

DOI: 10.11779/CJGE202006005

微生物灌浆加固可液化钙质砂地基的振动台试验研究

张鑫磊^{1, 2}, 陈育民^{*1, 2}, 张 喆^{1, 2}, 丁绚晨^{1, 2}, 徐盛明^{1, 2}, 刘汉龙³, 王志华⁴

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024;

3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 4. 南京工业大学交通学院, 江苏 南京 210009)

摘 要: 饱和钙质砂地基受到地震、波浪等动荷载作用时会发生液化灾害。微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)是利用细菌分解尿素结晶成矿的地基处理技术。开展了 MICP 灌浆加固南海钙质砂地基的振动台试验, 研究了 MICP 加固钙质砂地基的动力反应特性及抗液化性能, 并分析了振动历史对钙质砂地基动力特性的影响。结果表明: MICP 加固钙质砂地基在首次振动时产生的超孔压及地表沉降发展可分为平稳振荡阶段、快速增长阶段及稳定阶段 3 个阶段, 而对于未加固模型地基则不存在稳定振荡阶段。相对于未加固地基, MICP 处理后的钙质砂地基超孔压与地表沉降均有所降低, 表明加固后的钙质砂地基抗液化能力得到较大提高; 另一方面, 处理后的土体地表加速度峰值被放大, 因此, 在设计地基处理方案时, 需考虑 MICP 加固后钙质砂地基在地震作用下产生的地表加速度放大效应。MICP 胶结钙质砂的抗液化强度不仅仅与颗粒胶结强度相关, 还与土体密度及颗粒排列规律有关。振动历史提高了地基土密度, 改善了钙质砂的抗液化性能, 显著降低了地基的表面沉降。

关键词: 微生物诱导碳酸钙沉淀; 钙质砂地基; 抗液化性能; 动力反应特性; 振动历史; 振动台试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)06-1023-09

作者简介: 张鑫磊(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事微生物岩土技术及土动力学研究。E-mail: zxl201409@163.com。

Performance evaluation of liquefaction resistance of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests

ZHANG Xin-lei^{1, 2}, CHEN Yu-min^{1, 2}, ZHANG Zhe^{1, 2}, DING Xuan-chen^{1, 2}, XU Sheng-ming^{1, 2},
LIU Han-long³, WANG Zhi-hua⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. College of Civil Engineering, Chongqing

University, Chongqing 400045, China; 4. School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: Calcareous sandy foundations are susceptible to liquefaction when subjected to dynamic loading such as seismic or wave loading. The microbially induced calcite precipitation (MICP) treatment is a relatively new method to improve the liquefaction resistance of calcareous sand. In this study, several shake table tests are conducted to evaluate the seismic performance of MICP-treated calcareous sandy foundations. The influence of seismic history on dynamic performance of calcareous sand foundation is analyzed. The results indicate that the dynamic response of the soil after MICP treatment, including the excess pore water pressures and vertical settlements, can be divided into three main stages: the stable stage, rapid development stage, and gentle stage. The liquefaction resistance of MICP-treated sand is improved significantly. However, the surface accelerations for the MICP-treated models are amplified. Thus, when designing the treatment program, it is necessary to consider the tradeoff between the improved liquefaction resistance and the minimized undesirable amplified ground surface motions. The liquefaction resistance of MICP cementitious calcareous sand is related to intergranular cementation strength and relative density of soil and particle arrangement. The history of vibration improves the relative density of the foundation, and the liquefaction resistance significantly reduces the surface settlement.

Key words: microbially induced calcite precipitation; calcareous sandy foundation; liquefaction resistance; dynamic response; history of vibration; shake table test

0 引 言

钙质砂是一种以碳酸盐为主要成分的特殊岩土材料, 其广泛分布在南海、红海、澳大利亚和墨西哥湾

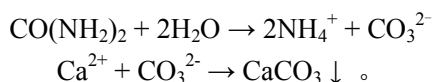
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41831282); 国家自然科学基金项目(51679072, 51879090); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2018B43214); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX19_0132); 中央高校基本科研业务费项目(2019B75414)

收稿日期: 2019-08-16

***通信作者** (E-mail: ymch@hhu.edu.cn)

沿岸^[1]。饱和钙质砂地基在地震、波浪等动力荷载作用下会发生液化^[2-3]。1993 年关岛地震发现了大量的钙质砂液化现象,对建筑和港口造成了严重破坏^[4-5]。因此,有必要对钙质砂地基进行抗液化加固处理。传统的地基抗液化措施,如挤密法、排水法、注浆搅和、深层搅拌等,并不适用于大面积分布的钙质砂地基的抗液化加固^[1]。例如,注浆技术及水泥深层搅拌技术往往会带来环境问题,导致海洋环境受到污染,因此日本等一些国家已采取措施禁止使用除水玻璃外的一切化学剂来灌浆^[6-7]。

微生物诱导方解石沉淀 (microbially induced calcite precipitation, 以下简称 MICP) 是一种利用微生物代谢过程来加固土体的最新技术^[8]。通过向待加固土体中注入尿素水解细菌,产生碳酸根离子并与提供的钙源反应,最后在土颗粒间生成碳酸钙胶结结构^[9]。控制 MICP 过程的化学反应可以描述为^[10-11]



由于机理简单、快速高效、环境友好性及可控制性等优点, MICP 方法受到越来越多学者的关注,并在解决各种工程问题中得到一定的应用^[12]。例如, MICP 被用来降低土壤渗透性、处理受污染土以及提高土体强度等^[13-16]。近年来, MICP 被证明可以有效地降低饱和石英砂的液化势。与硅酸盐水泥灌浆相比, MICP 改善可液化场地的抗液化性能所需时间较短^[17]。Montoya 等^[18]基于离心机试验研究了 MICP 处理砂土地基的动力响应特性,发现在地震荷载作用下, MICP 降低了松散砂土的液化势。Han 等^[17]通过动三轴试验研究了经 MICP 处理的砂样的动力特性,发现 MICP 注浆可改善液化砂土的抗液化特性。程晓辉等^[19]对 MICP 加固的粉细砂进行动三轴及小型振动台试验,发现微生物灌浆加固能显著提高砂柱和模型地基的抗液化性能。

目前,国内外的研究主要针对的是硅砂或石英砂。然而,与普通陆源砂相比,海洋生物形成的钙质砂具有颗粒形状不规则、多棱角、多孔隙等特性^[20],这些特殊性质决定了钙质砂与普通砂的力学特性具有较大差异。因此, MICP 技术在钙质砂地基中的应用还需要进一步的研究。方祥位等^[21]对 MICP 处理后的珊瑚砂进行了渗透、强度及微观结构等试验,研究发现加固后的珊瑚砂渗透性降低了 1~2 个数量级, UCS 强度可达到 14 MPa 左右;彭劼等^[22]开展了海洋环境下 MICP 加固珊瑚砂砂柱试验,研究了海水环境对微生物诱导碳酸钙沉积的加固效果的影响,试验表明海水环境会抑制 MICP 的加固效果。但是, MICP 胶结钙

质砂抗液化特性这方面研究不多见。

本文开展了 MICP 灌浆加固南海钙质砂地基的振动台试验,通过采集激励过程的动孔压、加速度、地表沉降等动参量,研究了 MICP 加固钙质砂地基的动力特性及抗液化性能,并分析了振动历史对钙质砂地基动力特性的影响,为 MICP 处理可液化钙质砂地基提供试验基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验土样及地基模型制备

试验所用钙质砂取自南海某岛礁。图 1 为其颗粒的电镜扫描图,不同于陆源砂,钙质砂颗粒具有表面多孔隙,形状多样,棱角度大等特性,这些颗粒特征导致钙质砂与石英砂等陆源砂的力学特性具有明显的差异性。试验所用钙质砂的颗粒级配如图 2 所示,模型地基钙质砂层不均匀系数 $C_u = 3.55$, 曲率系数 $C_c = 0.97$, 特征粒径 $d_{50} = 0.33 \text{ mm}$; 钙质砂颗粒密度 $G_s = 2.73 \text{ g/cm}^3$; 最大孔隙比 $e_{\max} = 1.44$, 最小孔隙比 $e_{\min} = 1.02$ 。

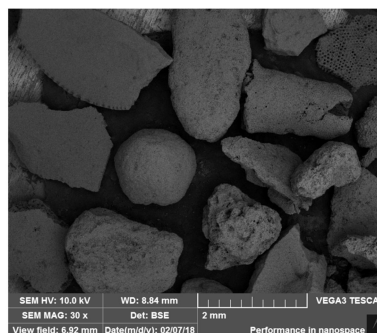


图 1 钙质砂电镜扫描

Fig. 1 Scanning electron microscope (SEM) images (in different close-up views) of calcareous sand

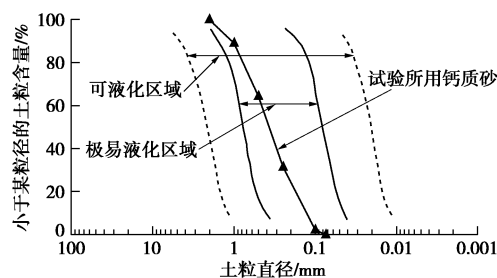


图 2 试验所用钙质砂级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of calcareous sand

模型地基采用上覆黏土层、底部饱和砂土层的水平分层结构,模型土层分布如图 3 所示。采用水沉法制备饱和钙质砂土层,制样时确保砂土层饱和、分布均匀,上覆黏土层密实、平坦。地基模型制作完成后,通过室内试验测出饱和钙质砂层的相对密实度。

表 1 试验工况
Table 1 Loading conditions

工况	加固时间/h	菌液		胶结液		$D_r/\%$	加速度峰值/g
		OD ₆₀₀	活性/(mUrea·min ⁻¹)	浓度/(mol·L ⁻¹)	用量/L		
UN-1	—	—	—	—	—	41.3	0.15, 0.20
UN-2	—	—	—	—	—	43.1	0.30
MICP-1	27	0.8	3.996	1.0	50	40.1	0.15, 0.20
MICP-2	54	0.7	3.794	0.5	100	39.8	0.15, 0.20
MICP-3		0.7	3.524	0.5	100	42.3	0.30

1.2 传感器的布置

试验采用南京工业大学土木工程与防灾减灾重点试验室的振动台系统, 该振动台系统可在水平方向以及竖直方向振动, 其最大振动频率为 50 Hz、最大加速度为 2g。试验采用的模型土箱为自行研制的叠层剪切型土箱, 该土箱内尺寸为 700 mm (长)×460 mm (宽)×650 mm (高)。剪切型土箱可以为土体提供较为理想的剪切变形条件, 能够较好地消除边界效应。

本试验利用的传感器主要有孔压计、加速度计及激光位移计。针对以往学者开展的 MICP 处理液化砂土的振动台试验结果, 加固后土体的超孔隙水压力反应较小, 故选用最大量程为 10 kPa 的孔压计, 其直径为 5 mm, 采用水压法进行标定。加速度计采用防水型加速度计, 按照地基土的质量密度对加速度计进行配重, 尽量减少加速度传感器与地基土之间的相互影响。激光位移计布置在模型表面中心位置, 用来监测振动过程中地基模型的地表沉降。试验传感器布置见图 3。

1.3 微生物培养

试验选用巴氏生孢八叠球菌株 (sporosarcina pasteurii), 培养基主要成分及含量: Yeast extract 20 g/L, NH₄Cl 10 g/L, MnCl₂·H₂O 12 mg/L, NiCl₂·6 H₂O 24 mg/L, 溶剂为蒸馏水, 采用标准 NaOH 溶液将培养基 pH 值调为 9.0。配制好的培养基经 121℃ 高温蒸汽灭菌 20 min 后, 放入超净工作台冷却待用。试验使用菌量为 10L, 故采用工业发酵罐对菌种进行扩大培养 (30℃, 培养 24~32 h), 菌种接种比例为 1:10。试验所用菌液浓度及活性见表 1。

1.4 MICP 胶结试验

如图 3 所示, 模型地基中预埋了 6 根橡胶软管, 软管连接蠕动泵用来注入菌液以及循环胶结液。本试验采用的橡胶软管直径为 1 cm, 杨氏模量为 8 MPa, 尽可能的减小管子对地基动力反应的影响。为更好地加固模型地基, 管体通长设置了直径为 5 mm 的圆孔, 圆孔沿管身布置间距为 5 cm。圆管管身包裹一层土工布, 防止砂颗粒进入管内引起注浆管堵塞。如图 3 所示, 将注浆管和出浆管间隔布置, 使胶结液能够在加固区均匀分布, 提高 MICP 加固的均匀性。

地基模型制备完成后, 在自重作用下静置 24 h, 使砂样充分固结。通过蠕动泵以 10 mL/min 的速度往模型中注入菌液与低浓度氯化钙溶液 (0.05 M) 的混合液, 菌液总用量为 10 L。注完菌液后, 试样静置 6 h, 使细菌自然扩散, 并充分吸附在钙质砂颗粒表面。饱和钙质砂地基的抗液化加固一般不需要进行高强度的 MICP 灌浆, 故本文采用蠕动泵低压泵入胶结液 (0.5 mol/L 或 1 mol/L 等浓度尿素、氯化钙混合溶液), 注浆管单管注入速度为 15 mL/min。出浆管单管流速为 13 mL/min, 略低于注浆管流速, 确保胶结液与菌液充分反应。通过蠕动泵循环灌浆达到设计加固时长后, 开展 MICP 加固钙质砂地基抗液化振动台试验。

1.5 试验工况

试验选择的激振荷载为正弦波, 频率为 2 Hz、峰值加速度 0.15g (0.2g)、历时 30 s。试验设计了 2 个未加固对比组以及 3 个 MICP 加固组, 加固组主要考虑不同的加固时长。除工况 UN-2、MICP-3 外, 所有模型地基均采用两次正弦波加载: 第一次采用正弦波加速度峰值为 0.15g; 振动结束后等待 6 h, 待超孔隙

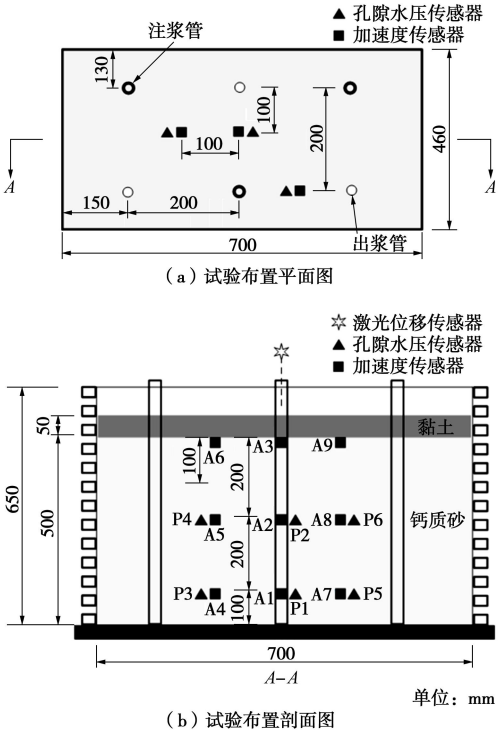


图 3 传感器布置图

Fig. 3 Distribution of sensors

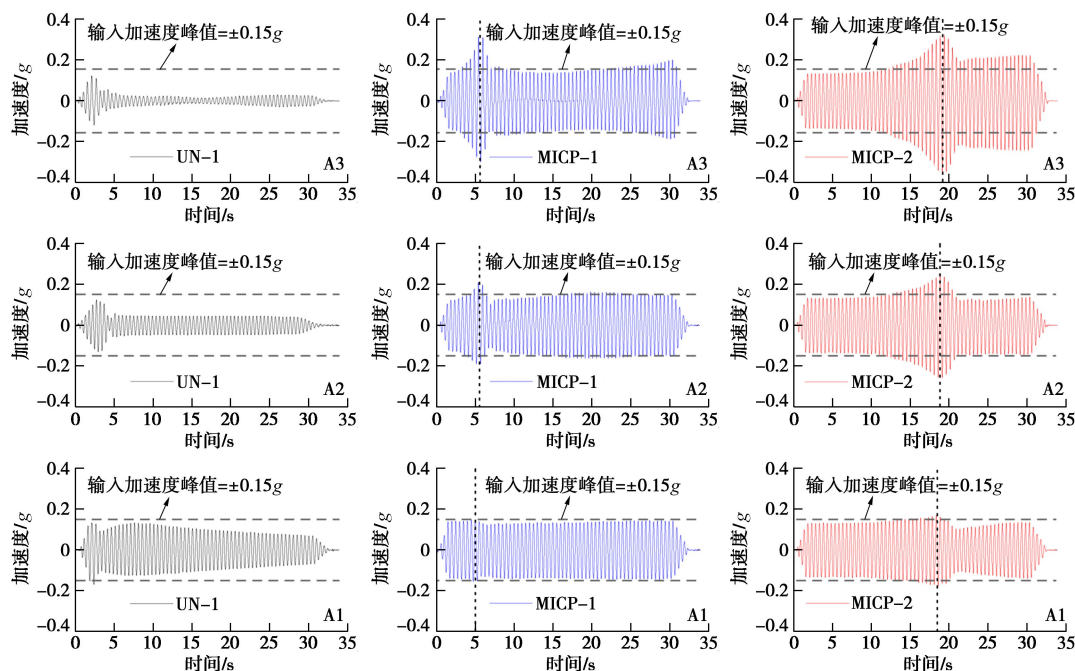


图4 地基若干点加速度时程(第一次加载, 0.15g)

Fig. 4 Acceleration responses of model foundation (first loading, 0.15g)

加速度峰值为 $0.15g$; 振动结束后等待 6 h , 待超孔隙水压力消散后, 进行第二次加载, 加载峰值为 $0.2g$ 。为了对比不同动荷载强度条件下, MICP 处理后钙质砂地基的动力特性, 试验还设计了工况 MICP-5 (加固 54 h , 动荷载峰值 $0.3g$)。由于试验采集故障, MICP-5 未能采集到加速度与地表沉降数据, 故本文只给出该工况动孔压反应时程。具体试验工况如表 1 所示。

2 微生物加固钙质砂地基动力反应特性

MICP 处理后, 钙质砂颗粒间产生“碳酸盐联结”, 地基土的结构性增强。加固效果越好, 土体结构性越明显, 其动力反应特性与未加固工况(散粒结构)动力特性的差异也就越大。本文主要通过地基加速度响应特征、超孔隙水压力发展、地表沉降等方面对 MICP 加固钙质砂地基抗液化性能进行分析。

2.1 地基加速度响应特征

图 4 为各工况振动过程中地基土加速度响应。振动开始后 $4\sim 5\text{ s}$, 未加固地基发生液化现象, 由于液化砂土层的“滤波减震”作用, 地基不同深度处的加速度都存在衰减现象, 且越靠近地表(A3)衰减越明显, 呈现出典型的液化土加速度响应特征。经 MICP 加固后, 地基不同深度处的加速度均出现不同程度的放大效应, 且越靠近地表放大现象越明显。对比工况 MICP-1、MICP-2 可以发现, 加固效果越明显, 加速度峰值对应的振动时间越长(MICP-1 约为振后 5 s ,

MICP-2 约为 17 s), 而且越靠近模型顶部, 出现加速度峰值所需振动时间越长, 这符合剪切波的传播规律。

图 5 为模型地基各深度加速度放大系数分布图。未加固工况 UN-1 模型地基同一深度不同位置处的加速度放大系数差距很小, 这从侧面表明了试验制样的均匀性以及模型箱的边界效应对地基动力反应的影响较小。UN-1 各深度处的加速度放大系数均小于 1, 且越靠近模型表面放大系数越小。加固工况 MICP-1、MICP-2 加速度放大系数沿模型深度的分布规律与未加固工况 UN-1 相反, 各位置处的放大系数均大于 1, 且沿深度方向逐渐较小。同一深度, MICP 模型地基不同位置处的加速度放大系数差异较大, 这主要是微生物加固的不均匀性导致的。

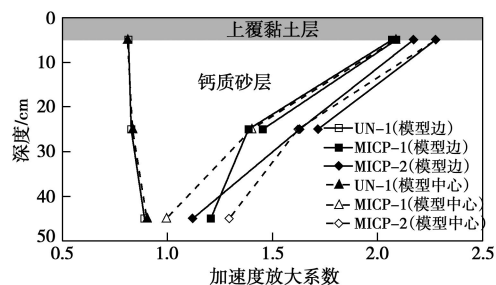


图5 地基加速度放大系数

Fig. 5 Acceleration amplification coefficients with model depth

2.2 地基超孔隙水压力发展特征

图 6 为第一次加载各工况超孔压时程。由图可知, 未加固工况与 MICP 加固工况的孔压发展规律差异明显。振动开始后, 未加固工况 UN-1 在很短时间即达到液化或接近液化。但是地基模型底部(深度 45 cm

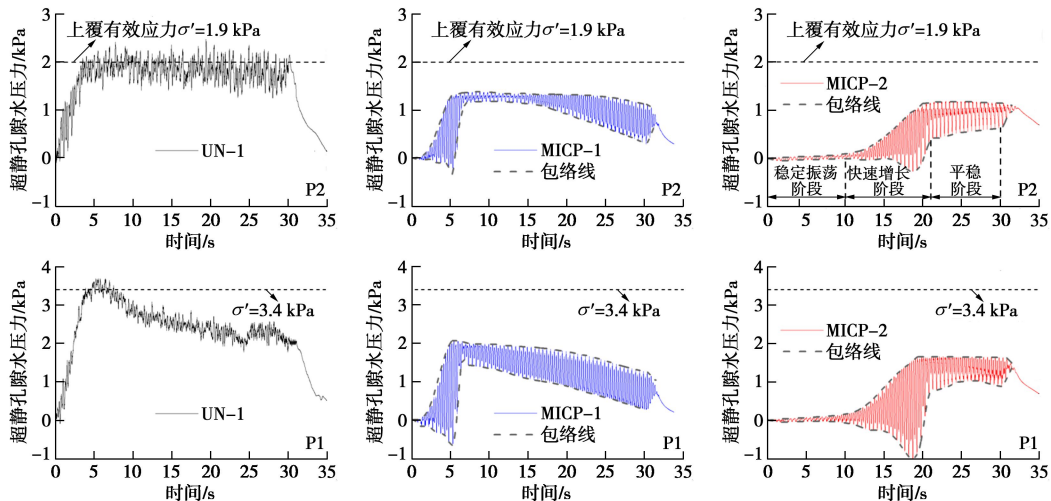


图6 地基若干测点处的超孔压时程(第一次加载, 0.15g)

Fig. 6 Time histories of dynamic pore pressure (first loading, 0.15g)

处)的超孔压达到 3.4 kPa (上覆有效应力)后很快就出现消散现象, 且随激振而持续消散; 反观上部土体 (深度 25 cm 处), 超孔压达到峰值后仍维持一段时间, 这与模型内部孔隙水向上排水路径有关。区别于未加固工况, MICP 加固后地基土超孔压积累与上升速度相对缓慢, 且最终超孔压比达不到 1.0。事实上, 在其它影响因素不变时, 未加固饱和钙质砂地基的抗液化强度主要与土体密实度及颗粒排列有关。然而, 不同于未加固工况, MICP 胶结钙质砂的抗液化强度不仅仅与土体密实度及颗粒排列规律有关, 还与颗粒胶结强度相关。

此外, 工况 MICP-2 的超孔压发展大致可分为 3 个阶段: ①稳定振荡阶段 (0~10 s), 此阶段内土体颗粒间的胶结结构相对稳定, 模型地基整体振动不发生剪切变形。因此, 该阶段内地基土不产生明显的体应变, 超孔压也基本不发展。②快速增长阶段 (10~20 s), 随着持续激振, 此阶段内土体胶结结构逐渐发生破坏, 地基超孔压快速积累。在循环荷载作用下, 这一阶段土体超孔压与密砂的孔压反应十分相似, 表现出剪胀、剪缩交替出现现象。相对于其他阶段, 此阶段的超孔压振动幅度较大并出现瞬时的负孔压, 这可能是由于局部胶结结构发生脆性破坏导致的。③平稳阶段 (20~30 s), 这个阶段地基各位置处超孔压变得平稳, 孔压比大概保持在 0.5~0.6。值得注意的是, 地基土加速度峰值出现的时间与超孔隙水压力达到最大值的时间是对应的, 这表明加速度出现峰值的主要原因是孔隙水压力上升, 土体结构发生脆性破坏导致的。

对比工况 MICP-1 与 MICP-2 可知, 虽然加固时间越长, 土体超孔压的积累速度越慢, 但最终达到最大超孔压数值差距并不明显, 两个工况均未发生液化现象。因此, 在采用 MICP 处理可液化钙质砂地基时, 可根据实际工程需求选择合理的加固时间。

图 7 为工况 UN-2、MICP-3 钙质砂地基超孔压发展时程, 这两个工况的基底输入加速度幅值为 0.3g。由图 7 可知, 与加速度峰值为 0.15g 的工况 (UN-1、MICP-1) 相比, 0.3g 加速度峰值工况的超孔压积累较快。振动开始后 1~2 s, 未加固工况 UN-2 孔压比即达到 1.0。因地表黏土层开裂, UN-2 工况孔压达到峰值后不能维持, 消散速度较快。

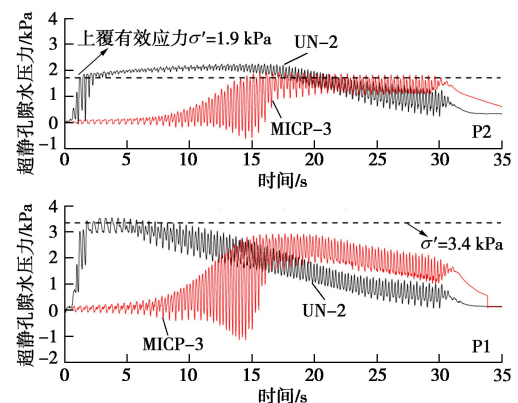


图7 地基若干测点处的超孔压时程(第一次加载, 0.3g)

Fig. 7 Time histories of dynamic pore pressure (first loading, 0.3g)

MICP-3 工况的动孔压累积特性与 MICP-2 相似, 可分为稳定振荡阶段、快速增长阶段及平稳阶段 3 个阶段。因基底动荷载峰值较大, MICP-3 工况稳定振荡阶段持续时间 (约为 5 s) 相对于 MICP-2 (约为 10 s) 较短, 说明微生物加固后的钙质砂地基的动力特性不仅与加固程度有关, 还与动荷载强度有关。在振动 15 s 后, MICP-3 模型上部 P2 处的超孔压值达到峰值 1.9 kPa (上覆有效应力), 而底部 P1 测点的超孔压未能上升到上覆有效应力 3.4 kPa, 且在达到峰值后持续消散。由此可见, 经 MICP 加固后的钙质砂地基抗液化强度得到较大提高; 同时, 在采用 MICP 处理饱和钙质砂地基时, 应提高浅层土体的加固强度, 防止较

强地震时发生液化现象。

为更清晰的分析加固地基超孔压发展规律,图 8 对各工况超孔压发展阶段时长进行了汇总。由图 8 可知:稳定振荡阶段只出现于各加固工况,未加固工况不存在稳定振荡阶段;相同条件下,加固工况的快速增长阶段持续时间要大于未加固工况。稳定振荡阶段及快速增长阶段的持续时间与土体加固程度和动荷载强度有关。MICP-2 稳定振荡阶段及快速增长阶段分别维持了 10, 11 s, 而对应加固时间较短的 MICP-1, 稳定振荡阶段及快速增长阶段只持续了 2, 5 s, 这说明加固强度及均匀性越好, 稳定振荡阶段及快速增长阶段维持得越久, 地基抵抗振动液化能力越强; MICP-3 的稳定振荡阶段时长只有 MICP-2 的 60% 左右, 表明振动荷载强度越强, 稳定振荡阶段持续时间越短, 这与动荷载能量积累有关。

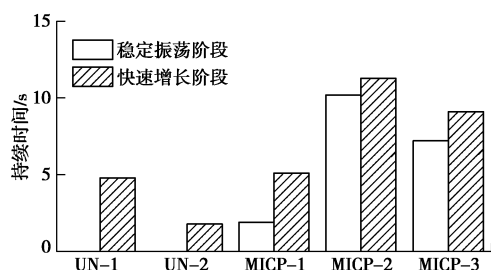


图 8 各工况各阶段时长

Fig. 8 Duration of each stage in cases

2.3 模型地表沉降

因 MICP-3 的数据采集异常, 这里给出 UN-1、MICP-1 及 MICP-2 中模型地表沉降时程, 如图 9 所示。经 MICP 处理后的模型地基沉降量明显减小, UN-1 地表沉降约为 19.2 mm, MICP-1 地表沉降为 10.5 mm, 而 MICP-2 地表沉降只有 6.6 mm, 相对于未加固工况减小了近 63%。对比不同工况的地表沉降, MICP 处理地基 (MICP-1 及 MICP-2) 沉降发展规律与未加固工况 (UN-1) 存在明显区别。与孔压发展规律一致, 处理后的 MICP-2 地表沉降也可分为 3 个阶段: ①稳定振荡阶段 (0~10 s), 此阶段内, 土颗粒间的胶结未发生破坏, 土样模型处于弹性阶段, 地表不发生沉降; ②快速增长阶段 (10~20 s), 随着持续加载, 胶结结构开始破坏, 地表开始沉降, 且沉降速率逐渐增大; ③平稳阶段 (20~30 s), 此阶段内地表沉降逐渐稳定。各个阶段时长与加固程度 (加固强度及加固均匀性) 有关。

3 振动历史对微生物加固钙质砂地基动力特性的影响

待第一次加载产生的超孔隙水压力完全消散后,

进行第二次加载, 研究振动历史对微生物处理饱和钙质砂地基抗液化性能的影响。

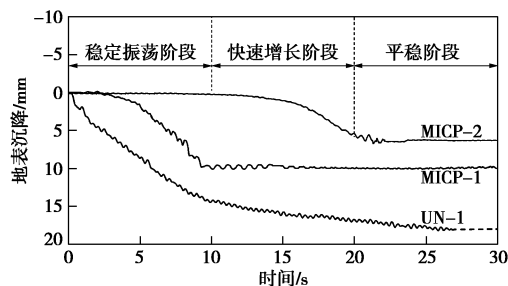


图 9 地表沉降曲线(第一次加载, 0.15g)

Fig. 9 Time histories of vertical settlement of soil during shaking (first loading, 0.15g)

3.1 地基加速度响应特征

图 10 为各工况第二次加载地基土加速度响应。工况 UN-1、MICP-1 模型地基各深度处的加速度均出现放大现象, 并且在整个振动过程中未出现明显的衰减现象, 表明土体未发生明显的软化或液化现象。经历第一次加载后, UN-1、MICP-1 的地基抗液化强度得到了提高, 主要原因是: ①未加固工况, 未加固工况在第一振动后发生地震液化现象, 待模型超孔隙水压力消散后, 地表产生了 1.9 cm 沉降, 钙质砂颗粒重新排列、咬合, 地基密实度提高 (从 41.3% 变为 60.1%), 因而未加固地基的抗液化强度得到很大提高; ② MICP-1 工况, 经 MICP 处理后, 模型地基的动力特性得到了改善, 因此第一次加载, 土体未发生明显的液化现象。但由于动荷载的持续作用, 钙质砂间的 MICP 胶结颗粒发生了软化及破坏, 待超孔压消散后, 地表产生了 1.2 cm 沉降, 地基密实度从 40.1% 提高为 50.3%, 地基土的密实度的提高使得地基的抗液化强度得到提高, 因此, 第二次加载 MICP-1 工况未发生液化。

第二次振动, MICP-2 地基各深度加速度峰值均大于基底输入加速度峰值。在振动开始 2 s 左右, 加速度发生衰减, 越靠近地表衰减越明显, 主要原因是由于土体胶结颗粒破碎, 地基结构软化, 孔压上升导致的。第二次加载 MICP-2 加速度发生衰减也从侧面表明: 第一次加载时 (0.15g), 虽然工况 MICP-2 地基超孔压有所发展, 但仍存在一些强度较高的胶结结构未完全发生破坏, 而这些胶结结构在第二次振动过程中 (0.2g) 强度发生了衰减。

3.2 地基超孔隙水压力发展特征

图 11 为第二次振动土体动孔压时程曲线。随着动荷载的循环作用, 工况 UN-1 及 MICP-1 的土样表现出剪胀、剪缩“交替”现象, 超孔压正、负交替出现, 振幅较大 (上、下振幅约为 2 kPa) 且无明显上升趋势, 表明第一次加载后, 土体密实度提高, UN-1 及 MICP-1

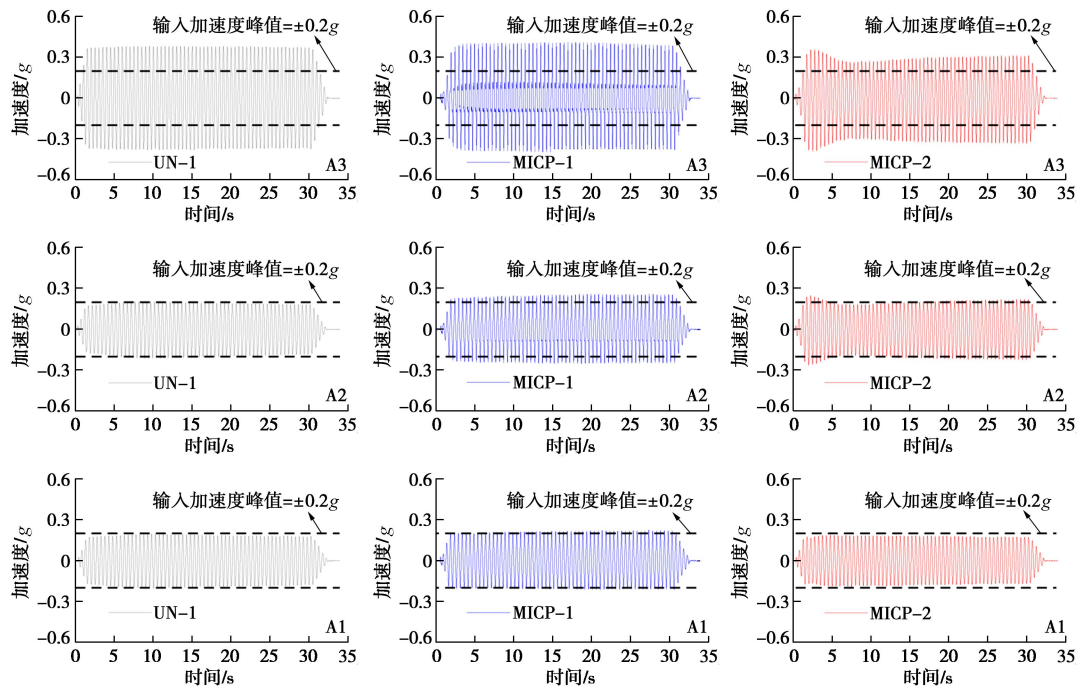


图 10 地基若干点加速度时程(第二次加载, 0.2g)

Fig. 10 Acceleration responses of model foundation (second loading, 0.2g)

地基土由松砂变为密砂。

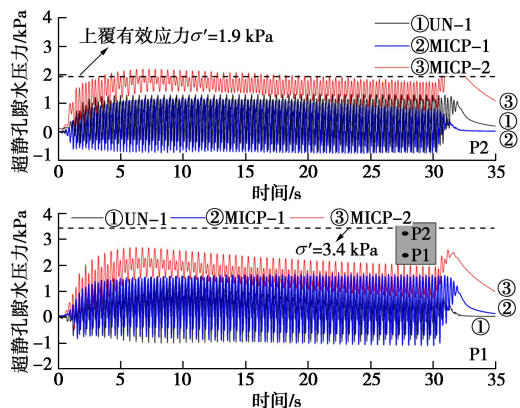


图 11 地基若干测点处的超孔压时程(第二次加载, 0.2g)

Fig. 11 Time histories of dynamic pore pressure (second loading, 0.2g)

振动历史对饱和钙质砂地基的抗液化性能影响较大。激振约 6 s 后, 工况 MICP-2 模型地基上部 P2 测点的超孔压达到峰值, 发生液化; 而底部 P1 超孔压只上升至 2.5 kPa 左右, 未发生液化。第一次振动中表现出较高抗液化强度的工况 MICP-2 (加固强度较高), 在第二次振动时其抗液化能力却要低于未加固工况 UN-1 及 MICP-1。主要原因是 MICP 胶结钙质砂的抗液化强度不仅仅与颗粒胶结强度相关, 还与土体密实度及颗粒排列规律有关。经过第一次振动后, 虽然 MICP-2 颗粒间的胶结强度要高于 MICP-1 及 UN-1, 但其密实度却远远小于其它两个工况, 因而其抗液化强度也相对较低。

综上所述, 针对微生物灌浆加固钙质砂地基工程, 应根据当地的抗震设防烈度来设计合适的 MICP 加固强度, 在地震发生后需对钙质砂地基 (尤其是靠近地表的土体) 进一步加固, 以防止胶结强度损失导致地基在下次地震中发生液化。

3.3 模型地表沉降

图 12 为第二次振动各工况的地基地表沉降曲线。工况 MICP-2 的地表沉降值为 6.6 mm, 大于其余两个工况。工况 UN-1 及 MICP-1 的地表沉降分别为 4.3, 5.2 mm, 约为第一次加载地表产生沉降的 22%, 50%。可以看出, 各工况第二次加载过程中产生的地表沉降要小于第一次加载, 这表明振动历史能够有效的改善地基沉降。第二次振动时, 虽然 MICP-2 地基 P2 测点处发生了液化, 但由于振动历史的作用, 模型地表产生的沉降要远小于 UN-1、MICP-1 工况第一次振动产生的沉降。

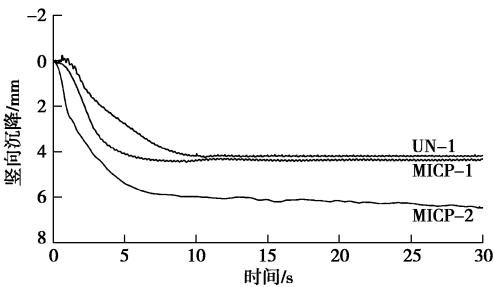


图 12 地基表面竖向位移时程曲线 (第二次振动, 0.2g)

Fig. 12 Time histories of vertical settlement of ground surface (second loading, 0.2g)

表 2 为部分工况地表沉降汇总表。两次振动后, MICP-1、MICP-2 两组模型地基表面累积沉降分别为 15.7、13.2 mm, 远小于未加固工况 23.5 mm, 说明 MICP 加固可有效降低地表沉降。

表 2 第一、第二次振动地表沉降

Table 2 Ground subsidences during shaking

工况	地表沉降/mm		
	第一次加载	第二次加载	累计
未加固 UN-1	19.2	4.3	23.5
MICP-1	10.5	5.2	15.7
MICP-2	6.6	6.6	13.2

3.4 振前、后地基模型密实度

图 13 为通过地表沉降数据换算得到的振前、后模型地基的密实度。振前各组地基土密实度基本一致, 均为 40% 左右。第一次加载后地基密实度显著提高, 未加固工况 UN-1 密实度提高了 46%, MICP-1 提高了 26%, 而加固效果最好的 MICP-2 的土体密实度只提高了 18%。可见第一次振后地基土密实度增加幅度与土体胶结强度有关, 胶结结构越稳定, 振动过程中产生的破坏就越小, 相应振后沉降值也越小, 土体密实度变化越不明显。第二次加载, 各工况模型地基土密实度提高幅度明显要低于第一次加载, UN-1、MICP-1 及 MICP-2 土体密实度分别提高了 7%, 10% 及 12%。振动历史会导致砂颗粒重新排列、地基密实度提高, 从而改善未加固场地的抗液化性能。

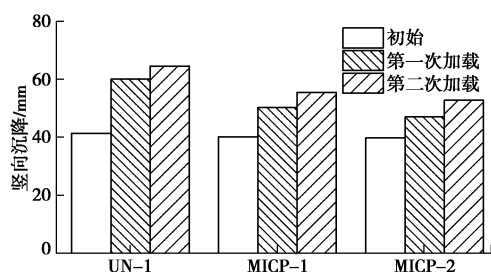


图 13 振动前、后模型地基密实度

Fig. 13 Relative densities of model foundation before and after shaking

4 结 论

基于振动台模型试验研究了微生物加固钙质砂地基动力反应特性, 分析和比较了不同加固时间下地基加速度响应特征、超孔压发展特征以及模型地表沉降规律, 探讨了振动历史对钙质砂地基动力反应特征及抗液化性能的影响, 得到以下 3 点结论。

(1) MICP 灌浆加固技术能够有效提高饱和钙质砂地基的抗液化性能, 经 MICP 处理后的钙质砂地基动孔压与地表沉降均有所降低; 处理后地基不同深度处的加速度均出现不同程度的放大效应, 越靠近地表

放大现象越明显, 有必要考虑提高液化阻力和尽量减少不必要的地表放大运动之间的权衡; 加固土样同一深度不同位置处的加速度放大系数差异较大, 表明微生物灌浆加固存在一定的不均匀性; 此外, 在采用 MICP 处理饱和钙质砂地基时, 应提高浅层土体的加固强度, 防止较强地震时发生液化现象。

(2) MICP 胶结钙质砂动孔压以及地表沉降发展可分为 3 个阶段: 稳定振荡阶段、快速增长阶段及平稳阶段, 各个阶段持续时长与加固程度 (加固强度及加固均匀性) 及动荷载强度有关; 在快速增长阶段内, 加固地基超孔压反应特征与密砂的孔压反应十分相似, 此阶段的超孔压振动幅度较大并出现瞬时的负孔压, 这是由于局部胶结结构发生脆性破坏导致的。

(3) 振动历史能够有效的改善地基沉降, 各工况第二次加载过程中产生的地表沉降均要小于第一次加载; 振动历史导致砂颗粒重新排列以及地基密实度提高, 从而提高了未加固场地的抗液化性能; 针对微生物灌浆加固钙质砂地基工程, 在地震发生后需对钙质砂地基 (尤其是靠近地表的土体) 进一步加固, 以防止胶结强度损失导致地基在下次地震中发生液化。

参考文献:

- [1] XIAO P, LIU H, XIAO Y, et al. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2018, **107**(1): 9 - 19.
- [2] ZHOU X Z, CHEN Y M, LI W W, et al. Monotonic and cyclic behaviors of loose anisotropically consolidated calcareous sand in torsional shear tests[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, **37**(4): 438 - 451.
- [3] VELEZ M, CRISTINA A. Evaluation of field based liquefaction approaches for calcareous sands using shear wave velocity[D]. Rhode Island: University of Rhode Island, 2014.
- [4] MORIOKA B T, NICHOLSON P G. Evaluation of the liquefaction potential of calcareous sand[C]// The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2000, Washington: 494 - 450.
- [5] SHAHNAZARI H, JAFARIAN Y, TUTUNCHIAN M A, et al. Probabilistic assessment of liquefaction occurrence in calcareous fill materials of Kawaihae Harbor, Hawaii[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, **16**(6): 05016001.
- [6] MONTOYA B M, DEJONG J T, BOULANGER R W, et al. Liquefaction mitigation using microbial induced calcite precipitation[J]. Proceedings of GeoCongress, 2012: 1918 -

- 1927.
- [7] WOODWARD J. An Introduction to Geotechnical Processes[M]. London and New York: Spon Press, 2005.
- [8] 何稼, 楚剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 643 - 653. (HE Jia, CHU Jian, LIU Han-long, et al. Research advances in biogeotechnologies[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 643 - 653. (in Chinese))
- [9] 韩智光, 程晓辉. 可液化砂土微生物处置试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, **48**(12): 103 - 107. (HAN Zhi-guang, CHENG Xiao-hui. An experimental study of microorganism's treatment on liquefiable sands[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, **48**(12): 103 - 107. (in Chinese))
- [10] 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 Cun-xiang, WANG An-hui, WANG Xin. Advances of soil improvement with bio-grouting[J]. Rock & Soil Mechanics, 2015, **36**(6): 1537 - 1548. (in Chinese))
- [11] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(11): 1381 - 1392.
- [12] 李明东, LIN Li, 张振东, 等. 微生物矿化碳酸钙改良土体的进展, 展望与工程应用技术设计[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(10): 80 - 87. (LI Ming-dong, LIN Li, ZHANG Zhen-dong, et al. Review, outlook and application technology design on soil improvement by microbial induced calcium carbonate precipitation[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(10): 80 - 87. (in Chinese))
- [13] 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. (LIU Lu, SHEN Yang, LIU Han-long, et al. Application of bio-cement in erosion control of levees[J]. Rock and Soil mechanics, 2016, **37**(12): 3410 - 3416. (in Chinese))
- [14] 孙潇昊, 缪林昌, 童天志, 等. 微生物沉积碳酸钙固化砂土试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(11): 3225 - 3230. (SUN Xiao-hao, MIAO Lin-chang, TONG Tian-zhi, et al. Sand solidification test based on microbially-induced precipitation of calcium carbonate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(11): 3225 - 3230. (in Chinese))
- [15] 高炎旭. 微生物诱导碳酸盐沉淀 (MICP) 团聚化垃圾焚烧飞灰试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017. (GAO Yan-xu. Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP) Agglomeration of Fly Ash From Waste Incineration[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [16] 王茂林, 吴世军, 杨永强, 等. 微生物诱导碳酸盐沉淀及其在固定重金属领域的应用进展[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(2): 206 - 214. (WANG Mao-lin, WU Shi-jun, YANG Yong-qiang, et al. Microbial induced carbonate precipitation and its application for immobilization of heavy metals: a review[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(2): 206 - 214. (in Chinese))
- [17] HAN Z, CHENG X, MA Q. An experimental study on dynamic response for MICP strengthening liquefiable sands[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, **15**(4): 673 - 679.
- [18] MONTOYA B M, DEJONG J T, BOULANGER R W. Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation[J]. Géotechnique, 2013, **63**(4): 302 - 312.
- [19] 程晓辉, 麻强, 杨钻, 等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1486 - 1495. (CHENG Xiao-hui, MA Qiang, YANG Zhuan, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1486 - 1495. (in Chinese))
- [20] 陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(9): 1389 - 1392. (CHEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(9): 1389 - 1392. (in Chinese))
- [21] 方祥位, 申春妮, 楚剑, 等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(10): 2773 - 2779. (FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, CHU Jian, et al. An experimental study of coral sand enhanced through microbially-induced precipitation of calcium carbonate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(10): 2773 - 2779. (in Chinese))
- [22] 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[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(6): 1048 - 1055. (PENG Jie, FENG Qing-peng, SUN Yi-cheng. Influences of temperatures on MICP-treated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(6): 1048 - 1055. (in Chinese))