

# 微生物加固岛礁地基现场试验研究

刘汉龙<sup>1,2</sup>, 马国梁<sup>1</sup>, 肖 杨<sup>1,2</sup>, 丁选明<sup>1,2</sup>, 方祥位<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘 要:** 人工吹填岛礁是我国南海开发的重要战略工程, 但是吹填岛礁地基不能直接用于工程建设, 必须对岛礁地基进行加固处理。微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 技术是近年来提出的一种新型加固技术, 可以用于提高砂土强度并降低砂土渗透性能。本文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, 结果表明经过 3~4 次微生物加固处理后, 开始检测到地基表面强度提升; 经过 9 次微生物加固处理后, 地基表面强度大于 10 MPa, 最高可达 20 MPa, 地基加固深度达 70 cm, 无侧限抗压强度最高可达 821 kPa。

**关键词:** 微生物诱导碳酸钙沉淀技术; 人工吹填岛礁; 钙质砂地基; 强度

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)01-0026-06

**作者简介:** 刘汉龙 (1964 - ), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学特性与岩土工程、软土力学特性与地基基础工程和环境岩土力学与防灾减灾工程等方面的研究。E-mail: hliuhu@163.com。

## In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands

LIU Han-long<sup>1,2</sup>, MA Guo-liang<sup>1</sup>, XIAO Yang<sup>1,2</sup>, DING Xuan-ming<sup>1,2</sup>, FANG Xiang-wei<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Artificial reclamation islands are key strategic projects for the development of the South China Sea. However, these islands which cannot be directly used as the foundation for the project construction, have to be treated before the project construction. Microbially induced calcite precipitation (MICP) technique which was put forward to improve strength and decrease permeability of sandy soils. In the present work, MICP technique was used to strengthen in-situ calcareous foundations on the artificial reclamation island. The results showed that the detectable surficial strength was presented after 3-4 times MICP treatment. After 9 times of MICP treatment the surficial strength were all larger than 10 MPa with the largest value of 20 MPa, the depth of stabilized foundation was up to 70 cm and the highest unconfined compression strength was 821 kPa.

**Key words:** microbially induced calcite precipitation; artificial reclamation reefs; calcareous sand foundation; strength

## 1 引 言

中国南海人工吹填岛礁地基主要成分来源于珊瑚、贝壳及藻类生物残骸, 主要由碳酸钙组成, 被统称为钙质砂<sup>[1]</sup>。人工吹填岛礁所处环境比较复杂, 包括海水的长期腐蚀作用, 复杂的地质构造特征, 以及各类极端环境条件等<sup>[2]</sup>。未经处理的钙质砂地基在复杂地质环境条件下, 可能会产生过量的沉降变形、不均匀沉降<sup>[3-4]</sup>及砂土液化<sup>[5]</sup>等, 不能直接用于工程建设, 必须对吹填岛礁地基进行加固处理<sup>[6]</sup>。

传统的加固方法例如水泥加固、化学灌浆等

在海洋环境下使用可能存在诸多问题, 例如水泥会被海水腐蚀, 化学灌浆加固可能造成环境污染等。微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 技术是近年来提出的一种新型加固技术, 它利用微生物的新陈代谢活动, 促进碳酸钙结晶沉淀在砂颗粒之间, 胶结砂颗粒从而提高砂土强度<sup>[7,8]</sup>。该技术对环境影响较小, 并且起胶结作用的碳酸钙在海洋环境下耐久性较好。

针对微生物诱导碳酸钙沉淀技术, 国内外学

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41831282, 51578096)

收稿日期: 2019-06-29

者开展了一些列室内砂柱试验<sup>[9-11]</sup>及模型试验<sup>[12-14]</sup>。关于 MICP 技术的现场试验研究较少, 并且主要集中在防风固沙、防渗漏等方面。Gomez<sup>[15]</sup>和李驰<sup>[16]</sup>等开展了沙漠表面原位覆膜防风蚀现场试验研究; Blauw<sup>[17]</sup>等开展了地基及土石坝防渗现场试验研究; 张越等<sup>[18]</sup>开展了地下室防渗漏现场试验研究; 谈叶飞<sup>[19]</sup>等探讨了 MICP 技术在堤坝防渗加固方面的应用。目前针对地基加固方面的现场试验研究较少, 本文拟开展 MICP 技术加固人工吹填岛礁钙质砂地基现场试验研究, 以为 MICP 技术在人工吹填岛礁地基加固中的应用提供参考及依据。

## 2 试验场地及加固方法

### 2.1 试验场地

试验地点位于南海某吹填岛礁, 该岛平均海拔为 5 m, 地处北回归线以南, 赤道以北, 属热带季风气候, 年降水量 1509.8 mm, 风力大, 蒸发快, 雨量充沛, 终年高温, 高湿, 高盐。太阳直射时间多、日照长, 年平均气温 26.5℃; 一月最冷, 平均气温 23℃; 六月最热, 平均气温 29℃; 雨季为每年 5~6 月份。

拟加固地基位于海岸附近(图 1 (a)), 该场地主要由钙质砂组成。本次试验的试验方案如图 2 及表 1 所示, 地基加固的目标深度为 50 cm, 按预期加固程度将该场地分为 4 个区, 按加固程度从小到大依次为: 未加固区、加固区 1、加固区 2 和加固区 3。每块地基四周用有机玻璃板分隔(如图 1 (b)), 防止微生物溶液与反应液横向流动, 避免加固区之间的相互干扰。有机玻璃板厚 5 cm, 长 150 cm, 高 60 cm, 其中 40 cm 位于地基表面以下, 20 cm 位于地基表面以上。

### 2.2 微生物运输及培养方法

本次试验所用微生物为巴氏生孢八叠球菌。地基加固所用微生物溶液均采用室内无菌培养、离心浓缩、低温运输及现场扩大培养的方式获得。具体方法如下:

(1) 室内培养: 培养液的成分包括酵母提取物 20 g/L, NH<sub>4</sub>Cl 10 g/L, MnSO<sub>4</sub> 12 mg/L, NiCl 6H<sub>2</sub>O 24 mg/L。培养液的 pH 值用 1 M NaOH 调节至 9.0。微生物接种后, 在 30℃ 条件下恒温振荡培养 24 h。

(2) 离心浓缩: 培养好的微生物用高速离心机分离微生物, 离心腔室温度为 4℃, 转速

4000 rpm, 时长 15 min。离心后, 除去上清液, 将沉淀溶于新鲜的培养液中, 新鲜培养液的体积为原体积的 1/10, 即将 10 L 的微生物溶液浓缩为 1 L。浓缩后的微生物装入塑胶水袋中在 4℃ 条件下储存。

(3) 低温运输: 浓缩后的微生物用保温箱运输至现场。保温箱中放有冰袋, 以保证运输过程中保温箱内温度较低。整个运输过程约 1~2 天。微生物运输到现场后, 立即放入冰箱中低温(4℃)保存。

(4) 现场扩培: 扩大培养所用培养基成分包括工业大豆蛋白胨 25 g/L, 尿素 10 g/L, MnSO<sub>4</sub> 12 mg/L, NiCl 6H<sub>2</sub>O 24 mg/L。培养基的 pH 值用 NaOH 调节至 9.0~10.0, 培养时间为 12 h。培养结束后, 用电导率法测细菌活性。培养好的微生物用 0.9% 的 NaCl 溶液稀释后立即用于现场地基加固, 稀释比例为 2:1。



(a) 整平后的场地 (b) 加固区分隔

图 1 试验现场及地基分隔

Figure 1 Test site and separation of the foundation



图 2 拟加固地基分区示意图

Figure 2 Schematic diagram of the separation of the foundation

表 1 MICP 加固钙质砂地基方案

Table 1 Test design for calcareous sand foundation

stabilization using MICP

| 编号   | 加固方式 | 加固次数 | 加固程度 |
|------|------|------|------|
| 未加固区 | /    | /    | 基准组  |
| 加固区1 | 倾倒法  | 3次   | 弱胶结  |
| 加固区2 | 倾倒法  | 6次   | 中胶结  |
| 加固区3 | 倾倒法  | 9次   | 强胶结  |

### 2.3 加固方法

本次地基加固的目标深度为 50 cm，按照加固区长度（150 cm）和宽度（150 cm）可以计算出拟加固地基的体积（ $1.125 \text{ m}^3$ ）。地基加固时，首先在拟加固地基表面铺设一层百洁布，然后在地基表面交替倾倒微生物溶液和反应液，利用自重渗流使微生物溶液和反应液渗入地基内部。以一个加固周期为例，首先在地基表面倾倒 1 倍孔隙体积的微生物溶液，静置 1 h；然后在地基表面倾倒 1 倍孔隙体积的反应液，在表面覆盖塑料薄膜，反应 11 h。在地基加固时，重复上述步骤，直至完成目标加固次数（表 1）。

加固过程中使用的反应液为 1 M 等浓度的尿素及  $\text{CaCl}_2$  混合溶液。

### 2.4 加固效果检测

由于现场条件限制，在试验初期用袖珍灌入仪测试地基表面加固效果，如图 3（a）所示，当加固程度较高时，地基强度超过袖珍灌入仪量程，无法得到准确数据。加固结束后，首先用回弹仪测试地基加固强度，如图 3（b）所示；然后拆除有机玻璃隔板，检测地基加固深度（图 3（c）），并凿取块状试样带回室内检测（如图 3（d）所示），本次共凿取 3 块试块，用于室内强度检测及微观结构观测。

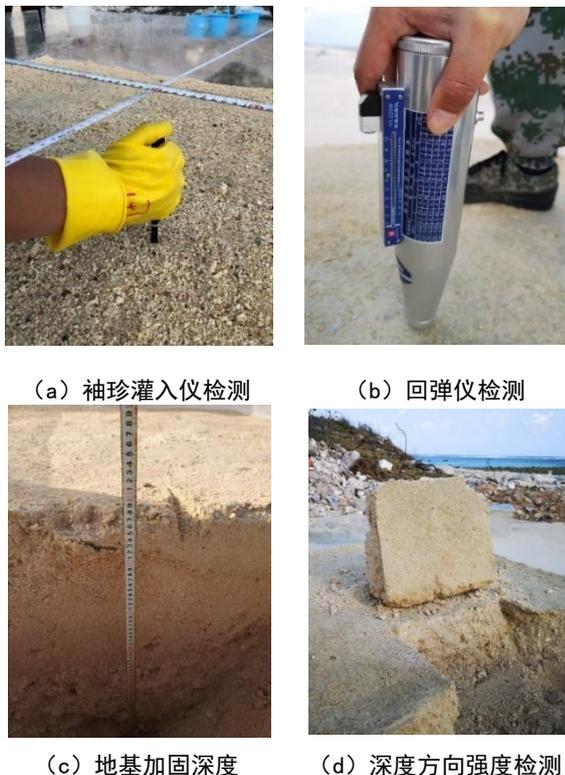


图 3 原位检测及现场取样

Figure 3 In-situ testing and sampling

## 3 试验结果

### 3.1 加固过程中强度增长

图 4 给出了袖珍灌入仪测点布置示意图，在每一个加固区分别设置 16 个监测点，在每次微生物溶液灌注前，测试一次表面贯入强度，当强度值超过袖珍灌入仪量程时（ $3.059 \text{ MPa}$ ），不再给出测点值。表面贯入强度随加固次数的变化值在图 5 中给出。

从图中可以看出，经过两次加固后，没有检测到钙质砂地基表面强度增长；经过 3 次加固后钙质砂地基表面部分测点强度开始提升，并且这些测点主要位于地基中间部位，在靠近有机玻璃隔板的部位（例如 11，12，13，14，24，34，44）强度仍然没有改善。经过 4 次加固后，地基表面所有测点强度均提高；加固 6~7 次后，除个别点外，几乎所有测点的表面贯入强度均超过袖珍灌入仪量程，该测试方法失效。由表面贯入强度结果可知，钙质砂地基强度提高是不均匀的，其中地基中间部位强度提升较早，经过 3 次处理后就开始检测到强度提升，地基四周靠近玻璃板部位强度提升较缓慢，经过 4 次处理后才开始检测到强度提升；加固 6~7 次后强度超过袖珍灌入仪量程，该方法失效。

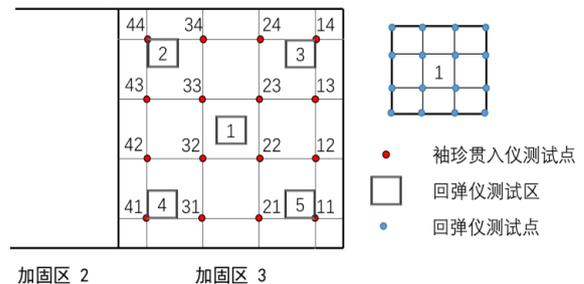


图 4 袖珍灌入仪及回弹仪监测点布置

Figure 4 Arrangement of test plots for pocket penetrometer and Schmidt hammer

### 3.2 加固后表面强度

在达到目标加固次数后，用混凝土回弹仪检测地基表面加固强度，检测区位置在图 4 中给出，每块地基共检测五个区，每个区设置 16 个测点，其中加固区 3 的回弹仪测试结果在图 6 中给出。

加固区 3 经过 9 次微生物处理后，地基表面强度值均大于  $10 \text{ MPa}$ ，强度平均值在  $12 \sim 15 \text{ MPa}$  范围内，最高值可达  $20 \text{ MPa}$ 。其中地基中心的表面强度平均值最大，约为  $15 \text{ MPa}$ ，地基四周表面强度较小约为  $12 \sim 13 \text{ MPa}$ 。由此可见，地基在微生物加固处理后，强度值明显提高，但是强度值分布范围较大，在同一个测区强度差异最大可达  $10 \text{ MPa}$ ，地基加固均匀性较差。

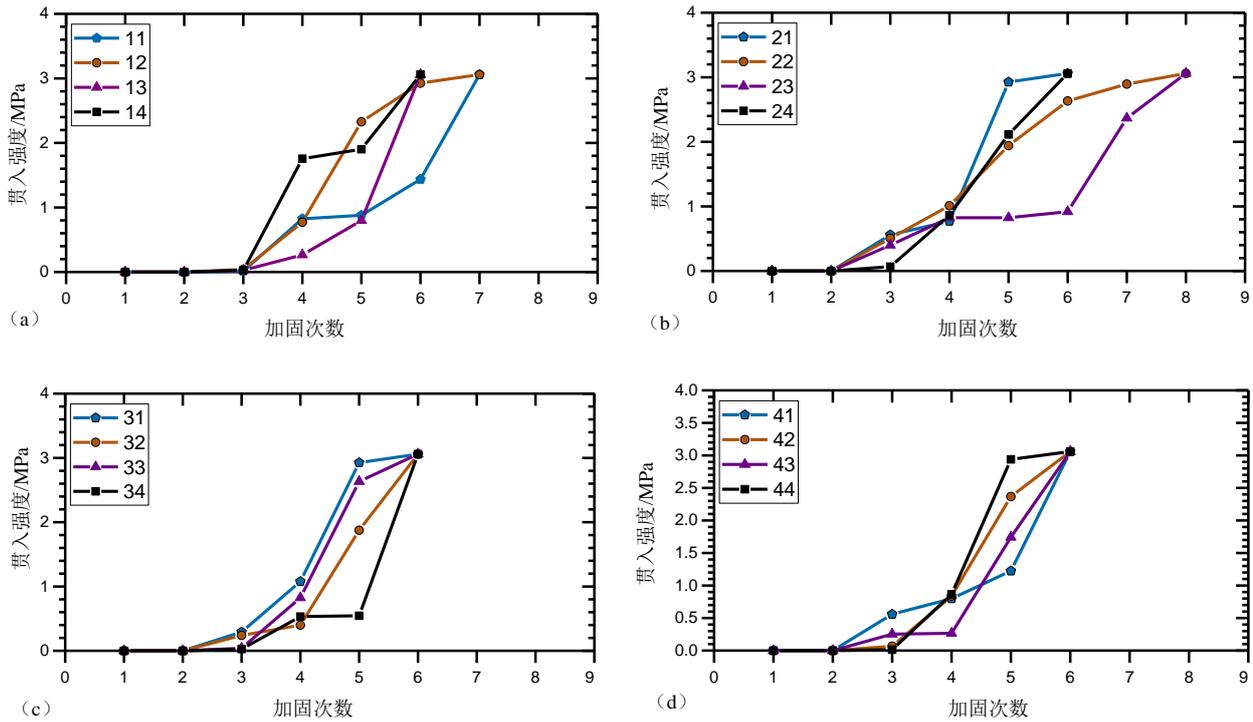


图 5 MICP 加固过程中贯入强度变化

Figure 5 Variations of penetration resistance during MICP treatment

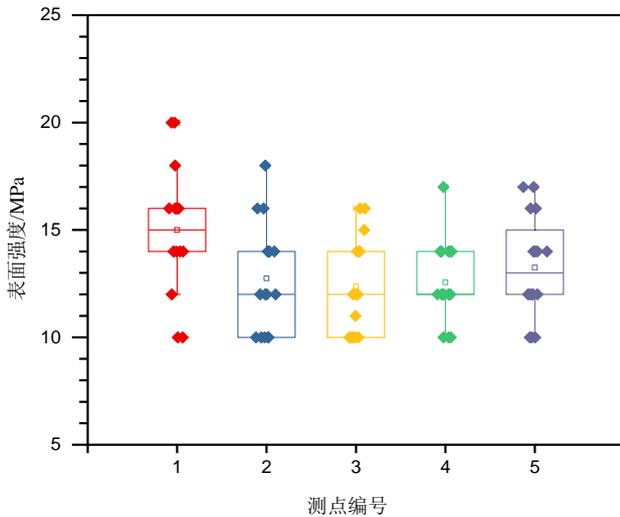


图 6 MICP 加固后表面强度

Figure 6 Surface strength after MICP treatment

### 3.3 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是检测微生物加固效果的常用指标。在试验室将现场带回的块状试样切割成长×宽×高约为 60×60×120 mm<sup>3</sup> 的小试块, 用 CMT5504 型电子万能试验机检测小试块的无侧限抗压强度, 加载由位移控制, 位移速率为 0.1 mm/min。本次共测试了 5 块试样, 强度值由高到低分别为: 821 kPa, 462 kPa, 307 kPa,

288 kPa 和 231 kPa。钙质砂在微生物加固后形成弱胶结砂岩, 强度明显提高, 但是加固后强度差异较大, 差值最大可达 590 kPa。

### 3.4 SEM 微观观测

无侧限抗压强度试验结束后, 取代表性样品进行 SEM 观测, 如图 7 所示。其中 (a)、(b) 和 (c) 是不同尺度下未加固钙质砂的结构特征。强度为 821 kPa 的试样的微观结构特征在 (d) 中给出, 强度为 231 kPa 的试样的微观结构特征在 (g) 中给出。(d) 和 (g) 中黄色方框所示区域分别在 (e) 和 (h) 中给出, (e) 和 (h) 中局部放大后的结果分别在 (f) 和 (i) 中给出。其中 (f) 中碳酸钙主要以球霏石的形态存在, 而 (i) 中碳酸钙主要以方解石的形态存在。

通过 SEM 图片可以看出, 强度为 821 kPa 的试样的颗粒粒径明显比强度为 231 kPa 的试样的颗粒粒径小。此外强度为 821 kPa 的试样表面基本完全被碳酸钙包裹, 残留孔隙的尺寸较小(10~20 μm 左右); 而强度为 231 kPa 的试样表面碳酸钙较少, 颗粒间接触点数量较少, 颗粒间接触点被碳酸钙胶结, 颗粒间孔隙尺寸较大, 孔径在 100 μm 量级。

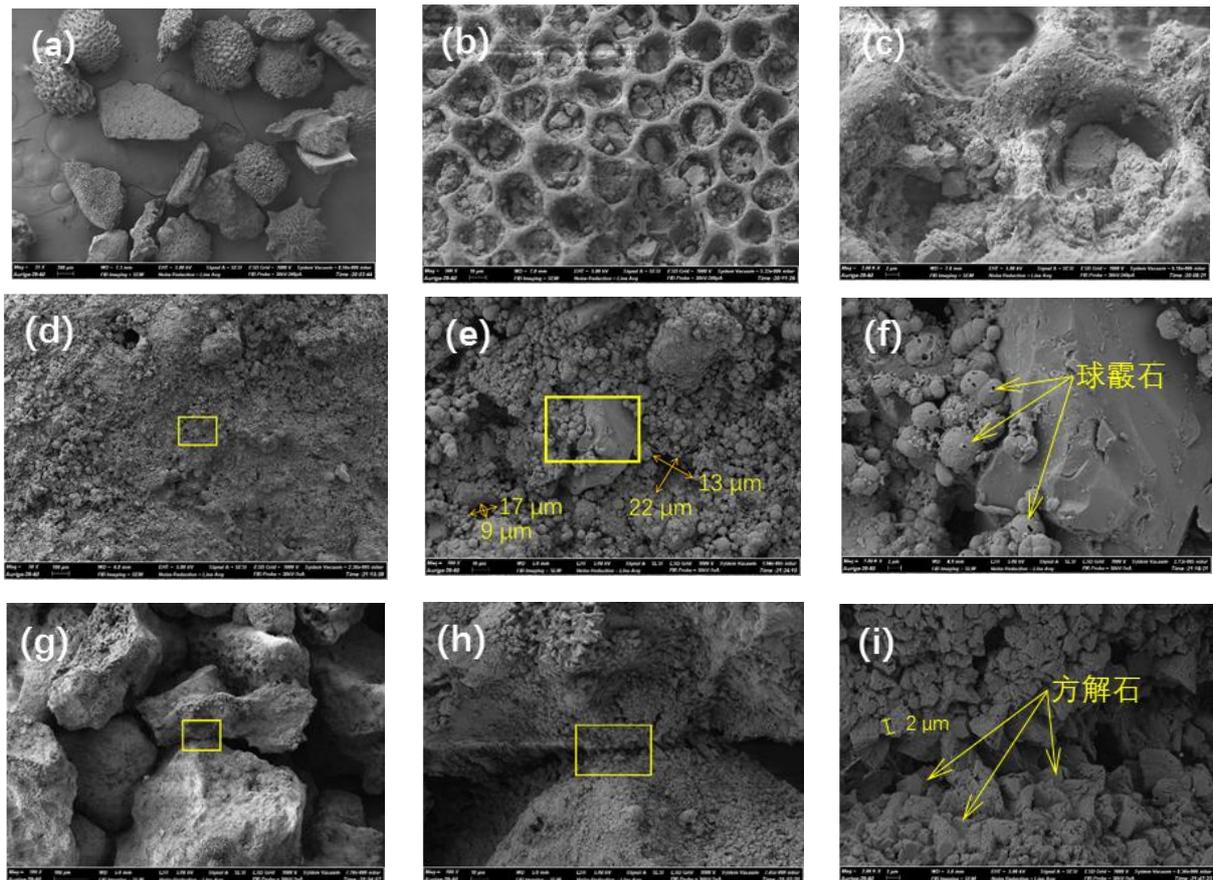


图7 MICP加固前后钙质砂微观结构

Figure 7 Microstructures of calcareous sands before and after MICP treatment

## 4 讨 论

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术加固钙质砂地基可以提高地基强度,例如加固后表面强度基本都大于10 MPa,最高可达20 MPa;无侧限抗压强度最高可达821 kPa。但是在地基加固过程中和加固结束后,地基强度的提升都表现出明显的不均匀性。地基加固过程中表面贯入强度变化有明显的差异(图5),地基中间部位加固3次后检测到强度提升,在第4次处理后地基四周检测到强度提升。加固结束后,地基中间部位表现出较高的表面强度,平均表面强度约为15 MPa,最大强度为20 MPa,最小强度约为10 MPa,同一测区的强度变化较大;靠近角点处的平均强度约为12~13 MPa,最大强度约为18 MPa,比中间部位稍低(图6)。无侧限抗压强度也表现出较大差异,加固区3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。

造成地基加固不均匀的原因可能有多种。首先,地基加固过程中人为倾倒很难控制细菌及反应液均匀地分布在地基表面,导致地基中碳酸钙

沉淀的分布不均匀,从而造成地基强度分布的不均匀。其次,钙质砂加固后的强度与颗粒粒径及相对密度等有关,如图7中SEM图片所示,地基中钙质砂颗粒粒径分布不均匀,强度较高的试样的颗粒粒径较小,颗粒间接触点较多,孔隙孔径较少;强度较低的试样的颗粒粒径和孔隙孔径明显较大,并且颗粒间接触点较少。

## 5 结论与展望

本文开展了微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术加固吹填岛礁钙质砂地基现场试验研究,主要针对加固程度最强的分区进行检测,包括:加固过程中袖珍贯入仪检测,加固结束后回弹仪检测,加固深度开挖检测,室内无侧限抗压强度检测及扫描电镜微观结构观测。本文得到以下结论:微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术可以用于加固钙质砂地基,经过3~4次微生物加固处理后,开始检测到地基表面强度提升;经过9次微生物加固处理后,地基表面强度均大于10 MPa,最高可达20 MPa,地基加固深度达70 cm,无侧限抗压强度最高可达821 kPa。

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术在钙质砂地基加固应用中仍存在很多问题,主要表现为加固过程中及加固后地基强度分布不均匀,造成该现象的原因有多种,大体可以分为两种:人为因素和钙质砂基本物理性质。其中人为因素主要是人工倾倒入细菌溶液和反应液时造成溶液在地基中的分布不均匀,这种影响可以通过设计相应的机械设备来克服。钙质砂的基本物理性质主要包括地基中钙质砂的颗粒粒径分布及相对密度分布不均匀等,现有研究表明微生物加固土体的强度与其级配和相对密度等密切相关。目前MICP技术的加固对象都是均匀土体,即土体内部各部位颗粒粒径及对密度差异较小。但是,在工程实践过程中,土体的不均匀性是一个普遍现象,要使MICP技术真正用于现场实践,必须要进一步研究土体的不均匀性对MICP加固土体强度的影响,并改善加固工艺以减小土体不均匀性对土体加固效果的影响。

#### 参考文献

- [1] 钱磊,王新志,陈剑文,等. 南海岛礁吹填钙质砂渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1557-1564.
- [2] 黄云,胡其高,张硕云. 南海海洋环境对岛礁工程结构与设施影响研究[J]. 国防科技, 2018, 39(3): 55-68.
- [3] 兰恒星,赵晓霞,伍宇明,等. 钙质岛礁沉降变形过程分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(10): 6-13.
- [4] 叶剑红,曹梦,李刚. 中国南海吹填岛礁原状钙质砂蠕变特征初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6):1242-1251.
- [5] 刘汉龙,胡鼎,肖杨,等. 钙质砂动力液化特性的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 707-725.
- [6] 杨洪周,闫伟,郭小兵,等. 海外吹填造地及地基处理发展状况[J]. 水运工程, 2018, 10: 207-213.
- [7] Dejong J T, Soga K, Kavazanjian E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges[J]. Geotechnique, 2013, 63(4): 287-301.
- [8] Liu L, Liu H L, Xiao Y, et al. Biocementation of calcareous sand using soluble calcium derived from calcareous sand[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(4): 1781-1791.
- [9] Xiao P, Liu H, Xiao Y, et al. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2018, 107:9-19.
- [10] 刘汉龙,肖鹏,肖杨,等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 1-14.
- [11] Gao Y, Hang L, He J, et al. Mechanical behaviour of biocemented sands at various treatment levels and relative densities [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3):697-707.
- [12] Van Paassen L A, Harkes M P, Van Zwieten G A, et al. Scale up of BioGrout: A biological ground reinforcement method [C]. proceedings of the Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, F:2328-2333.
- [13] Van Paassen L A. Bio-Mediated Ground Improvement: From Laboratory Experiment to Pilot Applications [M]. Geo-Frontiers. 2011, 4099-4108.
- [14] 刘璐,沈扬,刘汉龙,等. 微生物胶结在防治堤坝破坏中的应用研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3410-3416.
- [15] Gomez M G, Martinez B C, Dejong J T, et al. Field-scale bio-cementation tests to improve sands [C]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2015, 168(3): 206-216.
- [16] 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(04): 1291-1298.
- [17] Blauw M, Lambert J W M, Latil M N. Biosealing: A method for in situ sealing of leakages [C]. Ground Improvement Technologies and Case Histories, 2010: 125-130.
- [18] 张越,郭红仙,程晓辉,等. 微生物诱导碳酸钙沉积技术治理某地下室渗漏的现场试验[J]. 工业建筑, 2013, 43(12): 138-143.
- [19] 谈叶飞,郭张军,陈鸿杰,等. 微生物追踪固结技术在堤防防渗中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(06): 521-526.