

纤维加筋钙质砂液化及超静孔压增长特性研究

谭洁¹, 任非凡^{1*}, 沈超²

1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092

2. 上海勘察设计研究院(集团)股份有限公司, 上海 200070

摘要: 钙质砂地基液化是造成其上修建的防波堤、码头及机场跑道等关键基础设施地震损毁的主要原因。作为一种环境友好型土工材料, 纤维加筋技术可显著提高钙质砂抗液化能力, 在南海岛礁工程建设中展现出良好的应用前景。本文开展了一系列不排水循环单剪试验, 研究纤维掺量 F_c 和循环应力比 CSR 对加筋钙质砂超静孔压、变形特性及抗液化强度的影响。在此基础上, 提出了适用于纤维加筋钙质砂的新型超静孔压发展预测模型。研究表明: 纤维掺量 F_c 的增加可明显减小钙质砂超静孔压和剪应变发展速率, 提高其抗液化强度; 随着 CSR 的增加, 加筋效果逐渐减弱。纤维加筋可改变钙质砂在液化过程中的变形模式, 有效抑制变形急剧增大现象的出现。此外, 纤维加筋钙质砂超静孔压发展模式与硅质砂存在较大差异, 相同循环振次下钙质砂超静孔压累积速率更快, 传统 Seed 模型难以准确刻画其超静孔压发展模式的变化特征。随着 CSR 的增加, 其超静孔压发展模式由 S 型逐渐转变为双曲线型, 而随着 F_c 的增加, 发展模式则呈现相反的演变趋势。研究成果可为纤维加筋土技术在岛礁区基础设施抗液化处理中的应用提供重要的理论依据。

关键词: 钙质砂; 纤维加筋; 液化; 抗液化强度; 超静孔压

中图分类号: P642

收稿日期: 2025-08-26

Study on Liquefaction and Excess Pore Pressure Development Characteristics of Fiber-Reinforced Calcareous Sand

Tan Jie¹, Ren Feifan^{1*}, Shen Chao²

1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., LTD, Shanghai 200070, China

Abstract: Liquefaction of calcareous sand foundations is a major cause of seismic damage to critical infrastructure, including breakwaters, wharves, and airport runways. Fiber reinforcement, an environmentally friendly geotechnical materials, can effectively improve the liquefaction resistance of calcareous sand and exhibits great promise for island and reef engineering in the South China Sea. In this study, a series of undrained cyclic simple shear tests were conducted to examine the effects of fiber content (F_c) and cyclic stress ratio (CSR) on excess pore pressure, deformation, and liquefaction resistance of fiber-reinforced calcareous sand. A new prediction model for excess pore pressure development of fiber-reinforced calcareous sand was proposed based on the test results. The findings show that increasing F_c significantly reduces the accumulation rates of excess pore pressure and shear strain, thereby enhancing liquefaction resistance, whereas the reinforcement effect weakens as CSR rises. Fiber reinforcement also alters the deformation pattern of calcareous sand during liquefaction and effectively inhibits the occurrence of sharp increase in deformation. Furthermore, the excess pore pressure development in fiber-reinforced calcareous sand differs significantly from that in siliceous sand, and it presents a faster excess pore pressure accumulation rate under the same cyclic ratio, resulting in the traditional Seed model inadequate for accurately capturing its evolution. With increasing CSR, excess pore pressure development pattern shifts from S-shaped to hyperbolic, while higher F_c induces the opposite trend. These results provide important theoretical support for applying fiber reinforcement to liquefaction mitigation in island and reef infrastructures.

基金项目: 上海浦江人才计划项目 (23PJD101); 国家自然科学基金项目 (4187224); 中央高校基本科研业务费项目

作者简介: 谭洁 (1994-), 女, 博士研究生, 从事土工合成材料加筋土结构动力特性研究. E-mail: 2210404@tongji.edu.cn. ORCID: 0009-0002-1573-8107.

***通讯作者:** 任非凡 (1980-), 男, 山西运城人, 地质工程专业, 博士, 副教授, 主要研究方向为地质灾害防治、加筋土结构等. E-mail: feifan_ren@tongji.edu.cn

Key words: calcareous sand; fiber reinforcement; liquefaction; liquefaction resistance; excess pore pressure.

0 引言

随着我国“海洋强国”战略的深入实施,南海岛礁工程建设进入快速发展阶段。以钙质砂为主要填筑材料的地基、护岸防波堤、码头等关键基础设施正在大规模建设中(高冉和叶剑红, 2019)。钙质砂是海洋生物残骸经物理、化学和生物作用形成的一种高碳酸钙含量的颗粒集合体,具有颗粒形状不规则、高压缩性、强度低、易破碎等特殊性质(Wang *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2022, 2024; Wang *et al.*, 2023)。我国南海海域位于亚欧板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块的交汇带,地震活动频繁,历史记录显示该区域近百年来已发生多次中强震(吴杨等, 2024)。地震作用下,钙质砂易发生超静孔压累积与液化,不仅直接导致地基失稳和护岸、码头等工程结构的破坏,还可能触发岸坡滑移、堤坝失效及连锁次生灾害,从而加速灾害链的演化过程(Chen *et al.*, 2024; 周林等, 2025)。液化已成为基础设施损毁得关键诱因(Li and Huang, 2023)。因此,开展钙质砂抗液化处理技术研究,揭示其超静孔压增长机理及液化特性,对于防控地震诱发的灾害链效应、保障南海岛礁关键基础设施的抗震安全与风险防控体系构建具有重要的理论意义和工程应用价值。

目前诸多学者针对动力荷载下钙质砂液化特性已开展一系列研究,取得了许多有价值的成果(Chen *et al.*, 2021; Qin *et al.*, 2024; Rui *et al.*, 2020; Salem *et al.*, 2013; 郭舒洋等, 2024)。虞海珍等(2006)通过空心圆柱扭剪试验研究了主应力连续旋转和初始主应力方向角对饱和钙质砂超静孔压累积特性的影响,发现超静孔压比与广义剪应变之间符合双曲线关系。马维嘉等(2019)对钙质砂和石英砂开展了动三轴对比试验,指出钙质砂抗液化强度高于石英砂,二者超静孔压发展模式存在一定差异,据此提出了可描述钙质砂超静孔压增长的预测模型。南海岛礁吹填钙质砂工程中的地层具有显著的多尺度颗粒分布特征,其粒径组成呈现粉粒、砂粒与砾粒的多相混杂分布状态(袁晓铭等, 2019; 吴杨等, 2022)。王鸾等(2021)和吴杨等(2024)研究了含砾量对钙质砂砾混合料液化特性的影响,发现粗颗粒的存在可有效延缓混合料中超静孔压和应变的发展速率,其抗液化强度随含砾量的增加而显著提高。Li *et al.* (2022)通过系统的动三轴试验,研究了细颗粒含量对钙质砂动力特性的影响,建立

了适用于含细颗粒钙质砂的对数和修正 Seed 超静孔压预测模型。鉴于钙质砂在强震下的易液化特性,微生物固化已成为钙质砂抗液化处理领域的研究热点(Xiao *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020; Shan *et al.*, 2022)。Xiao *et al.* (2019)对 MICP 固化钙质砂开展了动三轴试验,分析了相对密实度和固化程度对其超静孔压和变形特性的影响,发现微生物固化不仅改变了钙质砂的液化破坏模式,使其从流动液化转变为循环活动性破坏,而且在提高抗液化强度方面较传统致密化方法表现出更优的加固效果。然而,微生物固化成本较高、加固范围有限、在复杂海洋环境下的耐久性的问题尚不完全清楚(骆赵刚等, 2023)。此外,传统抗液化处理技术(如振冲加密、化学注浆等)存在施工成本高、环境扰动大等突出问题,在生态敏感的岛礁区域应用受到限制。

人工合成纤维作为绿色低碳工程材料,通过其特有的加筋与约束作用机制,可有效改良土体的抗剪强度和变形性能(Liu *et al.*, 2011),并显著增强颗粒土在动荷载作用下的抗液化能力(Rasouli and Fatahi, 2022),在岛礁区基础设施抗液化处理中具有极好的应用前景。Ye *et al.* (2017)对纤维加筋硅质砂开展了一系列动三轴和空心扭剪试验,分析了纤维长度、掺量和相对密实度对其抗液化强度的影响,发现抗液化强度随纤维长度和掺量的增加而逐渐提升,且在中等密实度试样中加筋效果较松散试样更为显著。Ghadr *et al.* (2020)对纤维加筋粉砂开展了一系列动三轴试验,指出随着纤维掺量的增加,试样的微观结构发生显著改变:颗粒间接触点数量增加,接触力减小,同时超静孔压消散效率显著提升,加筋硅质砂抗液化强度随之提高。

综上所述,关于钙质砂液化特性的研究已较为系统,针对加固钙质砂液化特性的相关研究也有所开展,但现有研究多集中于微生物加固方法,对纤维加筋钙质砂液化特性的系统研究仍十分有限。相较之下,关于纤维加筋砂的液化特性研究多以普通硅质砂为对象,其颗粒形貌、力学特性及液化机制与钙质砂存在显著差异。因此,现有成果难以直接适用于纤维加筋钙质砂的液化行为预测与机理分析,这在一定程度上制约了纤维加筋技术在岛礁工程中的应用与推广。鉴于此,深入开展纤维加筋钙质砂液化特性研究,对于完善其液化机理理论、拓展工程应用具有重要的科学意义与工程价值。

本文利用动单剪仪对纤维加筋钙质砂开展了一系列不排水循环试验,分析了纤维掺量和循环应力

比对其超静孔压、变形特性及抗液化强度的影响。建立了适用于纤维加筋珊瑚砂的超静孔压预测模型，研究成果可为纤维加筋土技术在岛礁区基础设施抗液化处理的应用提供重要的理论依据和技术支撑。

1 试验设计

1.1 试验仪器

试验采用 KTL 动态单剪系统（见图 1），该系统配置双作动器结构，可独立施加法向应力与水平剪切应力。该设备支持应力/应变双控制模式，能精准施加正弦波、方波、三角波及用户自定义波形等动态荷载。其技术指标如下：最大法向荷载 5 kN（精度为 $\pm 0.1\%$ FS），最大剪切荷载 2 kN（精度为 $\pm 0.1\%$ FS）；最大轴向和水平向位移分别为 ± 20 mm 和 ± 10 mm，精度为 0.03 mm。作为岩土动力特性测试的标准设备，该系统通过模拟地震荷载工况，可精确测定土体动强度、动弹性模量及阻尼比等关键参数，完全满足本研究中纤维加筋珊瑚砂在地震荷载下的动力液化特性测试需求。剪切盒由 20 个低摩擦的涂有特富龙材料的环境叠而成，每个环内径为 50 mm，厚度为 1 mm；环具有足够的刚性以提供有效的侧向约束，确保 K_0 固结条件。

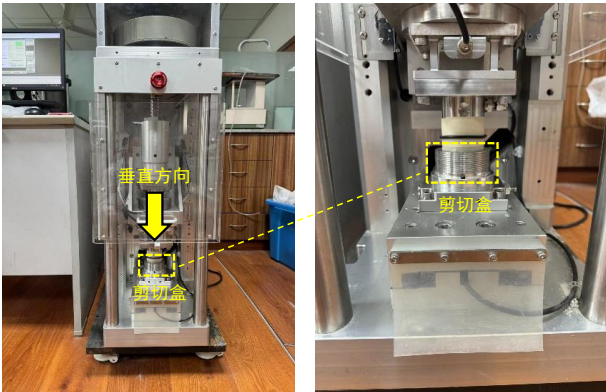


图 1 KTL 动态单剪系统

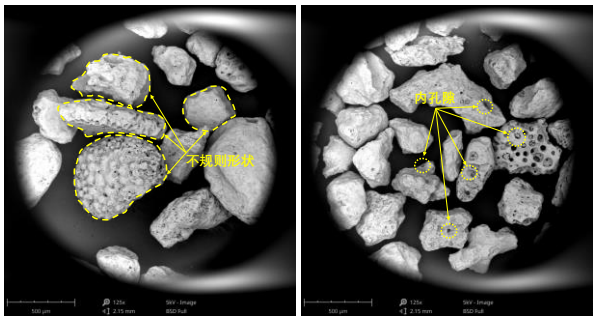
Fig.1 KTL dynamic simple shear system

1.2 试验材料及试样制备

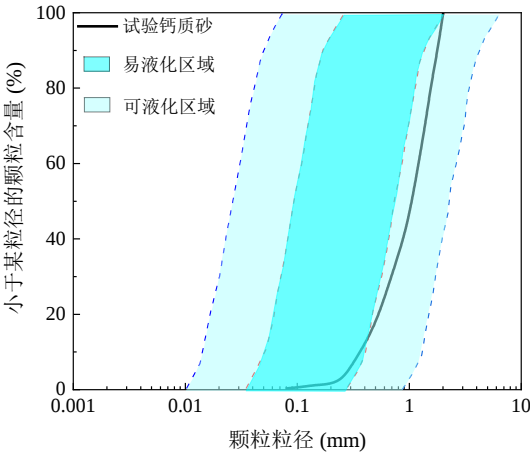
试验用钙质砂取自我国南海某岛礁，其颗粒呈白色，主要矿物成分为碳酸钙。图 2（a）给出了典型钙质砂颗粒在放大 125 倍条件下的电镜扫描图，可见测试钙质砂具有形状不规则、棱角度高和富含大量内孔隙的特征。图 2（b）为钙质砂级配曲线，根据砂土颗粒级配液化边界条件（Rasouli and Fatahi, 2022），测试钙质砂可归类为可液化砂土。试验用钙质砂基本物理参数如下：最大孔隙比 $e_{\max}$ 为 1.26，最小孔隙比为 $e_{\min}$ 为 0.71，比重 G_s 为 2.85，

不均匀系数 C_u 为 3.29，曲率系数为 C_c 为 1.08，属级配不良砂。试验用加筋材料为聚丙烯纤维，长度为 12 mm，直径为 0.025 mm，比重为 0.91，抗拉强度为 550 MPa，弹性模量为 4150 MPa。该纤维长度已在大量研究中证明能够显著提高砂土的抗液化强度，并在相关研究中广泛应用（Ye et al., 2017; Zhang et al., 2020）。

本试验中试样的具体制备步骤如下：（1）将橡胶膜安装于剪切盒底座，并沿其周围布置特氟龙涂层刚性环组；（2）在刚性环外围安装自制的对开式金属定位模具，有效约束橡胶膜拉伸过程中环组的位移，同时采用 O 型圈将橡胶膜多余部分固定于模具上，形成标准尺寸（ $d=50$ mm， $H=20$ mm）的圆柱形制样空间；（3）采用分层填筑法，将定量配制的钙质砂-纤维混合料分四层均匀填入橡胶膜内；（4）将成型试样精确安装于单剪仪，为后续试验做好准备。试样安装完成后，对其进行饱和处理：首先通入高纯度二氧化碳气体置换试样内部空气，持续通气 1 小时以确保充分置换；随后采用自下而上的渗流方式注入脱气水进行水头饱和，直至排水量达到试样体积的 2 倍时停止。饱和完成后，施加 100 kPa 的初始有效竖向应力进行固结，期间打开排水通道，待竖向位移稳定后，认为固结完成，并关闭排水通道。



(a)



(b)

图 2 典型钙质砂颗粒电镜扫描图及级配曲线

Fig. 2 Scanning electron micrograph image of representative calcareous sand particles and grain size distribution curve

1.3 试验方案

为研究纤维掺量 F_c 和循环应力比 CSR 对钙质砂液化特性的影响,本文在 F_c 为 0%, 0.25%, 0.50%, 0.75% 和 1% ($F_c = W_f/W_s$, 其中 W_f 和 W_s 分别为纤维和干燥钙质砂的质量), CSR 为 0.07, 0.08, 0.10 和 0.12 ($CSR = \tau/\sigma'_{v0}$, 其中 τ 为施加的剪应力幅值, σ'_{v0} 为初始有效竖向固结应力), 相对密实度 D_r 为 50%, 和 σ'_{v0} 为 100 kPa 条件下开展了一系列不排水循环单剪试验。由于过高的 F_c 会导致砂颗粒与纤维难以均匀混合, 进而影响加筋效果, 因此将最大 F_c 设定为 1%。液化通常发生在深度不超过 20 米的土层 (Huang and Jiang, 2010; Bhattacharya *et al.*, 2011)。Eseller-Bayat *et al.* (2013) 研究发现, 初始有效固结应力对土体动力荷载下的循环特性影响较小。因此, 本研究所有试样均在 100 kPa 初始有效竖向应力下固结, 该应力值所对应的深度处于易液化范围内。试验采用应力控制方式进行, 加载波形为正弦波, 频率为 0.1 Hz。本研究采用单幅剪应变幅值 $\gamma=3.75\%$ 作为液化判定标准 (Tomasello and Porcino, 2022), 并将对应的循环振次 N 定义为液化振次 N_L 。

表 1 不排水循环单剪试验工况

Table 1 Undrained cyclic simple shear test conditions

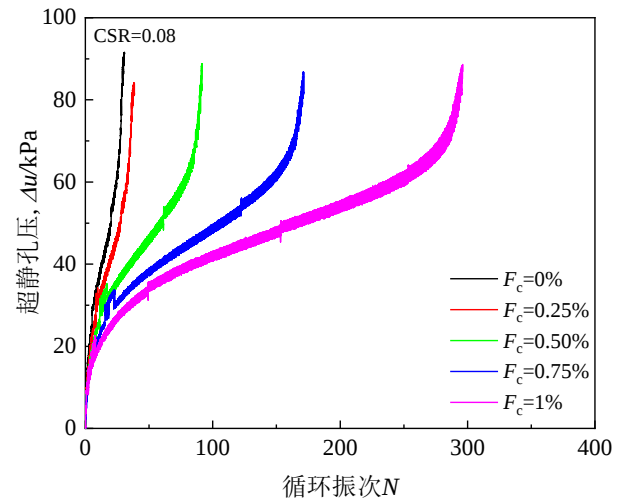
编号	纤维掺量 F_c (%)	相对密实度 D_r (%)	循环应力比 CSR
#1	0	50	0.07、0.08、0.10、0.12
#2	0.25		0.07、0.08、0.10、0.12
#3	0.50		0.07、0.08、0.10、0.12
#4	0.75		0.07、0.08、0.10、0.12
#5	1		0.07、0.08、0.10、0.12

2 试验结果分析

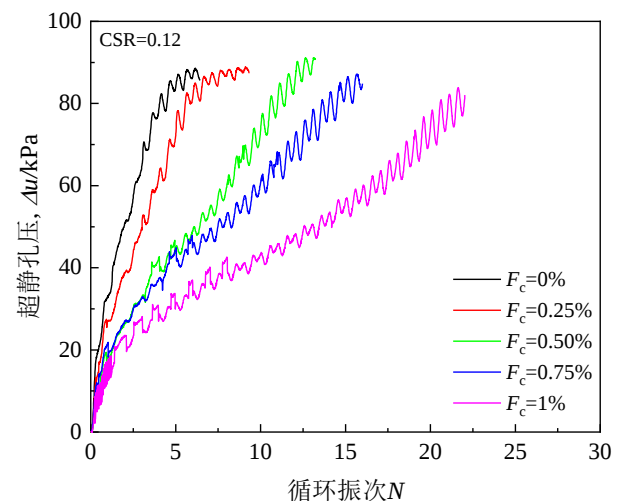
2.1 液化特性

图 3 给出了不同 F_c 和 CSR 条件下钙质砂超静孔压 Δu 随循环振次 N 变化曲线图。鉴于不同 CSR 条件下钙质砂试样的 Δu 发展规律呈现相似特征, 为突出研究重点并保证论述的简洁性, 该部分仅展示 CSR 为 0.08 和 0.12 条件下的典型工况试验数据。由图可见, CSR 和 F_c 均对钙质砂 Δu 发展速率具有一定影响。当 CSR 相同时, 随 F_c 的增加, Δu 发展速率明显减小。这是因为纤维加筋约束了循环荷载下试样中砂颗粒的错位和重排列, 减小了其变形发展, 进而降低了 Δu 累积速率; 试验条件下 ($F_c \leq 1\%$), F_c 越大, 纤维所能提供的约束作用越强, Δu 累积速率越慢。当 F_c 相同时, 随 CSR 的增加, Δu 发展速

率明显加快。由图 3 (b) 可见, 当 CSR=0.12 时, 纯钙质砂试样 ($F_c=0\%$) 在循环加载初期即表现出明显的 Δu 急剧增长特征, 仅经历 6 次循环即达到液化标准。这表明强震作用下钙质砂具有较高的液化敏感性, 因此在实际工程中需采取必要的抗液化加固措施。



(a)



(b)

图 3 超静孔压与循环振次关系曲线: (a) CSR=0.08; (b) CSR=0.12

Fig.3 Relationship curves of excess pore pressure and number of cycles: (a) CSR=0.08; (b) CSR=0.12

图 4 给出了不同 F_c 和 CSR 条件下钙质砂循环剪应变 γ_{cyc} 随循环振次 N 变化曲线图。由图可见, 不同 CSR 条件下纤维加筋钙质砂 γ_{cyc} 发展模式存在一定差异。当 CSR 较小时 (CSR=0.08), 试样在大多数循环加载下能抵抗刚度的降低, γ_{cyc} 基本保持不变或呈缓慢增长趋势; 随循环加载的持续进行, 试样中 Δu 不断累积, 有效应力降低, 软化响应加剧, 进而导致在较少的循环振次 N 下 γ_{cyc} 迅速增长直至

达到应变液化标准 ($\gamma_{cyc}=3.75\%$)。当 CSR 较大时 ($CSR=0.12$)，钙质砂 γ_{cyc} 发展特征表现出明显的 F_c 依赖性：当 F_c 较小时， γ_{cyc} 在加载初期即快速增长，试样在较少的循环振次 N 下即达到液化状态；而当 F_c 较高时， γ_{cyc} 发展模式与小 CSR 工况类似。总体而言，纤维加筋可明显降低 γ_{cyc} 发展速率，且减小效率随 F_c 增加而增强。这表明通过合理控制 F_c 可有效缓解强震（高 CSR）对钙质砂变形特性的不利影响。

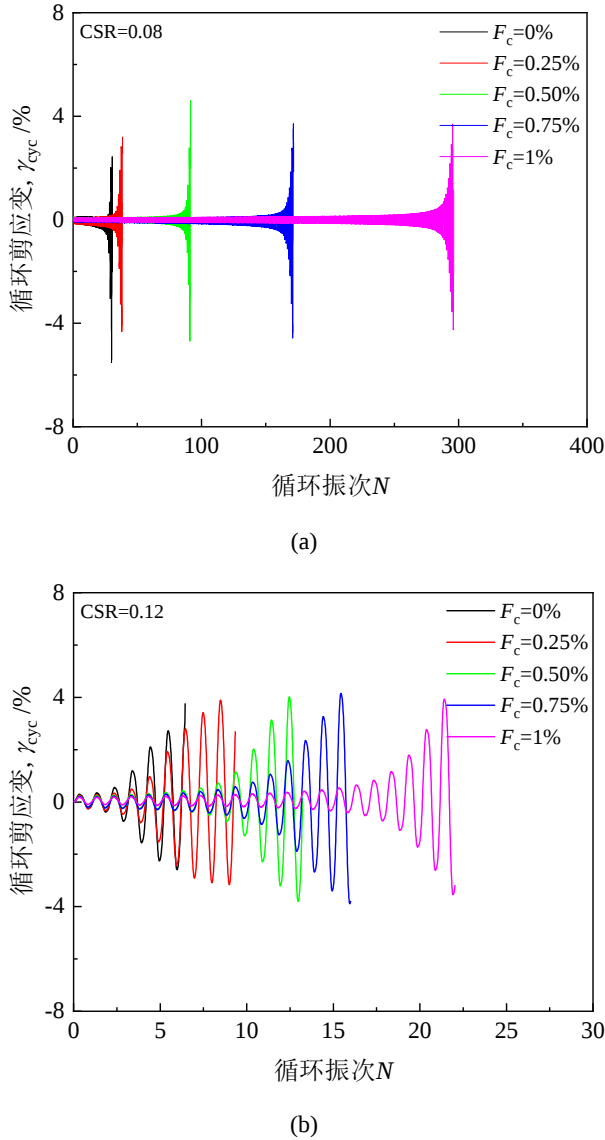


图4 循环剪应变与循环振次关系曲线：(a) $CSR=0.08$ ；(b) $CSR=0.12$

Fig.4 Relationship curves of cyclic shear strain and number of cycles: (a) $CSR=0.08$; (b) $CSR=0.12$

图5给出了不同 F_c 和 CSR 条件下钙质砂循环剪应力 τ_{cyc} 与循环剪应变 γ_{cyc} 滞回关系曲线图。由图可见，在循环加载初期，加筋钙质砂滞回曲线基本重叠；当 γ_{cyc} 累积至一定值后，滞回曲线开始呈现

明显的扩展趋势，随后在较少的 N 下即达到应变液化标准 ($\gamma_{cyc}=3.75\%$)。本研究将滞回曲线开始扩展至达到液化状态的发展过程定义为临界液化状态阶段（失稳阶段）。由图5可见，在不同 CSR 下，试样在失稳阶段所经历的 N 均随 F_c 的增加而显著提高。这表明纤维加筋可有效延缓钙质砂的液化进程，从而有效避免变形的急剧增大现象的出现。究其原因，在失稳阶段，纯钙质砂试样由于有效应力显著降低，在较小外力作用下即会产生较大变形；而对于纤维加筋试样，试样中三维分布的纤维网络能够有效包裹砂颗粒。当砂颗粒在外力作用下产生位移趋势时，纤维通过发挥其抗拉强度，可有效约束土颗粒位移，从而显著提升钙质砂在失稳阶段的抗变形能力和承载性能。

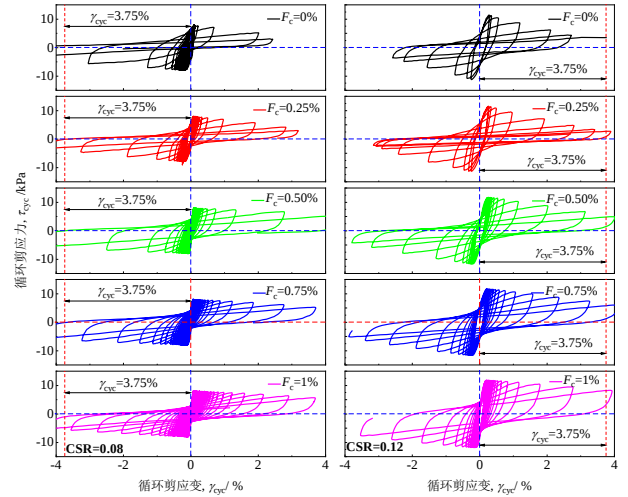


图5 循环剪应力与剪应变滞回关系曲线

Fig.5 Hysteresis relationship curves of cyclic shear stress and cyclic shear strain

2.2 抗液化强度

图6给出了纤维加筋钙质砂循环应力比 CSR 与液化时所需的循环振次 N_L 关系曲线，即抗液化强度曲线。由图可见，纤维加筋可明显提高钙质砂的抗液化性能，其抗液化强度随 F_c 的增加而增大。这是因为纤维通过界面剪切作用将拉应力传递至土骨架，形成附加约束效应，提高了土骨架的稳定性；随着 F_c 的增加，纤维在土体中相互交织形成三维网状结构，这种空间约束网络有效限制土颗粒位移，使得抗液化强度的进一步提升。当 F_c 相同时，随 CSR 的增加， N_L 逐渐减小，这与一般陆源土液化特性类似，即强震作用下土体液化敏感性增加。Saxena *et al.* (1988) 通过系统试验研究，建立了人工胶结砂 CSR 与液化振次 N_L 之间的定量关系：

$$CSR = A \times (N_L)^{-B} \quad (1)$$

式中， A 和 B 为与土体性质相关的拟合参数。

采用式 (1) 对不同 F_c 条件下纤维加筋钙质砂抗液化强度曲线进行拟合, 结果如图 6 中虚线所示。由图可见, 式 (1) 对试验数据拟合效果较好, R^2 介于 0.93~0.99 之间。由拟合结果深入分析可知, 参数 B 受纤维加筋影响较小, 基本维持在 0.19; 而参数 A 随 F_c 增加呈线性增加趋势 (见图 7(a)), 二者关系可表示为:

$$A = 0.063 \cdot F_c + 0.159 \quad (2)$$

为统一表征不同 F_c 条件纤维加筋钙质砂抗液化强度, 将式 (2) 及 $B=0.19$ 代入式 (1), 可得:

$$CSR = (0.063 \cdot F_c + 0.159) \times (N_L)^{-0.1} \quad (3)$$

图 7 (b) 对比分析了纤维加筋钙质砂抗液化强度的试验值与式 (3) 预测值。由图可见, 本文建立的预测模型具有较高的可靠性, 所有数据点的预测误差均控制在 10% 以内, 验证了式 (3) 在纤维加筋钙质砂抗液化性能评估中的适用性。

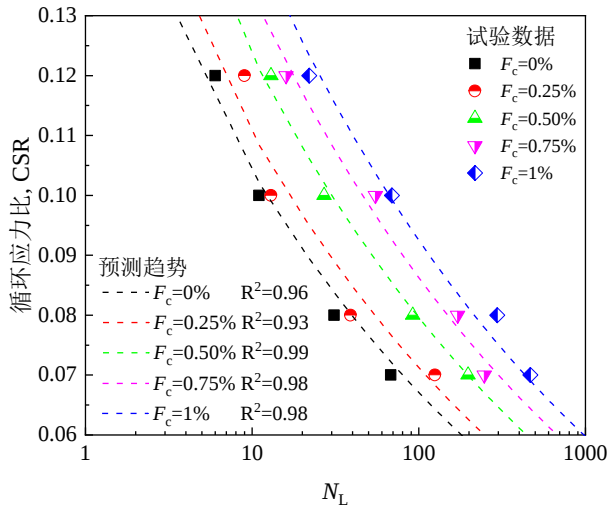


图 6 纤维加筋钙质砂抗液化强度曲线

Fig.6 Liquefaction resistance of fiber-reinforced calcareous sand

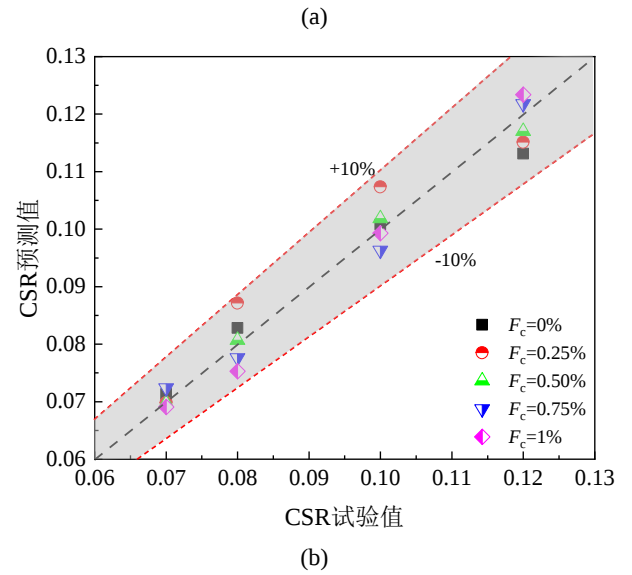
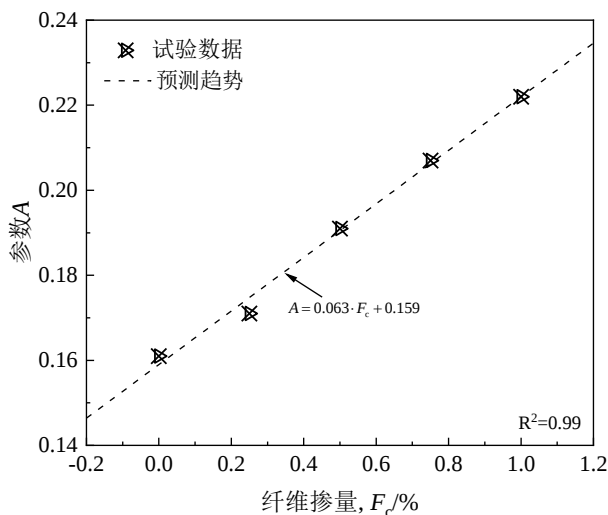


图 7 (a) 参数 A - F_c 关系曲线; (b) CSR 试验值与预测值对比
Fig.7 (a) relationship curves of parameter A - F_c ; (b) comparison between test values of CSR and predicted values

本研究提出抗液化强度改善系数 ($N_{L-impr} = N_{L-RE}/N_{L-un}$, 其中 N_{L-RE} 和 N_{L-un} 分别为加筋与纯钙质砂的液化振次), 用以定量表征纤维加筋效果。图 8 展示了不同 F_c 条件下 N_{L-impr} 与 CSR 的相关性。由图可知, 随着 F_c 的增加, N_{L-impr} 呈上升趋势。当 F_c 分别为 0.25%、0.50%、0.75% 和 1% 时, 各 CSR 条件下的最小 N_{L-impr} 值依次为 1.21、2.16、2.68 和 3.69。值得注意的是, 当 $F_c \geq 0.50\%$ 时, 钙质砂的抗液化强度出现明显提升。由图 (8) 可见, N_{L-impr} 随 CSR 增大总体呈先增加后减小的发展趋势。究其原因, 在较低 CSR 水平下, 试样累积变形和超静孔压发展缓慢, 纤维的抗拉强度难以充分激发, 对抗液化强度的提升作用有限; 在中等 CSR 水平下, 纤维与砂颗粒间的相互作用显著增强, 纤维抗拉性能得以充分发挥, 且适中的应力水平避免了纤维-土界面的过早破坏, 使加筋效果达到峰值; 而在高 CSR 水平下, 试样超静孔压迅速累积, 土体骨架结构在短时间内破坏, 纤维易发生拉拔失效、滑移甚至断裂。同时, 纤维周围土体迅速接近悬浮状态, 界面摩擦力显著降低, 从而导致加筋效果减弱。

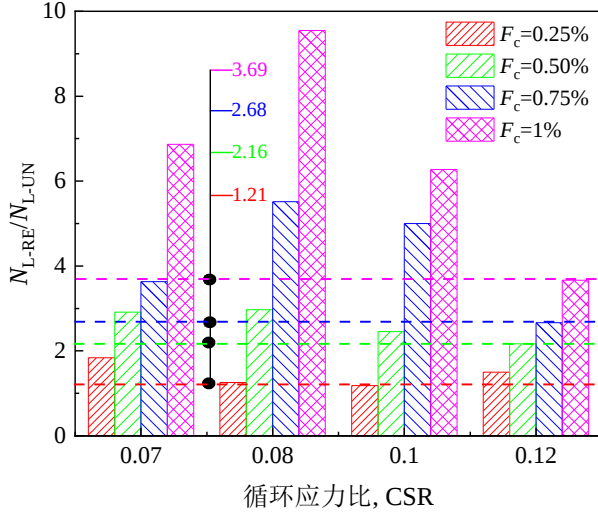


图 8 抗液化强度改善系数

Fig.8 Improvement factor for liquefaction resistance

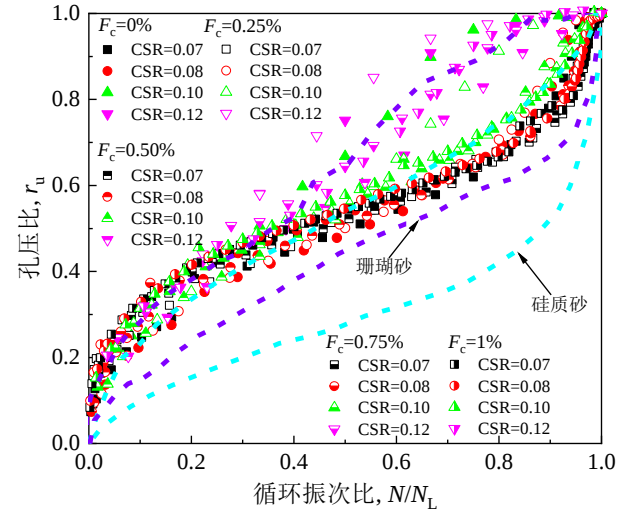
3 超静孔压发展预测模型

3.1 超静孔压比发展特性

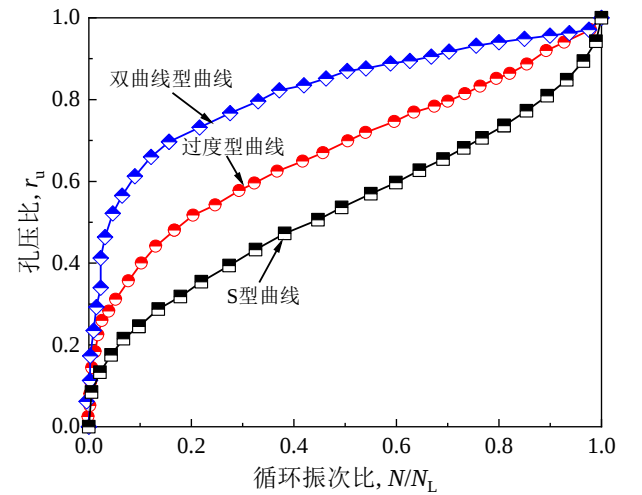
超静孔压比 r_u 定义为每一圈循环加载中峰值超静孔压 Δu 与初始有效竖向固结应力 σ'_{v0} 的比值 (马维嘉等, 2019)。图 9 (a) 给出了不同 CSR 和 F_c 下 r_u 与循环振次比 N/N_L 关系曲线。由图可见, r_u - N/N_L 曲线可归类为 3 种典型的发展模式: (1) S 型曲线; (2) 双曲线型曲线; (3) 介于 S 型和双曲线型曲线之间的过渡型曲线 (刘汉龙等, 2021), 如图 9(b) 所示。图 9(a) 中蓝色虚线是 Lee and Albaisa (1974) 给出的硅质砂超静孔压发展范围的上边界。由图可见, 相同 N/N_L 条件下, 测试钙质砂 r_u 发展超出了硅质砂超静孔压发展范围的上边界, 其 r_u 累积速率更快。加载初期 r_u 的快速增长是由于颗粒局部不稳定接触点消除和颗粒重排列等组构变化所致 (Asadi *et al.*, 2018)。这一解释也得到了离散元数值模拟的证实 (Kuhn *et al.*, 2014)。与硅质砂相比, 钙质砂具有易破碎和颗粒形状不规则的特点, 因此, 这种不稳定接触消除现象更加明显, 从而导致加载初期 r_u 增长更快。图 9 (a) 中紫色虚线是马维嘉等 (2019) 给出的不同 CSR 下 (CSR=0.15~0.25) 南沙珊瑚砂超静孔压发展范围的上边界。可见, 当 $r_u > 0.4$ 时, 纤维加筋钙质砂 r_u 发展在马维嘉等 (2019) 给出的南沙珊瑚砂超静孔压发展范围内; 但当 $r_u < 0.4$ 时, 加筋钙质砂 r_u 发展明显偏离了南沙珊瑚砂的上边界。

为深入研究 r_u - N/N_L 曲线发展规律, 图 10 对比分析了 F_c 和 CSR 对 r_u - N/N_L 曲线发展的影响。由图可见, CSR 和 F_c 均对钙质砂 r_u 发展模式具有一定

影响。当 F_c 相同时, 随着 CSR 增加, r_u - N/N_L 曲线发展模式逐渐由 S 型过渡到双曲线型; 当 CSR 相同时, 随着 F_c 增加, r_u - N/N_L 曲线发展模式由双曲线型向 S 型过渡。例如, 在 CSR=0.10, 当 F_c 分别为 0%、0.25% 和 0.75% 时, 曲线形态依次表现为双曲线型、过渡型和 S 型。通过深入分析试验数据发现, r_u - N/N_L 曲线形态与 N_L 存在显著相关性: 当 N_L 较小时, 由于加载初期 r_u 快速累积, 曲线呈现典型的双曲线特征; 反之, 当 N_L 较大时, 加载初期 r_u 发展相对缓慢, 曲线则表现出明显的 S 型特征。这表明纤维加筋不仅影响钙质砂抗液化强度, 还显著改变了其 r_u 发展模式。究其原因, 纤维与砂颗粒之间的相互作用有效地增强了砂土的结构稳定性, 减小砂颗粒滑移和错位, 限制了试样的塑性体积应变的发展趋势 (不排水条件下, 塑性体积应变发展趋势被超静孔压增长所抵消), 导致初期加载中 r_u 累积量明显减小, 进而影响了 r_u - N/N_L 曲线形态。



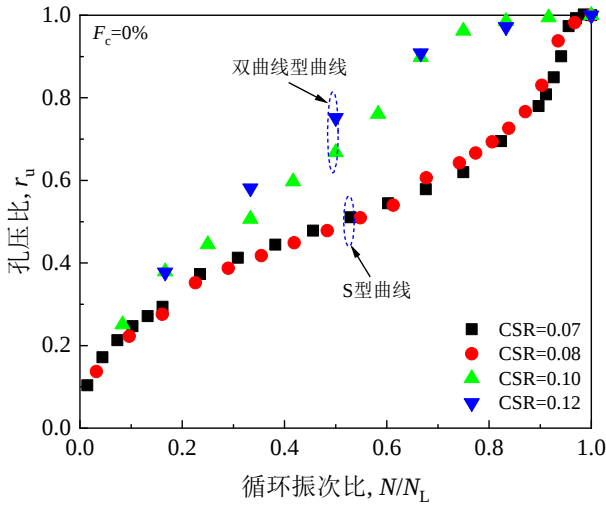
(a)



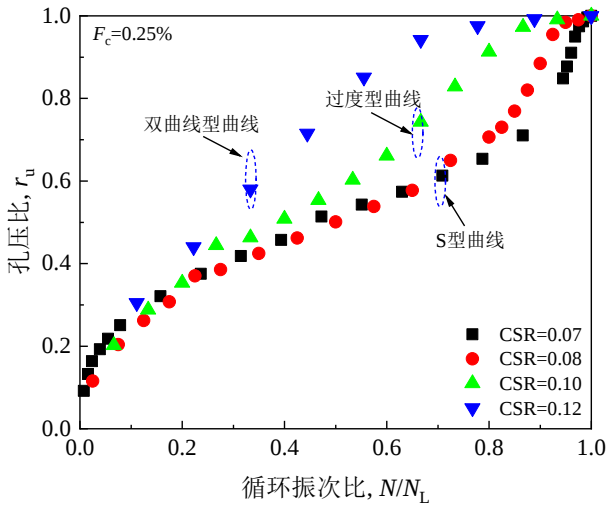
(b)

图 9 (a) 孔压比-循环振次比关系曲线; (b) 3 种典型孔压比发展模式

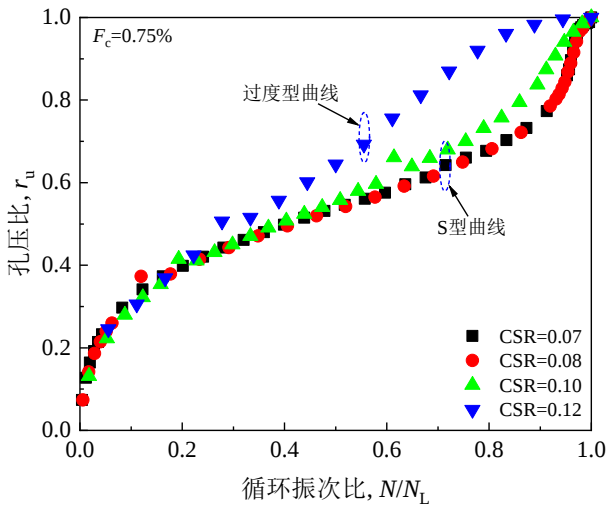
Fig.9 (a) Relationship curves of pore pressure ratio-number of cycle ratio; (b) three typical pore pressure ratio development models



(a)



(b)



(c)

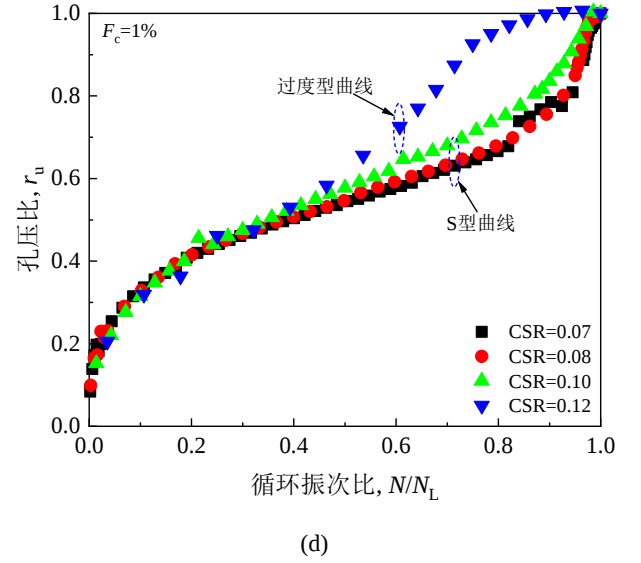


图 10 孔压比-循环振次比关系曲线: (a) $F_c=0\%$; (b) $F_c=0.25\%$; (c) $F_c=0.75\%$; (d) $F_c=1\%$

Fig.10 Relationship curves of pore pressure ratio-number of cycle ratio: (a) $F_c=0\%$; (b) $F_c=0.25\%$; (c) $F_c=0.75\%$; (d) $F_c=1\%$

3.2 新型超静孔压发展预测模型建立

定量评价砂土中超静孔压增长特性是开展土体液化机理研究的基础, 为此构建了多种超静孔压发展预测模型, 其中应用最为广泛的为 Seed 模型 (Zhou *et al.*, 2022):

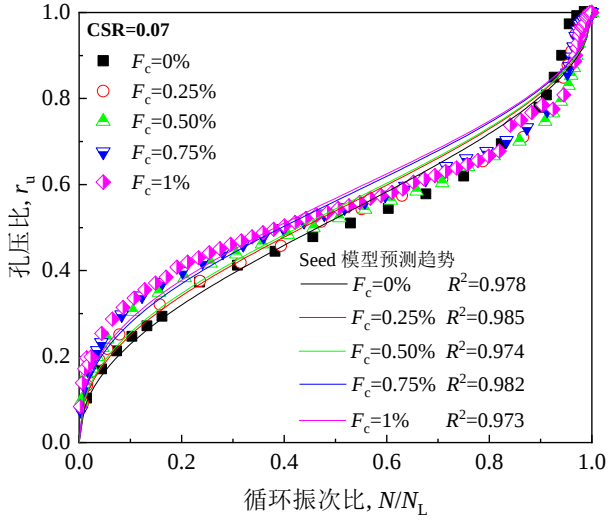
$$r_u = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{2\alpha}} \quad (4)$$

式中, α 为与土性有关的模型参数。

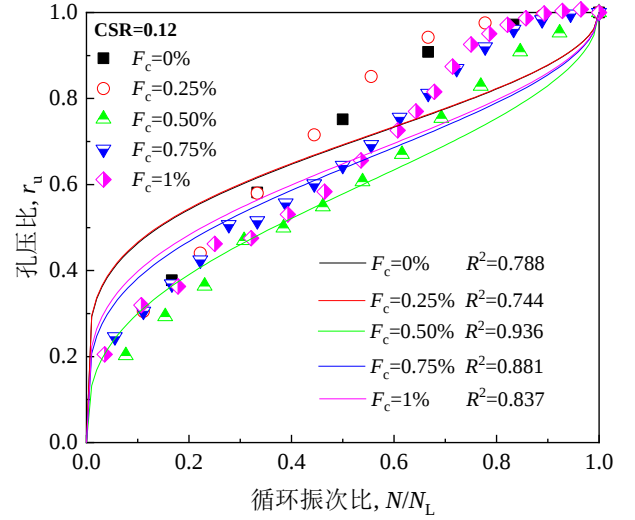
基于 Seed 模型, 本文对不同 F_c 和 CSR 条件下钙质砂的 r_u - N/N_L 关系进行了拟合分析, 见图 11 中实线所示。由图可见, 对于呈现 S 型特征的 r_u 发展曲线, Seed 模型表现出良好的拟合精度, 预测结果与试验数据吻合较好 ($R^2 > 0.95$)。但对于双曲线型发展模式的试验数据, Seed 模型的预测结果存在显著偏差 (R^2 最小仅为 0.788), 特别是在高 N/N_L 阶段, Seed 模型明显低估了加筋钙质砂 r_u 累积量。这是因为 Seed 模型是基于洁净硅质砂的试验数据建立的, 而纤维加筋钙质砂表现出更为复杂的特性, 进而限制了 Seed 模型对本文试验数据的适用性。鉴于此, 遵循 Seed 模型理论框架, 本文提出了适用于描述纤维加筋钙质砂 r_u 发展预测模型:

$$r_u = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_L} \right)^{\alpha \cdot (N/N_L)^\beta} \quad (5)$$

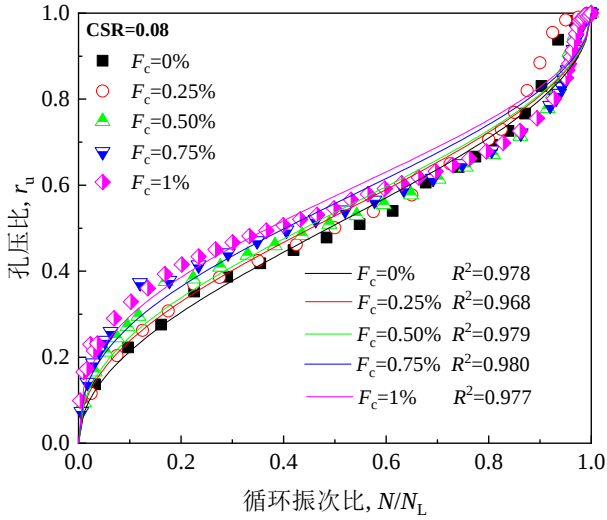
式中, α 和 β 为与土性、纤维加筋和测试条件有关的模型参数。



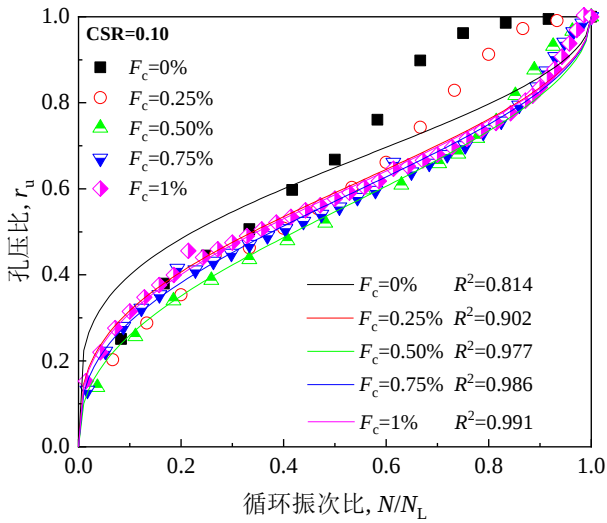
(a)



(d)



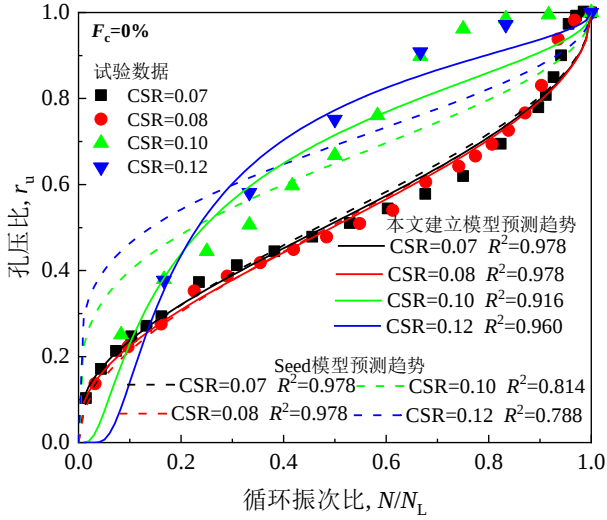
(b)



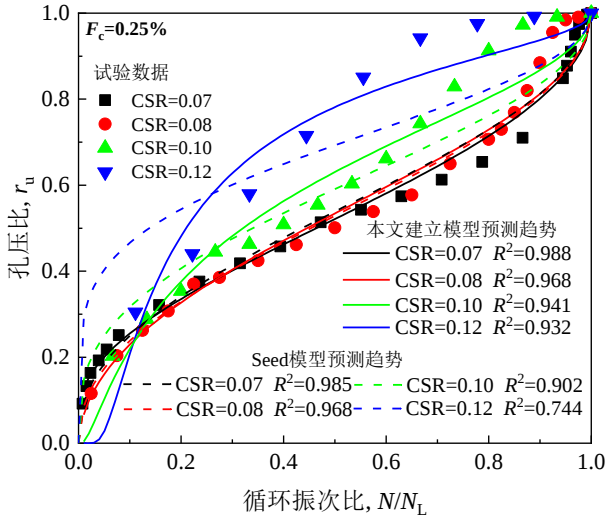
(c)

图 11 实测孔压比-循环振次比关系与 Seed 模型预测趋势对比: (a) CSR=0.07; (b) CSR=0.08; (c) CSR=0.10; (d) CSR=0.12
Fig.11 Comparison of the relationship between measured pore pressure ratio-number of cycle ratio with the Seed model prediction trend: (a) CSR=0.07; (b) CSR=0.08; (c) CSR=0.10; (d) CSR=0.12

图 12 对比分析了 Seed 模型与本文建立的模型在 $F_c=0\%$ 和 0.25% 条件下, 对不同 CSR 工况的 r_u-N/N_L 曲线拟合效果。图 13 对比了不同预测模型的可达系数 R 随 F_c 的变化规律。由图可见, 本文提出的式 (5) 能有效表征纤维加筋钙质砂 r_u 发展曲线从 S 型向双曲线型的渐进转变过程。与传统的 Seed 模型相比, 新模型展现出明显的精度提升, 其可达系数 R 始终保持在 0.90 以上。图 14 为模型参数 α 和 β 与 CSR 关系图。由图可见, 模型参数 α 和 β 随 CSR 的增大均呈现线性递减趋势, 二者关系可近似用线性函数表征。 F_c 对参数的变化也有一定影响。当 $CSR \leq 0.08$ 时, 不同 F_c 条件下, r_u-N/N_L 关系曲线几乎重叠 (均为 S 型), 此时 F_c 对 α 和 β 值的影响较小。当 $CSR > 0.08$ 时, 由于超静孔压发展模式的不同, 在 $F_c=0\% \sim 0.5\%$ 时, 随着 F_c 的增加, 参数 α 和 β 逐渐增大; 而当 $F_c=0.5\% \sim 1\%$ 时 (r_u-N/N_L 关系曲线几乎重叠), α 和 β 值趋于接近, 此时二者与 CSR 的关系可用统一的线性方程来表征。



(a)



(b)

图 12 试验数据与不同模型预测趋势对比: (a) $F_c=0\%$; (b) $F_c=0.25\%$

Fig.12 Comparison of test data with predicted trends by different models: (a) $F_c=0\%$; (b) $F_c=0.25\%$

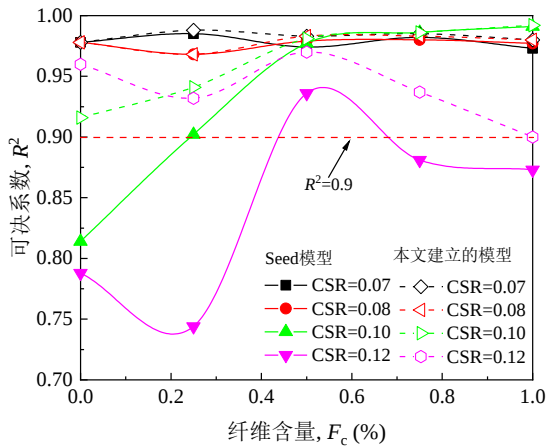
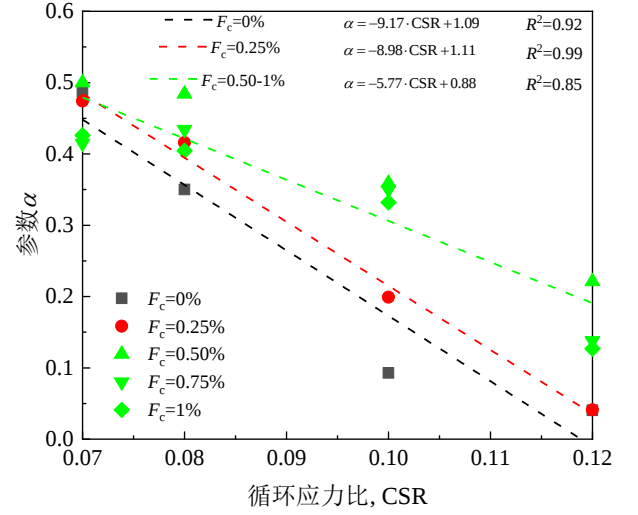
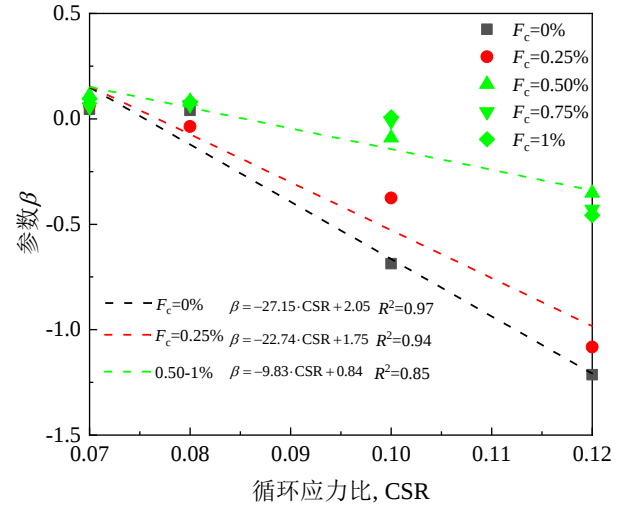


图 13 可决系数-纤维掺量关系曲线

Fig.13 Relationship curves of determination coefficient-fiber content



(a)



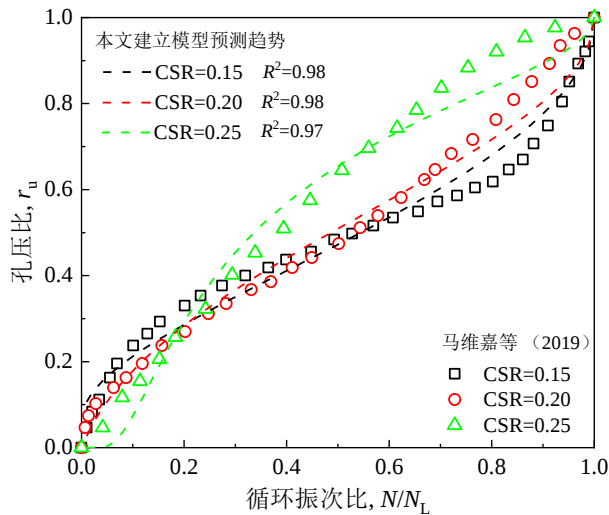
(b)

图 14 模型参数-循环应力比关系曲线: (a) 参数 α ; (b) 参数 β

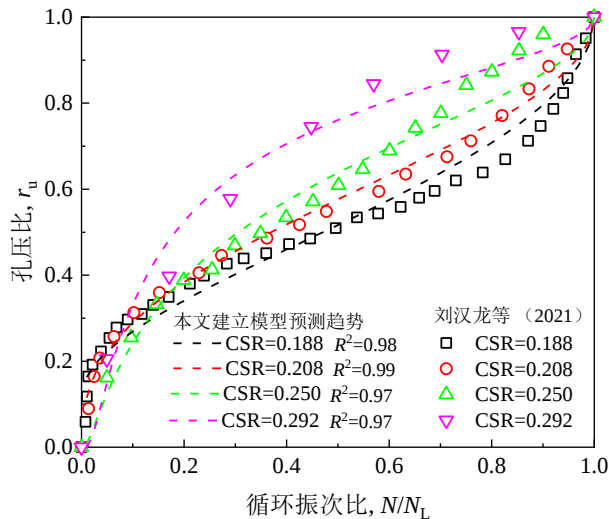
Fig. 14 Relationship curves of model parameters-CSR: (a) parameter α ; (b) parameter β

3.3 模型验证

为进一步验证所提出的超静孔压发展预测模型的适用性, 采用式 (5) 对南沙珊瑚砂 (马维嘉等, 2019) 和 MICP 固化钙质砂 (刘汉龙等, 2021) 在不同 CSR 条件下的试验数据进行了拟合分析 (见图 15)。两种不同类型钙质砂的 r_u-N/N_L 曲线均表现出随 CSR 增大由 S 型向双曲线型转变的特征, 与本文试验现象完全一致, 验证了本文试验数据的可靠性。此外, 对于马维嘉等 (2019) 给出的南沙珊瑚砂以及刘汉龙等 (2021) 给出的 MICP 固化钙质砂试验数据, 所建立的模型表现出良好的预测精度, 可决系数 R^2 均超过 0.97。这不仅验证了建立的模型的可靠性, 更表明其对于不同类型钙质砂的 r_u 发展预测具有较好的适用性, 为地震作用下钙质砂岩土结构的液化评估提供了可靠的理论工具。



(a)



(b)

图 15 建立模型的预测趋势与既有研究试验数据对比: (a) 南沙珊瑚砂; (b) MICP 固化钙质砂

Fig.15 Comparison of predictive trends using established model with the test data from existing research: (a) coral sand in Nansha Islands; (b) MICP-treated calcareous sand

4 结 论

本文通过循环单剪试验开展了纤维加筋钙质砂液化与超静孔压增长特性的研究, 主要结论如下:

(1) 增加纤维掺量可明显减小循环荷载下钙质砂中超静孔压累积和剪应变发展速率。在临界液化阶段, 随着纤维掺量的增加, 钙质砂需经历更多的循环振次才能达到液化状态, 表明纤维加筋可有效延缓钙质砂的液化进程, 从而避免变形的急剧增大现象的出现。

(2) 钙质砂的抗液化强度与纤维掺量呈明显正相关, 当掺量超过 0.50% 时, 抗液化强度呈急剧增

长特征。纤维加筋效果表现出明显的应力依赖性, 随着循环应力比的增大, 其改善效果呈先增大后减小的趋势。提出了纤维加筋质砂抗液化强度模型, 可较好地描述不同纤维掺量下钙质砂抗液化强度发展规律。

(3) 在孔压比-循环振次比坐标系中, 纤维加筋钙质砂的超静孔压发展曲线明显突破了传统硅质砂的超静孔压发展上限边界, 表现出更快的累积速率。加筋钙质砂的超静孔压发展模式受循环应力比和纤维掺量的双重影响: 在固定纤维掺量条件下, 随着循环应力比增加, 发展模式由典型的 S 型逐渐转变为双曲线型; 在固定循环应力比条件下, 随纤维掺量增加, 发展模式则呈现相反的变化趋势, 即从双曲线型向 S 型转变。

(4) 传统 Seed 孔压模型难以准确表征纤维加筋钙质砂的双曲线型超静孔压发展规律。为此, 本文建立了适用于纤维加筋钙质砂的新型超静孔压发展预测模型。模型参数分析表明, 参数 α 和 β 均与循环应力比呈显著负线性相关。当循环应力比较小时, 纤维掺量对参数 α 和 β 影响较小; 而当循环应力比较大时, 在纤维掺量 0%-0.50% 范围内时, α 和 β 值随纤维掺量增加而增大, 当纤维掺量增至 0.50%-1.0% 范围时, α 和 β 值趋于稳定。此外, 构建的模型对既有研究中不同类型钙质砂超静孔压发展同样具有较好的预测精度, 表明其具有一定广泛适用性。

References

- Asadi, M. S., Asadi, M. B., Orense, R. P., et al., 2018. Undrained Cyclic Behavior of Reconstituted Natural Pumiceous Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(8): 04018045.
- Bhattacharya, S., Hyodo, M., Goda, K., et al., 2011. Liquefaction of Soil in the Tokyo Bay Area from the 2011 Tohoku (Japan) Earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31: 1618-1628.
- Chen, G. X., Ma, W. J., Qin, Y., et al., 2021. Liquefaction Susceptibility of Saturated Coral Sand Subjected to Various Patterns of Principal Stress Rotation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 147(9): 04021093.
- Chen, G. X., Qin, Y., Ma, W. J., et al., 2024. Liquefaction Susceptibility and Deformation Characteristics of Saturated Coral Sandy Soils Subjected to Cyclic Loadings-A Critical Review. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 23(1): 261-296.

- Eseller-Bayat, E., Yegian, M. K., Alshawabkeh, A., et al., 2013. Liquefaction Response of Partially Saturated Sands. II: Empirical Model. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139: 872-879.
- Gao, R., Ye, J. H., 2019. Experimental Investigation on the Dynamic Characteristics of Calcareous Sand from the Reclaimed Coral Reef Islands in the South China Sea. *Rock and Soil Mechanics*, 40(10): 3897-3908, 3919 (in Chinese with English abstract).
- Ghadr, S., Samadzadeh, A., Bahadori, H., et al., 2020. Liquefaction Resistance of Fibre-Reinforced Silty Sands under Cyclic Loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(6): 812-827.
- Guo, S. Y., Cui, J., Wu, Y., et al., 2024. Dynamic Triaxial Tests of the Liquefaction Characteristics of Saturated Coral Sand. *China Earthquake Engineering Journal*, 46(1): 84-94 (in Chinese with English abstract).
- Kuhn, M. R., Renken, H. E., Mixsell, A. D., et al., 2014. Investigation of Cyclic Liquefaction with Discrete Element Simulations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140 (12): 04014075.
- Huang, Y., Jiang, X., 2010. Field-Observed Phenomena of Seismic Liquefaction and Subsidence During The 2008 Wenchuan Earthquake in China. *Natural Hazards*, 54: 839-850.
- Lee, K. L., Albaisa, A., 1974. Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(4): 387-406.
- Liu, J., Wang, G., Kamai, T., et al., 2011. Static Liquefaction Behavior of Saturated Fiber-Reinforced Sand in Undrained Ring-Shear Tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(5): 462-471.
- Liu, H. L., Zhang, Y., Guo, W., et al., 2021. A Prediction Model of Dynamic Pore Water Pressure for MICP-Treated Calcareous Sand. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(4): 790-801 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Liu, J., Nan, J., 2022. Prediction of Dynamic Pore Water Pressure for Calcareous Sand Mixed with Fine-Grained Soil under Cyclic Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 157: 107276.
- Luo, Z. G., Ding, X. M., Ou, Q., et al., 2023. Experimental Study on Strength and Deformation Characteristics of Coral Sand Reinforced by Geogrid. *Rock and Soil Mechanics*, 44(4): 1053-1064 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. Y., Huang, Y., 2023. Model Tests on the Effect of Dip Angles on Flow Behavior of Liquefied Sand. *Journal of Earth Science*, 34(2): 381-385.
- Ma, W. J., Chen, G. X., Li, L., et al., 2019. Experimental Study on Liquefaction Characteristics of Saturated Coral Sand in Nansha Islands under Cyclic Loading. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 41(5): 981-988 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Yang, Z. T., Du, X. Y., et al., 2024. An Energy-Based Model for the Generation of Excess Pore Water Pressure in Saturated Coral Sand. *Marine Georesources and Geotechnology*, 42(2): 193-204.
- Rui, S. J., Guo, Z., Si, T. L., et al., 2020. Effect of Particle Shape on the Liquefaction Resistance of Calcareous Sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 137: 106302.
- Rasouli, H., Fatahi, B., 2022. Liquefaction and Post-Liquefaction Resistance of Sand Reinforced with Recycled Geofibre. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(1): 69-81.
- Saxena, S. K., Reddy, K. R., Avramidis, A. S., 1988. Liquefaction Resistance of Artificially Cemented Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(12): 1395-1413.
- Salem, M., Elmamlouk, H., Agaiby, S., 2013. Static and Cyclic Behavior of North Coast Calcareous Sand in Egypt. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55(12): 83-91.
- Shan, Y., Zhao, J. T., Tong, H. W., et al., 2022. Effects of Activated Carbon on Liquefaction Resistance of Calcareous Sand Treated with Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 161: 107419.
- Tomasello, G., Porcino, D. D., 2022. Influence of Sloping Ground Conditions on Cyclic Liquefaction Behavior of Sand Under Simple Shear Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 163: 107516.
- Wang, X. Z., Jiao, Y. Y., Wang, R., et al., 2011. Engineering Characteristics of the Calcareous Sand in Nansha Islands, South China Sea. *Engineering Geology*, 120(1-4): 40-47.
- Wang, L., Wang, Y. L., Yuan, X. M., et al., 2021. Experimental Study on Liquefaction Resistance of Hydraulic Fill Coralline Soils at Artificial Sites Based on Large-Scale Dynamic Triaxial Apparatus. *Rock and Soil Mechanics*, 42(10): 2819-2829 (in Chinese with English abstract).

- Wu, Y., Cui, J., Li, C., et al., 2022. Experimental Study on the Effect of Fines on the Maximum Dynamic Shear Modulus of Coral Sand in a Hydraulic Fill Island-Reef. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(1): 205-216 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. L., Tang, C. S., Pan, X. H., et al., 2023. Coupling Effect of Fiber Reinforcement and Micp Stabilization on the Tensile Behavior of Calcareous Sand. *Engineering Geology*, 317: 107090.
- Wu, Y., Wu, Y. H., Ma, L. J., et al., 2024. Experimental Study on Dynamic Characteristics of Calcareous Sand-Gravel Mixtures from Islands in the South China Sea. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 46(1): 63-71 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, P., Liu, H. L., Xiao, Y., et al., 2018. Liquefaction Resistance of Bio-Cemented Calcareous Sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107: 9-19.
- Xiao, P., Liu, H. L., Stuedlein, A. W., et al., 2019. Effect of Relative Density and Biocementation on Cyclic Response of Calcareous Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(12): 1849-1862.
- Yu, H. Z., Wang, R., Zhao, W. G., et al., 2006. Experimental Research on Development Pattern of Pore Water Pressure of Carbonate Sand under Wave Loads. *Journal of Wuhan University of Technology*, 28(11): 86-89 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, X. M., Zhang, W. B., Duan, Z. G., et al., 2019. Analysis for Characteristics of Seismic Liquefaction in Engineering Sites of Coralline Soils. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(S2): 3799-3811 (in Chinese with English abstract).
- Ye, B., Cheng, Z. R., Liu, C., et al., 2017. Liquefaction Resistance of Sand Reinforced with Randomly Distributed Polypropylene Fibres. *Geosynthetics International*, 24(6): 625-636.
- Zhang, X. L., Chen, Y. M., Liu, H. L., et al., 2020. Performance Evaluation of a Micp-Treated Calcareous Sandy Foundation Using Shake Table Tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129: 105959.
- Zhou, L., Chen, J. F., Peng, M., et al., 2022. Liquefaction Behavior of Fiber-Reinforced Calcareous Sands in Unidirectional and Multidirectional Simple Shear Tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(4): 794-806.
- Zhou, L., Chen, J. F., Zhu, Y., et al., 2024. Liquefaction and Post-Liquefaction Behaviors of Unreinforced and Geogrid Reinforced Calcareous Sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 52(3): 286-303.
- Zhou, L., Chen, J. F., Zhu, Y., 2025. Development Model of Excess Pore Pressure for Geogrid Reinforced Coral Sand Based on Strain Characteristics. *Earth Science*, Doi:10.3799/dqkx.2025.097 (in Chinese with English abstract)

中文参考文献

- 高冉, 叶剑红, 2019. 中国南海吹填岛礁钙质砂动力特性试验研究. *岩土力学*, 40(10): 3897-3908+3919.
- 郭舒洋, 崔杰, 吴杨, 等, 2024. 饱和珊瑚砂液化特性动三轴试验研究. *地震工程学报*, 46(1): 84-94.
- 刘汉龙, 张宇, 郭伟, 等, 2021. 微生物加固钙质砂动孔压模型研究. *岩石力学与工程学报*, 40(4): 790-801.
- 骆赵刚, 丁选明, 欧强, 等, 2023. 土工格栅加筋珊瑚砂的强度及变形特性试验研究. *岩土力学*, 44(4): 1053-1064.
- 马维嘉, 陈国兴, 李磊, 等, 2019. 循环荷载下饱和南沙珊瑚砂的液化特性试验研究. *岩土工程学报*, 41(5): 981-988.
- 王鸾, 汪云龙, 袁晓铭, 等, 2021. 人工场地吹填珊瑚土抗液化强度大粒径动三轴试验研究. *岩土力学*, 42(10): 2819-2829.
- 吴杨, 崔杰, 李晨, 等, 2022. 细粒含量对岛礁吹填珊瑚砂最大动剪切模量影响的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 41(1): 205-216.
- 吴杨, 吴毅航, 马林建, 等, 2024. 南海岛礁珊瑚砂砾混合料动力特性试验研究. *岩土工程学报*, 46(1): 63-71.
- 虞海珍, 汪稔, 赵文光, 等, 2006. 波浪荷载下钙质砂孔压增长特性的试验研究. *武汉理工大学学报*, 28(11): 86-89.
- 袁晓铭, 张文彬, 段志刚, 等, 2019. 珊瑚土工程场地地震液化特征解析. *岩石力学与工程学报*, 38(S2): 3799-3811.
- 周林, 陈建峰, 朱艳, 2025. 基于应变特性的土工格栅加筋珊瑚砂超静孔压发展模型. *地球科学*, Doi:10.3799/dqkx.2025.097