



## 岛礁工程MICP加固技术研究进展

李雨杰 国振 李艺隆 芮圣洁 朱永强

### Advances in MICP reinforcement technology used in island engineering

LI Yu-jie, GUO Zhen, LI Yi-long, RUI Sheng-jie, ZHU Yong-qiang

引用本文:

李雨杰, 国振, 李艺隆, 芮圣洁, 朱永强. 岛礁工程MICP加固技术研究进展[J]. 工程科学学报, 2023, 45(5): 819–832. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.06.14.001

LI Yu-jie, GUO Zhen, LI Yi-long, RUI Sheng-jie, ZHU Yong-qiang. Advances in MICP reinforcement technology used in island engineering[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(5): 819–832. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.06.14.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.06.14.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 月壤原位利用技术研究进展

Research progress in the *in-situ* utilization of lunar soil

工程科学学报. 2021, 43(11): 1433 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.01.26.003>

#### 中国页岩气开发理论与技术研究进展

Research progress in theories and technologies of shale gas development in China

工程科学学报. 2021, 43(10): 1397 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.11.10.003>

#### 气相多环芳烃的吸附净化技术研究进展

Research progress on adsorption purification technology of gaseous polycyclic aromatic hydrocarbons

工程科学学报. 2018, 40(2): 127 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.02.001>

#### 二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望

A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition

工程科学学报. 2021, 43(7): 883 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.11.05.006>

#### 区块链技术及其研究进展

Survey of blockchain technology and its advances

工程科学学报. 2019, 41(11): 1361 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.03.26.004>

#### 金属磁记忆检测技术研究新进展与关键问题

Progress and key problems in the research on metal magnetic memory testing technology

工程科学学报. 2020, 42(12): 1557 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.05.10.002>

# 岛礁工程 MICP 加固技术研究进展

李雨杰<sup>1,2)</sup>, 国 振<sup>1,3)</sup>✉, 李艺隆<sup>3)</sup>, 芮圣洁<sup>3)</sup>, 朱永强<sup>3)</sup>

1) 海南浙江大学研究院, 三亚 572025 2) 浙江大学海洋学院, 舟山 316000 3) 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058

✉通信作者, E-mail: [nehzoug@163.com](mailto:nehzoug@163.com)

**摘 要** 近年来,微生物诱导碳酸钙沉积技术(MICP)成为岩土工程领域的热点方向,其中岛礁背景下的 MICP 加固技术更是具有广阔前景。本文系统总结了微生物矿化作用基本原理以及岛礁工程建设中的 MICP 技术最新进展,得出了以下结论: MICP 反应产物是碳酸钙,与钙质砂成分相同,满足岛礁生态需求;岛礁温度、pH 条件适宜 MICP 反应,仍需深入研究辐射、波流条件等岛礁特殊环境因素对 MICP 反应的影响;岛礁微生物技术能大幅提升钙质地层强度、刚度、桩基承载力、岸坡抗波流侵蚀能力,对于固岛强岛意义重大,需进一步通过现场原位加固试验验证该技术在岛礁环境下的适用性。目前, MICP 数值模型研究尚处于起步阶段,主要通过单元试验、模型试验验证,需开发可考虑岛礁环境(温度、pH、波流等)的 MICP 多过程数值理论模型,基于现场原位尺度试验验证其准确性。研究工作可为岛礁环境下的 MICP 加固提供参考。

**关键词** 岛礁建设; MICP; 钙质砂; 岛礁环境; 地层加固; 数值模型

**分类号** TG570.50

## Advances in MICP reinforcement technology used in island engineering

LI Yu-jie<sup>1,2)</sup>, GUO Zhen<sup>1,3)</sup>✉, LI Yi-long<sup>3)</sup>, RUI Sheng-jie<sup>3)</sup>, ZHU Yong-qiang<sup>3)</sup>

1) Hainan Institute, Zhejiang University, Sanya 572025, China

2) Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316000, China

3) College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

✉ Corresponding author, E-mail: [nehzoug@163.com](mailto:nehzoug@163.com)

**ABSTRACT** Being an environmentally friendly technology, Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) has become a popular research topic in the field of geotechnical and environmental engineering, among which island microbial technology is a promising direction. This paper systematically summarizes the basic principles of microbial mineralization and the progress made in the use of MICP in construction work done on islands, such as the reinforcement of calcareous sand, protection of island slopes from erosion, and reinforcement of pile foundations, and the numerical modeling performed in island engineering. The following conclusions can be drawn: MICP produces calcium carbonate, which is the same as calcareous sand, and thus MICP can be used to meet the ecological reinforcement requirements of islands. The temperature and soil pH of the islands are suitable for MICP. Urease activity in soil nonlinearly increases as environmental temperature increases in the range from 5 °C to 40 °C, and the soil pH influences pore solution concentrations, which in turn affects the deposition rate, yield, and morphology of calcium carbonate. The optimal pH value required for the mineralization caused by *Sporosarcina pasteurii* is approximately 9. However, the influence of the special environmental characteristics of islands, such as radiation, waves and currents, on MICP requires further study. Island microbial technology can be used to greatly enhance the strength and stiffness of calcareous sand in islands, the bearing capacity of pile foundations constructed in islands, and the erosion resistance of island slopes against waves and currents. The verification of the

收稿日期: 2022-06-14

基金项目: 海南省重大科技计划资助项目(ZDKJ202019); 三亚崖州湾科技城海南专项博士研究生科学研究基金资助项目(HSPHDSRF-2022-04-002); 国家自然科学基金资助项目(51779220)

applicability of MICP in an island environment and the determination of the efficiency of bacterial urease activity, morphology and deposition rate of calcium carbonate in calcareous sand, physical and mechanical properties and uniformity of cemented calcareous sand layers in that environment require *in-situ* reinforcement tests. Most of the previous research on MICP is laboratory experiments. The spatiotemporal evolutions of the chemical substances used in various processes of MICP cannot be determined in real-time. The labor and other resources used in field experiments, which are highly dependent on field conditions, are expensive. Therefore, a reliable numerical model is highly important to understand the biochemical processes associated with MICP. However, research on MICP numerical models is still in its infancy, and currently, the MICP models are verified mainly using element and model tests. The development of a numerical model for the multiple processes of MICP suitable for the environmental conditions, such as temperature, soil pH, waves, and currents, of an island and verification of the accuracy of the model based on *in situ* reinforcement tests is extremely important. The findings can provide a reference for soil reinforcement in an island environment using MICP.

**KEY WORDS** island construction; MICP; calcareous sand; island environment; ground reinforcement; numerical model

近年来,我国南海开展了大规模的岛礁吹填工程,主要是通过绞吸挖泥船等装备将海床砾石、钙质砂等材料泵送、堆积、压实,最终完成岛礁扩建。岛礁的吹填材料,如钙质砂、礁灰岩、珊瑚礁碎屑等,具有特殊的生物成因,与陆源填料的力学性质显著不同,主要表现在:孔隙发育、形状各异、破碎程度高、粒间易胶结<sup>[1-2]</sup>。直接吹填而成的岛礁地基需进行地基处理,提升其承载能力和稳定性,避免过大的工后沉降,抵御台风巨浪、地震等灾害,保障岛礁安全稳固。

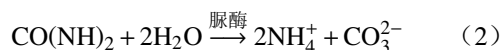
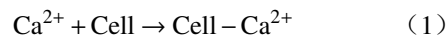
目前,常用的地基处理方法主要包括换填、机械夯实、振冲挤密、水泥及低聚合物灌浆加固。其中,换填需要从大陆运送较多性能良好的砂石,机械夯实需要大型设备,钙质砂易破碎,压实难度大,振冲挤密也会造成大量的颗粒破碎。虽然将水泥或低聚合物胶凝材料压送至土体内部会有较好的填充胶结效果,但需要较高泵送压力,扰动岛礁地层,造成岛礁生境劣化。微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术是一种环境友好,反应可控,效果优良的土体固化新技术,主要通过产脲酶细菌水解尿素产生碳酸根离子,结合环境中的钙离子产生碳酸钙,包裹细菌,从而将松散土体胶结成为具备一定强度的整体,大幅提升其强度、刚度,抑制渗流,抵抗侵蚀,抗裂防渗能力。

本文基于大量文献调研,首先介绍了微生物矿化基本原理,总结了岛礁工程中 MICP 加固技术研究进展与关键影响因素,结论可为进一步推进岛礁工程中 MICP 加固技术的应用发展提供借鉴与参考。

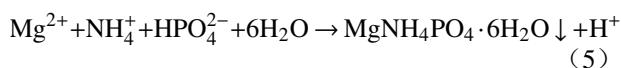
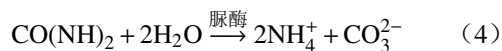
## 1 微生物矿化作用

微生物矿化主要是指微生物通过自身新陈代谢与周围环境发生系列反应形成矿物的过程。常

见的成矿类型主要有:尿素水解作用、硫酸盐还原、反硝化反应、铁还原作用等<sup>[3-7]</sup>。不同的反应过程涉及的微生物和反应物有所差异,其胶结效果也有所区别。相较而言,基于尿素水解的微生物矿化作用原理简单、转换效率高、反应速率可控。首先,将嗜碱性高产脲酶细菌注入至待加固土体中;然后将尿素和可溶钙混合液注入至土体中;在脲酶的作用下,尿素水解生成铵根离子和碳酸根离子,结合可溶钙离子,在细胞体外形成碳酸钙,达到颗粒包裹、桥接、堵塞孔隙的效果。化学反应式如下:



上述过程中的铵根离子以游离态的形式存在,对生态环境有一定负面影响,因此,一些学者提出了一种可固定铵根的生物镁磷酸盐材料<sup>[8-9]</sup>,尿素水解的铵根离子结合可溶性磷酸盐形成鸟粪石,可显著减小由游离态铵带来的生态环境的影响。其形成机理如下:



自 1973 年 Boquet 等<sup>[10]</sup>发现自然界中某些微生物可以利用自身新陈代谢活动生成碳酸钙沉淀以来,国内外开始不断研究 MICP 反应机理及其工程应用前景。Whiffin<sup>[11]</sup>率先将 MICP 技术应用于胶结松散砂土,以提高砂土强度、刚度等力学性质。2010 年,荷兰代尔夫特理工大学首次将微生物灌浆技术应用于现场砂砾固化,在地面以下 3 ~ 20 m 深度设置灌注井和抽取井,共注入了约 200 m<sup>3</sup>菌液和 600 m<sup>3</sup>胶结液,最终加固土体中碳酸钙含

量(单位体积内生成碳酸钙的质量与未处理砂的质量之比)约 6%, 固化土体保持稳定<sup>[12]</sup>.

## 2 岛礁工程 MICP 技术应用现状

目前, MICP 技术已在硅质砂固化中得到了广泛研究. 实际上, 由于 MICP 的主要产物是碳酸钙, 其在岛礁场景下的加固更具前景. 针对岛礁钙质砂的 MICP 加固研究, 目前也发展迅速, 主要包括: (1) MICP 加固钙质地层及其力学特性; (2) 岛礁基础 MICP 加固; (3) 岛礁岸坡 MICP 加固; (4) MICP 理论模型研究.

### 2.1 钙质地层强化、防渗及力学特性

#### (1) 钙质砂柱 MICP 处理.

围绕 MICP 加固钙质砂柱, 国内方祥位团队、郭红仙团队最早开展了相关研究. 方祥位等<sup>[13-14]</sup>利用 MICP 灌浆技术胶结了大量钙质砂柱标准样, 探明了颗粒粒径、级配对钙质砂 MICP 固化效果

的影响规律<sup>[15-16]</sup>. 郭红仙等<sup>[17]</sup>研究了 MICP 技术拌和固化岛礁钙质砂的压缩特性, 结果表明固化后钙质砂的压缩指数平均降低了约 0.1. Khan 等<sup>[18]</sup>对 中值粒径为 0.7 mm 的钙质砂进行了微生物灌浆, 28 d 强度可达 20.2 MPa. 刘汉龙等<sup>[19]</sup>开展了人工吹填岛礁钙质砂地基现场微生物加固试验(图 1(a)), 结果表明经过 3~4 次微生物加固之后, 图 1(b)中所有测点的贯入强度开始增加(图 1(c)), 经过 9 次微生物加固后, 地表最高强度可达 20 MPa, 加固深度达 70 cm, 无侧限抗压强度最高达 821 kPa. 部分学者考虑到岛礁高温、高盐环境, 研究了海水、温度、pH 等因素对 MICP 加固效果的影响. 李洋洋等<sup>[20]</sup>使用 5 种不同尿素、钙离子浓度比下的胶结液对钙质砂进行了加固, 结果表明尿素与氯化钙的浓度比值越大, 微生物固化反应越快, 但过快的固化反应会迅速降低珊瑚砂的渗透性, 导致可固化次数减少, 建议底物溶液中尿素与氯化钙

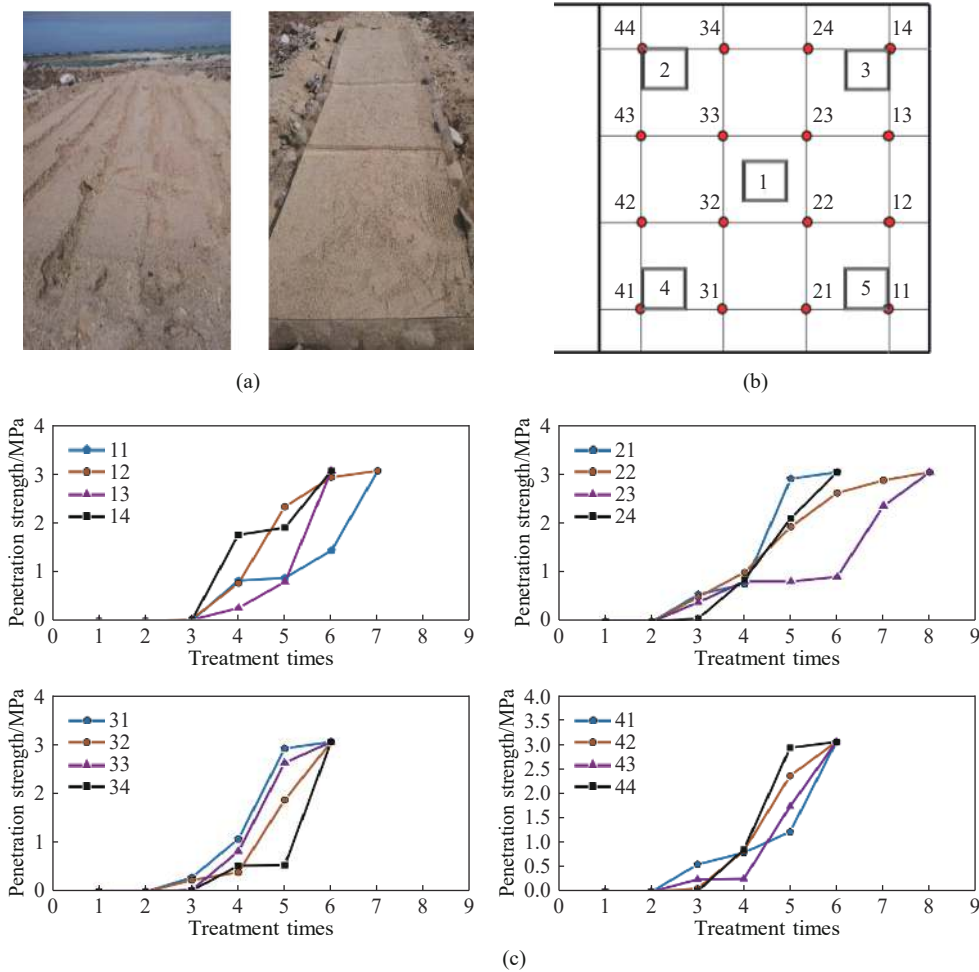


图 1 岛礁地层 MICP 现场加固试验<sup>[19]</sup>. (a) 岛礁现场试验照片; (b) 贯入强度测点; (c) 钙质砂地层贯入强度与处理次数之间的关系

Fig.1 MICP field reinforcement test of island formations<sup>[19]</sup>: (a) island field test image; (b) measuring points of the penetration strength; (c) relationship between the penetration strength of the calcareous sand formation and number of treatments



的浓度最佳配比为 1.00 : 1 ~ 1.2 : 1. 欧益希等<sup>[21]</sup>综合分析了溶液盐度对 MICP 加固钙质砂的影响, 发现钙质砂固化效果具有不均匀性, 上部固化效果优于下部, 固化后渗透系数降低了一个数量级. 目前, 关于海水环境对 MICP 加固钙质砂的影响研究结论尚未统一. 部分学者认为海水的弱碱性环境会提升细菌活性, 沉积更多碳酸钙, 从而具有更好的加固效果<sup>[22-24]</sup>; 但是, 也有部分学者认为海水条件下 MICP 加固钙质砂的效果与淡水条件相比差别较小<sup>[25]</sup>.

#### (2) MICP 加固钙质砂动力学特性.

在地震、波浪等循环荷载作用下, 岛礁钙质砂地基易发生液化, 丧失承载力, 进而造成上部建筑结构破坏. 肖鹏<sup>[26]</sup>基于微生物试验、室内循环三轴试验、模型振动台试验, 探究了 MICP 胶结程度、相对密实度、有效围压、动应力幅值对动强度、动孔压和动变形的影响, 提出了 MICP 加固钙质砂的统一动强度准则与新型统一孔压响应模型. 实际上, MICP 加固钙质砂抗液化性能的提升主要来自 MICP 反应生成碳酸钙的密实效应和胶结作用. 在 MICP 加固钙质砂初期, 生成的碳酸钙填充土体颗粒间隙引起的密实效应在抗液化性能

提升中起较大作用; 在 MICP 加固钙质砂中后期, 生成的碳酸钙在颗粒间形成的胶结作用对抗液化性能的提升作用显著.

#### (3) MICP 加固钙质砂压缩破碎变形特性.

本节从单颗粒压缩破碎与整体压缩变形两个方面进行总结. 单颗粒压缩破碎是整体压缩变形的重要组成部分, 而整体压缩受荷特征决定了单颗粒破碎模式. 申嘉伟等<sup>[27]</sup>从室内试验和离散元模拟两个角度对钙质砂颗粒 MICP 加固前后进行单颗粒破碎试验, 基于 weibull 分布和电镜扫描探究 MICP 对钙质砂颗粒破碎行为的影响, 结果表明经 MICP 处理后的钙质砂颗粒表面有明显的方解石生成, 破碎模式由“多峰型”向“单峰型”转变, 局部裂纹减少, 以表面磨损和直接贯穿裂纹为主 (图 2). 图 2a ~ 2c 和图 2e ~ 2g 分别为颗粒固化前后位移分别为 0.2, 0.4, 0.6 mm 时的裂纹分布, 其中红色和蓝色分别代表受拉和受剪破坏. 图 2d 和 2h 分别为固化前后颗粒的最终破碎图. 王逸杰和蒋宁俊<sup>[28]</sup>采用原位生物激发 MICP 方法加固钙质砂, 结果表明, 随着胶结水平增加, 试样压缩性显著减小, 压缩后原位激发 MICP 加固钙质砂中, 细颗粒和粗颗粒的比例均随着胶结水平的增加而增大.

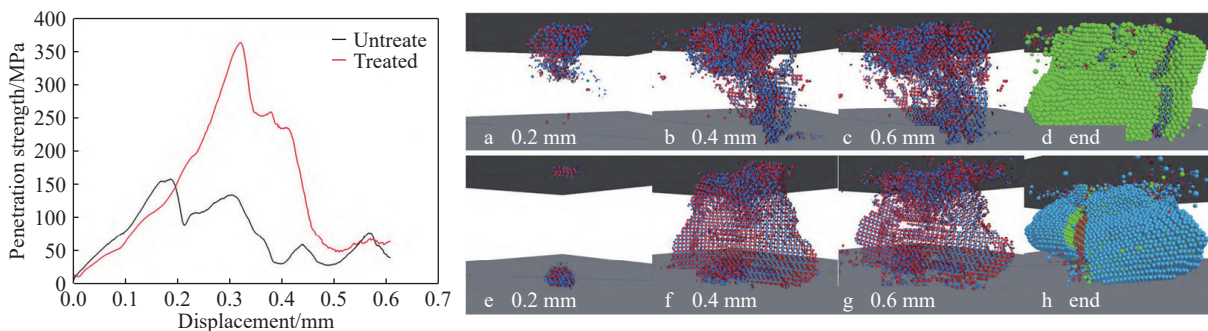


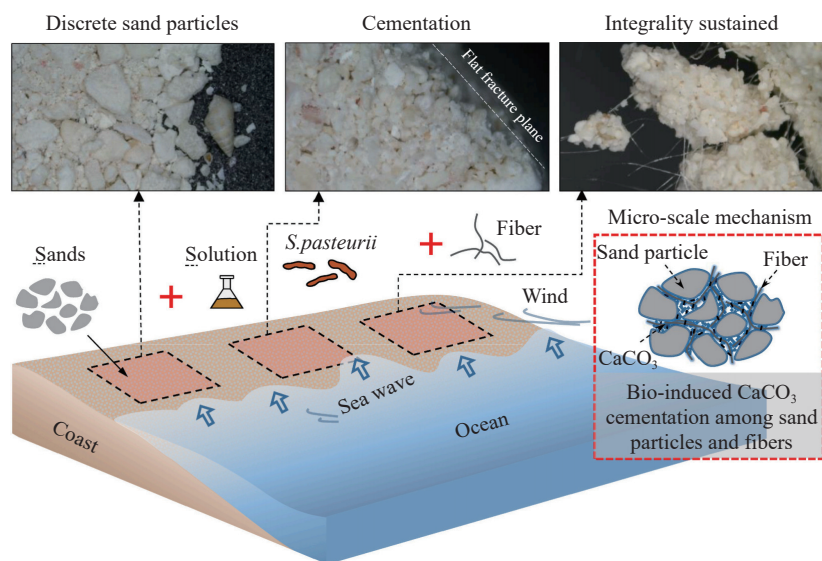
图 2 钙质砂颗粒 MICP 加固前后颗粒强度演化、裂纹分布及破碎形态<sup>[27]</sup>

Fig.2 Penetration strength, crack distribution and crushing form of calcareous sand particles before and after MICP treatment<sup>[27]</sup>

#### (4) 纤维改性 MICP 加固钙质砂.

尹黎阳<sup>[29]</sup>基于无侧限抗压试验和直接拉伸试验研究了纤维掺量对于钙质砂力学性能提升规律和破坏模式的影响, 掺加纤维增加细菌定殖面积, 提升碳酸钙沉积量, 因此增加试样延性和韧性, 力学上表现出阶梯状多峰特征应力应变关系. 林胜强等<sup>[30]</sup>基于动三轴系统, 研究了 MICP 耦合纤维加筋对固化钙质砂的动力特性的影响, 发现纤维通过桥接作用加强了 MICP 过程. Zhao 等<sup>[31]</sup>研究了纤维种类与含量对 MICP 加固钙质砂的单轴抗压强度的影响, 发现不同纤维种类下具有不同的最优纤维含量, 当纤维含量小于最优值时, 纤维连

接作用有限, 当纤维含量增加至超过最优值时, 纤维在砂体内分布不均匀导致胶结不良, 从而减小试样强度. 利用掺加纤维, 可显著改善 MICP 胶结钙质砂体的抗拉强度, Zeng 等<sup>[32]</sup>的试验结果表明, 纤维的存在增加了碳酸钙的沉积表面, 改善了传统微生物胶结砂土的脆性破坏问题, 这为岛礁岸滩防护提供了思路, 如图 3 所示. 通过均匀混合纤维和岛礁岸滩钙质砂, 结合 MICP 技术对其进行加固, 从而达到固砂防冲的目的. 但值得注意的是, 岛礁环境下混合钙质砂和纤维耗时耗力, 且难以保证混合均匀度, 需结合工程实际进行深入研究, 寻求合适的施工方法, 推动微生物技术在岛礁

图3 微生物矿化耦合纤维加固岛礁钙质岸滩<sup>[32]</sup>Fig.3 MICP coupling fibers reinforce the calcareous shore beaches of the islands<sup>[32]</sup>

海岸带防护应用中的发展.

## 2.2 岛礁基础加固

### (1) 钙质砂-桩基界面 MICP 加固及剪切带特征.

由于岛礁钙质砂特殊的物理力学特性,在钙质地层中打桩时,原有弱胶结结构遭受扰动破坏,易出现“溜桩”现象,桩基承载时,由于大量的颗粒破碎和胶结结构损坏,钙质砂中桩侧摩阻力一般较低.1968年,在Lavav石油平台的建设中,直径约为1 m的钢管桩在贯入胶结良好的钙质地层中时,自由下落了约15 m.之后,在澳大利亚North Rankin平台的建设中,钙质地层中120 m打入桩基的平均侧摩阻只有10~40 kPa,达不到设计值<sup>[2]</sup>.钙质砂的颗粒破碎造成桩侧体缩,胶结结构破坏引起脆性断裂,从而导致钙质砂-桩界面强度弱化与脆性破坏,大幅减小桩侧摩阻,桩基承载力难以满足设计要求.基于此背景,本文作者创新提出了生态友好的钙质砂-桩基界面加固技术,研发了多法向边界下的可视化多功能界面剪切设备(图4(a)),探究了胶结材料、胶结程度、法向应力、相对密度等对钙质砂-钢界面剪切行为的影响,基于geo-PIV技术,捕捉了剪切过程中界面剪切带的演化规律,厘清了MICP界面加固机理与破坏模式<sup>[33-34]</sup>.结果表明,通过颗粒桥接、颗粒包裹、孔隙填充,MICP技术可大幅增加钙质砂-桩基界面峰值抗剪强度并抑制界面剪切带的发挥(图4(b)~(d)).

### (2) 钙质砂中 MICP 加固桩基承载分析.

Lin等<sup>[35-36]</sup>最早提出利用MICP加固砂土中的透水混凝土桩,采用直接倾倒法将菌液与胶结液从桩顶依次灌入,结果显示加固桩与未加固桩的

极限抗压荷载分别为12648 N和5117 N.由于MICP的作用,直径为76 mm的模型桩形成了倒锥形胶结体,影响范围最大可达229 mm,桩端位置形成了直径为170 mm的胶结体,大幅提升了上拔荷载-位移响应,加固后的极限上拔荷载是未加固时的4.2倍.针对钙质砂中的桩基,Xiao等<sup>[37]</sup>采用微生物后注浆方法加固钙质砂地层中(图5(a))的桩基础,通过桩内预设注浆管将菌液和胶结液分别泵送至持力层中,发现采用MICP处理后,模型桩的极限抗压荷载是未加固的4.4倍,桩端形成了倒锥形胶结体,显著优化竖向荷载传递模式(图5(b)).虽然现有结果表明采用MICP加固桩基可改善其承载模式,大幅提升基础极限承载能力,根据注浆方法的不同,其加固侧重也有所差异,桩端后注浆技术主要在桩端形成胶结体,大幅提升端阻而对侧阻贡献较小.

### (3) 单桩基础 MICP 防冲试验.

针对局部冲刷,目前常用的防护思路包括2种:①减弱下降流和马蹄涡的侵蚀力,主要包括改变桩基截面形式、桩周布置护圈、桩身开缝、扩大桩基底部直径等措施,称为主动防护;②提高底床砂的抗侵蚀能力,主要通过抛石、垫层等措施来保护底床砂,称之为被动防护.根据被动防护的思路,Tao等<sup>[38]</sup>率先开展了MICP加固模型桩防冲试验,结果表明,MICP处理之后模型桩周围未出现侵蚀.Montoya等<sup>[39]</sup>研发了套管MICP注浆系统,在浅水环境下对单桩周围海床进行了加固,结合剪切波速、渗透特性、胶结物含量、静力触探系统揭示了MICP加固机理与效果.文献[40]基于大



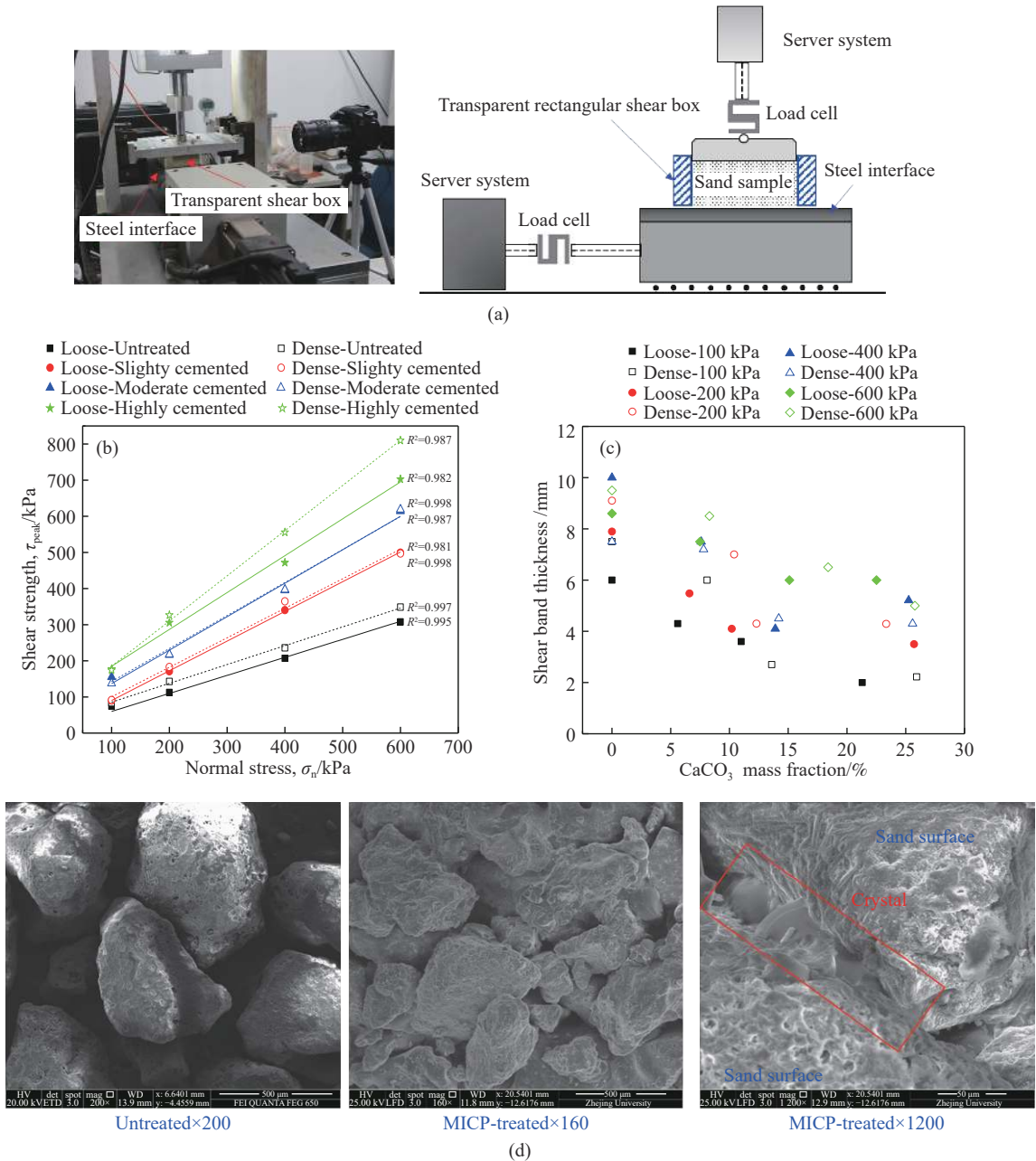


图 4 MICP 加固界面剪切试验结果<sup>[33]</sup>. (a) 多功能界面剪切设备; (b) MICP 胶结界面摩尔库伦强度规律; (c) MICP 胶结界面剪切带厚度与碳酸钙含量之间的关系; (d) MICP 胶结机理(放大 200、160、1200 倍)

**Fig.4** Interface shear test results for MICP reinforcement<sup>[33]</sup>: (a) multifunctional interface shear device; (b) molar Coulomb strength law of the MICP cemented interface; (c) the relationship between the shear band thickness and the calcium carbonate content at the MICP cemented interface; (d) MICP cementing mechanism (magnify 200, 160, 1200 times)

断面风浪流水槽系统,开展了大直径单桩的 MICP 防冲刷研究,并传统抛石防护进行了对比,海床中沉积的碳酸钙起到了胶结海床砂、包裹海床砂及填充海床孔隙的作用,倒锥形胶结体的出现抵抗了下降流的冲击、弱化了马蹄涡及尾迹涡的掏蚀,极大的减小了单桩冲刷深度(图 6),应注意到,虽然利用该技术进行冲刷防护具有较好效果,但出现了边缘冲刷,在设计防护方案时需要综合考虑处理次数与边缘冲刷,另外,现场条件下单桩水

下灌浆防冲工艺仍需深入研究.

### 2.3 岛礁边坡 MICP 加固

随着岛礁建设的推进,极端海况、军事威胁、地震台风等灾害作用下岛礁长期稳定性的保障意义重大.岛礁陡变地形上钙质砂层在波流等作用下易出现冲蚀,减小岛域面积,严重时甚至整体发生损毁.因此,亟需寻求适用于南海岛礁环境的固岛、强岛技术.目前已有部分针对波浪作用下 MICP 加固硅质岸坡水槽试验,主要聚焦地

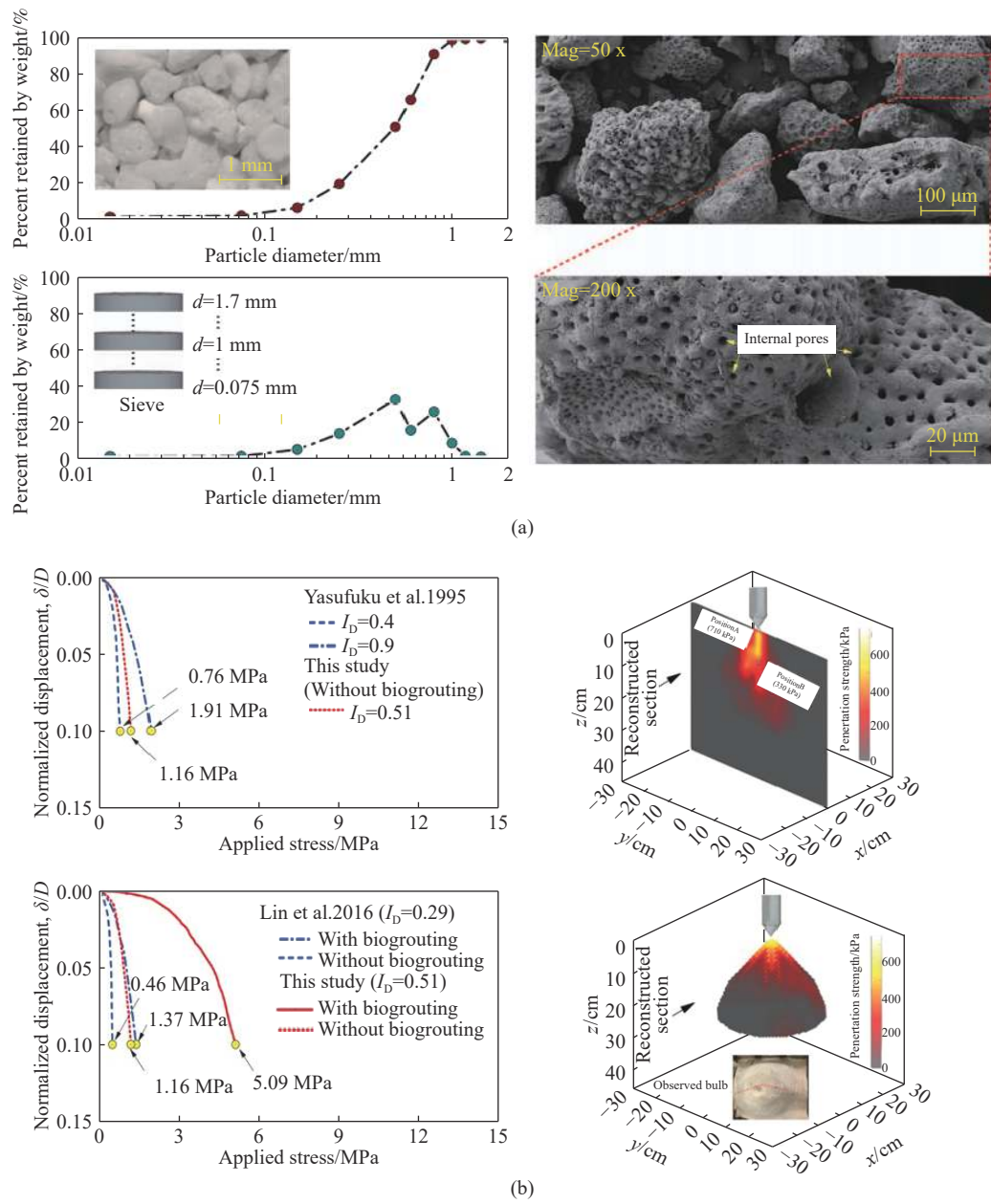
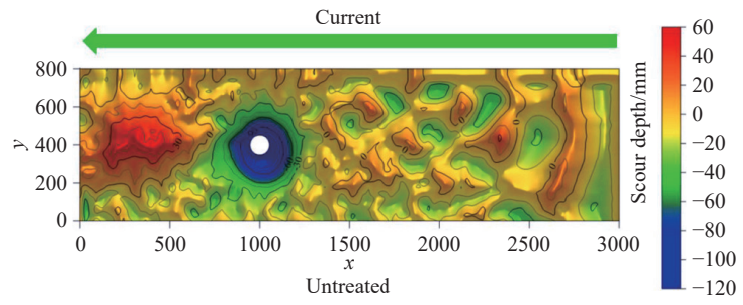


图5 MICP 加固钙质地层中桩基试验结果<sup>[37]</sup>。(a) 钙质砂级配与微观形貌( $d$  代表颗粒粒径); (b) 桩基承载特性与贯入强度分布( $\delta$ ,  $D$  和  $I_D$  分别代表桩顶位移、模型桩桩径和钙质砂土相对密度)

Fig.5 Test results of MICP reinforced pile foundation in calcareous sand formation<sup>[37]</sup>: (a) gradation distribution and microscopic morphology of the calcareous sand ( $d$  represents the particle size); (b) bearing characteristics of pile foundation and distribution of penetration strength ( $\delta$ ,  $D$  and  $I_D$  represent the displacement of the pile top, the diameter of the model pile and the relative density of the calcareous sand, respectively)

形变化、碳酸钙分布、表面贯入强度等物理量的变化<sup>[41-43]</sup>, 尚处在 MICP 加固岸坡防冲刷的初步适用性验证阶段, 而关于钙质岸坡的相关研究则较少。





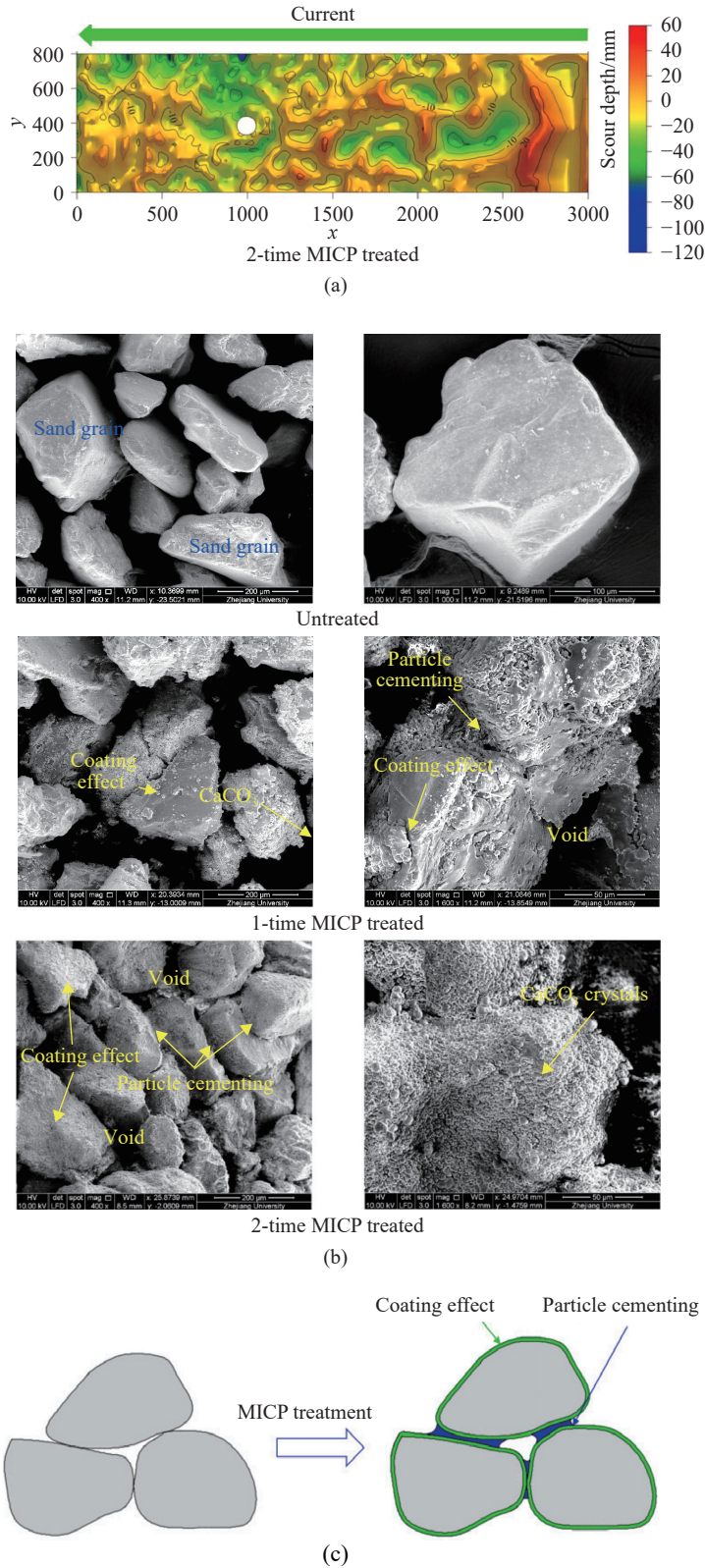
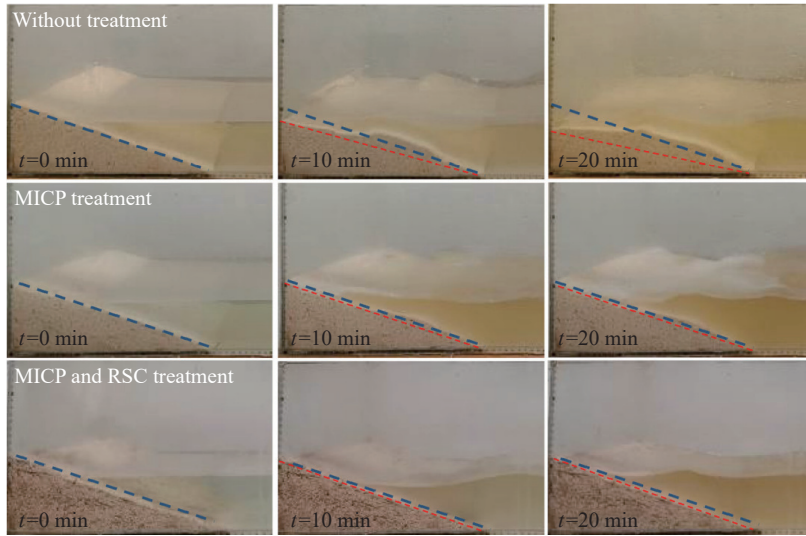


图 6 MICP 加固桩基防冲试验与结果<sup>[40]</sup>. (a) 冲刷坑形态; (b) 胶结砂微观形貌; (c) 胶结机理示意图

Fig.6 Scour test and results of MICP reinforced pile foundation<sup>[40]</sup>: (a) scour pit form; (b) microstructure of cemented sand; (c) schematic diagram of cementation mechanism

(1)波浪作用下 MICP 加固钙质岸坡防冲试验.  
Kou 等<sup>[43]</sup> 基于小尺度水槽设备, 采用 MICP 耦合椰壳丝加固钙质岸坡, 并评价了不同处理次数、

不同椰壳丝含量下加固岸坡在波浪冲蚀作用下的防护效果. 结果表明, 椰壳丝可为细菌提供更多的吸附点, 促进 MICP 过程. 如图 7 所示, 相同试验

图7 波浪作用下 MICP 耦合椰壳丝加固钙质岸坡试验<sup>[43]</sup>Fig.7 MICP coupled recycled shredded coconut coir reinforced calcareous shore slope test with wave actions<sup>[43]</sup>

条件下, MICP 处理工况及 MICP 耦合椰壳丝处理工况下的钙质砂岸坡在 20 min 的波浪作用下依旧完整, 而未加固岸坡冲毁严重。

#### (2) MICP 加固钙质砂耐久性研究.

岛礁岸坡 MICP 加固后的长期耐久性是保障岛礁稳定性的关键因素, 更是钙质砂 MICP 加固周期选取的重要参考. 岛礁岸坡处钙质砂会不断经历由潮汐作用而引起的干湿循环作用, MICP 加固钙质砂在经历吸水膨胀与干燥收缩交替作用下易产生内部应力, 造成材料的剥蚀与开裂. 基于此, 本文作者团队对 MICP 加固砂柱进行了干湿循环试验, 对比海水环境与淡水环境下 MICP 加固钙质砂柱的抗干湿循环能力, 厘清了 MICP 加固钙质砂柱的老化机理<sup>[44]</sup>. 如图 8(a) 所示, 采用浸泡法加固钙质砂, 并依次进行了 0 次到 21 次干湿循环作用下的耐久性试验, 结果表明, 虽然单轴抗压强度随着干湿循环次数的递增而弱化, 海水环境下胶结钙质砂柱的强度始终高于淡水环境下胶结而成的砂柱, 表面颗粒剥落现象也逐渐出现, 对于海水环境下胶结砂柱, 21 个干湿循环周期后仅在上部出现局部颗粒剥落, 试样完整性较好, 而淡水环境下的试样, 表明出现大范围的剥蚀蜂窝, 大量砂颗粒脱落, 试样完整性受到严重破坏(图 8(b)). 这表明海水环境下 MICP 加固钙质砂具有更好的效果.

#### 2.4 MICP 数值模型研究

迄今为止, 关于 MICP 过程的数值研究主要基于对流扩散反应理论体系. Martinez<sup>[45]</sup> 采用一阶动力反应方程, 建立了尿素水解与碳酸钙沉积反应模型, 但忽略了碳酸钙沉积对孔渗演化的影响. Fauriel

和 Laloui<sup>[46]</sup>、Wang 和 Nackenhorst<sup>[47]</sup> 分别建立了关于 MICP 过程的生化水力模型与考虑有效孔隙率概念的生化水模型. 上述模型虽然很好的反应了 MICP 过程中的生化物质与系统孔渗时空演化规律, 但并不适用于岛礁海洋环境, 作者考虑波浪作用, 耦合 Biot 固结动力方程, 构建了考虑波浪作用下的 MICP 反应模型. 根据细菌砂土体系中的赋存形态, 将其分为游离态细菌(分布在砂土孔隙溶液中的细菌)和吸附态细菌(吸附在砂土表面的细菌), 假设其满足一阶动力方程:

$$\frac{\partial C_{\text{bact}}}{\partial t} = -k_d C_{\text{bact}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial C_{\text{bacs}}}{\partial t} = k_{\text{att}} C_{\text{bacl}} - k_d C_{\text{bacs}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_{\text{bacl}}}{\partial t} = -k_{\text{att}} C_{\text{bacl}} - k_d C_{\text{bacl}} \quad (8)$$

其中,  $C_{\text{bact}}$ 、 $C_{\text{bacs}}$ 、 $C_{\text{bacl}}$  分别代表细菌浓度、吸附态细菌浓度、游离态细菌浓度,  $k_{\text{att}}$ 、 $k_d$  分别为吸附常数、衰亡常数. 采用 Michaelis-Menten 动力方程描述尿素水解过程,  $R_{\text{rea}}$ 、 $u_{\text{sp}}$ 、 $k_m$ 、 $C_{\text{urea}}$ 、 $T$ 、 $t$ 、 $t_d$  分别代表反应速率、最大脲酶常数、半饱和常数、尿素浓度、温度、反应时间、时间常数.

$$R_{\text{rea}} = u_{\text{sp}} (C_{\text{bacs}} + C_{\text{bacl}}) \frac{C_{\text{urea}}}{C_{\text{urea}} + k_m} \exp\left(\frac{(T-25)}{10} \ln 3.4\right) \exp(-t/t_d) \quad (9)$$

采用达西定律控制描述孔隙流体运动:

$$\mathbf{q} = -\frac{K}{\mu_l} \cdot (\nabla p + \rho_l \mathbf{g}) \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{q}$  为达西流速,  $K$  为渗透率,  $\mu_l$  为流体黏度,

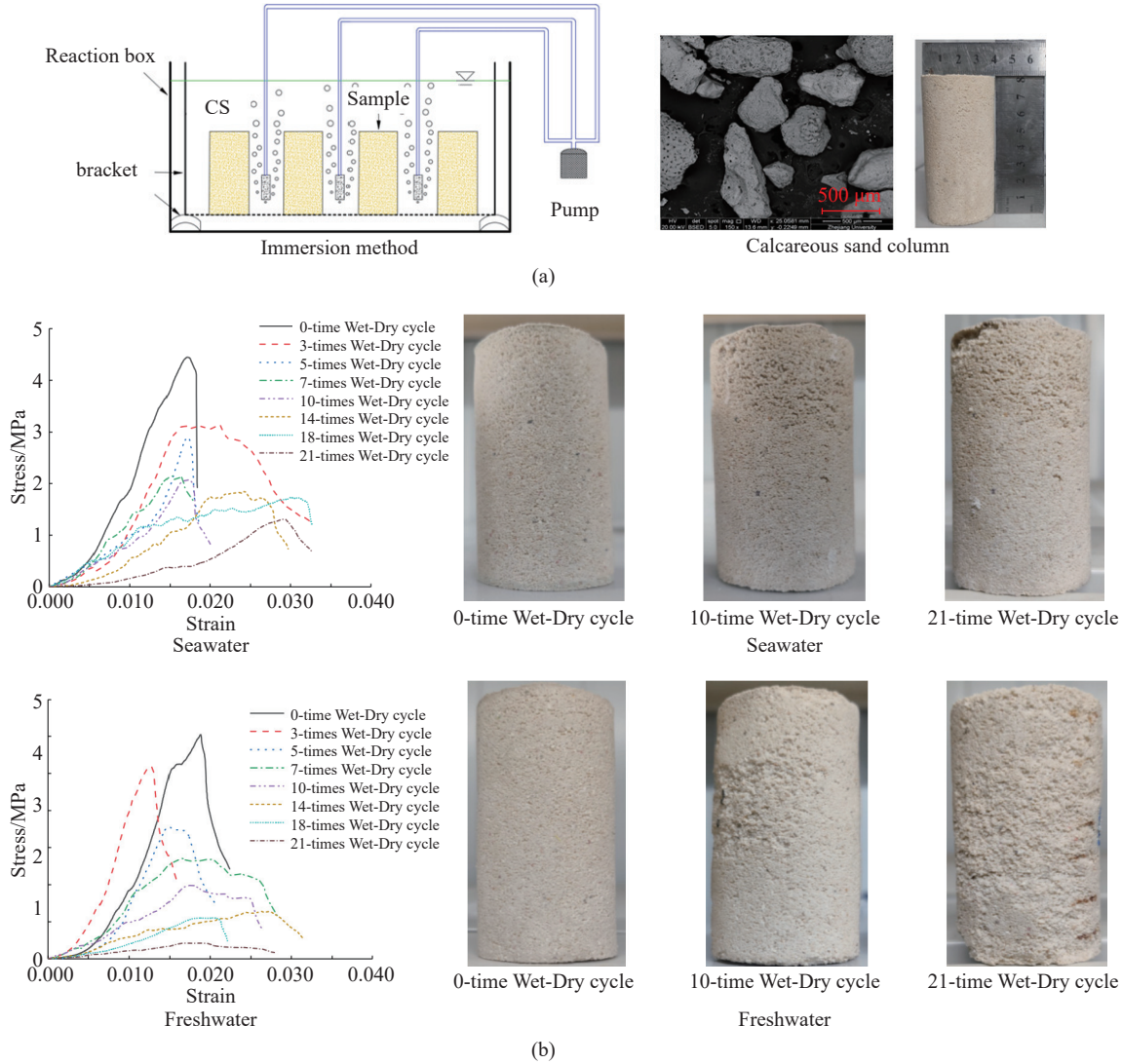


图 8 MICP 加固钙质砂与耐久性试验<sup>[44]</sup>. (a) 处理方法; (b) 强度退化规律与表面形貌

Fig.8 Durability test of MICP-reinforced calcareous sand<sup>[44]</sup>: (a) treatment method; (b) strength degradation law and surface topography

$\rho_l$  为流体密度,  $g$  为重力加速度.

采用对流扩散反应方程描述:

$$\varphi \frac{\partial C_{\text{urea}}}{\partial t} = \nabla \cdot (\varphi D \cdot \nabla C_{\text{urea}}) - \mathbf{q} \cdot \nabla C_{\text{urea}} - \varphi R_{\text{rea}} \quad (11)$$

$$\varphi \frac{\partial C_{\text{NH}_4^+}}{\partial t} = \nabla \cdot (\varphi D \cdot \nabla C_{\text{NH}_4^+}) - \mathbf{q} \cdot \nabla C_{\text{NH}_4^+} + 2\varphi R_{\text{rea}} \quad (12)$$

$$\varphi \frac{\partial C_{\text{Ca}^{2+}}}{\partial t} = \nabla \cdot (\varphi D \cdot \nabla C_{\text{Ca}^{2+}}) - \mathbf{q} \cdot \nabla C_{\text{Ca}^{2+}} - \varphi R_{\text{rea}} \quad (13)$$

$$\varphi \frac{\partial C_{\text{bacI}}}{\partial t} = \nabla \cdot (\varphi D \cdot \nabla C_{\text{bacI}}) - \mathbf{q} \cdot \nabla C_{\text{bacI}} - \varphi k_d C_{\text{bacI}} + \varphi k_{\text{att}} C_{\text{bacI}} \quad (14)$$

其中,  $\varphi$ ,  $C_i$ ,  $D$  分别代表孔隙率、溶质浓度(下角标  $i$  对应不同的溶质, 后文此规律同)、水动力弥散系数.

考虑 KC 公式建立了孔渗演化方程:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_c} m_{\text{CaCO}_3} \varphi R_{\text{rea}} \quad (15)$$

$$\frac{\partial C_{\text{CaCO}_3}}{\partial t} = m_{\text{CaCO}_3} \varphi R_{\text{rea}} \quad (16)$$

$$K = K_0 \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} \frac{(1-\varphi_0)^2}{\varphi_0^3} \quad (17)$$

其中,  $K$ ,  $K_0$ ,  $\varphi$ ,  $\varphi_0$  分别代表当前渗透率、初始渗透率、当前孔隙率、初始孔隙率.

上述一系列方程可描述 MICP 过程在多孔介质中的物质运移及时空反应规律. 在此基础上, 作者耦合一维比奥固结方程描述由波浪诱导在海床内部产生孔隙压力的过程:

$$G \frac{2-2\nu}{1-2\nu} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (18)$$

$$\frac{K}{\mu_l} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial t} + \varphi \beta \frac{\partial p}{\partial t} \quad (19)$$

其中,  $G$ ,  $\nu$ ,  $\beta$ ,  $z$  分别代表土体剪切模量、泊松比、竖向位移, 渗透系数, 孔隙介质压缩系数, 海床



下某一点的位置(原点位于海床平面)。孔隙压力  $p$  影响达西流速,从而影响对流扩散反应过程及碳酸钙的沉积。反之,碳酸钙的沉积堵塞孔隙,减小渗透性,增加剪切模量,这又会影响比奥动力响应过程。因此,考虑波浪作用下的 MICP 数值模型是一个双向耦合非线性模型。

作者首先通过单元试验验证了模型的正确性,然后开展了大量计算,结果表明 MICP 过程增加了海床表层超孔压梯度和竖向有效应力幅值(图 9)。其中  $T_w$ 、 $H_w$ 、 $d_w$ 、 $\phi_0$ 、 $K_0$ 、 $S_r$ 、 $G_0$  分别代表波浪周期、波高、水深、初始孔隙率、初始渗透率、饱和度和剪切模量。

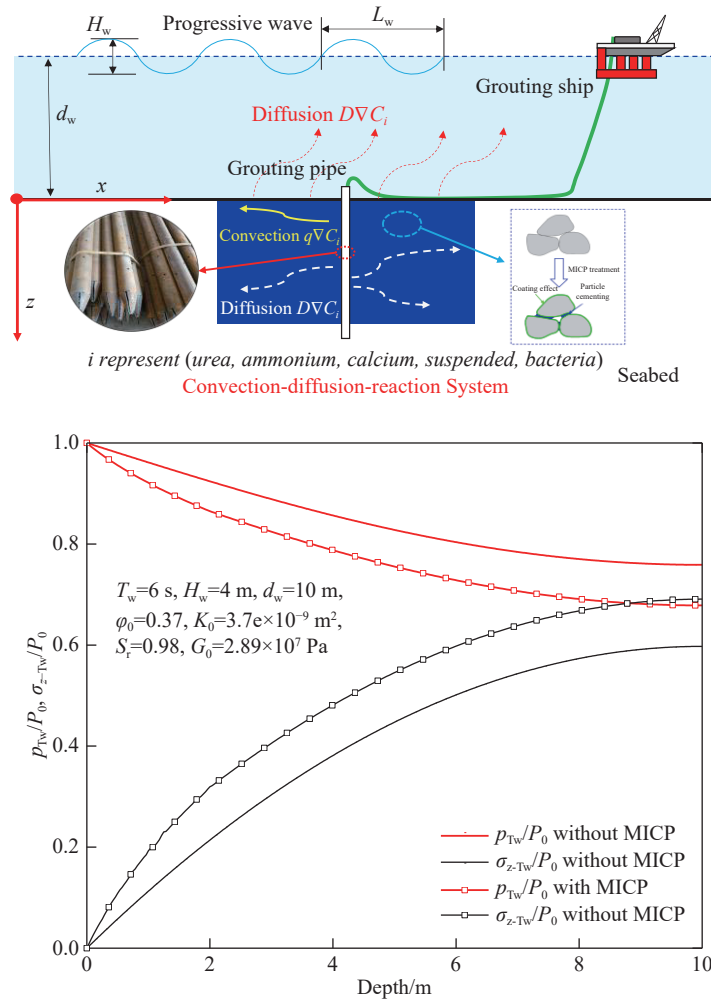


图 9 考虑波浪作用的 MICP 加固海床与响应(其中  $p_{Tw}/P_0$  和  $\sigma_{z-Tw}/P_0$  分别代表一个波浪周期内超孔压幅值、竖向有效应力幅值与海床表面压力  $P_0$  之比)

Fig.9 Seabed reinforcement by MICP and the dynamic response with the consideration of the waves ( $p_{Tw}/P_0$  and  $\sigma_{z-Tw}/P_0$  represent the ratio of excess pore pressure amplitude, vertical effective stress amplitude to the wave pressure at the seabed surface  $P_0$ )

这主要是由于碳酸钙的沉积对海床表层土体的堵塞,使之承担了更大的渗透力。但上述模型仍是初级模型,未来仍需发展考虑水流作用、波流耦合作用下的 MICP 加固岸坡理论模型,并通过现场试验验证其正确性。

### 3 MICP 过程影响因素

砂土中的 MICP 反应过程是一个高度耦合的多过程反应,涉及微生物行为、化学反应过程、对

流扩散体系、物理力学特性演化。从微生物水解尿素生成碳酸根离子和铵根离子开始,到结合环境中的钙离子在土体内部生成碳酸钙提升其强度、刚度等性能,其复杂过程受到很多因素的制约,包括细菌种类、细菌浓度、温度、pH 值、胶结液成分、胶结液浓度、土体性质、灌浆策略等<sup>[48-49]</sup>。上述因素已经被多位学者系统分析过,本文不再赘述,但针对南海特殊岛礁环境条件(高温、高湿、高辐射、波浪海流等因素)对 MICP 过程的影

响尚未见报道。

### 3.1 环境温度

环境温度首先影响细菌生长繁殖和新陈代谢, 其次控制着脲酶活性, 从而影响碳酸钙生成速率、晶体类别与形貌。研究表明, MICP 加固岩土材料的最适宜温度区间为  $20 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[49]</sup>。而岛礁温度条件一般介于  $25 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 处于 MICP 反应最适宜温度。彭劼等<sup>[50]</sup>开展了  $10, 20$  和  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境下微生物诱导碳酸钙沉积水溶液试验、一维砂柱加固试验和细菌活性试验, 结果表明水溶液试验中,  $10 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内温度对于 MICP 的影响与反应时间有关, 反应前期, 温度较高的环境下钙离子消耗量较大, 反应一段时间后温度较低的环境下钙离子消耗量较大。van Paassen<sup>[51]</sup>基于试验数据给出了相对脲酶活性与环境温度之间的关系, 在  $5 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境下, 相对脲酶活性随着温度的增加非线性增加。

### 3.2 pH

在 MICP 反应过程中, pH 值直接影响脲酶活性进而控制整个反应进行。芽孢杆菌和芽孢球菌生长的最适宜 pH 在 9.0 左右。Whiffin<sup>[11]</sup>则发现包含细菌细胞的菌液脲酶活性 pH 最佳值为 9。pH 通过影响多孔介质溶液中铵根、碳酸根、碳酸氢根离子浓度从而控制碳酸钙的沉积速率、产量与形貌。当反应离子(钙离子、碳酸根离子)的过饱和浓度越高, 碳酸钙的形成速率越快且晶体越小。研究表明<sup>[52-53]</sup>, 存在最优 pH 范围, 随着 pH 的增加, 脲酶活性先增加后减小, 一般碳酸钙含量和单轴抗压强度也表现出先增加后减小的趋势, 但抗压强度与环境温度、砂土类型、孔隙分布等因素相关, 根据单一的 pH 值的变化无法严格确定其强度的精确变化大小。近年来还有学者通过减小 pH 值形成酸性环境, 调控碳酸钙在多孔介质中沉积的均匀性<sup>[54]</sup>。而南海岛礁环境一般呈现出弱碱性, MICP 反应中所使用的巴氏芽孢杆菌是一种嗜碱性细菌, 因此在海水环境中会发挥出更高的脲酶活性。

### 3.3 高辐射与波流

南海岛礁日照充足, 辐射程度高, 波流条件复杂。这些因素在岛礁环境下开展 MICP 加固地层时不可忽略, 应展开系统性研究。高辐射环境下产脲酶细菌的生长特性与脲酶活性发挥程度尚不明确。此外, 南海波浪条件复杂, 尤其针对岛礁岸滩下的加固, 需要考虑波浪对岸滩 MICP 加固过程的影响, 探究波压力对砂土内部对流扩散过程及化

学反应的影响。海流的作用也加速了 MICP 反应物质的输运与扩散, 这将大幅减小 MICP 沉积碳酸钙的效果。另外, 对尚未完成胶结的砂颗粒, 在波流作用下, 砂颗粒的位置会实时调整, 这对于 MICP 反应而言是不利因素。

## 4 结论与展望

本文系统总结了岛礁环境下使用微生物矿化技术进展与影响因素, 以期为我国南海岛礁生态加固提供支撑与参考, 主要结论如下:

(1) MICP 反应产物是碳酸钙, 与南海岛礁钙质砂成分相同, 满足岛礁生态需求。岛礁温度、PH 条件均适宜 MICP 反应。因此, 岛礁环境下的微生物矿化加固技术具有较强应用前景。

(2) 岛礁微生物技术应用十分广泛, 主要包括钙质地层加固, 岛礁基础加固, 岛礁岸坡加固, 能大幅提升钙质地层强度、刚度、桩基承载力、岸坡抗波浪冲蚀特性, 对于固岛强岛意义重大。

(3) 关于 MICP 数值模型的研究尚处于起步阶段, 目前主要通过单元试验、小型模型试验验证, 需要开发可考虑岛礁环境(温度、PH、波流等)下的 MICP 数值模型。

(4) 岛礁微生物技术应用虽然开展了较多的试验研究, 但是目前尚缺乏现场大尺度试验验证其效果, 需要进一步开展系统的研究。

## 参 考 文 献

- [1] Wu Y, Li N, Wang X Z, et al. Experimental investigation on mechanical behavior and particle crushing of calcareous sand retrieved from South China Sea. *Eng Geol*, 2021, 280: 105932
- [2] Wang X Z, Jiao Y Y, Wang R, et al. Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea. *Eng Geol*, 2011, 120(1-4): 40
- [3] DeJong J T, Mortensen B M, Martinez B C, et al. Bio-mediated soil improvement. *Ecol Eng*, 2010, 36(2): 197
- [4] Martinez B C, DeJong J T, Ginn T R, et al. Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2013, 139(4): 587
- [5] Al Qabany A, Soga K, Santamarina C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2012, 138(8): 992
- [6] van Paassen L A, Daza C M, Staal M, et al. Potential soil reinforcement by biological denitrification. *Ecol Eng*, 2010, 36(2): 168
- [7] O'Donnell S T, Kavazanjian E Jr, Rittmann B E. MIDP: Liquefaction mitigation via microbial denitrification as a two-stage process. II: MICP. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2017, 143(12):

- 04017095
- [8] Gao X Y. *Study on the Technology of Solidifying Coral Sand with Struvite Induced by Microorganisms in High Salt Environment* [Dissertation]. Quanzhou: Huaqiao University, 2020  
(高歆雨. 高盐环境下微生物诱导鸟粪石固化珊瑚砂技术研究[学位论文]. 泉州: 华侨大学, 2020)
- [9] Yu X N, Qian C X, Xue B. Loose sand particles cemented by different bio-phosphate and carbonate composite cement. *Constr Build Mater*, 2016, 113: 571
- [10] Boquet E, Boronat A, Ramos-Cormenzana A. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon. *Nature*, 1973, 246(5434): 527
- [11] Whiffin V S. *Microbial  $\text{CaCO}_3$  Precipitation for the Production of Biocement* [Dissertation]. Perth: Murdoch University, 2004
- [12] van Paassen L A. Bio-mediated ground improvement: From laboratory experiment to pilot applications // *Geo-Frontiers Congress 2011*. Dallas, 2011: 4099
- [13] Fang X W, Li J X, Li J, et al. Damage constitutive model of biocemented coral sand columns under unconfined compression. *Chin J Undergr Space Eng*, 2018, 14(5): 1234  
(方祥位, 李晶鑫, 李捷, 等. 珊瑚砂微生物固化体单轴损伤本构模型. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1234)
- [14] Fang X W, Li J X, Li J, et al. Study of triaxial compression test and damage constitutive model of biocemented coral sand columns. *Rock Soil Mech*, 2018, 39(Suppl 1): 1  
(方祥位, 李晶鑫, 李捷, 等. 珊瑚砂微生物固化体三轴压缩试验及损伤本构模型研究. 岩土力学, 2018, 39(Suppl 1): 1)
- [15] Ou Y X, Fang X W, Shen C N, et al. Influence of particle sizes of coral sand on bio-cementation. *J Water Resour Archit Eng*, 2016, 14(2): 35  
(欧益希, 方祥位, 申春妮, 等. 颗粒粒径对微生物固化珊瑚砂的影响. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 35)
- [16] Li J, Fang X W, Shen C N, et al. Influence of grain composition on coral sand bio-cementation. *J Water Resour Archit Eng*, 2016, 14(6): 7  
(李捷, 方祥位, 申春妮, 等. 颗粒级配对珊瑚砂微生物固化影响研究. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 7)
- [17] Guo H X, Li D R, Ma R N, et al. Oedometer test of calcareous sands solidified using the MICP mixing method. *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2019, 59(8): 593  
(郭红仙, 李东润, 马瑞男, 等. MICP拌和固化钙质砂一维固结试验. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(8): 593)
- [18] Khan M N H, Amaragoon G G N N, Shimazaki S, et al. Coral sand solidification test based on microbially induced carbonate precipitation using ureolytic bacteria. *Mater Trans*, 2015, 56(10): 1725
- [19] 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 Ground Improv*, 2019, 1(1): 26  
(刘汉龙, 马国梁, 肖杨, 等. 微生物加固岛礁地基现场试验研究. 地基处理, 2019, 1(1): 26)
- [20] Li Y Y, Fang X W, Ou Y X, et al. Impacts of different substrate solution ratio in biocementation of coral sand. *J Water Resour Archit Eng*, 2017, 15(6): 52  
(李洋洋, 方祥位, 欧益希, 等. 底物溶液配比对微生物固化珊瑚砂的影响研究. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 52)
- [21] Ou Y X, Fang X W, Zhang N, et al. Influence of solution salinity on microbial biocementation of coral sand. *J Logist Eng Univ*, 2016, 32(1): 78  
(欧益希, 方祥位, 张楠, 等. 溶液盐度对微生物固化珊瑚砂的影响. 后勤工程学院学报, 2016, 32(1): 78)
- [22] Li H, Tang C S, Liu B, et al. Mechanical behavior of MICP-cemented calcareous sand in simulated seawater environment. *Chin J Geotech Eng*, 2020, 42(10): 1931  
(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. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1931)
- [23] Liu Y, Zhang Y L, Hu J N, et al. MICP-cemented coastal fine sand in simulated seawater environment. *Nat Sci J Hainan Univ*, 2021, 39(4): 390  
(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. 海南大学学报(自然科学版), 2021, 39(4): 390)
- [24] Xiao Y, Deng H F, Li J L, et al. Study on the domestication of *Sporosarcina pasteurii* and strengthening effect of calcareous sand in seawater environment. *Rock Soil Mech*, 2022, 43(2): 395  
(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. 岩土力学, 2022, 43(2): 395)
- [25] Dong B W, Liu S Y, Yu J, et al. Evaluation of the effect of natural seawater strengthening calcareous sand based on MICP. *Rock Soil Mech*, 2021, 42(4): 1104  
(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. 岩土力学, 2021, 42(4): 1104)
- [26] Xiao P. *Study on Dynamic and Liquefaction Characteristics of Temperature Controlled MICP-Treated Calcareous Sand* [Dissertation]. Chongqing: Chongqing University, 2020  
(肖鹏. 微生物温控加固钙质砂动力与液化特性研究[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020)
- [27] Shen J W, Zhou B, Zhang X, et al. Study on the effect of MICP on the crushing behavior of calcareous sand particles. *Geol J China Univ*, 2021, 27(6): 655  
(申嘉伟, 周博, 张星, 等. MICP对钙质砂单颗粒的破碎行为影响研究. 高校地质学报, 2021, 27(6): 655)
- [28] Wang Y J, Jiang N J. Direct shear and compressibility behavior of bio-stimulated MICP treated calcareous sand. *Geol J China Univ*, 2021, 27(6): 662  
(王逸杰, 蒋宁俊. 原位激发微生物成矿加固钙质砂的剪切与压缩特性研究. 高校地质学报, 2021, 27(6): 662)
- [29] Yin L Y. *Experimental Study on the Mechanical Behavior of Fiber Reinforcement Calcareous Sand Cemented by MICP Technology* [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2019  
(尹黎阳. 基于微生物诱导碳酸钙沉淀技术固化纤维加筋钙质砂的力学性能研究[学位论文]. 南京: 南京大学, 2019)
- [30] Lin S Q, Lei X W, Meng Q S, et al. Influence of fiber contents on



- dynamic behavior of MICP-treated calcareous sand. *Yangtze River*, 2020, 51(7): 181  
(林胜强, 雷学文, 孟庆山, 等. 纤维掺量对MICP固化钙质砂动力特性的影响. *人民长江*, 2020, 51(7): 181)
- [31] Zhao J T, Tong H W, Shan Y, et al. Effects of different types of fibers on the physical and mechanical properties of MICP-treated calcareous sand. *Materials*, 2021, 14(2): 268
- [32] Zeng H, Yin L Y, Tang C S, et al. Tensile behavior of bio-cemented, fiber-reinforced calcareous sand from coastal zone. *Eng Geol*, 2021, 294: 106390
- [33] Li Y J, Guo Z, Wang L Z, et al. Interface shear behavior between MICP-treated calcareous sand and steel. *J Mater Civ Eng*, 2021, 33(2): 04020455
- [34] Li Y J, Guo Z, Wang L Z, et al. Shear resistance of MICP cementing material at the interface between calcareous sand and steel. *Mater Lett*, 2020, 274: 128009
- [35] Lin H, Suleiman M, Jabbour H, et al. Enhancing the axial compression response of pervious concrete ground improvement piles using biogrout. *J Geotech Geoenvironmental Eng*, 2016, 142(10): 04016045
- [36] Lin H, Suleiman M, Jabbour H, et al. Bio-grouting to enhance axial pull-out response of pervious concrete ground improvement piles. *Can Geotech J*, 2017, 55(4): 1
- [37] Xiao Y, Stuedlein A, Pan Z Y, et al. Toe bearing capacity of precast concrete piles through biogrouting improvement. *J Geotech Geoenvironmental Eng*, 2020, 146(12): 06020026
- [38] Tao J L, Li J H, Wang X R, et al. Nature-inspired bridge scour countermeasures: Streamlining and biocementation. *J Test Eval*, 2018, 46(4): 20170517
- [39] Montoya B M, Do J, Gabr M A. Distribution and properties of microbially induced carbonate precipitation in underwater sand bed. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2021, 147(10): 04021098
- [40] Li Y J, Guo Z, Wang L Z, et al. An innovative eco-friendly method for scour protection around monopile foundation. *Appl Ocean Res*, 2022, 123: 103177
- [41] Kou H L, Wu C Z, Ni P P, et al. Assessment of erosion resistance of biocemented sandy slope subjected to wave actions. *Appl Ocean Res*, 2020, 105: 102401
- [42] Salifu E, MacLachlan E, Iyer K R, et al. Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of sandy soil foreshore slopes: A preliminary investigation. *Eng Geol*, 2016, 201: 96
- [43] Kou H L, Liu J H, Zhang P, et al. Ecofriendly improvement of coastal calcareous sandy slope using recycled shredded coconut coir (RSC) and bio-cement. *Acta Geotech*, 2022: 1
- [44] Li Y L, Guo Z, Xu Q, et al. Experimental research on wet-dry cycle of MICP cemented calcareous sand in seawater environment. *J Zhejiang Univ (Eng Sci)*, 2022, 56(9): 1740  
(李艺隆, 国振, 徐强, 等. 海水环境下MICP胶结钙质砂干湿循环试验研究. *浙江大学学报 (工学版)*, 2022, 56(9): 1740)
- [45] Martinez B C, DeJong J T, Ginn T R. Bio-geochemical reactive transport modeling of microbial induced calcite precipitation to predict the treatment of sand in one-dimensional flow. *Comput Geotech*, 2014, 58: 1
- [46] Fauriel S, Laloui L. A bio-chemo-hydro-mechanical model for microbially induced calcite precipitation in soils. *Comput Geotech*, 2012, 46: 104
- [47] Wang X R, Nackenhorst U. A coupled bio-chemo-hydraulic model to predict porosity and permeability reduction during microbially induced calcite precipitation. *Adv Water Resour*, 2020, 140: 103563
- [48] Tang C S, Pan X H, Lyu C, et al. Bio-geoengineering technology and the applications. *Geol J China Univ*, 2021, 27(6): 625  
(唐朝生, 泮晓华, 吕超, 等. 微生物地质工程技术及其应用. *高校地质学报*, 2021, 27(6): 625)
- [49] Yin L Y, Tang C S, Xie Y H, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of geomaterials by microbial-induced calcite precipitation. *Rock Soil Mech*, 2019, 40(7): 2525  
(尹黎阳, 唐朝生, 谢约翰, 等. 微生物矿化作用改善岩土材料性能的影响因素. *岩土力学*, 2019, 40(7): 2525)
- [50] Peng J, Feng Q P, Sun Y C. Influences of temperatures on MICP-treated soils. *Chin J Geotech Eng*, 2018, 40(6): 1048  
(彭劼, 冯清鹏, 孙益成. 温度对微生物诱导碳酸钙沉积加固砂土的影响研究. *岩土工程学报*, 2018, 40(6): 1048)
- [51] van Paassen L A V. *Biogrout, Ground Improvement by Microbial Induced Carbonate Precipitation* [Dissertation]. Delft: Delft University of Technology, 2009
- [52] Cheng L, Shahin M A, Cord-Ruwisch R, et al. Soil stabilisation by microbial-induced calcite precipitation (MICP): investigation into some physical and environmental aspects // *7th International Congress on Environmental Geotechnics*. Melbourne, 2014, 64(12): 1105
- [53] Keykha H A, Asadi A, Zareian M. Environmental factors affecting the compressive strength of microbiologically induced calcite precipitation-treated soil. *Geomicrobiol J*, 2017, 34(10): 889
- [54] Cheng L, Shahin M A, Chu J. Soil bio-cementation using a new one-phase low-pH injection method. *Acta Geotech*, 2019, 14(3): 615