

微生物加固珊瑚砂动剪切模量与阻尼比特性研究

刘璐^{1,2}, 李帅学^{1,2}, 张鑫磊^{1,2}, 高洪梅^{1,2}, 王志华^{1,2}, 肖杨³

(1. 南京工业大学 城市地下空间研究中心, 江苏 南京 211816;
2. 江苏省交通基础设施安全保障技术工程研究中心, 江苏 南京 211816;
3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 微生物诱导碳酸钙沉淀 (microbially induced calcite precipitation, 简称 MICP) 技术能够有效改善珊瑚砂的力学性能。为研究微生物加固珊瑚砂的小应变动力特性, 对不同加固次数 N_b 和有效围压 σ'_0 的微生物加固珊瑚砂试样开展共振柱试验, 对比分析其动剪切模量 G 和阻尼比 λ 的发展规律。试验结果表明: 在小应变范围内, 微生物加固珊瑚砂的动剪切模量 G 随 N_b 和 σ'_0 增加而显著增长; 最大动剪切模量 G_{max} 随 N_b 和 σ'_0 的增加分别表现出线性和幂律形式的增长趋势, 且 G_{max} 和无侧限抗压强度 q_{ucs} 存在显著的幂律相关性; 随着 N_b 增加, 微生物加固珊瑚砂的参考剪应变 γ_0 逐渐减小, 动剪切模量比衰减曲线 (即 $G/G_{max}-\gamma_0$ 曲线, γ_0 为剪应变) 向下方移动, 非线性特征愈发显著; 同时, 微生物加固珊瑚砂的最小阻尼比和最大阻尼比均有所增长, 阻尼比曲线 (即 $\lambda-\gamma_0$ 曲线) 向上方移动, 滞后性特征显著增强; 然而, 有效围压的增长对 $G/G_{max}-\gamma_0$ 和 $\lambda-\gamma_0$ 曲线表现出相反影响趋势, 非线性和滞后性特征均逐渐减弱; 给出了用于描述微生物加固珊瑚砂动剪切模量和阻尼比非线性特征的经验公式及相关参数。扫描电子显微镜试验 (scanning electron microscope, 简称 SEM) 结果表明, 珊瑚砂经微生物加固后, 其刚度增强主要来源于碳酸钙沉淀的胶结、裹覆和填充作用。

关键词: 珊瑚砂; 微生物诱导碳酸钙沉淀; 共振柱试验; 动剪切模量; 阻尼比

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 11-3410-11

Experimental investigation on dynamic shear modulus and damping ratio of biocemented coral sand

LIU Lu^{1,2}, LI Shuai-xue^{1,2}, ZHANG Xin-lei^{1,2}, GAO Hong-mei^{1,2}, WANG Zhi-hua^{1,2}, XIAO Yang³

(1. Research Center of Urban Underground Space, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China;

2. Jiangsu Province Engineering Research Center of Transportation Infrastructure Security Technology, Nanjing, Jiangsu 211816, China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The microbially induced calcite precipitation (MICP) technique can effectively enhance the mechanical properties of coral sand. To investigate the small-strain dynamic characteristics of MICP-treated coral sand, resonant column tests were conducted on specimens with varying biocementation cycles N_b and effective confining pressures σ'_0 and the development laws of dynamic shear modulus G and damping ratio λ were comparatively analyzed. The test results reveal that: at small strains, the dynamic shear modulus G increases significantly with both N_b and σ'_0 . The maximum dynamic shear modulus G_{max} exhibits a linear correlation with N_b and a power-law correlation with σ'_0 . A significant power-law relationship exists between G_{max} and unconfined compressive strength (q_{ucs}). As N_b increases, the reference strain γ_0 decreases gradually while the $G/G_{max}-\gamma_0$ curves shift downward, indicating enhanced nonlinearity. Both minimum and maximum damping ratios increase, with the $\lambda-\gamma_0$ curve moving upward and characterized by greater energy dissipation. In contrast, increasing σ'_0 produces opposite trends in both $G/G_{max}-\gamma_0$ and $\lambda-\gamma_0$ curves, exhibiting reduced nonlinearity and energy dissipation. Empirical relationships are established to quantify the nonlinear dynamic behavior and energy dissipation characteristics of MICP-treated coral sand. Scanning electron microscope (SEM) observations reveal that stiffness improvement primarily results from three mechanisms: contact cementation between sand grains, grain coating by calcite precipitates, and matrix supporting through pore filling.

Keywords: coral sand; microbially induced calcite precipitation; resonant column tests; dynamic shear modulus; damping ratio

收稿日期: 2024-12-06

录用日期: 2025-01-22

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52008207, No. 52108324)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52008207, 52108324).

第一作者简介: 刘璐, 女, 1990年生, 博士, 副教授, 主要从事微生物岩土及土动力学方面的研究。E-mail: ownqqq@163.com

通讯作者: 王志华, 男, 1976年生, 博士, 教授, 主要从事土力学与地震工程及城市地下空间工程新技术方面的研究。E-mail: wzhnjut@163.com

1 引 言

作为南海岛礁工程建设的主要岩土材料，珊瑚砂具有形状不规则、内孔隙丰富和易破碎等复杂特征^[1]，其力学特性与陆源砂相比存在明显差异。此外，南海海域地处环太平洋火山地震带，地震灾害时有发生报道^[2]。南海岛礁珊瑚砂地基在地震荷载作用下易发生液化失稳，对上覆建（构）筑物的稳定性造成较大威胁。基于上述内部因素和外在威胁，对南海岛礁珊瑚砂地基采取加固措施十分必要。

传统的物理夯实和化学注浆等地基加固方法在岛礁工程中应用存在诸多限制。综合考虑南海岛礁的生态平衡和可持续性发展需求，具有非扰动、相容性好和高胶结强度等特点的微生物诱导碳酸钙沉淀（microbially induced calcite precipitation，简称 MICP）技术为处理南海岛礁珊瑚砂地基问题提供了新思路^[3]。在 MICP 过程中，脲酶菌通过自身代谢活动促使尿素发生酶解，酶解产物与环境中的钙源相结合，形成以细菌为成核位点的碳酸钙沉淀，并沉积于土颗粒表面和接触位置形成胶结以固化岩土体，宏观表现为岩土材料的强度和刚度显著提升，渗透性明显降低^[4-5]。

循环荷载作用下，微生物加固方法被证明能够有效改善珊瑚砂的动力特性。刘汉龙等^[6]通过动三轴试验研究了微生物加固珊瑚砂的动力特性。结果表明，微生物加固珊瑚砂的动强度和抗液化能力随加固程度提高而显著增强。Xiao 等^[7]探究了相对密实度、循环应力比和加固程度对微生物加固珊瑚砂动力特性的影响。研究表明，珊瑚砂经微生物加固后，超静孔隙水压力的发展趋势减缓，失稳破坏模式由流动破坏转变为循环活动性，且不同应力水平下的动强度均显著提高。Zhang 等^[8]基于振动台试验的研究表明，微生物加固方法能够显著减少珊瑚砂地基的地表沉降，并增强其抗液化能力。上述研究主要聚焦于微生物加固珊瑚砂在大应变条件下的动力特性，但其小应变动力特性研究明显不足。

动剪切模量和阻尼比是表征珊瑚砂小应变动力特性的重要参数。现有研究表明，相对密实度、有效围压、颗粒形状、细粒含量等因素对珊瑚砂的动剪切模量和阻尼比特性具有显著影响^[9-11]。Liu 等^[9]研究表明，随着有效围压和相对密实度的增加，珊瑚砂的动剪切模量逐渐增加，但阻尼比逐渐减小；珊瑚砂动剪切模量对相对密实度变化的敏感性随有效围压的增加而逐渐降低。Giang 等^[10]探讨了颗粒形状对珊瑚砂剪切模量的影响。结果表明，珊瑚砂

的剪切模量随着颗粒的棱角愈发突出而明显增加。吴琪等^[11]研究发现，当细粒含量小于 30% 时，细粒含量的增加会削弱珊瑚砂的土骨架力链，强化其非线性及低耗能特性，但阻尼比在小应变范围内对细粒含量的敏感性不强。

上述研究促进了对珊瑚砂动剪切模量和阻尼比特性的认识，但在指导微生物加固珊瑚砂场地进行工程设计时可能出现较大误差。目前，针对微生物加固珊瑚砂动剪切模量和阻尼比特性的研究较少，微生物加固的影响机制尚不明晰。因此，为获取微生物加固珊瑚砂场地地震反应分析的关键参数，本研究利用美国 GCTS TSH-100 型共振柱测试系统对珊瑚砂和微生物加固珊瑚砂开展共振柱试验，研究加固次数和有效围压对其动剪切模量和阻尼比的影响。建立了最大动剪切模量 G_{\max} 与无侧限抗压强度 q_{ucs} 之间的经验关系。基于试验结果，描述了珊瑚砂和微生物加固珊瑚砂的非线性和滞后性特征。根据 Darendeli 模型和经验方程建立了 $G/G_{\max} - \gamma_d$ （ G 为动剪切模量， γ_d 为剪应变）和 $\lambda - \gamma_d$ （ λ 为阻尼比）曲线的经验关系，并给出了参数推荐值。

2 试验材料与方法

2.1 珊瑚砂

本次试验用珊瑚砂取自南海某岛礁，其颗粒级配曲线如图 1 所示。珊瑚砂试样的不均匀系数 C_u 为 2.27，曲率系数 C_c 为 1.13，平均粒径 d_{50} 为 0.32 mm。为减少颗粒破碎现象，珊瑚砂的最小孔隙比 e_{\min} 采用 ASTM D4254-16^[12] 建议的静压振动法测量。最大孔隙比 e_{\max} 采用漏斗法和量筒慢转法联合测定。经测算，珊瑚砂的主要物理性质如表 1 所示。根据《土的工程分类标准》（GB/T 50145-2007）^[13]，该珊瑚砂属级配不良的砂，土的分类代号为 SP。

2.2 菌液与反应液

试验选用巴氏芽孢八叠球菌（*Sporosarcina past*-

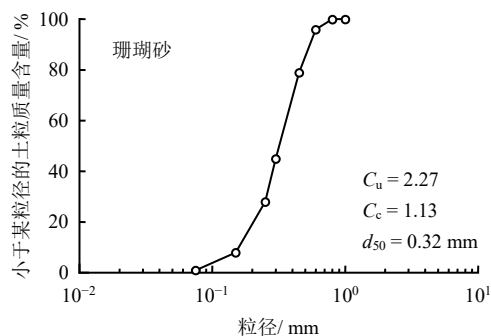


图 1 珊瑚砂颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution of coral sand

表 1 珊瑚砂物理性质指标
Table 1 Physical indexes of coral sand

颗粒相对 密度 G_s	最大孔隙比 e_{max}	最小孔隙比 e_{min}	平均粒径 d_{50} / mm	土类 代号
2.81	1.04	0.63	0.32	SP

eurii)。细菌培养所用培养基配方如下: 酵母提取物 20 g/L, NH_4Cl 10 g/L, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 10 mg/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 24 mg/L, 蒸馏水 1 L 和琼脂 15 g/L (固体培养基中添加)。

培养基调配完成后, 需用 1 mol/L 的 NaOH 溶液将液体培养基的 pH 值调整至 8.8~9.0。在接种前, 培养基须在高压灭菌锅中进行 20 min、121 °C 的高温灭菌处理, 于超净工作台冷却后通过平板划线法分离与纯化细菌, 并倒置于 30 °C 恒温箱内培养 48 h。挑取经分离纯化所得的单菌落进行液体接种, 并将液体培养基置于 30 °C 恒温振荡培养箱内以 200 r/min 的转速培养 24 h。将菌液以 10% 接种量进行扩大培养, 扩大培养后所得液体培养基置于 30 °C 恒温振荡箱内以 80 r/min 的转速培养 48 h。扩大培养后所得菌液在 4 °C 的离心机内以 4 000 r/min 离心 20 min, 并取离心瓶底部粉色沉淀稀释于质量分数为 0.9% 的氯化钠溶液中。

经测定, 本次微生物培养所得菌液脲酶活性为 0.047 mol/(m³/s), 吸光度 OD₆₀₀ 为 1.3。反应液由 1 mol/L 尿素和 1 mol/L 氯化钙溶液配置而成, 其物质的量比为 1:1。试验环境温度保持 25 °C 恒定, 且每次加固所用菌液和反应液均为同批次。

2.3 试样制备

本试验使用的制样装置如图 2 所示, 主要由菌液/反应液、蠕动泵、模具筒 (包括基座和对开模) 和废液等部分组成, 制得微生物加固试样的尺寸直径为 50 mm、高度为 100 mm。

试样的具体制备过程为: ①将珊瑚砂分 5 层装入模具筒内, 并通过控制装样高度确保每一层的初始相对密实度均为 50%。由于振捣压实上层试样的过程中会使下部土层进行压密, 为保证试样的均匀性和连续性, 每层的目标高度由下至上逐层递减, 每层土样压实后将土层表面刮毛再装入上层土样。②通过蠕动泵将 110 mL 菌液以 3 min/L 的速率注入试样, 浸泡 6 h 以保证细菌吸附于珊瑚砂颗粒表面, 完成后打开底部排水通道并利用重力作用排出菌液。③通过蠕动泵将 110 mL 反应液以 3 min/L 的速率注入试样, 静置 12 h 以充分反应后排出废液, 至此实现 1 轮加固循环。④采用正反向交替灌注的方式进行多轮加固循环保证加固试样的均匀性。⑤加

固完成后从试样顶部泵送 1 L 清水以去除掉残余在试样中的反应液。

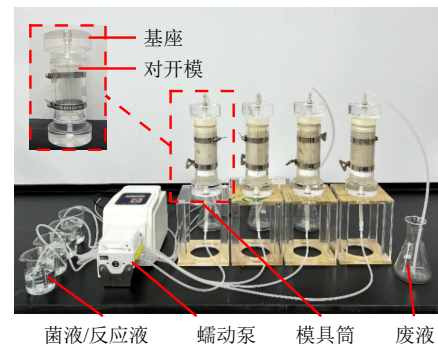


图 2 微生物加固装置
Fig.2 Biocementation procedure

2.4 试验方法

共振柱试验采用美国 GCTS 公司的 TSH-100 型“固定-自由”型高精度测试系统, 能够在试验过程中获取稳定、可靠、准确的试验结果。

微生物加固珊瑚砂试样制备完成后进行饱和: 先通入 20 min CO₂ 置换试样孔隙中的空气; 然后通入无气水进行 1 h 的水头饱和; 最后分级反压饱和至 400 kPa, 并同步进行饱和度检测。当孔隙压力系数 $B > 0.97$ 时, 可认为试样完全饱和。饱和完成后对微生物加固珊瑚砂试样进行均等固结, 固结围压分别为 25、50、100 kPa, 固结时间不少于 180 min, 共振柱试验的具体试验方案如表 2 所示。

无侧限抗压强度试验使用的仪器为上海新三思公司的双柱桌面式电子万能试验机, 采用与共振柱试验条件相同的同一批次试样。试验采用位移控制方式, 其剪切速率设定为 0.5 mm/min。

表 2 共振柱试验工况
Table 2 Resonant column test conditions

No.	N_b /次	加固程度	e_b	e_c	σ'_0 / kPa
1	0		0.828	0.821	25
2	0	未加固	0.829	0.819	50
3	0		0.828	0.812	100
4	4		0.735	0.729	25
5	4	弱加固	0.734	0.725	50
6	4		0.737	0.722	100
7	6		0.684	0.679	25
8	6	中等加固	0.683	0.675	50
9	6		0.685	0.671	100
10	8		0.628	0.624	25
11	8	强加固	0.627	0.620	50
12	8		0.625	0.615	100

注: N_b 为加固次数; e_b 为加固后的孔隙比; e_c 为固结后的孔隙比; σ'_0 为有效围压。

3 试验结果与分析

3.1 动剪切模量

图 3 展示了在小应变范围 ($10^{-6} \sim 10^{-3}$) 内, 不同加固次数下微生物加固珊瑚砂动剪切模量 G 与剪应变 γ_d 的关系曲线。从图中可以看出, 当剪应变 $\gamma_d < 10^{-5}$ 时, 珊瑚砂与微生物加固珊瑚砂的动剪切模量衰减幅度均小于 10%, 但微生物加固珊瑚砂的在同一应变水平处的 G 值远大于珊瑚砂。以 $\sigma'_0 = 25$ kPa 为例 (如图 3(a) 所示), 珊瑚砂经 4 次加固后, 其动剪切模量 G 由 50.7 MPa 增长至 125.9 MPa。对于珊瑚砂, 其剪切刚度主要来自于多棱角砂颗粒间的摩擦互锁作用。而微生物加固珊瑚砂的动剪切模量增长主要来源于: ①微生物诱导生成的碳酸钙对不规则

形状珊瑚砂颗粒的胶结和裹覆作用; ②碳酸钙沉淀填充部分孔隙空间, “密实” 效应愈发显著。现有研究^[14]表明, 在所研究的有效围压范围 ($\sigma'_0 = 25 \sim 100$ kPa) 内, 颗粒破碎现象几乎没有发生, 其对珊瑚砂小应变特性的影响可忽略不计。随着加固程度进一步增加, 上述胶结、裹覆和填充作用愈发增强, 微生物加固珊瑚砂的剪切刚度显著增长。图 3(a) 中表现为珊瑚砂经 8 次加固后, 其动剪切模量 G 增长至 204.3 MPa。

当 γ_d 发展至 10^{-5} 后, 珊瑚砂与微生物加固珊瑚砂的动剪切模量衰减梯度 ΔG 均有所增大。值得注意的是, 微生物加固珊瑚砂的 ΔG 随加固程度增加而明显增长, 图 3 中表现为 γ_d 发展至 10^{-4} 后, 不同加固程度微生物加固珊瑚砂试样的 $G-\gamma_d$ 曲线均趋于一致。究其原因, 当剪应变 γ_d 发展至一定水平后, 珊瑚砂经微生物加固后的土体刚度强化效果在逐渐减弱, 促使微生物加固珊瑚砂的非线性特征增强, 该结果与 Simatupang 等^[15]的酶诱导碳酸钙沉淀固化砂结果一致。

图 4 给出了不同有效围压条件下珊瑚砂和微生物加固珊瑚砂的 $G-\gamma_d$ 关系曲线。当 σ'_0 从 25 kPa 增长至 100 kPa 时, 珊瑚砂在 $\gamma_d < 10^{-5}$ 时的 G 由 50.7 MPa 增长至 95.4 MPa。对于珊瑚砂, σ'_0 的增长促使不规则形状珊瑚砂颗粒间的接触愈发紧密, 摩擦互锁作用有所增强。对于微生物加固珊瑚砂, 碳酸钙沉淀的裹覆和填充作用致使砂颗粒接触较未加固试样更为紧密, σ'_0 的增长也促使砂颗粒间摩擦互锁作用进一步增强。以弱加固珊瑚砂为例 (如图 4(b) 所示), 当 σ'_0 由 25 kPa 增长至 100 kPa 时, G 由 125.9 MPa 增长至 225.2 MPa。此外, 珊瑚砂与微生物加固珊瑚砂的动剪切模量衰减梯度 ΔG 在 σ'_0 的影响下变化不大, 图中表现为 $G-\gamma_d$ 曲线近似平行。

3.2 最大动剪切模量

最大动剪切模量 G_{max} 是预测土体动力变形的重要参数, 可基于 Hardin-Drnevich 双曲线模型^[16]由外推法计算得到:

$$G_{max} = \frac{1}{a + b\gamma_d} \Big|_{\gamma_d \rightarrow 0} = \frac{1}{a} \quad (1)$$

式中: a 和 b 均为拟合参数。

图 5 描述了微生物加固珊瑚砂的最大动剪切模量 G_{max} 与加固次数 N_b 的关系曲线, 且该关系可表示为

$$G_{max} = k \cdot N_b + n \quad (2)$$

式中: k 和 n 均为拟合参数。相关性系数 R^2 均大于

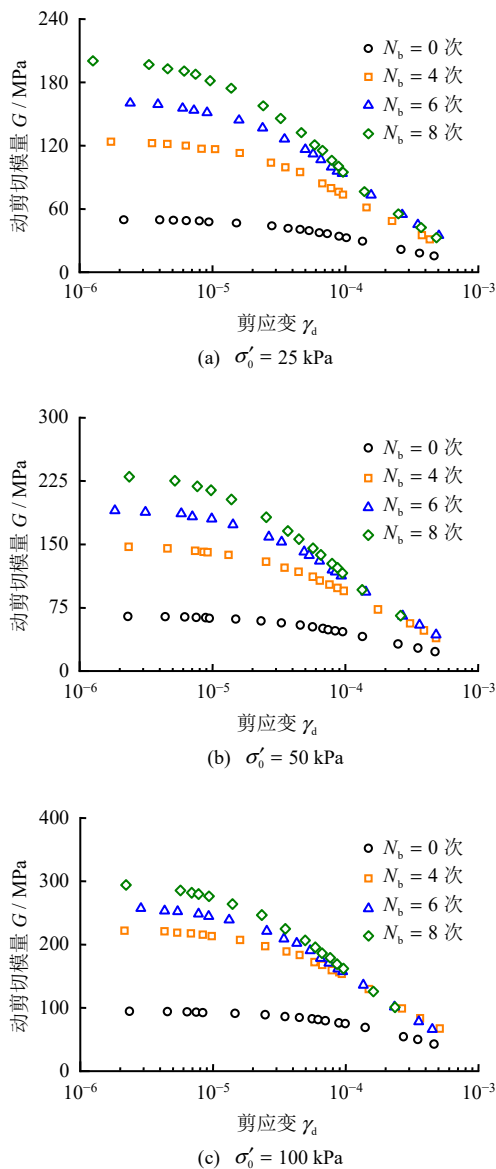


图 3 不同加固次数下微生物加固珊瑚砂的 $G-\gamma$ 关系曲线
Fig.3 Variations of dynamic shear modulus G with shear strain γ for biocemented coral sand at different N_b

0.97。在所研究的 N_b 范围内，微生物加固珊瑚砂的 G_{max} 随 N_b 增加呈现近似线性的增长趋势。究其原因，珊瑚砂的 G_{max} 主要来源于砂颗粒间的摩擦互锁作用。然而，微生物加固珊瑚砂的刚度增长除摩擦互锁作用外，还包括碳酸钙沉淀的胶结、裹覆和填充作用，且上述强化作用随 N_b 增加而逐渐增强。

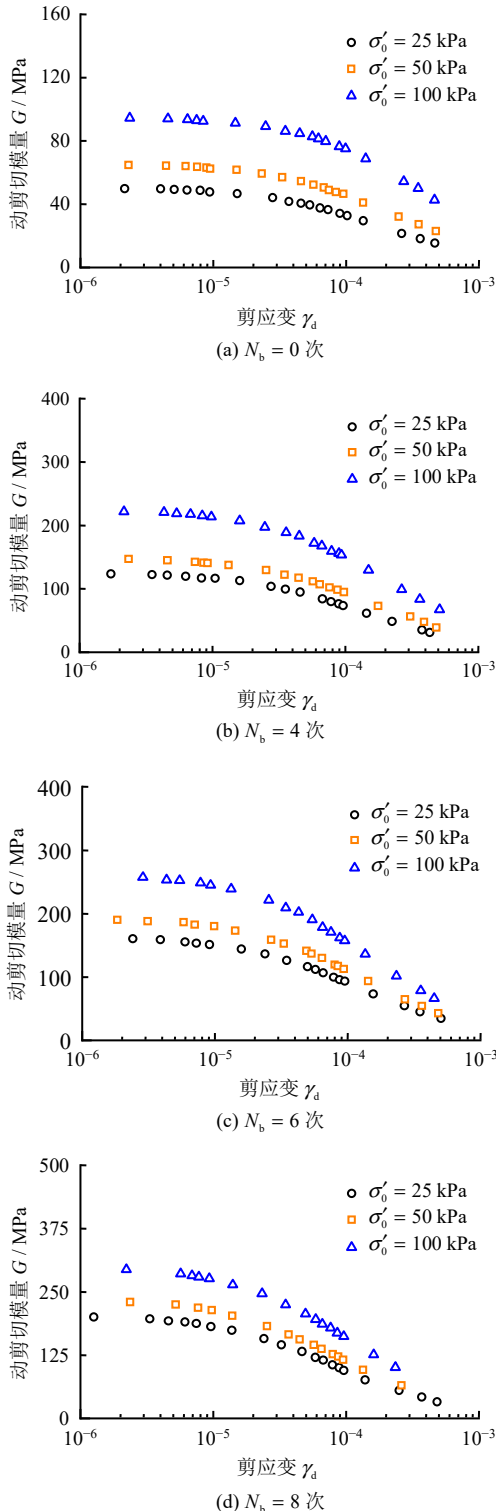


图4 不同有效围压下微生物加固珊瑚砂 $G-\gamma_d$ 关系曲线
Fig.4 Variations of dynamic shear modulus G with shear strain γ_d for biocemented coral sand under different σ'_0

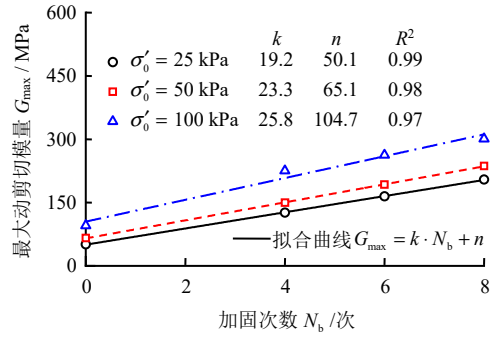


图5 微生物加固珊瑚砂的 $G_{max}-N_b$ 关系曲线
Fig.5 Relationship between G_{max} and N_b of biocemented coral sand

图6给出了微生物加固珊瑚砂的最大动剪切模量 G_{max} 随有效围压 σ'_0 变化的关系曲线，且其幂律相关性可表示为

$$G_{max} = A \cdot (\sigma'_0)^B \quad (3)$$

式中： A 和 B 均为拟合参数。

如图6所示，微生物加固珊瑚砂的 G_{max} 随 σ'_0 增加而以幂律形式增长，但 $G_{max}-\sigma'_0$ 曲线的增长速率系数 b 随加固次数增加而线性降低，表明 σ'_0 对 G_{max} 的影响有所减弱，该现象与 Rivero 等^[17]的 MICP 胶结 Fraser 河砂结果一致。这种现象的原因可能在于，随着加固程度的增加，胶结作用成为微生物加固珊瑚砂剪切刚度增长的主要来源；摩擦互锁作用尽管随 σ'_0 增长而有所增强，但其在刚度增长中的贡献比例逐渐降低。

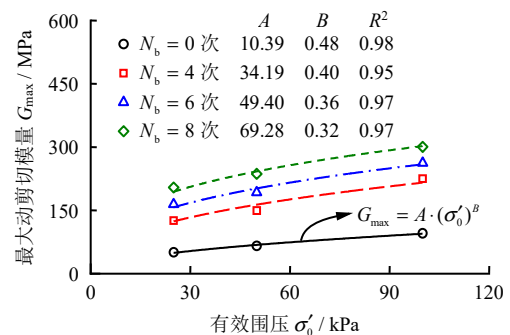


图6 微生物加固珊瑚砂的 $G_{max}-\sigma'_0$ 关系曲线
Fig.6 Relationship between G_{max} and σ'_0 of biocemented coral sand

无侧限抗压强度 q_{ucs} 和最大动剪切模量 G_{max} 是表征岩土体强度和刚度的基础参数。相较于共振柱试验，无侧限抗压强度试验更为简便高效，在岩土工程实践中已经获得了广泛应用。因此，建立无侧限抗压强度 q_{ucs} 与最大动剪切模量 G_{max} 之间的经验

关系能够快速便捷地获取微生物加固珊瑚砂的 G_{\max} 预测值。具体地, $G_{\max} - q_{\text{ucs}}$ 经验关系可通过幂律形式表示为

$$G_{\max} = \alpha \cdot q_{\text{ucs}}^{\beta} \quad (4)$$

式中: α 和 β 为拟合系数。

图 7 给出了基于 q_{ucs} 的微生物加固珊瑚砂最大动剪切模量 G_{\max} 的预测曲线。如图 7 所示, G_{\max} 的预测值同共振柱试验值较为吻合, 相关性系数 R^2 均大于 0.96。这表明, $G_{\max} - q_{\text{ucs}}$ 经验关系能够根据现场实测的 q_{ucs} 表征微生物加固珊瑚砂在不同有效围压条件下 G_{\max} 的变化规律, 具有较好的准确性和合理性。

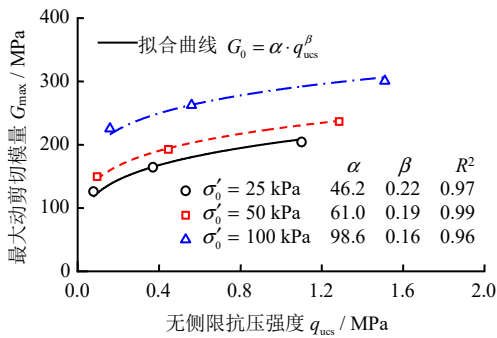


图 7 基于 q_{ucs} 的微生物加固珊瑚砂 G_{\max} 预测曲线
Fig.7 Prediction in G_{\max} of biocemented coral sand based on q_{ucs}

3.3 动剪切模量比

基于 Hardin 模型^[16], Darendeli 模型^[18]引入控制动剪切模量比 G/G_{\max} 衰减曲率的重要参数, 能够较好地描述胶结材料的动剪切模量比衰减特性, 其形式可表示为

$$G/G_{\max} = 1 / \left[1 + (\gamma_d / \gamma_0)^\zeta \right] \quad (5)$$

式中: ζ 为控制动剪切模量比衰减曲率的拟合参数, 其值可取 0.95; γ_0 为参考剪应变, 其值取 $G/G_{\max} = 0.5$ 时的剪应变 γ_d 幅值^[18]。珊瑚砂与微生物加固珊瑚砂动剪切模量比经验方程的参数推荐值如表 3 所示。

图 8 描述了不同加固次数下珊瑚砂与微生物加固珊瑚砂的动剪切模量比-剪应变关系曲线。珊瑚砂与微生物加固珊瑚砂的动剪切模量比衰减曲线均表现出显著的非线性特征: 即 $\gamma_d < 10^{-5}$ 时, 动剪切模量比 G/G_{\max} 随 γ_d 的增长而略有衰减, 土体刚度基本不变; 随着剪应变 γ_d 的进一步增长, 砂颗粒间的胶结逐渐损伤劣化, G/G_{\max} 迅速衰减; 当 γ_d 并增长至 10^{-2} 后, G/G_{\max} 的衰减速度逐渐降低, 且其值趋向于 0。

表 3 部分试验结果及模型参数
Table 3 Test results and model parameters

No.	G_{\max} / MPa	q_{ucs} / MPa	ζ	γ_0	λ_{\min} / %	λ_{\max} / %	θ
1	50.7	—	0.95	1.94×10^{-4}	0.71	21.28	1.60
2	65.7	—	0.95	2.40×10^{-4}	0.66	20.18	1.60
3	95.4	—	0.95	3.81×10^{-4}	0.61	18.51	1.60
4	125.9	0.077	0.95	1.40×10^{-4}	1.31	21.94	1.60
5	149.5	0.096	0.95	1.73×10^{-4}	1.22	20.46	1.60
6	225.2	0.159	0.95	2.06×10^{-4}	1.13	18.77	1.60
7	164.4	0.370	0.95	1.15×10^{-4}	1.44	23.49	1.60
8	192.5	0.446	0.95	1.36×10^{-4}	1.35	21.97	1.60
9	262.4	0.560	0.95	1.46×10^{-4}	1.27	19.84	1.60
10	204.3	1.101	0.95	0.86×10^{-4}	1.62	25.58	1.60
11	236.5	1.286	0.95	0.93×10^{-4}	1.52	23.28	1.60
12	300.5	1.510	0.95	1.14×10^{-4}	1.43	21.27	1.60

注: λ_{\min} 为最小阻尼比; λ_{\max} 为拟合参数; θ 为形状系数。

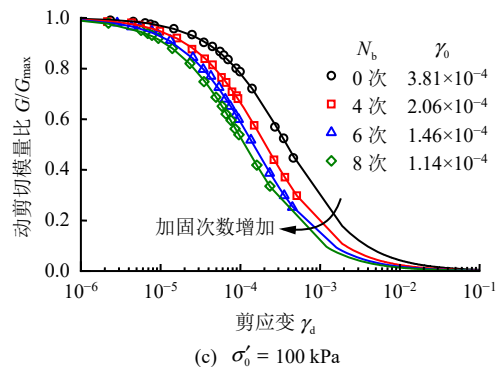
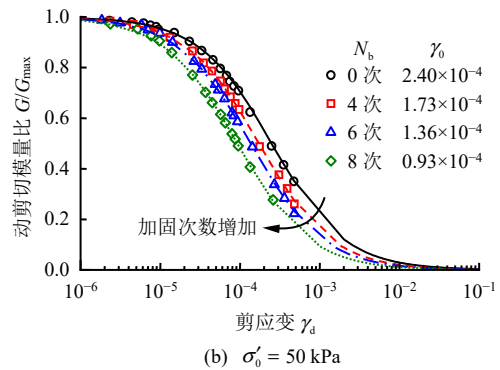
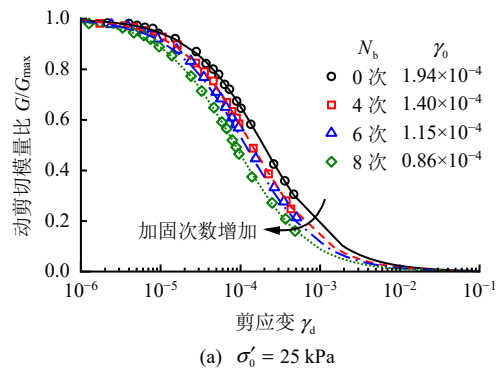


图 8 不同加固次数 N_b 下微生物加固珊瑚砂的 $G/G_{\max} - \gamma_d$ 曲线
Fig.8 Relationships between G/G_{\max} and γ_d of biocemented coral sand at different values of N_b

然而,在同一有效围压 σ'_0 下,珊瑚砂与微生物加固珊瑚砂的 $G/G_{\max} - \gamma_d$ 曲线随加固次数 N_b 变化呈现明显差异:在有效围压 $\sigma'_0 = 25$ kPa 条件下,当珊瑚砂的动剪切模量比 G/G_{\max} 由 1.0 衰减至 0.5 时,其对应的剪应变幅值(即参考剪应变 γ_0)为 1.94×10^{-4} 。随着 N_b 逐渐增加,微生物加固珊瑚砂的 γ_0 值逐渐减小,并在 8 次加固后减少为 0.86×10^{-4} ,其变化幅值为 1.08×10^{-4} 。图 8(a)中表现为 $G/G_{\max} - \gamma_d$ 曲线向下方移动,非线性特征更为显著,表明微生物加固珊瑚砂的应变敏感性随加固次数增加而有所增强。有效围压 σ'_0 分别为 50、100 kPa 时珊瑚砂和微生物加固珊瑚砂的 $G/G_{\max} - \gamma_d$ 曲线分别如图 8(b)和图 8(c)所示。珊瑚砂与微生物加固珊瑚砂的 G/G_{\max} 在加固次数影响下的变化趋势同 $\sigma'_0 = 25$ kPa 结果

较为类似,但其变化幅值由 25 kPa 条件下的 1.08×10^{-4} 增长至 100 kPa 条件时的 2.67×10^{-4} ,分布范围逐渐变大。

图 9 描述了有效围压 σ'_0 对珊瑚砂和微生物加固珊瑚砂的 $G/G_{\max} - \gamma_d$ 曲线的影响。随着有效围压 σ'_0 的增加,珊瑚砂 $G/G_{\max} - \gamma_d$ 曲线的衰减梯度逐渐减小,非线性特征减弱。 σ'_0 的增加强化了珊瑚砂的骨架力链,土体刚度显著增强。

对于微生物加固珊瑚砂, $G/G_{\max} - \gamma_d$ 曲线的衰减梯度亦随 σ'_0 增加而逐渐减小,与珊瑚砂结果较为相似。然而,对比图 9(a)和图 9(d)可知, $G/G_{\max} - \gamma_d$ 曲线分布范围逐渐减小, γ_0 的增长幅值由 1.87×10^{-4} 减少至 0.28×10^{-4} ,表明珊瑚砂经微生物加固后, $G/G_{\max} - \gamma_d$ 曲线对 σ'_0 的依赖性逐渐降低。

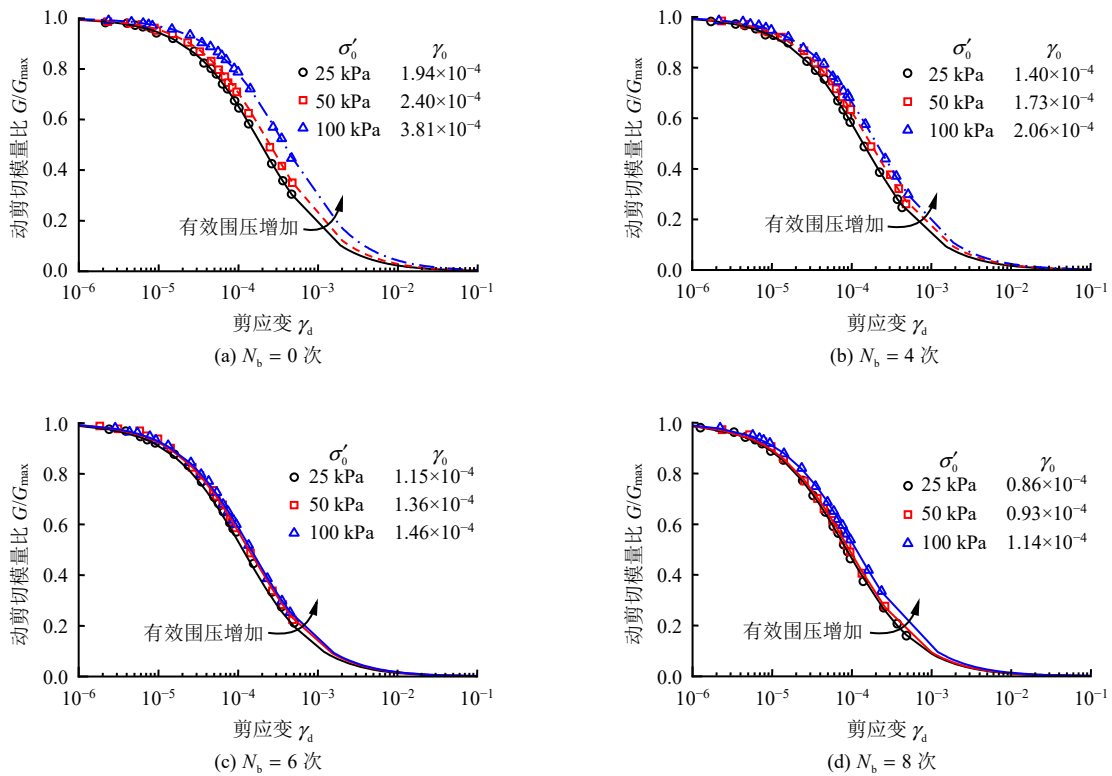


图 9 不同有效围压下微生物加固珊瑚砂的 $G/G_{\max} - \gamma_0$ 曲线
 Fig.9 Relationships between G/G_{\max} and γ_0 of biocemented coral sand under different values of σ'_0

3.4 阻尼比

采用陈国兴等^[19]提出的经验公式对微生物加固珊瑚砂的阻尼比进行拟合分析:

$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_{\max} (1 - G/G_{\max})^\theta \quad (6)$$

其中: λ_{\min} 取 $\gamma_d = 1 \times 10^{-6}$ 对应的阻尼比幅值; λ_{\max} 与土的类型和加载条件相关; 决定阻尼比曲线形状的形状系数 θ , 其值为 1.60。表 3 给出了珊瑚砂与微

生物加固珊瑚砂阻尼比经验方程的参数推荐值。

图 10 为珊瑚砂和微生物加固珊瑚砂的阻尼比 λ 与剪应变 γ_d 的关系曲线。从图 10 中可以看出,珊瑚砂与微生物加固珊瑚砂试样的阻尼比增长曲线(即 $\lambda - \gamma_d$ 曲线)均表现出显著的滞后性特征:剪应变 $\gamma_d < 10^{-5}$ 时,试样的阻尼比 λ 随 γ_d 的增大均略有增长;随着 γ_d 的进一步发展 ($\gamma_d > 10^{-5}$),试样的 λ 随 γ_d 增大而逐渐增长,且其增长速度开始逐渐增

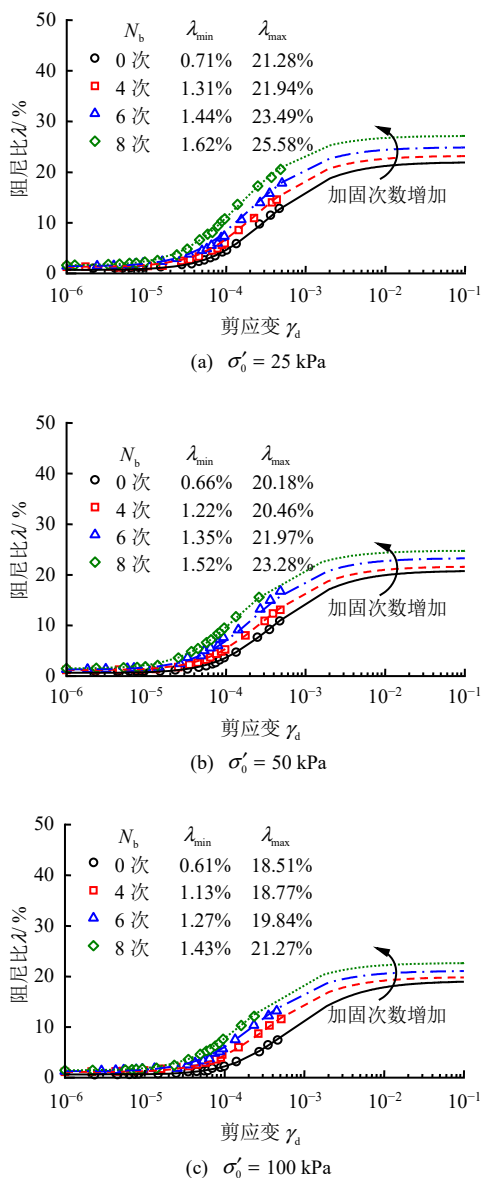


图 10 不同加固次数下微生物加固珊瑚砂的 $\lambda-\gamma_d$ 曲线
Fig.10 Relationships between λ and γ_d of of biocemented coral sand at different values of N_b

加；当 γ_d 增长至 10^{-2} 后，试样的 λ 趋于稳定。然而，在相同的有效围压 σ'_0 条件下，珊瑚砂与微生物加固珊瑚砂的 $\lambda-\gamma_d$ 曲线随加固次数 N_b 的变化表现出明显差异：①在极小应变范围（ $10^{-6}\sim 10^{-5}$ ）内，试样的最小阻尼比随 N_b 增加表现出小幅增长趋势， $\lambda-\gamma_d$ 曲线随 N_b 的变化较小，表明 $\lambda-\gamma_d$ 曲线在极小应变范围内对 N_b 的敏感性较低。②在小应变范围（ $10^{-5}\sim 10^{-3}$ ）内， N_b 越大，同一剪应变 γ_d 处对应的阻尼比 λ 越大，图中表现为微生物加固珊瑚砂的阻尼比增长曲线随加固次数增加而向上方移动， $\lambda-\gamma_d$ 曲线的分布范围明显增大，该现象与 Li 等^[20]报道的水泥胶结砂结果相同。相较于未胶结试样，弹性波在胶结砂土中传播需要消耗的能量增加^[21-22]，

阻尼比滞后性特征更为显著。

图 11 描述了有效围压 σ'_0 对珊瑚砂和微生物加固珊瑚砂阻尼比与剪应变关系曲线的影响。随着 σ'_0 的增加，珊瑚砂和微生物加固珊瑚砂的阻尼比 λ 均

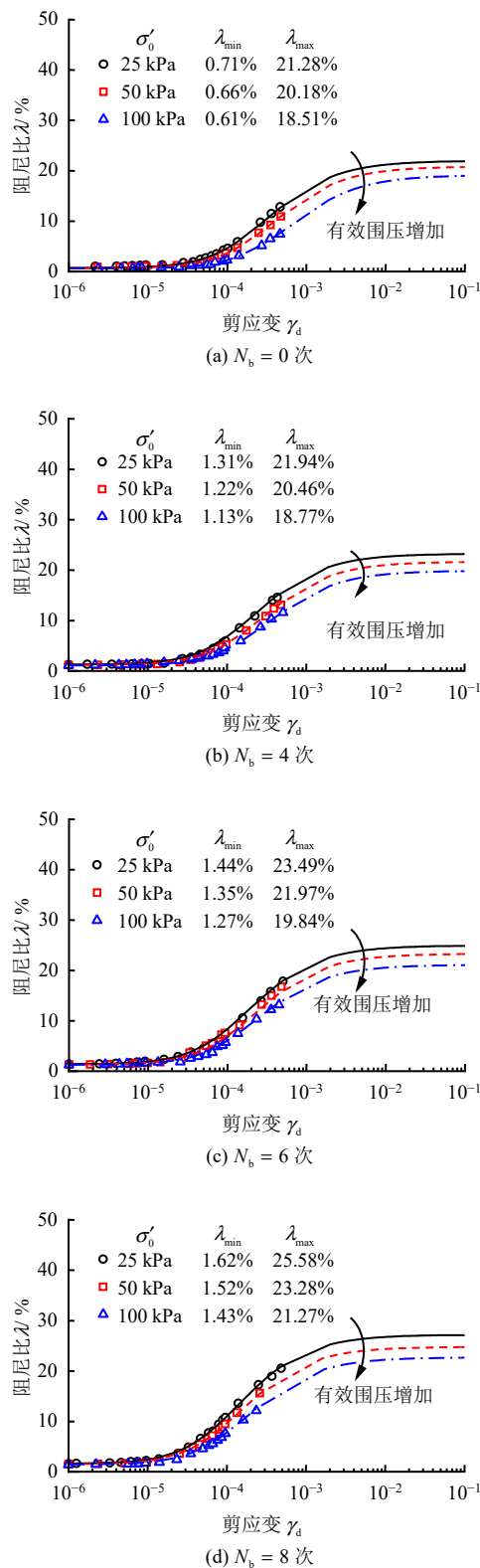


图 11 不同有效围压下微生物加固珊瑚砂的 $\lambda-\gamma_d$ 曲线
Fig.11 Relationships between λ and γ_d of biocemented coral sand at different values of σ'_0

随剪应变 γ_d 的增长速度逐渐降低，即 100 kPa 条件下，试样在相同剪应变 γ_d 处的阻尼比 λ 较 25 kPa 结果更低，图中表现为 $\lambda - \gamma_d$ 曲线随有效围压增加向下方移动。这种现象的原因在于，有效围压的增加促使砂颗粒的摩擦互锁作用更为紧密，颗粒间接触点增加，因颗粒相对运动而产生的能量传播损耗降低，低耗能特性显著。

3.5 与其他固化砂土的对比

Liu^[9]、Li^[20]和 Maher^[23]等分别给出了南海珊瑚砂、水泥胶结砂和丙烯酸酯胶结 Ottawa 20/30 砂的动剪切模量与阻尼比曲线的分布范围。

图 12 给出了不同加固程度微生物加固珊瑚砂动剪切模量比和阻尼比分布范围与上述研究成果的对比。结果表明，微生物加固珊瑚砂结果同 Liu 等^[9]给出珊瑚砂的 $G/G_{max} - \gamma_d$ 分布范围存在差异，但与

$\lambda - \gamma_d$ 曲线分布范围存在局部重合。这是因为微生物加固珊瑚砂的级配分布和最大、最小孔隙比等物理指标同 Liu 等^[9]报道珊瑚砂存在较大差异。对于胶结砂土，微生物加固珊瑚砂的 $G/G_{max} - \gamma_d$ 分布范围超出了 Li^[20]、Maher^[23]等报道的硅酸盐水泥胶结砂和丙烯酸酯胶结 Ottawa 砂的 $G/G_{max} - \gamma_d$ 曲线下边界范围，非线性特征显著。微生物加固珊瑚砂的阻尼比 λ 在 $\gamma_d < 10^{-5}$ 范围内同珊瑚砂和水泥胶结砂的阻尼比特性较为吻合；然而，随着剪应变的进一步发展，微生物加固珊瑚砂较 Li 等^[20]给出的硅酸盐水泥胶结砂表现出更强的滞后性特征，但与 Maher 等^[23]的丙烯酸酯胶结 Ottawa 砂的阻尼比范围存在局部重合。究其原因，珊瑚砂具有内孔隙丰富、形状不规则，颗粒强度低等特点，较之陆源石英砂具有更强的非线性和低耗能特性。

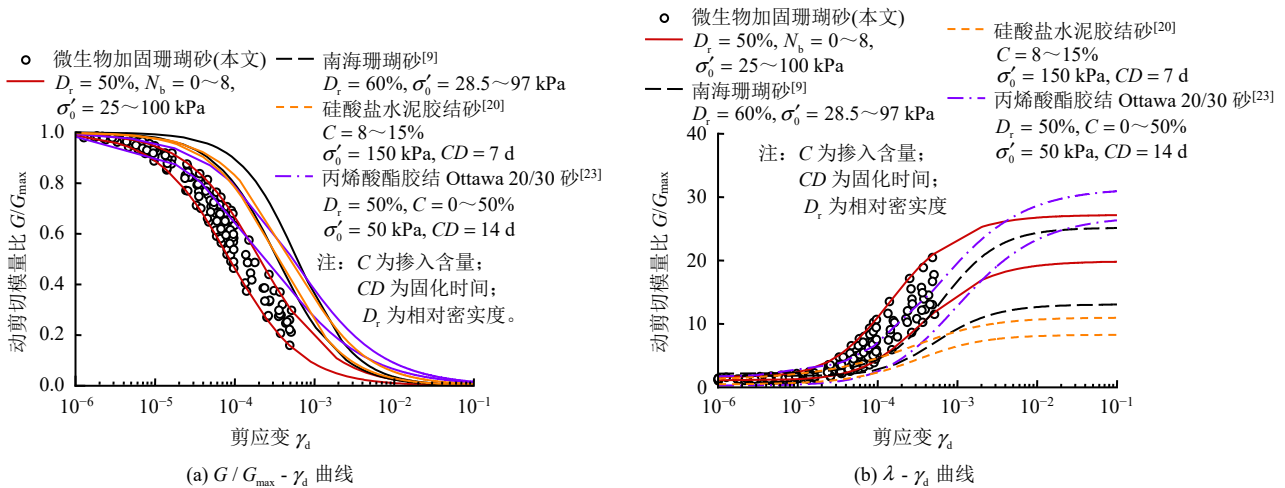


图 12 加固砂土的 $G/G_{max} - \gamma_d$ 曲线和 $\lambda - \gamma_d$ 曲线
Fig.12 $G/G_{max} - \gamma_d$ curves and $\lambda - \gamma_d$ curves of cemented sands

总体而言，微生物加固珊瑚砂的动剪切模量和阻尼比特性较珊瑚砂和各类水泥胶结砂土结果的差异较为明显。当采用适用于水泥固化砂土的经验公式对微生物加固珊瑚砂的小应变特性进行预测时，其预测所得经验参数可能与实际结果偏差较大。本研究为南海岛礁微生物加固珊瑚砂场地的动力响应分析提供了可靠参考依据。

3.6 微观机制分析

图 13 给出了微生物加固珊瑚砂的扫描电镜结果。如图 13 所示，微生物诱导生成的碳酸钙沉淀以菱形方解石为主，主要分布在珊瑚砂颗粒表面和颗粒间的接触位置处。分布于颗粒间接触位置的碳酸钙沉淀增强了多棱角珊瑚砂的互锁作用，并通过“空间网状”结构^[24]将土体胶结强化，胶结作用促

使其强度和刚度显著提升。分布于颗粒表面的碳酸钙沉淀包裹珊瑚砂并填充部分内孔隙，该裹覆作用促使颗粒间的相互摩擦有所增强。同时，微生物加

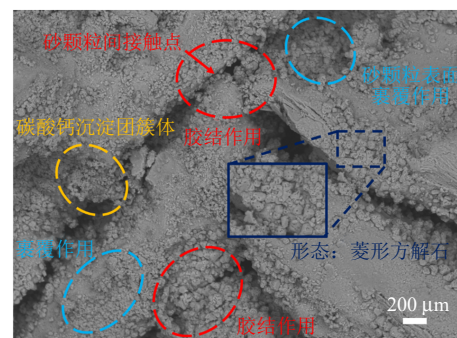


图 13 微生物加固珊瑚砂 SEM 分析
Fig.13 SEM analysis of biocemented coral sand

固珊瑚砂试样的孔隙空间中也可观察到碳酸钙沉淀沉积, 试样孔隙体积减小, 填充密实效应愈发显著, 促使珊瑚砂的强度和刚度明显增强。

4 结 论

通过对微生物加固珊瑚砂开展系列共振柱试验, 重点探讨了加固次数 N_b 和有效围压 σ'_0 对微生物加固珊瑚砂动剪切模量特性、动剪切模量比衰减特性和阻尼比特性的影响, 主要结论如下:

(1) 在小应变范围内, 微生物加固珊瑚砂的动剪切模量 G 表现出显著的非线性特征: 当剪应变 $\gamma_d < 10^{-5}$ 时, 微生物加固珊瑚砂的衰减较为缓慢, G 随 N_b 和 σ'_0 的增加而显著增加; 随着剪应变进一步发展, 动剪切模量的衰减梯度明显增大, 且衰减梯度随 N_b 的增大而增大, 但对 σ'_0 较不敏感。

(2) 微生物加固珊瑚砂的最大动剪切模量 G_{max} 随 N_b 和 σ'_0 的增加而分别以线性和幂律形式增长。微生物加固珊瑚砂的 G_{max} 与无侧限抗压强度 q_{ucs} 存在显著相关性, 并建立了微生物加固珊瑚砂 G_{max} 的预测公式。

(3) 微生物加固珊瑚砂的动剪切模量比衰减曲线和阻尼比增长曲线随 N_b 的增加分别表现出“由上到下”和“由下到上”的变化, 非线性和滞后性特征愈发显著。随着 σ'_0 增大, 微生物加固珊瑚砂的非线性和滞后性特征逐渐减弱。

(4) 根据研究结果, 给出了微生物加固珊瑚砂动剪切模量和阻尼比预测公式的经验参数, 并描述了微生物加固珊瑚砂动剪切模量和阻尼比的变化范围, 试验结果为南海岛礁微生物加固珊瑚砂场地的动力响应分析提供参考依据。

(5) 微生物诱导生成的碳酸钙沉淀主要分布于珊瑚砂颗粒表面, 颗粒间接触处和孔隙空间中, 充分发挥胶结作用, 裹覆作用和填充作用, 促使微生物加固珊瑚砂的强度和刚度显著增强。

参 考 文 献

- [1] MA C H, ZHU C Q, QU R, et al. Influence of the particle morphology and internal porosity characteristics of coral sand in the South China Sea on its limit void ratio[J]. *Powder Technology*, 2023, 428: 118771.
- [2] GONG W F, RUAN A G, NIU X W, et al. Preliminary results of the seismicity monitoring experiment around the 2019 M_w 5.4 earthquake epicenter in the central south China sea basin[J]. *Journal of Earth Science*, 2024, 35(1): 212-220.
- [3] LIU H L, CHU J, KAVAZANJIAN E. Biogeotechnics: a new frontier in geotechnical engineering for sustainability[J]. *Biogeotechnics*, 2023, 1(1): 10001.
- [4] LIU L, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(10): 1502-1513.
- [5] 刘鹏, 曹源兴, 程钰, 等. 碳酸酐酶增强微生物矿化固土效果的试验研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(9): 2554-2564.
- [6] LIU Peng, CAO Yuan-xing, CHENG Yu, et al. Experimental study of enhancing the effects of microbial-induced calcite precipitation treated sand using carbonic anhydrase[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(9): 2554-2564.
- [7] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. MICP胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(1): 38-45.
- [8] LIU Han-long, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(1): 38-45.
- [9] XIAO P, LIU H L, GUO W, et al. Effect of relative density and biocementation on cyclic response of calcareous sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(12): 1849-1862.
- [10] ZHANG X L, CHEN Y M, LIU H L, et al. Performance evaluation of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 129: 105959.
- [11] LIU X, LI S, SUN L Q. The study of dynamic properties of carbonate sand through a laboratory database[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79: 3843-3855.
- [12] GIANG P H H, IMPE P O V, IMPE W F V, et al. Small-strain shear modulus of calcareous sand and its dependence on particle characteristics and gradation[J]. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 2017, 100: 371-379.
- [13] 吴琪, 杨铮涛, 刘抗, 等. 细粒含量对饱和珊瑚砂动力变形特性影响试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(8): 1386-1396.

- WU Qi, YANG Zheng-tao, LIU Kang, et al. Experimental study on influences of fines content on dynamic deformation characteristics of saturated coral sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(8): 1386-1396.
- [12] ASTM International. ASTM D 4254—16 Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density[S]. West Conshohocken: [s. n.], 2016.
- [13] 中华人民共和国水利部. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007. Ministry of Water Resources, PRC. GB/T 50145—2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [14] XIAO P, LIU H L, XIAO Y, et al. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand[J]. **Soil Dynamic and Earthquake Engineering**, 2018, 107: 9-19.
- [15] SIMATUPANG M, OKAMURA M, HAYASHI K, et al. Small-strain shear modulus and liquefaction resistance of sand with carbonate precipitation[J]. **Soil Dynamic and Earthquake Engineering**, 2018, 115: 710-718.
- [16] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division**, 1972, 98(7): 667-692.
- [17] RIVEROS G A, SADREKARIMI A. Liquefaction resistance of Fraser River sand improved by a microbially-induced cementation[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2020, 131:106034.
- [18] DARENDELI M B. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves[M]. Texas: The university of Texas, 2001.
- [19] 陈国兴, 刘雪珠, 朱定华, 等. 南京新近沉积土动剪切模量比与阻尼比的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2006, 28(8): 1023-1027. CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu, ZHU Ding-hua, et al. Experimental studies on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of recently deposited soils in Nanjing[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(8): 1023-1027.
- [20] LI W, LANG L, WANG D, et al. Investigation on the dynamic shear modulus and damping ratio of steel slag sand mixtures[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 162: 170-180.
- [21] SAXENA S K, AVRAMIDIS A S, REDDY K R. Dynamic moduli and damping ratios for cemented sands at low strains[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1988, 25: 353-368.
- [22] DUFFY J, MINDLIN R D. Stress-strain relations of a granular medium[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1957, 24(4): 585-593.
- [23] MAHER M H, RO K S, WELSH J P. High strain dynamic modulus and damping of chemically grouted sand[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1994, 13(2): 131-138.
- [24] 崔明娟, 郑俊杰, 赖汉江. 颗粒粒径对微生物固化砂土强度影响的试验研究[J]. **岩土力学**, 2016, 37(增刊 2): 397-402. CUI Ming-juan, ZHENG Jun-jie, LAI Han-jiang. Experimental study of effect of particle size on strength of bio-cemented sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.2): 397-402.