

DOI: 10.11779/CJGE20220455

微生物加固钙质砂地基动力响应特性研究

肖 鹏^{1,2}, 刘汉龙^{1,3}, 史金权^{1,3}, 何 想^{1,3}, 楚 剑⁴, 肖 杨^{*1,3}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆铁路投资集团有限公司, 重庆 400023; 3. 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; 4. 南洋理工大学土木与环境工程学院, 新加坡 639789)

摘要: 微生物加固技术是一种有效提高土体强度、抑制土体发生液化破坏的绿色环保加固技术。采用温控微生物加固法对南海钙质砂地基模型进行微生物加固处理, 并开展了一系列模型振动台试验研究, 系统讨论了微生物加固程度和土体深度对微生物加固钙质砂地基的动应力应变关系、剪切模量、剪切波速以及动强度等动力特性的影响。试验研究表明微生物加固对钙质砂地基的动力学特性影响十分显著, 具体表现在: 随着微生物加固程度的提高, 动剪应变显著降低, 滞回圈骨干曲线的斜率逐渐增大, 滞回圈面积和土体能量的耗散逐渐减小; 动剪切模量随着加固程度的提高而增大, 但增大幅度逐渐降低; 深部土体的剪切模量衰减要高于上部土体; 剪切波速值随着微生物加固程度的提高而显著提高, 振动后的土体剪切波速值要高于振动前。动三轴试验获得的统一动强度方程, 通过折减系数进行修正处理, 可在一定程度上模拟振动台试验所获得的微生物加固钙质砂动强度发展规律。

关键词: 微生物加固; 钙质砂; 动力响应; 动强度; 振动台试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)06-1303-11

作者简介: 肖 鹏 (1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事铁路工程、地基处理等方面的科研及管理工作。E-mail:
xpcqdx2012@163.com。

Dynamic responses of calcareous foundation reinforced by microbially induced calcite precipitation

XIAO Peng^{1,2}, LIU Hanlong^{1,3}, SHI Jinquan^{1,3}, HE Xiang^{1,3}, CHU Jian⁴, XIAO Yang^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Chongqing Railway Investment Group CO., LTD.,
Chongqing 400023, China; 3. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University,
Chongqing 400045, China; 4. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798,
Singapore)

Abstract: The microbially induced calcite precipitation (MICP) is a green and ecofriendly technique to efficiently improve soil strength and mitigate liquefaction potential of soil. In this study, the temperature-controlled MICP method is used to reinforce the foundation model made with the calcareous sand from the South China Sea. A series of shaking table tests are performed to investigate the effects of biocementation level and soil depth on the dynamic stress-strain relationship, shear modulus, shear wave velocity and dynamic strength of the MICP-treated calcareous sand foundation. The test results show that the MICP can affect the dynamic response of the calcareous sand foundation significantly, indicating that with the increase of the biotreatment level, the dynamic shear strain decreases significantly; the area of stress-strain hysteresis ring and the energy dissipation decrease; the dynamic shear modulus increases with the decrease of increment amplitude; the shear modulus degradation at a larger depth is higher than that at a lower depth. The shear wave velocity increases with the biocementation level and becomes higher after shaking. The dynamic strength equation for the biotreated soil models from the triaxial cyclic loading tests, multiplying a reduction coefficient, can be used to simulate the dynamic soil strength of the MICP-treated calcareous sand foundation in the shaking table tests.

Key words: biotreatment; calcareous sand; dynamic response; dynamic strength; shaking table test

0 引言

钙质砂是海洋工程中一种常见建筑材料, 其广泛分布于热带、亚热带大陆架与海岸线, 也是南海地区

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年项目 (51922024); 国家自然科学基金面上项目 (52078085); 重庆英才计划优秀科学家项目 (cstc2021ycjh-bgxm0051)

收稿日期: 2022-04-18

*通信作者 (E-mail: hhuxyanson@163.com)

最主要的岩土介质^[1]。钙质砂主要由海洋生物残骸,如贝壳、珊瑚、有孔虫等海洋生物碎屑组成,内部孔隙结构发达、颗粒粒径范围广、形状较不规则,导致其力学特性较陆源砂(如石英砂)存在着较大差异^[2]。近年来,在“建设海洋强国”战略的指导下,中国南海地区的岛礁建设工程活动进入大力发展阶段。南海海域处于地震活跃区,地震多发易发,该地区曾多次发生过地震;钙质砂地基在地震、波浪冲击等动力荷载作用下,可能引发地基土体液化,导致港口岸线设施和各类建筑物发生破坏,危及人民的财产和生命安全^[1,3-4],如1993年日本关岛地区发生的7.7级大地震就造成了严重的钙质砂液化破坏^[5]。因此,钙质砂地基动力液化特性与地基加固处理研究成为南海岛礁工程建设重点任务之一。从20世纪90年代起,人们开始对钙质砂的工程力学特性展开系统研究,并通过压缩、直剪、三轴、冲击试验等试验研究以及理论分析,取得了一系列丰硕研究成果。研究发现,较石英砂而言,由于钙质砂内孔隙结构丰富,导致其易发生颗粒破碎,因此具有高压缩特性、内摩擦角较大、刚度衰减较快的特点;钙质砂的动力特性受围压、应力各向异性影响较大,有效围压和土体密实度越大,动强度值越高,松散砂土在液化时的应力路径通常为“流滑”状态,高密实度钙质砂通常呈现为“循环活动”状态,破坏时对应的孔压可能未完全达到有效围压;钙质砂的孔压发展规律满足Seed公式,且其动模量和动应变之间的关系不受颗粒级配与相对密实度的影响;初始主应力方向角对钙质砂的抗液化能力有较大影响,其液化循环次数随着应力方向角的增大而减小;场地地基倾斜角度会影响钙质砂的动力响应^[6-9]。系列研究表明,钙质砂是一种可液化土,在一定动力荷载作用下钙质砂地基可能发生液化失稳现象^[10-12],南海岛礁建设过程中,需要对部分钙质砂场地进行抗液化与地基加固处理。

近年来,面向绿色地基加固的微生物加固(MICP)已成为一个新兴研究方向^[13]。微生物加固能显著提升土体力学特性,具有低碳环保等优点,MICP技术在砂土地基加固、液化防治、防尘治沙、降低土壤侵蚀等方面的试验研究已取得显著成效^[14-24]。然而MICP相关研究主要以陆源砂为研究对象,关于微生物加固钙质砂的研究,特别是动力特性的相关研究较少,其中:Xiao等^[25-26]通过系列三轴试验研究了微生物加固钙质砂的动力响应特性,并分析了MICP加固程度、有效围压、相对密实度等对MICP加固钙质砂动力液化规律的影响;Zhang等^[27]通过MICP加固钙质砂模型振动台试验,研究了正弦动力荷载作用下模型地基的动孔压、加速度、地表沉降的变化规律,研究结果

证明了MICP能提升钙质砂地基的动力特性,延解孔压发展,有效增强抗液化能力。

为进一步对微生物加固钙质砂地基的动力特性开展更加系统、全面的研究,本文通过1g模型振动台试验和加速度时程响应分析,探究不同微生物加固程度下,不同深度土体MICP加固钙质砂的动剪应力应变、剪切模量、剪切波速以及动强度等动力响应规律。研究成果有利于更加全面的认识与掌握微生物加固钙质砂地基的动力特性,为后期开展现场试验提供理论支撑,为中国南海地区珊瑚岛礁钙质砂地基加固与抗震设计提供参考。

1 微生物加固钙质砂模型试验

试验采用0.95 m×0.85 m×0.65 m的层状剪切模型箱,为满足微生物加固和防渗需求,模型箱内部铺设超薄塑料膜,底部设有排水孔。试验用砂为南海岛礁钙质砂,采用砂雨法制备模型钙质砂地基。为与吹填钙质砂^[7]及三轴试验密实度一致^[26],取模型地基相对密实度为47%。试验采用温控微生物加固技术对制好的钙质砂模型地基进行MICP灌浆加固处理,菌液浓度为 2.5×10^7 cells/mL,反应液浓度为0.5 mol/L(其中CaCl₂与尿素摩尔比为1:1),环境温度为25~30℃。试验时,将菌液和反应液在4℃条件下按体积比1:10混合,并以6 L/min将180 L混合液(约1.5倍土体孔隙体积)均匀灌注在模型土体表面,试验时通过调整模型箱底部排水阀,以保证液面和模型地基地表基本齐平;一次灌浆结束后,保持模型静置12 h,以确保MICP过程充分反应。有关温控法加固技术可参考相关文献[28]。本次试验研究包括0~3次共4类微生物加固处理程度,分别对应编号UM, TM1, TM2, TM3模型地基。针对微生物加固处理完成的钙质砂模型地基开展了一系列模型振动台试验研究。试验振动波形采用正弦波,频率为5 Hz,振动时长10 s,振动加速度分别采用了0.05g, 0.1g, 0.2g, 0.4g, 0.7g等5个不同加速度幅值。此外,钙质砂样上部覆盖2 cm左右的黏土层来模拟土体不排水状态,同时也可增加部分上覆土压力^[29-31]。试验中,在试样内部距离试样表面0.15, 0.25, 0.35 m处分别布设加速度传感器以采集分析不同埋深处微生物加固钙质砂地基的振动响应数据。

2 加速度时程响应

2.1 动剪应力应变计算

为获取模型地基内部的动力响应特性,本文将土层结构进行简化处理,采用一维剪切梁模型的计算方

法, 对不同土体高度处的动剪应力、动剪应变进行分析, 具体计算方法为^[32]

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \ddot{u} . \quad (1)$$

式中: τ , \ddot{u} , ρ 分别为深度 z 处土体所受剪应力、水平加速度和土体密度。对于初始剪应力为零的土体, 剪应力可通过式(1)积分获得^[33]

$$\tau_i(t) = \begin{cases} \tau_{i-1}(t) + \rho_{i-1} \frac{\ddot{u}_{i-1} + \ddot{u}_i}{2} \Delta z_{i-1} & (i = 2, 3, \dots) \\ 0 & (i = 1) \end{cases} . \quad (2)$$

式中: z_i 为加速度计 a_i 的深度, τ_i , \ddot{u}_i 为 z_i 处的剪应力和水平加速度, ρ_{i-1} 为土层 $i-1$ 与 i 的平均密度; Δz_{i-1} 为 z_{i-1} 与 z_i 之差的绝对值。对于土层 z_i 的剪应变, 可根据土层 i 的绝对位移 $u_i = u(z_i, t)$ 与相邻传感器之间水平加速度差值 Δz_{i-1} 和 Δz_i 通过下式计算得到^[33]

$$\gamma_i(t) = \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta z_{i-1} + \Delta z_i} \frac{\Delta z_{i-1}}{\Delta z_i} + \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta z_{i-1} + \Delta z_i} \frac{\Delta z_i}{\Delta z_{i-1}} \quad (i = 2, 3, \dots) . \quad (3)$$

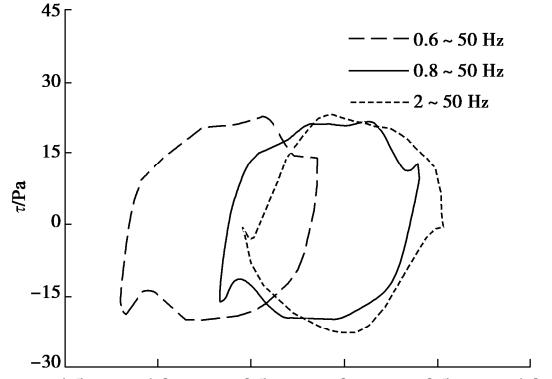
式中: $u_i = u(z_i, t)$ 为 $\ddot{u}(z_i, t)$ 的积分。

2.2 加速度数据处理分析

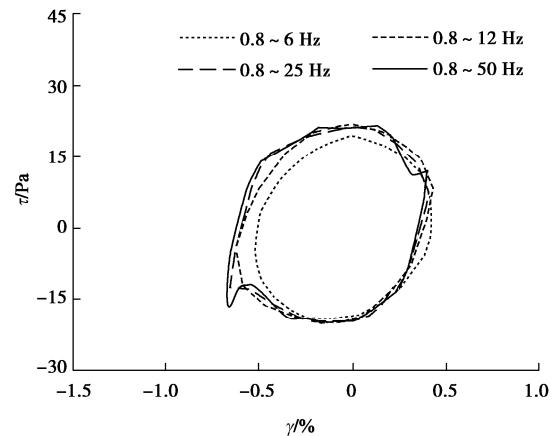
模型地基内部某一位置土体的应力应变滞回曲线可通过分析该位置土体的位移时程曲线得到, 而位移时程曲线通过对加速度时程进行二次积分得到。由于加速度传感器采集的时域信号中通常夹杂许多无用信号, 影响数据的分析给试验结果, 因此在对加速度信号进行分析前需要对信号进行修正处理, 包括基线修正、滤波等步骤。这里选取二次多项式进行基线修正, 选取四阶的巴特沃斯带通进行滤波。下面主要分析滤波频率上下限取值对滞回曲线的影响。

图1表示加速度为 $0.1g$ 深度为 0.15 m 处, 带通滤波中低频、高频的取值变化对应力应变曲线的影响。由图1(a)可知, 固定滤波高频率为 50 Hz 改变中低频下限(分别取 0.6 , 0.8 , 2 Hz)对应力应变滞回曲线有较大的影响, 当滤波频率为 $0.6\sim 50\text{ Hz}$ 时, 出现较为显著的零点偏移现象; 当 $2\sim 50\text{ Hz}$ 带通滤波时得到的滞回圈形状较其他发生比较明显的变化。当滤波频率为 $0.8\sim 50\text{ Hz}$ 时, 土体的滞回曲线可基本反映其动力状态。由图1(b)可知, 固定滤波低频率为 0.8 Hz 改变高频上限(分别取 6 , 12 , 25 , 50 Hz)对应力应变滞回曲线的线型有较大影响。当滤波高频取值降低, 应力应变滞回曲线逐渐趋于光滑且滞回圈面积出现缩小, 当滤波高频取值 50 Hz 时有明显的剪胀现象, 而当滤波高频取值降低至 6 Hz 时, 剪胀现象完全消失。加速度数据进行分析处理结果表明采用 $0.8\sim 50\text{ Hz}$ 带通滤波处理可以较真实反映各试验工况下土体的应力

应变曲线, 上述方法对加速度反演计算得到的应变精度可以达到 0.01% 。因此, 本文试验采集的加速度主要采用 $0.8\sim 50\text{ Hz}$ 进行带通滤波处理。



(a) 滤波频率上限值不变, 改变滤波频率下限值



(b) 滤波频率下限值不变, 改变滤波频率上限值

图1 滤波频率对应力应变关系曲线的影响

Fig. 1 Effects of filter frequency on stress-strain hysteresis loops

2.3 等效剪切模量计算

动剪切模量是衡量土体刚度的重要指标^[34]。由于土体振动过程产生的残余应变的影响, 应力应变滞回曲线会出现不闭合的现象, 导致通过闭合曲线面积计算动剪切模量存在一定困难, 为有效分析土体剪切模量, 本文采用等效剪切模量来代表动剪切模量, 具体计算方法为^[35]

$$G = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} . \quad (4)$$

式中: τ_{\max} , γ_{\max} 分别为一个滞回圈内的最大剪应力和最大剪应变, 对应地, τ_{\min} , γ_{\min} 分别为剪应力和剪应变的最小值。研究表明当应变范围在 $0.01\%\sim 0.5\%$ 时采用此简化方法得到的等效剪切模量较为准确^[35]。

2.4 等效剪切波速计算

剪切波速能有效反应土体的剪切刚度, 模型试验中测量剪切波速的方法较多^[36], 本文通过在模型地基

表面施加一个小幅脉冲荷载, 采用模型地基内部的加速度传感器记录脉冲波的传播时间, 通过计算相邻两个加速度传感器间距与接受脉冲信号时间差值之比得到土体的等效剪切波速^[37-38]。需要指出的是采用此方法得到的剪切波速较弯曲元偏小。

3 温控微生物加固地基模型动力响应

3.1 动剪应力应变关系

图 2 例举了振动加速度为 $0.2g$, 钙质砂模型地基在埋深为 0.25 m 处土体的动剪应力应变关系曲线。由图中可知, 随着微生物加固程度的提高, 模型地基土体的动强度有所增强, 具体表现在, 未加固地基的最大剪应变在 2.8% 左右, 而随着微生物加固的进行, 动剪应变缩减至 0.4% 左右, 且应力应变滞回圈面积逐渐缩小、骨干曲线斜率增大、峰值应变以及产生的能量耗散逐渐减小。

图 3 例举了不同微生物加固程度的模型地基在 $0.2g$ 加速度作用下, 不同循环振次和不同土体深度的动剪应力应变关系。由图 3 (a) 可知, 对于未加固模型地基 UM, 土体深度为 $0.25, 0.35\text{ m}$ 处, 15 周循环振次的最大剪应变 γ_{\max} 已达到 2% , 此时地基已发生明显的液化现象, 超孔隙水压力比近似为 1。液化破坏后应力应变滞回曲线接近平行于水平轴, 斜率近似为 0, 这表明模型地基土已完全丧失抗剪强度。

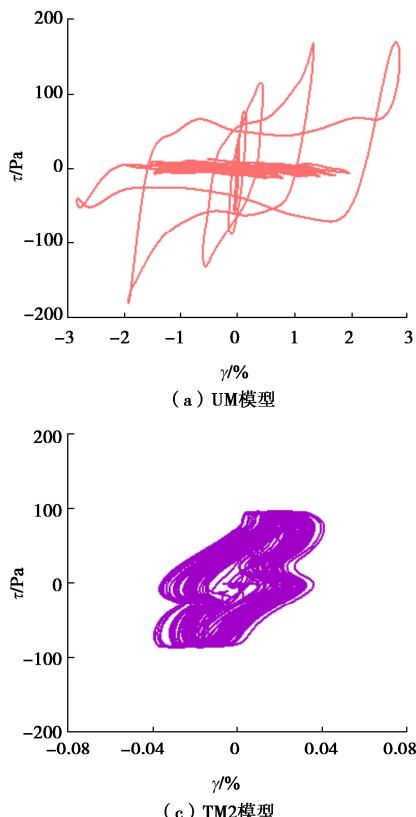


图 2 不同微生物加固程度对应力应变关系曲线的影响

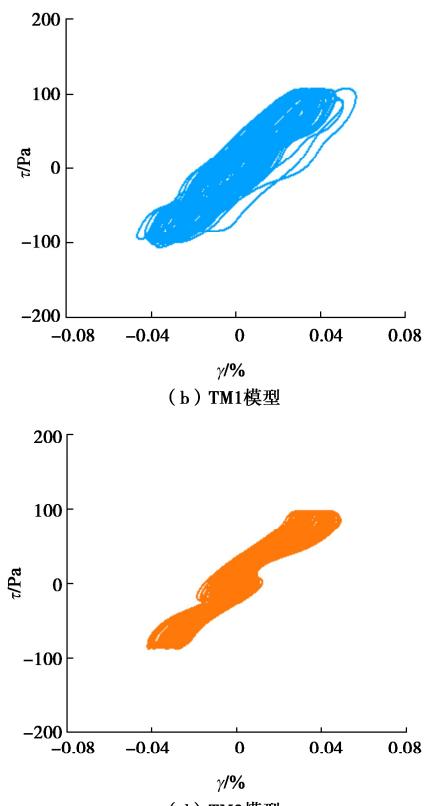
Fig. 2 Effects of biotreated level on dynamic stress-strain relation

对比图 3 (b) ~3 (d) 可以看出, 随着微生物加固程度的提高, 模型地基土的动强度显著提高。在相同埋深和循环振次下, 随着微生物加固程度的提高, 应力应变滞回曲线面积逐渐减小, 骨干曲线斜率呈现出逐渐增大的趋势。在 TM3 模型地基中, 15 周循环振次下 $H=0.35\text{ m}$ 处土体的最大剪应变值为 0.03% , 表明模型地基土体仍然保留较高的抗剪强度。另外, 对于单个不同加固程度的模型地基, 随着埋深的增加, 应力应变滞回圈的面积逐渐增大, 斜率逐渐提高, 与未加固地基中的规律一致, 表明模型箱底部的动强度较弱, 易发生明显的变形。经微生物加固后的模型地基土体, 不同振动周次下的应力应变滞回圈基本重合, 也说明土体整体上仍保持较高的完整性。同时, 图 3 中不同加固程度的土体出现了一定程度的零点偏移现象, 推测可能是由于振动过程中传感器位置发生改变或者由于加速度时程的低频信号扰动造成的变形计算值偏移。

3.2 剪切模量

本节采用等效剪切模量计算方法, 分析模型地基土体在不同深度处的剪切模量。为保证数据的合理性, 计算处理时, 对应变范围为 $0.005\% \sim 1\%$ 的数据点进行了分析, 并略去了异常数据。

图 4 例举了 $0.05g$ 加速度下, 不同加固程度的钙质砂模型地基土体等效剪切模量随剪应变的发展规



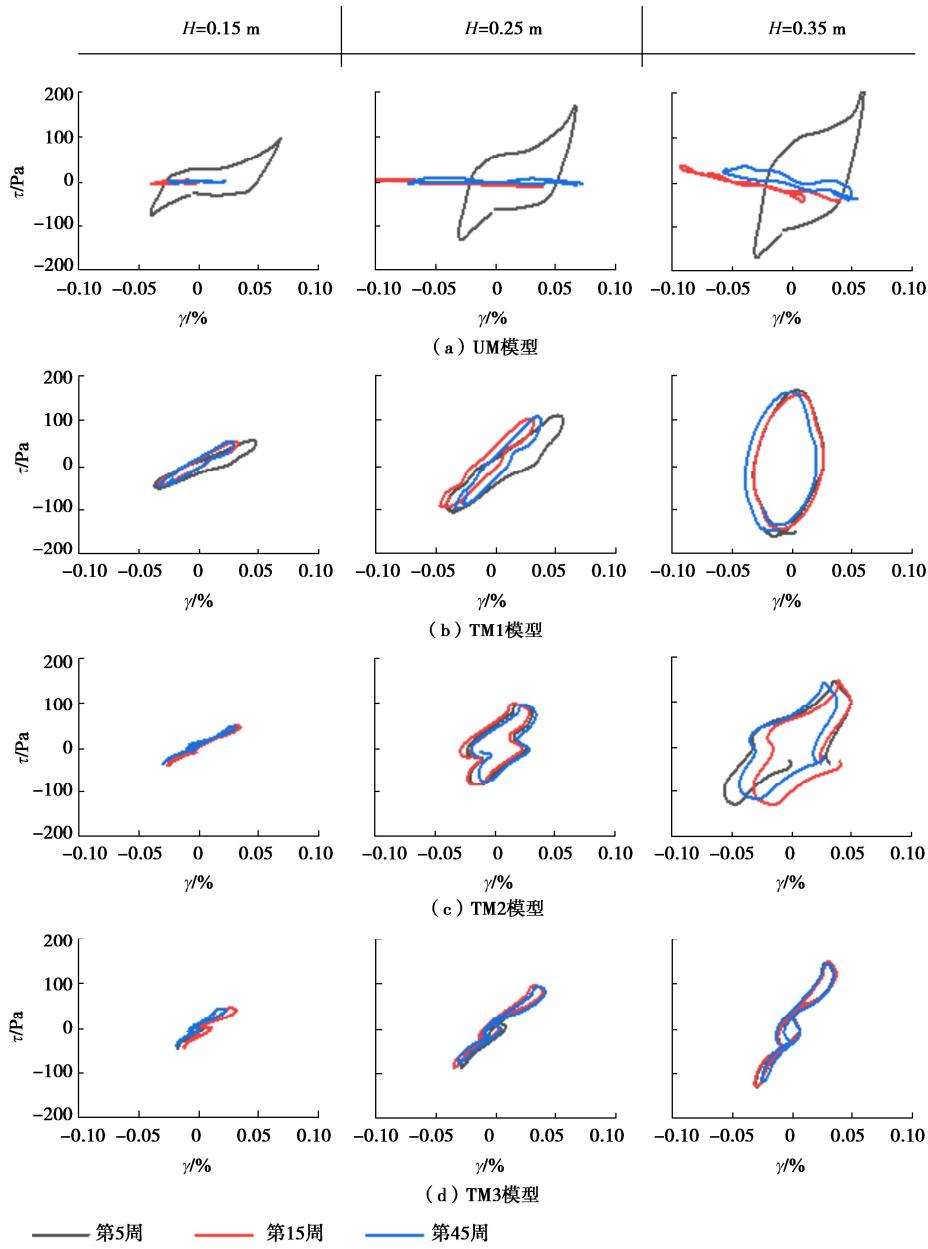


图3 不同微生物加固程度模型地基在不同深度动剪应力-应变关系

Fig. 3 Dynamic shear stress-strain relation of ground models with different biotreated levels at different depths

律。由图可知, 随着剪应变的增大, 等效剪切模量呈指数量型衰减, 且随着埋深的增加, 土体受力逐渐增加, 剪切模量逐渐变大, 但衰减幅度也随之增大。对 TM1 模型地基, 在 $H=0.35$ m 处, 剪切模量的衰减幅度约为 1.4 MPa, 而在 $H=0.15$ m 处的衰减幅度仅为 0.2 MPa, 根据拟合曲线可发现, 当剪应变达到 0.1% 左右时, 不同埋深处土体动剪切模量将衰减至接近零, 完全丧失刚度, 该结果与前人研究结论一致^[6, 39-41]。

图 5 给出了在剪应变取 0.01% 时, 等效剪切模量随加固次数的变化趋势。由图可知, 随着微生物加固次数的增加, 等效剪切模量逐渐提高, 但增加幅度逐渐放缓。如 0.35 m 埋深处土体的剪切模量从未加固状态的 0.49 MPa 增加到 0.63 MPa, 微生物加固 2 次和 3

次分别为 0.65, 0.67 MPa。随着埋深的降低, 剪切模量随微生物加固程度的变化逐渐变小, 0.15 m 处未加固的剪切模量为 0.16 MPa, 微生物加固 3 次后仅为 0.2 MPa 左右。

图 6 分析了不同微生物加固程度下, 不同深度处土体在不同加速度荷载下的等效剪切模量随剪应变衰减规律。由图可知, 对于 UM 地基, 经历不同大小振动荷载后, 土体的刚度衰减规律并未发生较大变化, 符合统一的衰减规律, 但在不同深度处的衰减幅度上有所差别。如 0.35 m 处等效剪切模量衰减幅度约为 0.4 MPa, 而 0.15 m 处的衰减幅度仅为 0.2 MPa。同时, 在不同微生物加固程度的模型地基中, 也可观察到相同的规律。随着土体埋深的增加, 微生物加固土体剪

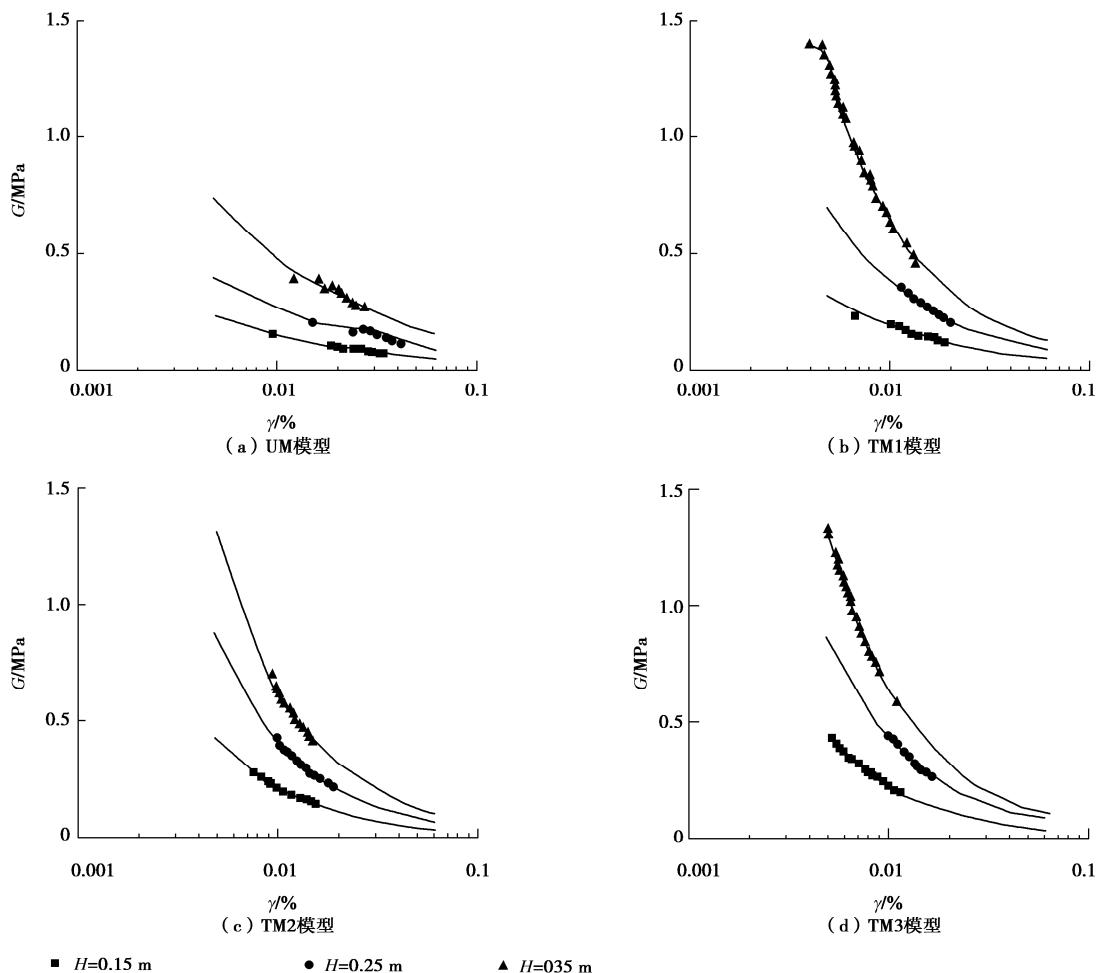


图 4 不同微生物加固程度模型地基剪切模量衰减规律

Fig. 4 Degradation of shear modulus for ground models with different biotreatments

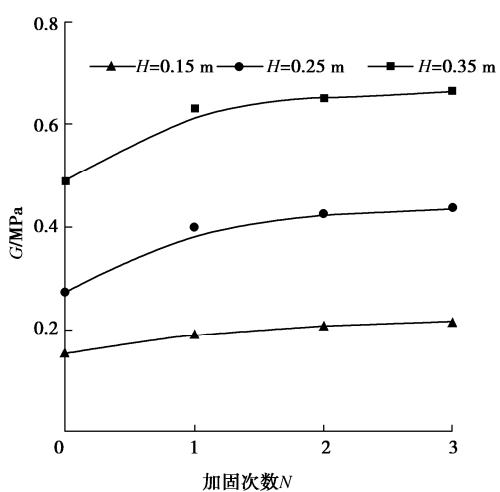


图 5 微生物加固程度对剪切模量大小的影响

Fig. 5 Effects of biotreated level on shear modulus

切模量衰减幅度增大, 具体表现在: 对于 TM1, TM2, TM3 模型地基, 在 H 为 0.15, 0.25 m 处剪切模量衰减的幅度差别不大, 但 $H=0.35$ m 处明显增大, 这表明在模型地基底部的土体稳定性要弱于上部土体, 更易于发生失稳破坏。另外, 随着历史振动荷载的发展,

剪切模量变化范围呈向右发展的趋势, 表明模型地基在经历前期振动荷载后, 土体刚度有所衰减, 可能是由于振动荷载下微生物胶结发生破坏所导致的。

3.3 剪切波速

本次试验利用 S 羊角锤对模型振动台台面进行一次轻微的锤击, 锤击产生的脉冲荷载在模型地基土体内传播, 利用加速度传感器采集脉冲信号, 最后通过等效剪切波速的计算方法获得不同深度、不同加固程度土体的剪切波速大小。图 7 给出了不同微生物加固程度对钙质砂地基土体剪切波速的影响规律。

由图 7 可以看出, 未加固土体的剪切波速在 63 m/s 左右且随着埋深的增加而有所增大, 这是由于剪切波速会随着上覆土压力的增大而增大所导致的, 与前人研究结论一致^[41]。对于微生物加固后的模型地基, 这一现象不明显, 并且在 0.35 m 处土体的剪切波速有减小的趋势, 这一现象随着加固程度的提高而愈发明显, 推测是由于加固不均匀, 即深部土体的加固效果相较于上部土体有所降低^[42-44]导致通过微生物加固提升的剪切波速要大于由上覆荷载引起的剪切波

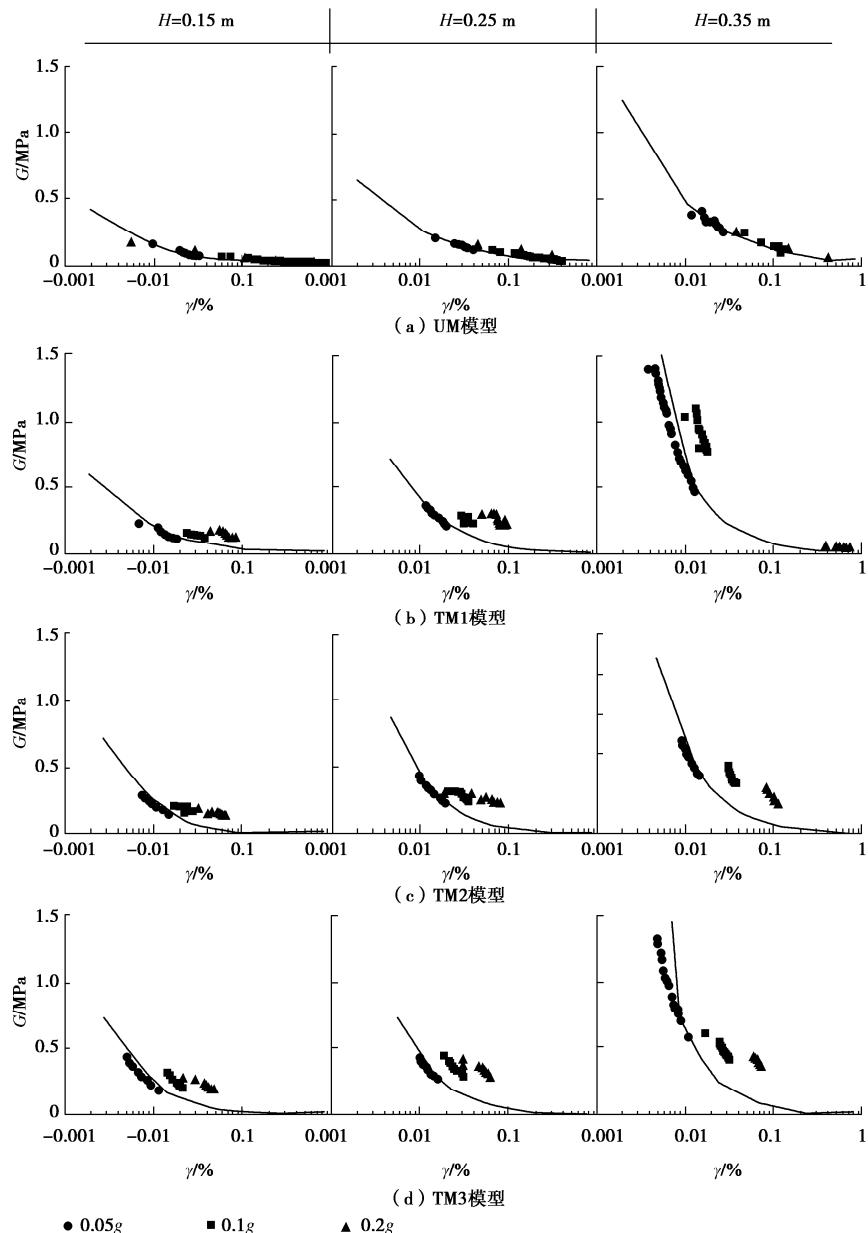


图 6 不同微生物加固程度模型地基在不同深度处剪切模量衰减规律

Fig. 6 Degradation of shear modulus for ground models with different biotreated levels at different depths

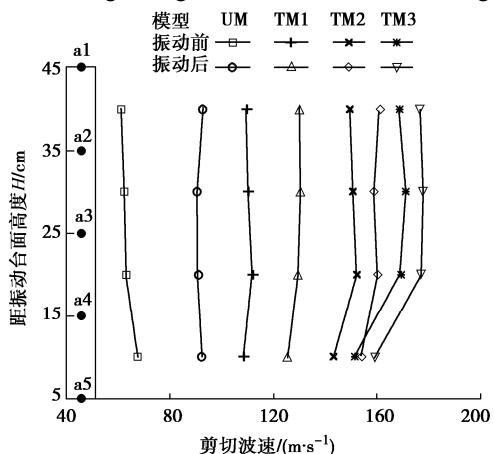


图 7 不同微生物加固程度模型地基剪切波速变化规律

Fig. 7 Evolution of shear wave velocity for ground models with different biotreatment levels

速变化。对于所有模型地基，振动后，土体的剪切波速会发生较大幅度的提升。TM1, TM2, TM3 模型地基的均值剪切波速分别为 110, 149, 165 m/s; 振动后，UM, TM1, TM2, TM3 的剪切波速分别为 91, 129, 159, 173 m/s。可以看出，UM, TM1 模型地基经历振动作用后，剪切波速增加幅度要明显高于 TM2, TM3 模型地基，这是由于，对于 UM, TM1 模型地基，振动后因为土体发生液化和较大幅度的地基沉降，土体密实度显著提高，进而导致剪切波速值明显增大；而对于 TM2, TM3 模型地基，由于微生物加固的作用，模型地基沉降要远低于 UM, TM1 地基，土体密实度增加不明显，剪切波速增加幅度偏小。

通过与上文中剪切模量的变化趋势对比发现，剪

切模量的增量要大于剪切波速的增量，这是由于本文计算的等效剪切模量对应的应变为 0.01% 左右，而剪切波速反应的是弹性范围内 (<0.00001%) 的土体刚度。因此，不能直接比较剪切模量和剪切波速的变化规律。

3.4 动强度规律

振动荷载作用下，不同埋深的地基土的等效动应力比 CSR 可通过该埋深处土体对应的动剪应力和上覆土压力的比值计算得到^[28]。将本文 4 种不同加固程度模型地基的等效 CSR 及相应破坏振次 N_f 绘制在 CSR- N_f 坐标系中；同时，通过统一动强度准则^[28]可获得 4 种不同程度微生物加固钙质砂动强度曲线如图 8 所示。

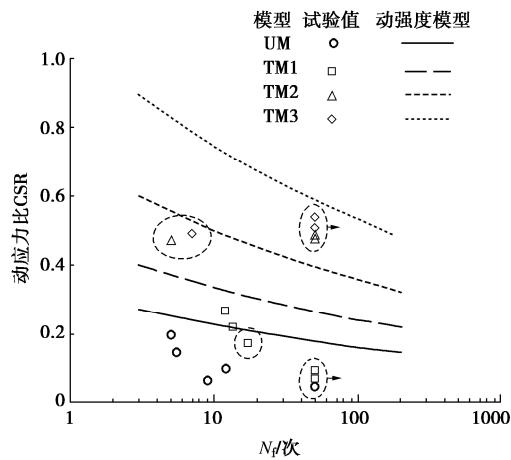


图 8 不同微生物加固程度模型地基 CSR- N_f 关系

Fig. 8 Relationship between CSR and N_f for bio-ground models with different biotreated levels

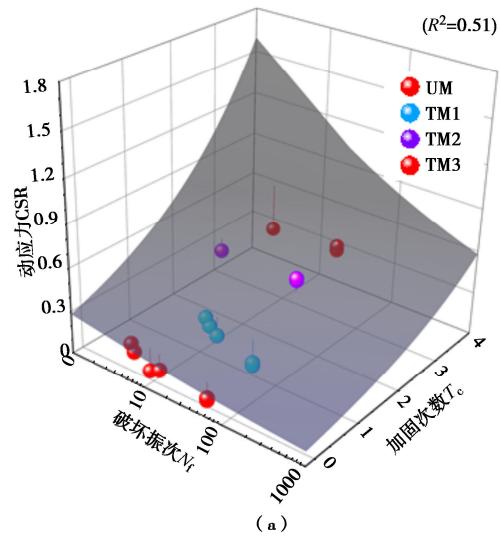
由图 8 可知，振动台模型试验得到的微生物加固钙质砂动强度的总体发展规律与统一动强度准则公式模拟曲线大体一致。也即动强度随着振次的增大而减小；相同振次下，微生物加固程度越高，动剪应力比值也越大。试验结果中，由于振动台模型试验的循环振动次数较短，图 8 中灰色虚线圈对应的土体未达到破坏振次；红色虚线圈对应为模型地基中下层土体动强度值明显低于统一动强度准则的模拟值，这可能是由于模型地基中底部土体加固效果弱于上部土体，导致其动强度值偏低。

值得说明的是，模型振动台微生物加固试验的反应用量和 MICP 反应效率与动三轴微生物加固试验有一定差异；同时，不同试验条件下，土体有效应力条件、边界效应影响等也存在一定差异，导致图 8 中振动台模型地基土的动强度规律与统一动强度准则曲线存在较明显差异。

为了进一步分析动三轴获得统一动强度方程的适

用性，将振动台试验地基动强度与统一动强度方程^[28]进行比较，如图 9 (a) 所示，三维曲面为考虑加固次数统一动强度方程^[28]计算结果，点代表振动台试验地基动强度，可以看出大部分数据点在曲面下方，即统一动强度方程得到的值偏高。考虑到地基模型微生物加固的均匀性较动三轴试样差，得到的强度值偏小。为了体现模型地基动强度的降低，将统一动强度方程乘以小于 1 的系数 k_f ，通过最佳拟合获得该系数为 0.76，如图 9 (b) 所示，修正后的考虑模型条件下强度降低的修正统一动强度方程能够对振动台试验强度规律进行较合理地模拟。

$$\text{统一动强度方程: } \text{CSR} = 0.302 \exp(0.415 T_c) N_f^{-0.147}$$



$$\text{修正统一动强度方程: } \text{CSR} = k_f \cdot 0.302 \exp(0.415 T_c) N_f^{-0.147}, \quad k_f = 0.76$$

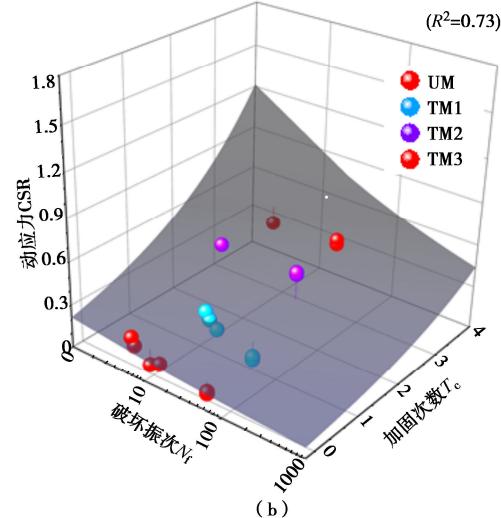


图 9 考虑加固次数的统一动强度方程与微生物加固地基模型动强度比较

Fig. 9 Comparison between unified dynamic strength considering biotreating cycles and strength from bio-ground models

4 结语

本文开展温控微生物加固的钙质砂模型地基振动台模型试验, 系统研究了微生物加固程度和土体深度对模型地基动应力应变关系、剪切模量、剪切波速及动强度发展规律等动力特性的影响, 得到如下结论:

通过加速度时程反演分析研究, 求解得到模型地基不同埋深土体的等效剪应力与剪应变参数; 研究了带通滤波频率取值对土体动应力应变关系的影响, 合理选取0.8~50 Hz的带通滤波频率, 对本试验加速度时程进行滤波处理; 通过加速度时程滤波分析研究, 合理得出等效剪切模量和通过脉冲信号推导剪切波速的分析方法。

微生物加固能显著改善地基土体的动力与抗液化特性。随着微生物加固程度的提高, 钙质砂模型地基动力响应特性有显著变化。其中, 应力应变滞回圈骨干曲线的斜率逐渐增大, 滞回圈面积、动剪应变以及土体能量的耗散逐渐减小。

不同微生物加固程度和土体深度的动力响应特性存在一定差异性。相同振次下, 随着微生物加固程度的提高, 动剪切模量逐渐增大, 但增大幅度逐渐降低; 较浅层土体, 深部土体的剪切模量衰减速率要更明显。剪切波速值随着微生物加固程度的提高而显著提高, 振动后的土体剪切波速值要高于振动前, 这种差异性会随着加固程度的提高而减小。考虑加固次数和折减系数的统一动强度方程可以较为合理地模拟振动台试验所获得的微生物加固钙质砂动强度规律。

参考文献:

- [1] WANG X Z, JIAO Y Y, WANG R, et al. Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea[J]. Engineering Geology, 2011, **120**(1/2/3/4): 40-47.
- [2] XIAO Y, WANG L, JIANG X, et al. Acoustic emission and force drop in grain crushing of carbonate sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, **145**(9): 04019057.
- [3] SINGH S C, CARTON H, TAPPONNIER P, et al. Seismic evidence for broken oceanic crust in the 2004 sumatra earthquake epicentral region[J]. Nature Geoscience, 2008, **1**(11): 777-781.
- [4] 胡进军, 郝彦春, 谢礼立. 潜在地震对我国南海开发和建设影响的初步考虑[J]. 地震工程学报, 2014, **36**(3): 616-621. (HU Jinjun, HAO Yanchun, XIE Lili. Effects of potential earthquakes on construction and development in South China Sea region[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, **36**(3): 616-621. (in Chinese))
- [5] VAHDANI S, PYKE R, SIRIPRUSANEN UJTRN. Liquefaction of Calcareous Sands and Lateral Spreading Experienced in Guam as A Result of the 1993 Guam Earthquake[C]// 5th US- Japan workshop on Earthquake resistant design of lifeline facilities and countermeasures against soil liquefaction, Snowbird Utah, 1994: 117-123.
- [6] SEED HB, IDRISI IM. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis[R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center (EERC), 1970.
- [7] 高冉, 叶剑红. 中国南海吹填岛礁钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(10): 3897-3908, 3919. (GAO Ran, YE Jianhong. Experimental investigation on the dynamic characteristics of calcareous sand from the reclaimed coral reef islands in the South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(10): 3897-3908, 3919. (in Chinese))
- [8] 马维嘉, 陈国兴, 秦悠, 等. 初始主应力方向角对饱和珊瑚砂液化特性影响的试验[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(3): 592-600. (MA Weijia, CHEN Guoxing, QIN You, et al. Experimental studies on effects of initial major stress direction angles on liquefaction characteristics of saturated coral sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(3): 592-600. (in Chinese))
- [9] ZHANG Y L, DING X M, CHEN Z X, et al. Seismic responses of slopes with different angles in coral sand[J]. Journal of Mountain Science, 2021, **18**(9): 2475-2485.
- [10] MURFF J D. Pile capacity in calcareous sands: state of the art[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**(5): 490-507.
- [11] WU Q, DING X M, CHEN Z X, et al. Shaking table tests on seismic responses of pile-soil-superstructure in coral sand[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, **26**(7): 3461-3487.
- [12] LIU H X, ZHANG J M, ZHANG X D, et al. Seismic performance of block-type quay walls with liquefiable calcareous sand backfill[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **132**: 106092.
- [13] 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 Hanlong, et al. Research advances in biogeotechnologies[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 643-653. (in Chinese))

- [14] 彭 勘, 温智力, 刘志明, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固有机质黏土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 733-740. (PENG Jie, WEN Zhili, LIU Zhiming, et al. Experimental research on MICP-treated organic clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 733-740. (in Chinese))
- [15] 桂 跃, 吴承坤, 刘颖伸, 等. 利用微生物技术改良泥炭土工程性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(2): 269-278. (GUI Yue, WU Chengkun, LIU Yingshen, et al. Improving engineering properties of peaty soil by biogeotechnology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(2): 269-278. (in Chinese))
- [16] 欧孝夺, 莫 鹏, 江 杰, 等. 生石灰与微生物共同固化过湿性铝尾黏土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(4): 624-631. (OU Xiaoduo, MO Peng, JIANG Jie, et al. Experimental study on solidification of bauxite tailing clay with quicklime and microorganism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(4): 624-631. (in Chinese))
- [17] 谢约翰, 唐朝生, 尹黎阳, 等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 675-682. (XIE Yuehan, TANG Chaosheng, YIN Liyang, et al. Mechanical behavior of microbial-induced calcite precipitation(MICP)-treated soil with fiber reinforcement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 675-682. (in Chinese))
- [18] LIU Hanlong, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, **41**(1): 1-14.
- [19] XIAO Y, HE X, EVANS T M, et al. Unconfined compressive and splitting tensile strength of basalt fiber-reinforced biocemented sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, **145**(9): 04019048.
- [20] XIAO Y, ZHANG Z, STUEDLEIN A W, et al. Liquefaction modeling for biocemented calcareous sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, **147**(12): 04021149.
- [21] 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. (LIU Hanlong, 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. (in Chinese))
- [22] FATTAHI S M, SOROUGH A, HUANG N. Biocementation control of sand against wind erosion[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, **146**(6): 04020045.
- [23] JIANG N J, SOGA K. The applicability of microbially induced calcite precipitation (MICP) for internal erosion control in gravel-sand mixtures[J]. Geotechnique, 2017, **67**: 42-55.
- [24] CLARÀ SARACHO A, HAIGH S K, EHSAN JORAT M. Flume study on the effects of microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) on the erosional behaviour of fine sand[J]. Géotechnique, 2021, **71**(12): 1135-1149.
- [25] XIAO P, LIU H L, XIAO Y, et al. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **107**: 9-19.
- [26] XIAO P, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Effect of relative density and biocementation on cyclic response of calcareous sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, **56**(12): 1849-1862.
- [27] 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.
- [28] 肖 鹏. 微生物温控加固钙质砂动力与液化特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020. (XIAO Peng. Study on Dynamic and Liquefaction Characteristics of Temperature Controlled MICP-Treated Calcareous Sand[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese))
- [29] PRASAD S, TOWHATA I, CHANDRADHARA G P, et al. Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering[J]. Current Science, 2004, **87**: 1398-1404.
- [30] TSUKAMOTO Y, ISHIHARA K, SAWADA S, et al. Settlement of rigid circular foundations during seismic shaking in shaking table tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, **12**(4): 462-470.
- [31] DARBY K M, BOULANGER R W, DEJONG J T, et al. Progressive changes in liquefaction and cone penetration resistance across multiple shaking events in centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, **145**(3): 04018112.
- [32] TURAN A, HINCHBERGER S D, EL NAGGAR H. Design and commissioning of a laminar soil container for use on small shaking tables[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, **29**(2): 404-414.

- [33] KOGA Y, MATSUO O. Shaking table tests of embankments resting on liquefiable sandy ground[J]. Soils and Foundations, 1990, **30**(4): 162-174.
- [34] 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.
- [35] AFACAN K B, BRANDENBERG S J, STEWART J P. Centrifuge modeling studies of site response in soft clay over wide strain range[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(2): 04013003.
- [36] FENG K, MONTOYA BM. Influence of confinement and cementation level on the behavior of microbial-induced calcite precipitated sands under monotonic drained loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, **142**(1): 04015057.
- [37] CONLEE C T, GALLAGHER P M, BOULANGER R W, et al. Centrifuge modeling for liquefaction mitigation using colloidal silica stabilizer[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(11): 1334-1345.
- [38] DIHORU L, BHATTACHARYA S, MOCCIA F, et al. Dynamic testing of free field response in stratified granular deposits[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, **84**: 157-168.
- [39] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, **98**(7): 667-692.
- [40] WANG K, BRENNAN A. Behaviour of saturated fibre-reinforced sand in centrifuge model tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **125**: 105749.
- [41] ELGAMAL A, YANG Z H, LAI T, et al. Dynamic response of saturated dense sand in laminated centrifuge container[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(5): 598-609.
- [42] 张鑫磊, 陈育民, 张 喆, 等. 微生物灌浆加固可液化钙质砂地基的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(6): 1023-1031. (ZHANG Xinlei, CHEN Yumin, ZHANG Zhe, et al. Performance evaluation of liquefaction resistance of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(6): 1023-1031. (in Chinese))
- [43] 刘汉龙, 马国梁, 肖 杨, 等. 微生物加固岛礁地基现场试验研究[J]. 地基处理, 2019, **1**(1): 26-31. (LIU Hanlong, MA Guoliang, XIAO Yang, et al. In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands[J]. Journal of Ground Improvement, 2019, **1**(1): 26-31. (in Chinese))
- [44] VAN PAASSEN L A, GHOSE R, VAN DER LINDEN T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(12): 1721-1728.