

DOI: 10.11779/CJGE20240908

# 宽级配饱和珊瑚土场地剪应力-剪应变非线性响应动力 离心试验研究

王体强<sup>1,2</sup>, 王永志<sup>\*1,2</sup>, 屈盅伶<sup>1,2</sup>, 梁小丛<sup>3,4</sup>, 陈平山<sup>3,4</sup>, 兰景岩<sup>5</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080;  
5. 燕山大学建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 珊瑚土作为热带和亚热带地区港口工程及军事、民事设施建设场地的重要土体, 其在接近真实场地条件和地震自下而上传递下的循环剪应力、剪应变行为尚缺乏认知。基于动力离心试验可较真实模拟场地应力分布、排水条件、地震传递等优势, 开展了典型水平饱和珊瑚土场地模型试验, 探讨了珊瑚土场地的循环剪应力、剪应变时空分布特征与演化规律, 比较了循环剪应力、剪应变与超静孔压比发展的关联性, 并求解分析了不同埋深珊瑚土动剪切模量、阻尼比随剪应变的变化关系和发展模式。结果表明: 反演获得剪应力-剪应变滞回圈具有良好的光滑性、连续性和规律性, 随着循环次数增加, 滞回圈逐步向水平倾斜且面积逐步扩大, 呈明显的强度软化特征; 同一荷载下, 剪应力随埋深增加而增大, 剪应变随埋深增加而先增加后减小, 并随荷载强度的增大而增大, 基岩峰值加速度 0.05g~0.3g 正弦荷载下, 剪应变主要集中于 0.01%~2%。荷载强度逐渐提高条件下, 剪应力与超静孔压比随埋深变化的关联性不明显, 但超静孔压比增加对剪应力随埋深的增长表现出一定约束作用; 而剪应变与超静孔压比随埋深的分布具有显著的一致性, 当孔压比超过 0.6 时, 土层剪应变将显著增加。求解的动剪切模量随埋深增大而增大、随剪应变增大而减小, 具有良好的规律性; 而阻尼比随埋深增大而减小, 相对离散性偏大, 与计算方法和液化强非线性相关; 最大剪切模量明显低于单元试验结果, 且典型水平饱和场地的珊瑚土动剪切模量比更符合 Martin-Davidson 模型。

**关键词:** 动力离心试验; 珊瑚土; 反演分析; 剪应力; 剪应变; 演化特性

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)12-2602-11

作者简介: 王体强(1992— ), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事动力离心模型试验技术、土体动力本构反演分析方法方面的研究。E-mail: wangtqiang0313@126.com。

## Dynamic centrifugal test study on shear stress-shear strain nonlinear response of wide-graded saturated coral soil site

WANG Tiqiang<sup>1,2</sup>, WANG Yongzhi<sup>1,2</sup>, QU Zhongling<sup>1,2</sup>, LIANG Xiaocong<sup>3,4</sup>, CHEN Pingshan<sup>3,4</sup>, LAN Jingyan<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd, Guangzhou 510230, China; 4. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 5. School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** As an important soil for port engineering and military and civil facilities construction sites in tropical and subtropical areas, there is a lack of knowledge about the cyclic shear stress-shear strain behavior of coral soils under near-real site conditions and bottom-up transfer of earthquakes. Based on the advantages that the dynamic centrifugal test can simulate the site stress distribution, drainage conditions, and earthquake transmission of the site more realistically, a typical horizontal saturated coral soil site model test is carried out. The spatial and temporal distribution characteristics and evolution laws of

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2023B14, 2023C11); 国家自然科学基金项目(52368068); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2023E019) This work was supported by the Scientific Research Fund of the Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (Grant No. 2023B14 and 2023C11), National Natural Science Foundation of China (Grant No.52368068), and the Heilongjiang Natural Science Foundation (Grant No. LH2023E019).

收稿日期(Received): 2024-09-09 修回日期(Revised): 2025-01-06 接受日期(Accepted): 2025-01-08 网络出版日期(Online): 2025-01-09

\*通信作者 (E-mail: yong5893741@163.com)

cyclic shear and stress shear strain in coral soil sites are discussed. The correlation between cyclic shear stress, shear strain, and the development of excess pore water pressure ratio are compared, and the relationship between the dynamic shear modulus and damping ratio with shear strain and the development model of coral soils with different burial depths is analyzed and solved. The results show that the shear stress-shear strain hysteresis loops evaluated by inverse analysis have good smoothness, continuity, and regularity, and with the increase of the number of cycles, the hysteresis loops are gradually tilted to the horizontal and the area is enlarged, which is an obvious characteristic of strength softening. Under the same load, the shear stress increases with the increase of burial depth, and the shear strain increases firstly and then decreases with the increase of burial depth and increases with the increase of load intensity, and under the sinusoidal load of 0.05g~0.3g, the shear strain is mainly concentrated in 0.01%~2%. The correlation between the shear stress and the excess pore water pressure ratio with the burial depth is not obvious when the load strength increases gradually, but the increase of the excess pore water pressure ratio has a certain constraint on the increase of the shear stress with the burial depth. While the distribution of shear strain and excess pore water pressure ratio is remarkably consistent with the buried depth. When the pore pressure ratio exceeds 0.6, the shear strain will increase significantly. The dynamic shear modulus increases with the increase of buried depth and decreases with the increase of shear strain with good regularity. The damping ratio decreases with the increase of buried depth, and the relative dispersion is larger, which is related to the calculation method and the strong nonlinear liquefaction. The maximum shear modulus is significantly lower than that obtained by the unit test, and the dynamic shear modulus ratio of coral soils in a typical horizontal saturated site is more consistent with the Martin-Davidson model.

**Key words:** dynamic centrifugal test; coral soils; inverse analysis; shear stress; shear strain; evolution characteristics

## 0 引言

珊瑚土是热带和亚热带海洋环境下由珊瑚礁石、海洋生物残骸等, 受物理、化学及生物等作用后沉积形成的一种特殊海洋土, 包含从砾到粉土的宽级配无黏性土。伴随南海人工吹填岛礁和沿海港口工程及军事、民事设施的大规模兴建, 珊瑚土成为了一种重要的工程建设场地土体, 牵涉海洋经济、国防等强国战略的实施<sup>[1-3]</sup>, 主要分布于地表至埋深数十米范围内。地震等动荷载下, 珊瑚土的循环剪应力、剪应变行为特性与表征模型成为学者和工程师们关注的一个焦点。然而, 现有物理试验研究主要集中于动三轴、扭剪仪、动直剪等单元试验的本构行为响应认识, 而缺乏珊瑚土场地宏观地震响应及非线性规律方面的深入探讨, 且受限于单元试验设备规格和试验技术限制, 多为剔除 2 mm 以上的珊瑚土试验, 其与在真实或接近真实场地条件下珊瑚土动力本构响应差异性, 也尚缺乏认知。

室内常重力模型试验和动力离心模型试验可以模拟接近真实应力、排水等场地条件和地震自下而上的传播特性, 是研究珊瑚土场地在地震等动荷载作用下动力非线性响应及土-结作用体系的有效手段。Lü 等<sup>[2]</sup>和梁小从等<sup>[3]</sup>均利用动力离心模型试验, 研究了珊瑚土场地的抗液化效果, 二者的结论也较为一致, 认为 0.1g 峰值地震下, 珊瑚土场地的液化风险较小, 但在 0.3g 峰值地震下, 场地将面临极大的液化风险。Liu 等<sup>[4]</sup>通过离心模型试验, 证明了在地震作用下, 回填珊瑚

土的液化会导致码头砌体结构发生较大位移甚至破坏。Wang 等<sup>[5]</sup>对比分析了桩基在珊瑚土场地和标准砂场地中的水平承载特性, 表明珊瑚土中桩基的侧向位移、弯矩等要明显小于标准砂。Ding 等<sup>[6]</sup>对比了不同水位对地下管廊结构的影响, 表明随着地下水位增加, 珊瑚土场地的加速度放大系数、地下结构的应变和弯矩均可减小。综上所述, 目前针对珊瑚土液化特性及土-结相互作用方面的研究, 取得了许多具有创新性的成果, 但在接近真实场地环境条件下珊瑚土的循环剪应力、剪应变及其与场地地震液化过程中孔压累积的关系, 尚缺乏认知。

依托东南亚某热带地区港口工程建设, 开展了典型饱和珊瑚土水平场地的动力离心模型试验研究, 获得了较为规律且闭合性光滑性良好的珊瑚土滞回响应, 分析了珊瑚土的剪应力、剪应变与超静孔压比的关系。以此为基础, 研究了珊瑚土动剪切模量和阻尼比的规律和特征, 并对比分析了试验结果与现有单元试验建立的珊瑚土最大剪切模量预测模型、动剪切模量比衰减模型的特征与差异, 为认识和丰富较真实应力及排水条件下珊瑚土的剪切模量和阻尼比特性提供参考。

## 1 工程概况与土体特征

该项目位于环太平洋地震带上, 面临极大的地震破坏风险, 其抗震设防级别高, 码头结构的设计地震加速度高达 0.53g, 非码头区为 0.505g, 相当于 475 a

重现期。原位地质条件为珊瑚土、砾混合层，颗粒级配分布不均匀，局部夹细粒含量高，地质条件复杂。该港口钻孔取样的珊瑚土宏观形态如图 1(a)所示。珊瑚土整体呈现灰白色，多为松散的珊瑚碎屑，含少量的贝类、螺类外壳；强度较低，易破碎；外形十分不规则，棱角多，多角砾、片状、圆柱状颗粒。该珊瑚土的微观结构如图 1(b)所示，可知珊瑚土表面粗糙、多内空隙、凸凹程度明显。

该港口珊瑚土少数颗粒粒径超过 100 mm，属于粗粒土类，根据不同钻孔的土样结果及所有钻孔土样混合后，去除大于 50 mm 粒径颗粒的土体，绘制的土体颗粒级配曲线如图 2 所示。根据图 2 可知，不同钻孔所得土样的差异显著，各粒组土样的比例也不尽相同，显著特点是级配宽、粒径大、细粒含量高。

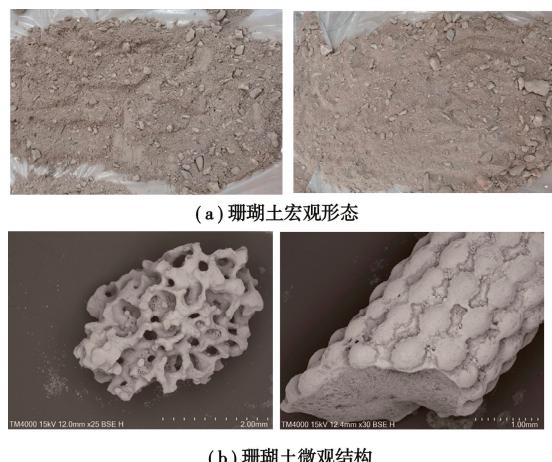


图 1 珊瑚土的宏观形态与微观结构

Fig. 1 Macro morphology and micro structures of coral soils

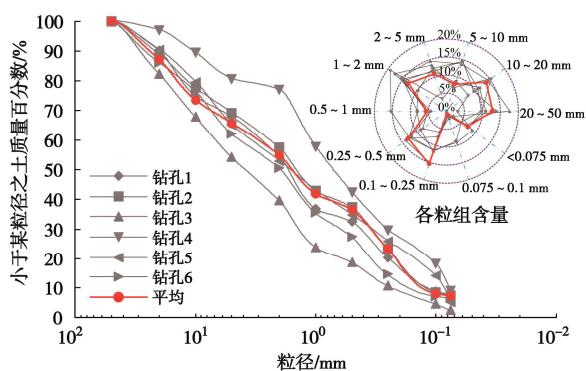


图 2 不同钻孔取样的珊瑚土级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of coral soils from different boreholes

## 2 动力离心模型试验

本次饱和珊瑚土水平场地动力离心模型试验在中国地震局工程力学研究所 DCIEM-40-300 大型动力离心机上进行。试验采用某港口原位钻孔取样珊瑚土，其级配非常宽，最大粒径已超过 100 mm，不能满足

离心模型制样和相似比设计的要求。依照《土工离心模型试验技术规程：DL/T 5102—2013》<sup>[7]</sup>和参考《土工试验方法标准：GB/T 50123—2019》<sup>[8]</sup>及考虑避免粒径效应、边界效应等影响，试验珊瑚土采用剔除>5 mm 土样，保留 2~5 mm 砾粒组颗粒，设计了试验珊瑚土的级配曲线如图 3 所示。该级配一方面保证了试验土体的工程分类与原型场地土体一致，属于砾类土；另一方面，根据图 2，原级配 5 mm 以上颗粒约占总质量的 34.4%，剔除后不对土体有效骨架产生明显影响，试验土体的基本物理性质：土粒相对质量密度  $G_s=2.71$ ，曲率系数  $C_c=0.821$ ，不均匀系数  $C_u=11.54$ ，小于该粒径的土颗粒的质量占土颗粒总质量的 50% 的  $d_{50}=0.43 \text{ mm}$ ， $d_{10}=0.065 \text{ mm}$ ，最小孔隙比  $e_{min}=0.525$ ，最大孔隙比  $e_{max}=1.009$ ，渗透系数  $k=5.1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。

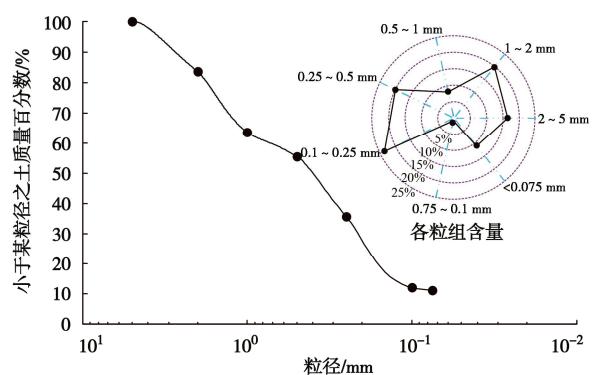


图 3 试验珊瑚土级配曲线

Fig. 3 Gradation curves of coral soils for testing

珊瑚土动力离心模型试验数据量测方案如图 4 所示，为典型水平饱和场地。模型箱采用柔性剪切叠层箱，以降低模型的边界效应。由于试验珊瑚土体的级配较宽且细粒含量较高，模型制备采用低落距砂雨法和分层击实法相结合的模型制备方法，防止珊瑚土在砂雨法制备模型时出现分层现象，并防止细粒飞扬造成级配损失。相对密实度为 50% 左右，模型采用循环真空饱和，溶液为热容型甲基纤维素溶液，试验前后测得数值分别为 51.6, 44.8 cSt。试验在 50g 离心加速度条件下开展（相似比为 50）。

为了便于数据分析且可研究珊瑚土在地震等动荷载下的循环剪应力、剪应变特性，试验模型台面输入为调制正弦波，频率为 1 Hz，波形如图 5 所示。试验加载工况和振动台实测 PBA (peak base acceleration, 基岩峰值加速度) 已列入表 1，根据表 1 可知，实测 PBA 与目标 PBA 最大相差约 6.0%，验证了振动台具有优异的控制准确性与稳定性，为获得高质量模型数据提供条件。除特别说明外，本文试验数据均已按相似比换算为原型。

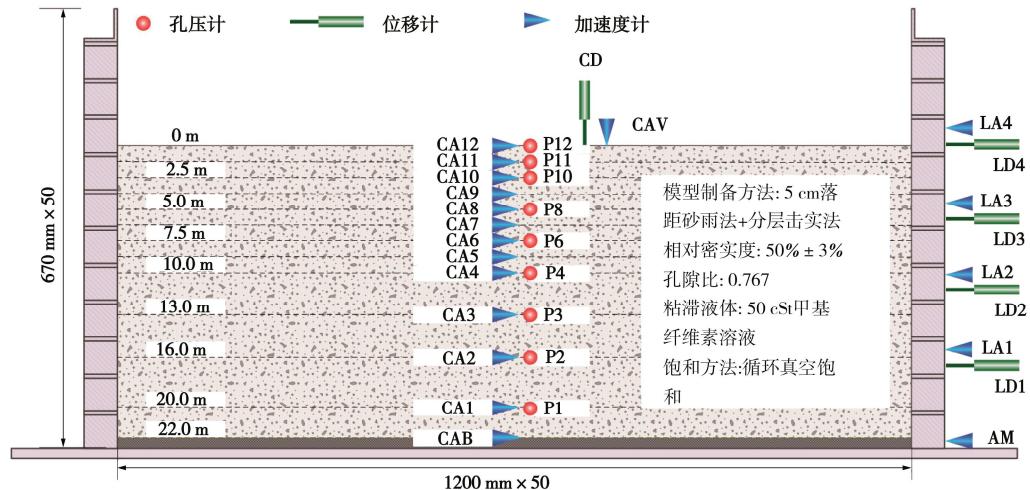


图 4 试验模型及量测方案

Fig. 4 Model configuration and instrument layout

表 1 施加载荷工况

Table 1 Load case table

序号	输入荷载	目标 PBA/g	实测 PBA/g	误差/%
1	正弦波	0.05	0.049	2.0
2	正弦波	0.10	0.094	6.0
3	正弦波	0.20	0.201	0.5
4	正弦波	0.30	0.303	1.0

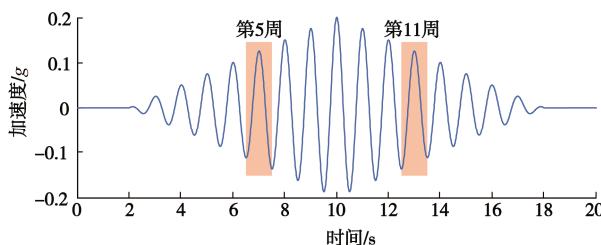


图 5 振动台输入荷载

Fig. 5 Shaking table input load

### 3 剪应力-剪应变及滞回响应

反演分析指利用加速度阵列数据积分位移，再基于一维剪切梁模型获得土体的剪应力、剪应变响应的数据分析方法<sup>[9]</sup>。笔者提出了自适应鲁棒性加速度积分位移方法(ARI法)<sup>[10]</sup>，有效解决了反演分析剪应力、剪应变时的相位误差问题；厘清了剪切梁分布函数对剪应力-剪应变滞回圈的影响机制<sup>[11]</sup>，获得了较为连续、光滑，且闭合性和准确性较高的剪应力-剪应变滞回圈，并将其应用于反演分析动力离心试验石英砂的动剪切模量和阻尼比及可靠性分析<sup>[12-13]</sup>，为模型试验反演分析土体的动剪切模量和阻尼比提供方法参考。为此，课题组开发了适于岩土地震工程监测数据的处理分析软件 GEOFIX-dataX，除了包含积分位移、反演分析土体剪应力-剪应变之外，还集成了加速度、

孔隙水压等常用数据分析功能，利用该软件分析获得本试验的场地超孔压比、加速度放大、地表沉降结果可见文献[1, 3]。本文利用该软件并选取线性分布函数<sup>[14]</sup>，反演分析珊瑚土的剪应力和剪应变。

#### 3.1 滞回圈响应

图 6 给出了饱和珊瑚土水平场地在  $0.05g \sim 0.3g$  序列正弦波输入荷载下，以时间为序、并在剪应变逐渐增大的情况下（正弦荷载前 8 周）反演分析的珊瑚土剪应力-剪应变滞回圈。可知，各荷载、各埋深下，剪应力-剪应变滞回圈均具有较好的闭合性、光滑性、连续性和规律性，证明了 ARI 加速度积分位移方法采用时域数据处理方式和积分位移，有效地解决了反演分析剪应变、剪应力时的相位误差而引起的滞回圈不闭合和不连续问题，满足了分析动剪切模量和阻尼比的需求。

将滞回圈顶点连线形成剪应力-剪应变滞回圈骨干曲线，也绘于图 6 中。观察图 6 可知，对比任一荷载下任一埋深处的滞回圈，骨干曲线的斜率随剪应变增大而明显降低，逐步向水平方向倾斜，表现出剪切模量随剪应变及循环次数增加而降低。对比同一荷载下不同埋深处的滞回圈，骨干曲线的整体斜率随埋深增加呈增大趋势，反映了土体动剪切模量随埋深增加而增大的规律。对比不同输入荷载下相同埋深处的滞回圈，随输入循环荷载幅值增大，剪应变与剪应力迅速提高，且土体软化速率和程度明显增加。由于地表的剪应变为零，因此在  $0.05g \sim 0.3g$  序列正弦波输入荷载下，剪应变随埋深的增加呈先增加后减小的趋势，最大剪应变分别为  $0.18\%$ ,  $0.35\%$ ,  $1.50\%$ ,  $2.74\%$ ，且位于埋深  $1.25\text{ m}$  处。这些特征与规律，与现有认识十分吻合，证明了该模型试验反演分析循环剪应力、

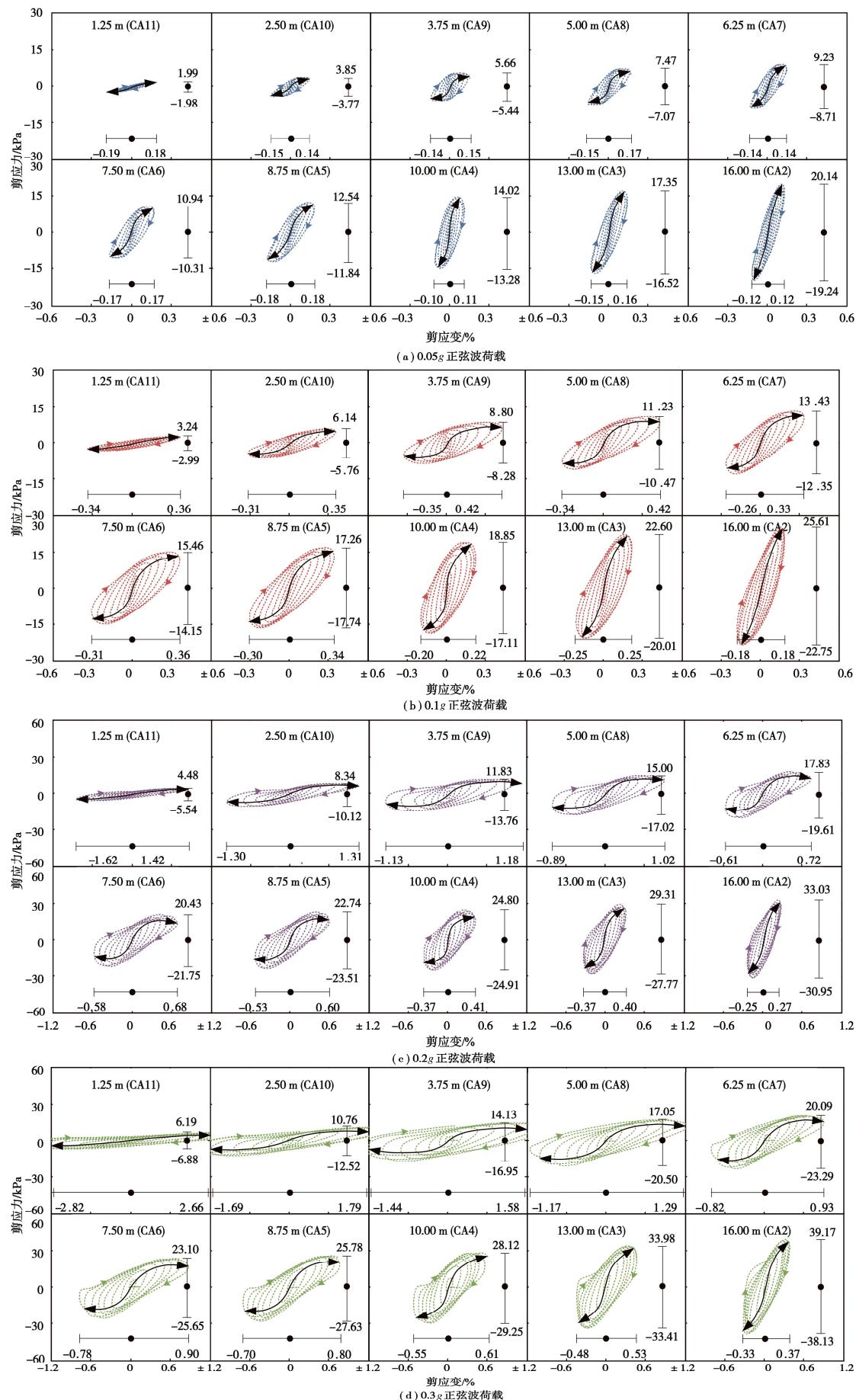


图 6 珊瑚土的剪应力-剪应变滞回圈特性

Fig. 6 Shear stress-shear strain hysteresis of coral soils

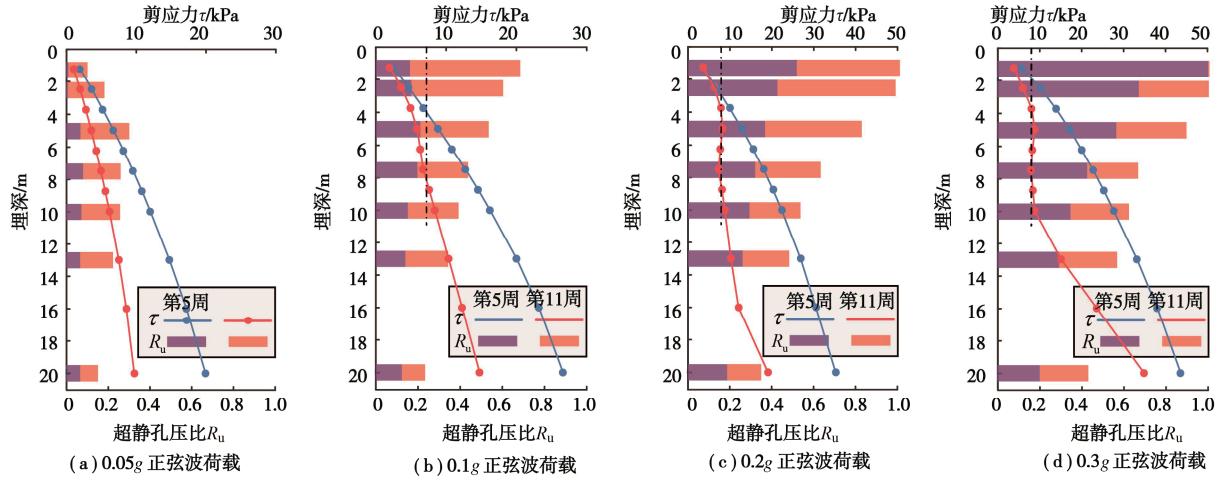


图7 剪应力与超静孔压比随土层埋深的变化分布

Fig. 7 Distribution of shear stress and excess pore water pressure ratio with burial depth in coral soils

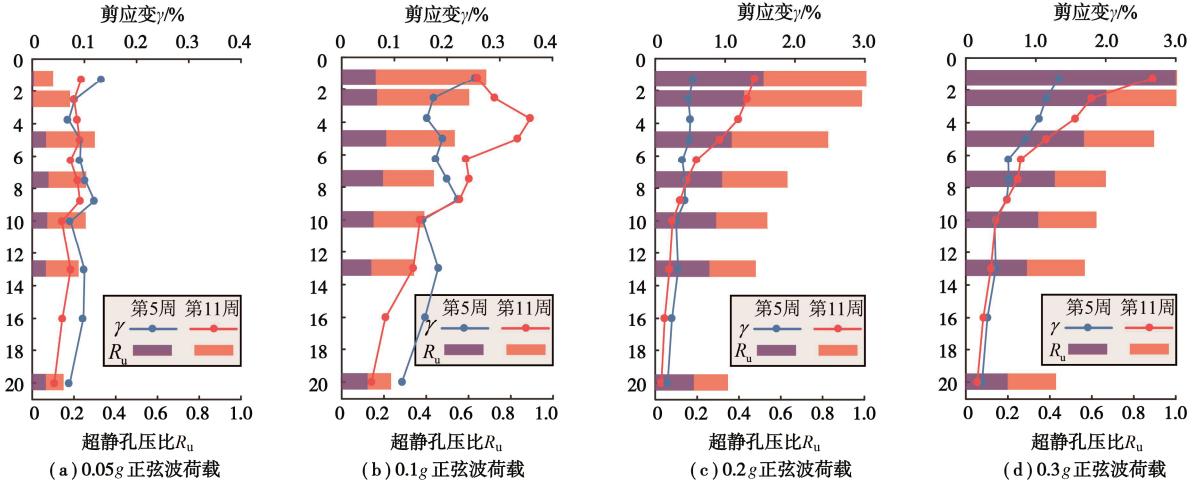


图8 剪应变与超静孔压比随土层埋深的变化分布

Fig. 8 Distribution of shear strain and excess pore water pressure ratio with burial depth in coral soils

剪应变响应和滞回圈的准确性和可靠性。然而, 与单元试验相比, 该模型试验反演分析的滞回曲线呈现明显的椭圆形状, 剪应变时程明显滞后于剪应力时程, 该现象可能主要因为动力离心模型试验在模拟一维剪切波的上行过程和真实  $K_0$  条件下的土体应力及应变下, 传感器的布设间距远大于单元试验的单元体, 波的传播时间更长, 致使剪应变明显滞后于剪应力。

### 3.2 剪应力、剪应变与超静孔压比关系

为对比分析珊瑚土场地在地震过程中及液化前后场地剪应力和剪应变的非线性响应, 选取振动过程中第 5 周和第 11 周荷载为分析对象。其中第 5 周荷载时, 有效应力正在降低, 超静孔压比处于增长状态, 珊瑚土场地未液化; 而第 11 周荷载时, 场地的超静孔压比基本达到最大, 已经发生明显的液化现象。此外输入荷载的调制正弦波第 5 周和第 11 周的振动幅值一致。

图7给出了珊瑚土水平场地在 0.05g~0.3g 序列正弦波输入荷载下, 第 5 周和第 11 周的最大剪应力和超静孔压比随土层埋深的变化分布。从图 7 中第 11 周超静孔压比数据 (P2 损坏) 可知, 随着输入荷载幅值增加, 相同埋深处的超静孔压比均明显提高, 土体液化趋势逐渐显著。0.05g, 0.1g 正弦波输入荷载下, 场地没有发生液化现象。而 0.2g, 0.3g 正弦波输入荷载下, 地表的超静孔压比达到 1.00, 埋深 5.0 m 处的超静孔压比也超过 0.8, 土层发生明显的液化现象。但与标准陆源砂相比, 触发液化的荷载强度明显增加, 且液化深度也明显降低, 体现出更难液化的特征<sup>[1]</sup>。该现象说明宽级配珊瑚土具有较高的抗液化特征, 一方面因为珊瑚土的粒径大、含砾量高, 排水效果好; 另一方面因为珊瑚土具有较高的内孔隙, 孔隙水压增长较慢。此外, 0.05g, 0.1g 荷载第 5 周及 0.05g 荷载第 11 周的超静孔压比, 表现出地表 1.25, 2.5 m 要小于埋深 5.0

m, 是因为此时超静孔压比处于正在增长的过程中, 体现出超静孔压比自模型底部向地表传递的特征。

对比图 7 中第 5 周和第 11 周的最大剪应力可以明确看出, 从第 5 周到第 11 周, 随着荷载持续输入, 超静孔压比逐渐增大, 液化程度增加, 相同埋深的剪应力减小, 但剪应力与超静孔压比随埋深变化的关联性不明显。同时, 在  $0.05g \sim 0.3g$  荷载的第 5 周, 以及  $0.05g$  荷载的第 11 周, 剪应力随埋深的曲线呈现逐渐增长的趋势, 此时除  $0.3g$  荷载下近地表的超静孔压比较大外, 其他均不到 0.6。而在  $0.1g \sim 0.3g$  荷载的第 11 周, 约埋深  $3 \sim 10$  m 的土层, 剪应力随着埋深没有明显增加, 而是稳定在  $8$  kPa 左右, 此时超静孔压比基本超过 0.6。线性剪应力反演分析中, 剪应力由加速度和土体密度的积沿土层埋深累加所得, 通常为埋深越大, 剪应力越大。然而通过以上分析可知, 饱和珊瑚土水平场地在地震作用下, 当超静孔压比超过 0.6 时, 超静孔压比增加对剪应力随埋深的增加表现出明显约束作用, 剪应力将不再向上传递。这是因为随着荷载振动循环增加, 超静孔压比不断增长, 土体的有效应力降低, 强度和剪切波速明显下降, 显著约束了剪应力在场地中自下而上的有效传递, 呈现一定减震现象。

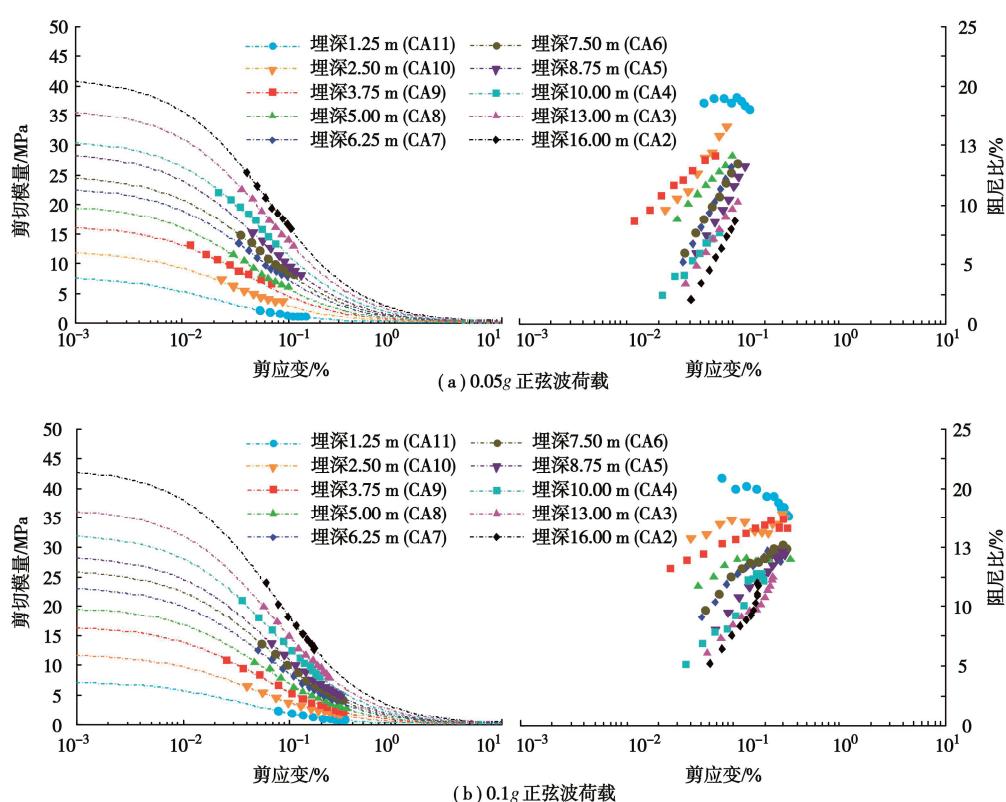
图 8 给出了珊瑚土水平场地在  $0.05g \sim 0.3g$  序列正弦波输入荷载下, 第 5 周和第 11 周的最大剪应变和超静孔压比随土层埋深的变化分布。观察图 8 可知, 剪应变总体上随超静孔压比的增加而增大, 二者随埋深

的增加而呈减小的趋势, 具有显著的一致性。在  $0.05g$  荷载下, 场地的最大超静孔压比为 0.4 左右, 未液化, 此时第 5 周和第 11 周的剪应变随土层埋深的分布没有明显差异。在  $0.1g \sim 0.3g$  荷载下, 埋深 10 m 以下的土层的剪应变差异不大; 而在 10 m 以上, 当超静孔压比超过 0.6 时, 相同幅值荷载输入下, 剪应变明显变大, 第 11 周的剪应变约为第 5 周的 2 倍。需要特别指出, 自由地表的剪应变虽为零, 但是地表的累积变形或是相对变形是最大的。因此, 饱和珊瑚土场地的超静孔压比超过 0.6 时, 土体强度明显降低, 在没有周围约束的情况下, 将产生液化大变形, 例如倾斜场地的流滑变形; 同时, 相邻结构的侧向位移可能将变大、水平承载力将变小, 面临严重的破坏风险。

## 4 动剪切模量和阻尼比

### 4.1 动剪切模量和阻尼比

在  $0.05g \sim 0.3g$  序列正弦波输入荷载下, 不同埋深处的剪切模量和阻尼比随剪应变的变化结果, 绘于图 9 中。观察图 9 中动剪切模量离散数据, 可发现, 剪切模量随剪应变的增加而减小, 随埋深的增加而增加, 呈现明显分层特征。这些规律特征与现有认识及单元试验结果高度吻合。根据图 6, 9 的反演分析结果可知, 随着地震动强度由  $0.05g$  逐步增加至  $0.3g$ , 各埋深处珊瑚土剪应变呈明显增大趋势, 且集中于  $0.01\% \sim 2\%$ , 与动三轴的剪应变范围相当, 大于共振柱的剪应



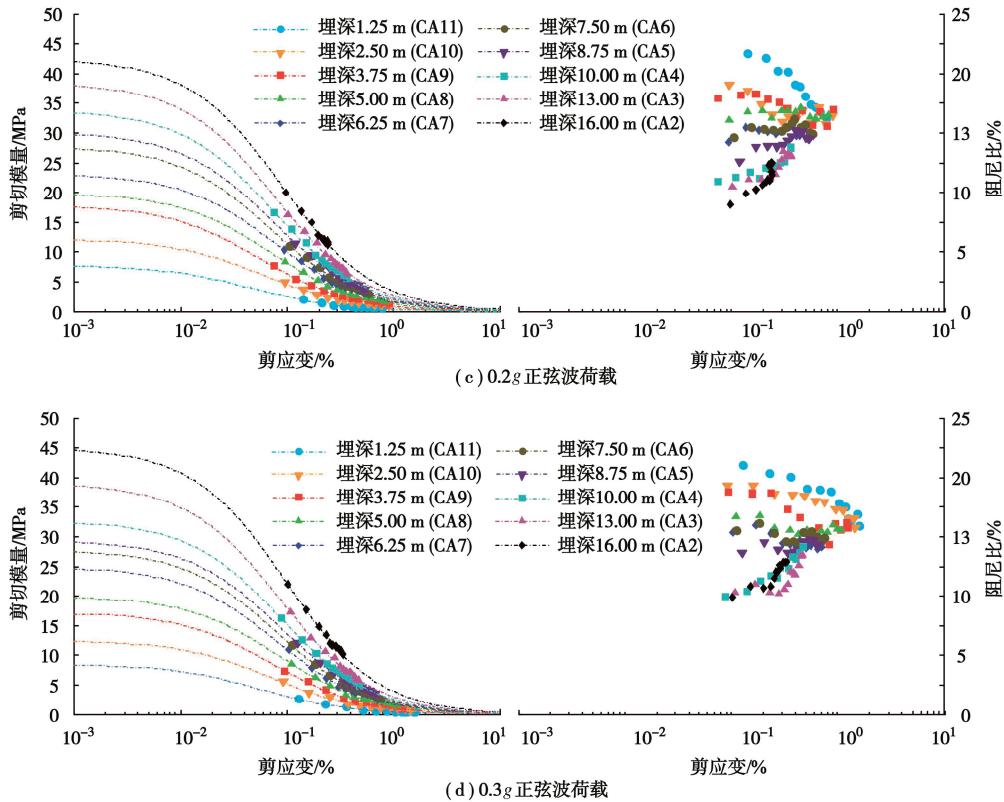


图9 珊瑚土的剪切模量与阻尼比特性

Fig. 9 Shear modulus and damping ratio of coral soils

变范围。其中, 试验方法和输入可控荷载(约为 $0.08 \text{ m/s}^2$ )条件决定离心模型试验较难得到 $<10^{-4}$  剪应变范围的剪切模量和阻尼比; 剪应变的上限值与试验土类、荷载强度、模型埋深、量测传感器准确响应等密切相关。

根据 Hardin 双曲线模型<sup>[14]</sup>, 剪切模量的拟合结果也绘于图 9 中。可知珊瑚土剪切模量数据, 均较好地落在拟合曲线附近, 较好符合 Hardin 双曲线模型, 数据离散性较小; 相邻或相近埋深处拟合曲线无交叉点; 相同剪应变处, 剪切模量随埋深保持规律性的增长趋势。 $0.05g \sim 0.3g$  序列正弦波输入荷载下, 拟合曲线的平均决定系数分别为 0.985, 0.986, 0.988, 0.992。反演分析结果和拟合结果一方面证明了在不同埋深、不同密实度、不同地震荷载下, 动力离心模型试验均可准确反演分析土体的动剪切模量, 另一方面也说明 ARI 加速度积分位移方法在反演分析土体剪切模量时的有效性和可靠性。

观察图 9 中阻尼比离散数据, 可发现, 同一荷载下, 不同埋深处的阻尼比, 虽未呈现明显分层特征, 但随埋深增加呈现明显减小的趋势, 其离散性相对偏大。 $0.05g$ ,  $0.1g$  输入荷载下, 阻尼比均随剪应变的增加基本呈增加趋势; 而  $0.2g$ ,  $0.3g$  输入荷载下, 深层土体的阻尼比随剪应变的增加呈现增长趋势, 但浅层

土体的阻尼比随剪应变增加出现减小现象, 与计算方法和液化强非线性相关。

#### 4.2 最大剪切模量

最大剪切模量表示土体在小应变( $<10^{-6}$ )条件下的剪切模量, 此时土体处于完全弹性状态。模型试验中, 最大剪切模量根据双曲线模型由剪切模量随剪应变变化的离散点图拟合而来, 此时, 土体应满足以下基本假定:

(1) 假定土体模型为各向同性、均匀成层的半无限空间土体, 忽略孔隙率沿土层埋深的变化。

(2) 假定线弹性小应变状态下, 土层内部的孔隙水压力无明显增长, 即可忽略孔隙水对最大剪切模量的影响。

(3) 假定动荷载作用下土层处于不排水状态, 即忽略孔隙率变化和土体变形及沉降的影响。

在  $0.05g \sim 0.3g$  序列正弦波输入荷载下, 将图 9 拟合所得最大剪切模量  $G_{\max}$  绘于图 10 中。同时, 取土体的有效围压  $p' = K_0 \rho_s g z$ , 其中  $K_0$  为静止土压力系数;  $\rho_s$  为饱和土体密度;  $g$  为重力加速度;  $z$  为土层埋深, 因此在  $e$ ,  $C_u$ ,  $d_{50}$  等土体参数确定时, 最大剪切模量  $G_{\max}$  可转化为以土层埋深  $z$  为变量的表达式。根据地表沉降数据, 可估算出  $0.05g$ ,  $0.1g$ ,  $0.2g$ ,  $0.3g$  正弦波输入荷载下, 珊瑚土土体的相对密实度分

别为 51.3%, 54.2%, 60.7%, 70.6%, 此时的孔隙比分别为 0.761, 0.747, 0.715, 0.667。参考现有研究成果, 在不考虑静止侧压力系数沿土层埋深及随土体孔隙率的变化, 暂取  $K_0 = 0.4$ , 选取部分珊瑚土最大剪切模量研究成果, 将梁珂等<sup>[15]</sup>和史金权等<sup>[16]</sup>单元试验的预测公式也绘于图 10 中。观察图 10 中反演分析所得  $G_{\max}$  数据, 可发现, 珊瑚土场地, 不同荷载下,  $G_{\max}$  随埋深均表现出增长特征, 因为随着埋深增加, 土体围压增大,  $G_{\max}$  随之增大。

同时, 观察图 10 可发现, 本次模型试验反演的珊瑚土最大剪切模量随埋深的增长趋势与单元试验获得的预测模型基本一致, 但在相同埋深下, 最大剪切模量的幅值比所列单元试验结果明显偏低, 约为 1/2, 其与试验应力应变条件和试验土体材料的差异相关。两种试验手段的明显不同, 导致最大剪切模量的预测模型存在一定区别, 当然离心模型试验中, 静止土压力系数、孔隙比等参数的准确确定, 也是联系单元试验与模型试验的关键因素。

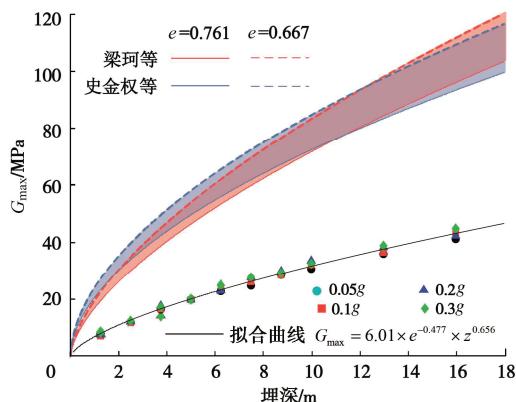


图 10 珊瑚土最大剪切模量与单元试验结果对比

Fig. 10 Comparison between maximum shear modulus of coral soils and empirical formula of unit test

#### 4.3 剪切模量比特性

剪切模量比曲线是描述土体非线性特性的重要指标。结合图 9 中动剪切模量和图 10 中最大剪切模量, 得到 0.05g~0.3g 序列正弦波输入荷载下的剪切模量比, 绘于图 11 中。从图 11 中散点分布情况可知, 数据离散性较小, 说明不同密实度、不同埋深, 不确定  $K_0$  变化等条件对珊瑚土的剪切模量比退化趋势影响较小。

Hardin 等<sup>[14]</sup>提出了剪切模量比的 Hardin-Drnevich 模型。随着研究的深入, 在 Hardin-Drnevich 模型的基础上, Ha 等<sup>[17]</sup>提出了 Martin-Davidovik 模型。Oztoprak 等<sup>[18]</sup>统计了大量的单元试验的结果, 提出了砂土的剪切模量退化曲线表达式, 本文称为 Oztoprak 模型。图 11 同时也给出了 Hardin-Drnevich 模型和

Martin-Davidovik 模型分别拟合剪切模量比的结果; 同时, 将 Oztoprak 模型的上下限及平均值也绘于图 11 中。观察图 11 可发现, 本次模型试验的剪切模量退化趋势较好的符合 3 种剪切模量退化模型, 拟合的决定系数分别为 0.868, 0.897, 0.871, Martin-Davidovik 模型略好一些, 数据离散性较小。反演结果说明, 现有剪切模量比退化模型可以较好的预测此次模型试验珊瑚土的剪切模量退化趋势, 模型试验与单元试验的结果较为一致; 同时也证明了此次动力离心试验反演分析的剪切模量和最大剪切模量的准确性和可靠性。

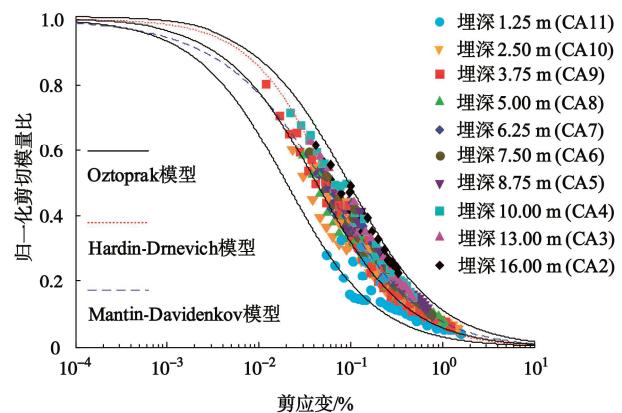


图 11 珊瑚土剪切模量比及拟合曲线

Fig. 11 Shear modulus ratio and fitting curves of coral soils

## 5 结 论

(1) 动力离心模型试验反演分析的剪应力-剪应变滞回圈具有良好的光滑性、连续性、闭合性和规律性, 随着循环次数增加, 滞回圈逐步向水平倾斜且面积逐步扩大, 呈明显的强度软化特征; 随着循环荷载强度的增加, 软化的速率和程度明显增加, 一定程度证明了所选积分位移方法、剪切梁模型和试验测量数据的有效性和可靠性。

(2) 同一荷载下, 剪应力随埋深增加而增大, 剪应变随埋深增加而先增加后减小, 并随荷载强度的增大而增大。PBA 为 0.05g, 0.1g, 0.2g, 0.3g 正弦荷载下, 剪应变主要集中于 0.01%~2%, 最大剪应变分别为 0.18%, 0.35%, 1.50%, 2.74%, 且均位于埋深 1.25 m 处。

(3) 荷载强度逐渐提高条件下, 剪应力与超静孔压比随埋深变化的关联性不明显, 但在埋深 3~10 m, 超静孔压比达到 0.6 时, 观察到剪应力随埋深的增长受到了一定约束作用; 而剪应变、超静孔压比随埋深的分布具有显著的一致性, 且当孔压比超过 0.6 时, 土层剪应变显著增大。

(4) 求解的动剪切模量随埋深增大而增大、随剪应变增大而减小, 具有良好的规律性; 而阻尼比随埋

深增大而减小, 相对离散性偏大, 与计算方法和液化强非线性相关。总体而言, 反演的动剪切模量、阻尼比与试验模型中密实度、埋深、 $K_0$ 等参数变化相比, 离散性较小, 进一步证明所用积分位移、剪切量模型的适用性与合理性。

(5) 序列荷载作用下, 求解的最大剪切模量与既有单元试验结果相比, 约为后者的1/2, 其与试验应力应变条件和试验土体材料的差异相关。对比了Hardin-Drnevich模型、Martin-Davidenkov模型和Oztoprak等3种动剪切模量比预测模型, 珊瑚土动剪切模量比与3种模型的决定系数分别为0.868, 0.897, 0.871, 表明典型水平场地中珊瑚土更符合Martin-Davidenkov模型。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 王体强、王永志、梁小丛、陈平山参与研究内容设计, 王永志、梁小丛、兰景岩提供试验指导, 王体强、屈盅伶、兰景岩完成试验和数据分析, 王体强、屈盅伶参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by WANG Tiqiang, WANG Yongzhi, LIANG Xiaocong and CHEN Pingshan. The experiments were supervised by WANG Yongzhi, LIANG Xiaocong and LAN Jingyan. The experiments and data analyses were conducted by WANG Tiqiang, QU Zhongling and LAN Jingyan. The manuscript was drafted and revised by WANG Tiqiang and QU zhongling. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

## 参考文献:

- [1] 陈平山, 梁小丛, 王体强, 等. 珊瑚礁砂与标准砂场地液化特征动力离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2283-2294. (CHEN Pingshan, LIANG Xiaocong, WANG Tiqiang, et al. Dynamic centrifuge model test study on liquefaction characteristics of coral sand and standard sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2283-2294. (in Chinese))
- [2] LÜ W Q, YUAN Y, CHEN P S, et al. Seismic liquefaction of saturated calcareous sands: dynamic centrifuge test and numerical simulation[J]. Applied Sciences, 2022, 12(17): 8701.
- [3] 梁小丛, 陈平山, 刘志军, 等. 离心机振动台模型试验验证的珊瑚礁砂液化判别方法研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3173-3181, 3212. (LIANG Xiaocong, CHEN Pingshan, LIU Zhijun, et al. A liquefaction evaluation method for coral sand based on dynamical centrifuge model test verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(11): 3173-3181, 3212. (in Chinese))
- [4] 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.
- [5] WANG C Y, LIU H L, DING X M, et al. Study on horizontal bearing characteristics of pile foundations in coral sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58(12): 1928-1942.
- [6] DING X M, ZHANG Y L, WU Q, et al. Shaking table tests on the seismic responses of underground structures in coral sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 109: 103775.
- [7] 土工离心模型试验技术规程: DL/T 5102—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014. (Specification for Geotechnical Centrifuge Model Test Techniques: DL/T 5102—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014. (in Chinese))
- [8] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [9] ZEGHAL M, ELGAMAL A W, TANG H T, et al. Lotung downhole array. II: Evaluation of soil nonlinear properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(4): 363-378.
- [10] 王体强, 王永志, 袁晓铭, 等. 自适应鲁棒加速度积分新方法与可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊1): 2724-2737. (WANG Tiqiang, WANG Yongzhi, YUAN Xiaoming, et al. A new method of adaptive robust acceleration integration and reliability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2724-2737. (in Chinese))
- [11] 王体强, 王永志, 陈 苏, 等. 基于加速度阵列反演循环剪应力-剪应变的积分位移方法影响[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 115-124, 202-203. (WANG Tiqiang, WANG Yongzhi, CHEN Su, et al. Influence of double-integral-displacement methods on inverse analysis of accelerograph arrays for cyclic shear stress-strain response[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 115-124, 202-203. (in Chinese))
- [12] 王体强, 王永志, 梁小丛, 等. 超重力模型试验干-饱和砂动剪切模量阻尼比特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1546-1559. (WANG Tiqiang, WANG Yongzhi, LIANG Xiaocong, et al. Study on the characteristics of shear

- modulus and damping ratio between dry sand and saturated sand in centrifuge model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, **42**(6): 1546-1559. (in Chinese))
- [13] 王永志, 王体强, 袁晓铭, 等. 动力离心试验反演分析砂土模量阻尼比特征与可靠性[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(8): 1717-1727. (WANG Yongzhi, WANG Tiqiang, YUAN Xiaoming, et al. Characteristics and reliability of sand shear modulus and damping ratio evaluated by inverse analysis in dynamic centrifuge tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(8): 1717-1727. (in Chinese))
- [14] 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.
- [15] 梁珂, 何杨, 陈国兴. 南沙珊瑚土的动剪切模量和阻尼特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(1): 23-31, 38. (LIANG Ke, HE Yang, CHEN Guoxing. Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio characteristics of coral sand from Nansha Islands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(1): 23-31, 38. (in Chinese))
- [16] 史金权, 肖杨, 刘汉龙, 等. 钙质砂小应变初始剪切模量试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(2): 324-333. (SHI Jinquan, XIAO Yang, LIU Hanlong, et al. Experimental study on small-strain shear modulus of calcareous sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(2): 324-333. (in Chinese))
- [17] HA GIANG P H, VAN IMPE P O, VAN IMPE W F, et al. Small-strain shear modulus of calcareous sand and its dependence on particle characteristics and gradation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, **100**: 371-379.
- [18] OZTOPRAK S, BOLTON M D. Stiffness of sands through a laboratory test database[J]. Géotechnique, 2013, **63**(1): 54-70.