [29] 梁仕华, 曾伟华, 龚星, 等. 颗粒级配对微生物固化砂土力学性能的影响[J]. *人民长江*, 2020, 51(2): 179-183.
- LIANG S H, ZENG W H, GONG X, *et al.* Effect of particle size on mechanical properties of microbe-solidified sand [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(2): 179-183.
- [30] L A VAN PAASSEN. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications[J]. *Geo-Frontiers*, 2011, 4099-4108.
- [31] FILET A E, GADRET J P, LOYGUE M, *et al.* Biocalcis and its applications for the consolidation of sands[C]//Grouting and Deep Mixing 2012. New Orleans: Society of Civil Engineers, 2012: 1767-1780.
- [32] L A VAN PAASSEN, CLAUDIA M DAZA, MARC STAAL, *et al.* Potential soil reinforcement by biological denitrification [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 168-175.
- [33] 刘汉龙, 马国梁, 肖杨, 等. 微生物加固岛礁地基现场试验研究[J]. *地基处理*, 2019, 1(1): 26-31.
- LIU H L, MA G L, XIAO Y, *et al.* In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands [J]. *Chinese Ground Improvement*, 2019, 1(1): 26-31.
- [34] 李驰, 刘世慧, 周团结, 等. 微生物矿化风沙土强度及孔隙特性的试验研究[J]. *力学与实践*, 2017, 39(2): 165-171.
- LI C, LIU S H, ZHOU T J, *et al.* The strength and porosity properties of micp-treated aeolian sandy soil [J]. *Mechanics in Engineering*, 2017, 39(2): 165-171.
- [35] 李驰, 王硕, 王燕星, 等. 沙漠微生物矿化覆膜及其稳定性的现场试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(4): 1291-1298.
- LI C, WANG S, WANG Y X, *et al.* Field experimental study on stability of bio-mineralization crust in the desert [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(4): 1291-1298.
- [36] MELTON L. How to grow cement. *Nat Biotechnol* 40, 286 [EB/OL](2022-02-24) [2023-10-20]. <https://doi.org/10.1038/s41587-022-01264-8>
- [37] 友绿智库. 细菌砖, 一种活性建筑材料[EB/OL](2023-05-12) [2023-10-20]. <https://ugreen.cn/newsDetail/9604>.
- [38] 竹文坤, 牟涛, 段涛, 等. 大理石表面微生物诱导碳酸钙覆膜[J]. *非金属矿*, 2014(1): 11-13.
- MOU T, ZHU W K, DUAN T, *et al.* Coating of microbially produced calcium carbonate precipitation on marble. [J] *Non-Metallic Mines*, 2014(1): 11-13.
- [39] ZHU W K, TAO M, ZHANG Y K, *et al.* Coating of microbially produced calcium carbonate onto stone materials [J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(2): 266-272.
- [40] WILLEM DE MUYNCK, STIJN LEURIDAN, DENIS VAN LOO, *et al.* Influence of pore structure on the effectiveness of a biogenic carbonate surface treatment for limestone conservation [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, 77(19): 6808-6820.
- [41] 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.
- HE J H, GUO H X, TAN Q, *et al.* Experiment research on the restoration of white marble beams using microbially-induced carbonate precipitation [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2019, 31(6): 46-53.
- [42] 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.
- LIU S Y, YU J, ZENG W L, *et al.* Repair effect of tabia cracks with microbially induced carbonate precipitation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(1): 191-204.
- [43] 曾伟龙. 微生物对缺陷土楼补强加固的试验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2020.
- [44] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological considerations in geotechnical engineering [J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 2005, 131(10): 1222-1233.
- [45] NEMATI M, VOORDOUW G. Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2003, 33(5): 635-642.
- [46] KAVAZANJIAN E, HAMDAN N. Enzyme induced carbonate precipitation (EICP) columns for ground improvement [C] // 2015 American Society of Civil Engineers. Texas: ASCE 2015, 2015: 2252-2261.
- [47] OSSAI R, RIVERA L, BANDINI P. Experimental study to determine an EICP application method feasible for field treatment for soil erosion control [C] // Bio-geotechnics 2020. Minnesota: Geo-Congress 2020, 2020: 205-213.
- [48] DAKHANE A, DAS S, HANSEN H, *et al.* Crack healing in cementitious mortars using enzyme-induced carbonate precipitation: quantification based on fracture response [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(4): 04018035(1-10).
- [49] KAVAZANJIAN E, ALMAJED A, HAMDAN N. Bio-inspired soil improvement using EICP soil columns and soil nails [C] // 2017 American Society of Civil Engineers. Hawaii: Grouting 2017, 2017: 13-22.
- [50] MARTIN K K, HAMED K T, KAVAZANJIAN E. Enzyme-induced carbonate precipitation: Scale-up of bio-cemented soil columns [C] // American Society of Civil Engineers. Minnesota: Geo-Congress 2020, 2020: 96-103.

(责任编辑: 杨耀辉 英文审核: 熊荣斌)