

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.121



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 考虑级配影响的珊瑚砂最大动剪切模量试验研究

梁珂<sup>1</sup>, 岳冲<sup>1</sup>, 周正龙<sup>2</sup>, 杭天柱<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 南京工业大学岩土工程研究所, 南京 210009)

**摘要:** 对不同级配的南沙岛礁珊瑚砂进行共振柱试验, 测试不同孔隙比  $e$  的珊瑚砂在 20~300 kPa 围压下的最大动剪切模量  $G_0$ , 分析不均匀系数  $C_u$ 、平均粒径  $d_{50}$  和细粒含量  $F_c$  对珊瑚砂  $G_0$  的影响, 并建立珊瑚砂的  $G_0$  经验模型。结果表明: 珊瑚砂的孔隙比  $e$  普遍大于陆源砂砾土; 同一有效围压  $\sigma'_0$  下, 珊瑚砂的  $G_0$ - $e$  曲线随  $C_u$  的增大而降低, 随  $d_{50}$  的增大而升高, 以  $F_c \approx 20\%$  为界, 随  $F_c$  的增大先降低后缓慢升高; 陆源砂砾土的  $G_0$  经验模型将低估珊瑚砂的  $G_0$  值;  $F_c$  对  $G_0$  影响的本质是不同细粒含量的珊瑚砂具有不同的  $C_u$  和  $d_{50}$ ,  $C_u$  和  $d_{50}$  对  $G_0$  的影响隐含了  $F_c$  对  $G_0$  的影响。基于 Hardin 模型给出考虑  $C_u$ 、 $d_{50}$  影响的珊瑚砂  $G_0$  预测模型, 并引入修正系数  $A'$ , 以考虑颗粒类型等复杂因素的综合影响, 采用不同海洋珊瑚砂的试验数据对  $G_0$  预测模型进行验证。

**关键词:** 珊瑚砂; 最大动剪切模量; 共振柱试验; 级配

中图分类号: TU441; TU411.8 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2023)06-0095-09

## Small-strain shear modulus prediction model related to grain gradation of coral sand

LIANG Ke<sup>1</sup>, YUE Chong<sup>1</sup>, ZHOU Zhenglong<sup>2</sup>, HANG Tianzhu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of China Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, P. R. China)

**Abstract:** A series of resonant column tests were conducted on coral sand taken from the Nansha Islands, South China Sea with different grain gradations. The small-strain shear modulus  $G_0$  of the coral sands with various void ratio  $e$  with the confining stress of 20~300 kPa was obtained. The influence of coefficients of uniformity  $C_u$ , mean particle size  $d_{50}$ , and fines content  $F_c$  on  $G_0$  of coral sand was investigated, and the  $G_0$  formulation for coral sand was established. For the constant effective confining pressure  $\sigma'_0$ , the curve of  $G_0$ - $e$  moves downward as the increasing  $C_u$ , and moves upward as the increasing  $d_{50}$ . The  $G_0$  firstly decreases and then increases as the increasing  $F_c$ , and the  $G_0$  reaches the minimum value for  $F_c$  of about 20%. The  $G_0$  prediction equations of terrigenous sandy and gravelly soils will obviously underestimate the  $G_0$  value of coral sand. The influence of  $F_c$

收稿日期: 2022-07-27

基金项目: 北京市自然科学基金(8224082); 中国博士后科学基金(2021M700309)

作者简介: 梁珂(1991-), 男, 博士, 主要从事土动力学研究, E-mail: liangk91@163.com。

Received: 2022-07-27

**Foundation items:** Beijing Natural Science Foundation (No. 8224082); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2021M700309)

**Author brief:** LIANG Ke (1991-), PhD, main research interest: soil dynamics, E-mail: liangk91@163.com.

on  $G_0$  essentially results from the change of  $C_u$  and  $d_{50}$  for coral sand with various  $F_c$ . The  $G_0$  prediction equation of coral sand related to  $C_u$  and  $d_{50}$ , which implies the influence of  $F_c$  on  $G_0$ , was proposed, and the correction factor  $A'$  related to the morphology and mineralogy of the particle form of coral sands was incorporated in the proposed  $G_0$  prediction equation. The validity of the  $G_0$  prediction equation was verified by comparing the measured and predicted  $G_0$  values of coral sands from different seas.

**Keywords:** coral sand; small-strain shear modulus; resonant column test; grain gradation

土的动剪切模量  $G$  是场地地震反应分析必需的参数之一,  $G$  随剪应变幅值  $\gamma_a$  的增大而衰减。当  $\gamma_a$  小于  $10^{-6}$  时, 土体可视为线弹性体, 该状态的  $G$  称为小应变(最大)动剪切模量  $G_0$ 。测试  $G_0$  的室内试验主要有共振柱试验和弯曲元试验。Yang 等<sup>[1]</sup>对比了弯曲元和共振柱试验测试的  $G_0$ , 弯曲元测得的  $G_0$  略大于共振柱试验测得的  $G_0$ , 但两者误差不超过 10%; 顾晓强等<sup>[2]</sup>对比了弯曲元、共振柱和循环扭剪试验测得的干砂的  $G_0$ , 发现 3 种试验测试的  $G_0$  结果具有很好的一致性。现有研究表明, 砂土  $G_0$  受孔隙比  $e$  和有效围压  $\sigma'_0$  的影响较显著。 $G_0$  随  $\sigma'_0$  的增加呈幂函数增长关系; 同一  $\sigma'_0$  下,  $G_0$  随  $e$  的增大而减小。Hardin 模型<sup>[3-4]</sup>是经典的砂土  $G_0$  预测模型。

$$G_0 = A \frac{(b-e)^2}{1+e} \left( \frac{\sigma'_0}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

另一类常用的砂土  $G_0$  预测模型修正了 Hardin 模型中的孔隙比项函数表达式。

$$G_0 = A e^c \left( \frac{\sigma'_0}{P_a} \right)^n \quad (2)$$

式中:  $A$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $n$  为与材料有关的试验参数;  $P_a$  为大气压, 100 kPa。

研究表明, 级配曲线、颗粒形状、矿物成分等也是砂土  $G_0$  的重要影响因素。级配特征可以通过不均匀系数  $C_u$ 、平均粒径  $d_{50}$  和细粒含量  $F_c$  (粒径小于 0.075 mm 颗粒的质量百分比) 等参数来表征。Menq<sup>[5]</sup>通过共振柱试验发现, 相同  $e$  和  $\sigma'_0$  条件下, 砂土的  $G_0$  随  $d_{50}$  的增加稍有增大, 随  $C_u$  的增加而减小。Wichtmann 等<sup>[6]</sup>试验发现, 相同  $e$  和  $\sigma'_0$  条件下, 石英砂的  $G_0$  随  $C_u$  的增大显著减小, 而  $d_{50}$  对  $G_0$  的影响不明显。Yang 等<sup>[1]</sup>试验发现,  $G_0$  随  $d_{50}$  的增加略有减小。Liu 等<sup>[7]</sup>定义复合粒径差  $\Gamma_{com}$  为砂-细粒混合物中纯砂(clean sand)平均粒径与混合物平均粒径之差, 建立了砂-细粒混合物  $G_0$  与相应的纯砂  $G_0$  的比值与  $\Gamma_{com}$  的经验模型。毕昇等<sup>[8]</sup>采用共振柱试验研究了  $F_c$  对南通某海域滩涂砂土动剪切模量特性的影响, 发现  $\sigma'_0$  和  $e$  相同时, 以  $F_c \approx 10\%$  为界, 南通滩

涂砂的  $G_0$  随  $F_c$  的增大呈先减小后增大的趋势。Payan 等<sup>[9]</sup>评估了 4 个陆源砂的  $G_0$  模型, 发现已有模型的普适性较差, 其原因是未考虑颗粒形状的影响, 并给出了考虑颗粒形状影响的  $G_0$  预测模型。Senetakis 等<sup>[10]</sup>通过对比相同级配下石英砂和火山岩砂的  $G_0$  试验结果, 推断土体的矿物成分对  $G_0$  也有一定影响。

珊瑚砂是珊瑚死亡后经过长期地质作用形成的特殊岩土介质, 颗粒棱角度高、形状不规则、多孔隙、易破碎、易胶结。梁珂等<sup>[11]</sup>对南沙岛礁珊瑚砂进行了应变控制分级循环三轴试验, 发现  $\gamma_a < 1 \times 10^{-4}$  时珊瑚砂动剪切模量衰退特性与陆源砂砾土的差异显著。Ha Giang 等<sup>[12]</sup>采用弯曲元测试了 Abu Dhabi 珊瑚砂的  $G_0$ , 发现珊瑚砂的  $G_0$  比石英砂的大;  $\sigma'_0$  和  $e$  相同时, 珊瑚砂的  $G_0$  随  $C_u$  的增大而减小。Morsy 等<sup>[13]</sup>对埃及的珊瑚砂进行了共振柱试验研究, 发现珊瑚砂  $G_0$ - $\sigma'_0$  关系的幂指数  $n$  比石英砂的大。

现有研究大多忽略了  $d_{50}$  对  $G_0$  的影响,  $F_c$  的影响研究通常独立于其他级配参数, 且鲜有关于珊瑚砂  $G_0$  特性的系统性研究。笔者针对中国南沙岛礁珊瑚砂进行了一系列共振柱试验, 系统研究  $C_u$ 、 $d_{50}$  和  $F_c$  对珊瑚砂  $G_0$  的影响, 并建立珊瑚砂  $G_0$  经验模型。

## 1 试验材料与试验过程

### 1.1 试验珊瑚砂

珊瑚砂取自南沙群岛某岛礁, 颜色为白色, 颗粒比重  $G_s = 2.77$ 。物相分析结果表明, 南沙岛礁珊瑚砂的主要矿物成分为文石、高镁方解石和方解石, 它们的质量百分比分别为 55.5%、41.5% 和 3.0%。如图 1 所示, 珊瑚砂颗粒形状不规则, 棱角度高。为研究级配对珊瑚砂  $G_0$  的影响, 设计了 15 组级配(图 2), 按研究目的分成 3 组。CU 组: 珊瑚砂级配仅  $C_u$  不同 ( $C_u = 2.10 \sim 11.20$ ), 其他参数一致或接近 ( $d_{50} \approx 0.53$  mm,  $F_c = 0\%$ ), 主要研究  $C_u$  对

珊瑚砂  $G_0$  的影响; D 组: 仅  $d_{50}$  不同 ( $d_{50}=0.21\sim 2.00\text{ mm}$ ),  $C_u$  接近 ( $C_u\approx 2.95$ ),  $F_c$  一致 ( $F_c=0\%$ ), 主要研究  $d_{50}$  对珊瑚砂  $G_0$  的影响; FC 组: 主要为不同细粒含量的珊瑚砂-粉混合土, 在级配编号为 S0 的纯砂中分别掺入  $F_c=0\%\sim 40\%$  的细粒, 以研究  $F_c$  对珊瑚砂  $G_0$  的影响, 并用于验证珊瑚砂  $G_0$  模型。南沙珊瑚砂的具体物理性质见表 1。由表 1 可知, 随着  $F_c$  的增大,  $C_u$  先增大后缓慢减小, 当  $F_c\approx 30\%$  时,  $C_u$  最大;  $d_{50}$  随  $F_c$  的增大而减小。

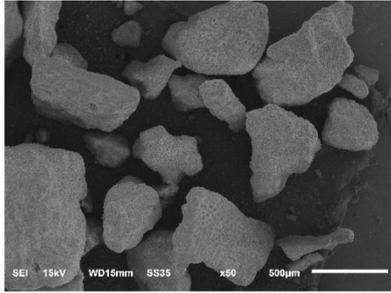


图 1 珊瑚砂颗粒电镜扫描图像

Fig. 1 Scanning electron microscope image of coral sand particles

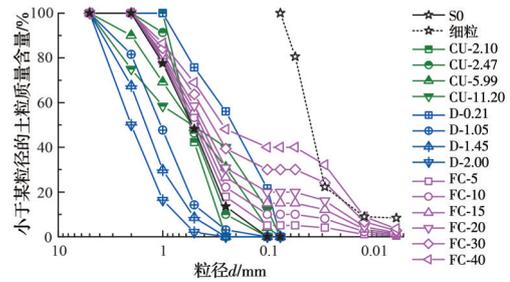


图 2 南沙珊瑚砂级配曲线

Fig. 2 Grain size distribution curves of Nansha coral sand

如图 3 所示, 南沙珊瑚砂的最大孔隙比  $e_{max}$  和最小孔隙比  $e_{min}$  均随  $C_u$  的增大而减小;  $e_{max}$  随  $d_{50}$  变化不明显,  $e_{min}$  随  $d_{50}$  的增大而缓慢增大; 以  $F_c=30\%$  为界,  $e_{max}$  和  $e_{min}$  随  $F_c$  的增大先减小后增大。Menq<sup>[5]</sup>总结了陆源砂砾土的  $e_{max}$ 、 $e_{min}$  平均曲线(图 3(a)), 珊瑚砂的孔隙比远大于陆源砂砾土, 主要原因是: 1) 珊瑚砂颗粒形状不规则且棱角度高, 导致珊瑚砂的孔隙比更大<sup>[14]</sup>; 2) 珊瑚砂含有大量内孔隙, 部分内孔隙与外界连通, 成为颗粒的表面孔隙, 导致珊瑚砂的孔隙比比陆源砂砾土的大。

表 1 南沙珊瑚砂物理性能指标、试验工况及最佳拟合参数

Table 1 Properties index of Nansha coral sand, test program and best-fitting parameters of Hardin model

| 组别 | 级配编号     | 物理性质  |                    |          | 初始孔隙比 $e_0$                | 最佳拟合参数         |       |
|----|----------|-------|--------------------|----------|----------------------------|----------------|-------|
|    |          | $C_u$ | $d_{50}/\text{mm}$ | $F_c/\%$ |                            | $A/\text{MPa}$ | $n$   |
| CU | Cu-2.10  | 2.10  | 0.55               | 0        | 1.123, 1.029, 0.943, 0.877 | 104.129        | 0.446 |
|    | Cu-2.47  | 2.47  | 0.53               | 0        | 1.048, 0.947, 0.865, 0.781 | 88.453         | 0.507 |
|    | S0       | 3.27  | 0.52               | 0        | 1.008, 0.910, 0.799, 0.776 | 93.088         | 0.524 |
|    | Cu-5.99  | 5.99  | 0.52               | 0        | 0.852, 0.772, 0.693, 0.644 | 73.332         | 0.545 |
|    | Cu-11.20 | 11.20 | 0.52               | 0        | 0.816, 0.657, 0.617, 0.603 | 74.680         | 0.559 |
| D  | D-0.21   | 3.05  | 0.21               | 0        | 0.967, 0.820, 0.679        | 76.500         | 0.502 |
|    | S0*      | 3.27  | 0.52               | 0        | 1.008, 0.910, 0.799, 0.776 | 93.088         | 0.524 |
|    | D-1.05   | 3.35  | 1.05               | 0        | 1.034, 0.945, 0.826, 0.754 | 94.718         | 0.498 |
|    | D-1.45   | 2.99  | 1.45               | 0        | 1.081, 0.919, 0.853, 0.742 | 96.167         | 0.485 |
|    | D-2.00   | 3.26  | 2.00               | 0        | 1.053, 0.947, 0.863        | 102.496        | 0.454 |
| FC | S0*      | 3.27  | 0.52               | 0        | 1.008, 0.910, 0.799, 0.776 | 93.088         | 0.524 |
|    | FC-5     | 4.40  | 0.49               | 5        | 0.852, 0.764, 0.673        | 75.865         | 0.533 |
|    | FC-10    | 5.95  | 0.46               | 10       | 0.818, 0.726, 0.561, 0.593 | 69.849         | 0.527 |
|    | FC-15    | 13.00 | 0.43               | 15       | 0.767, 0.694, 0.584        | 67.599         | 0.551 |
|    | FC-20    | 22.19 | 0.40               | 20       | 0.727, 0.653, 0.563        | 65.377         | 0.562 |
|    | FC-30    | 26.86 | 0.34               | 30       | 0.658, 0.588, 0.513        | 63.820         | 0.582 |
|    | FC-40    | 26.32 | 0.27               | 40       | 0.663, 0.573, 0.487        | 68.730         | 0.532 |

注: \*表示重复土样; 不同工况下式(2)中参数  $c$  均取  $-0.924$ 。

### 1.2 试验过程

试验采用美国 GCTS 公司研制的 TSH-100“固定-自由”型共振柱仪, 如图 4 所示, 仪器性能指标详

见文献[15]。固结压力通过气压伺服系统控制, 试样底部固定, 顶部采用全自动悬浮扭转马达进行激励, 土样剪应变由顶部马达延长臂上加速度传感器

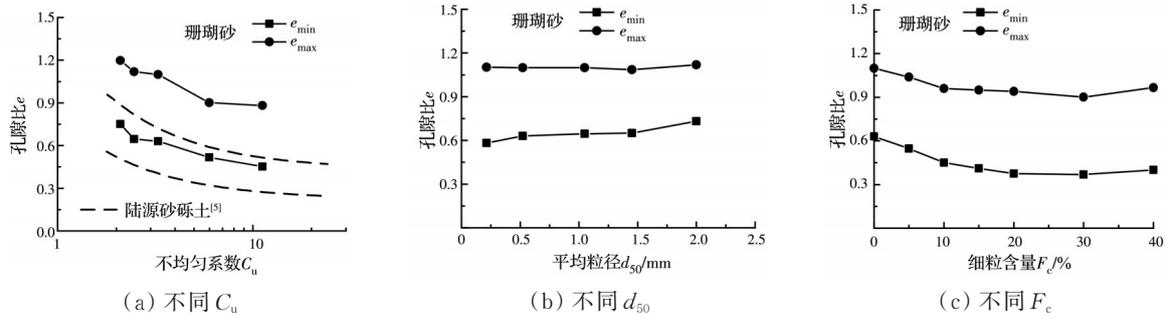


图 3 南沙珊瑚砂和陆源砂砾土的最大、最小孔隙比

Fig. 3 Maximum and minimum void ratios of Nansha coral sand and terrigenous sandy and gravelly soils

测得。保持激振荷载不变,通过扫频激振方式确定试样剪应变幅值最大时的共振频率 $f_1$ ,动剪切模量 $G$ 通过式(3)确定。

$$G = \rho V_s^2 = \rho \left( \frac{2\pi h f_1}{\varphi_1} \right)^2 \quad (3)$$

式中 $\varphi_1$ 根据式(4)计算。

$$\varphi_1 \tan(\varphi_1) = I_\theta / I_t \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为试样密度; $V_s$ 为剪切波速; $h$ 为试样高度; $I_\theta$ 为圆柱试样绕轴线的转动惯量; $I_t$ 为顶部所有参振部件的转动惯量。

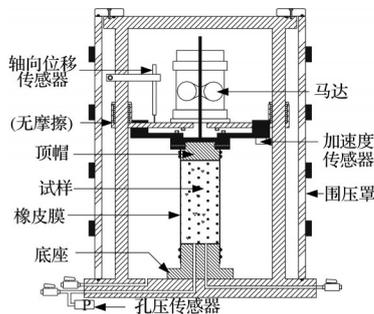


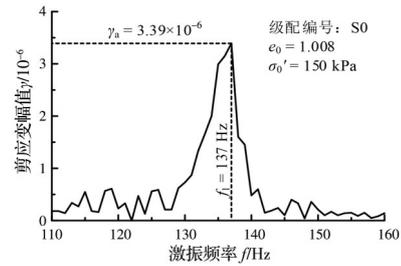
图 4 TSH-100 共振柱仪原理图

Fig. 4 Schematic diagram of TSH-100 resonant column apparatus

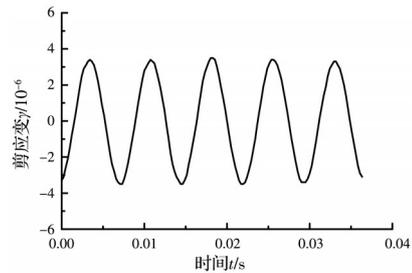
图 5 为典型的共振柱扫频激振试验结果,不同激振频率下试样的应变幅值如图 5(a)所示,由此获得相应激振剪应变 $\gamma_a$ 最大时的共振频率。共振频率下试样的应变时程如图 5(b)所示。

试样直径 50 mm、高度 100 mm,制样方法参考文献[11]。每组级配按不同初始孔隙比 $e_0$ 配制 3~4 个试样(表 1),联合采用通 $\text{CO}_2$ 、通循环无气水与施加反压(200 kPa)3 种方法进行饱和,使 $B$ 值大于 0.95。

由于试验为无损测试,可对同一试样按 $\sigma'_0 = 20, 50, 100, 150, 200, 300$  kPa 的次序进行等压固结和共振柱试验,每级固结时间不少于 30 min,并记录



(a) 扫频结果



(b) 共振频率下的应变时程记录

图 5 珊瑚砂的典型共振柱试验结果

Fig. 5 Typical test results of resonant column test on coral sand

试样的体应变 $\epsilon_v$ ,由此计算每级固结后试样的实际孔隙比 $e$ 。每级固结完成后,均对试样进行激振,测试小应变幅值 $\gamma_a(10^{-6}$ 量级)下的 $G$ 即为最大动剪切模量 $G_0$ 。

## 2 试验结果及 $G_0$ 预测模型

### 2.1 试验结果

所有 53 个南沙岛礁珊瑚砂试样的 $G_0$ 测试结果如图 6 所示,图例中试样编号的末位数字为同一级配下 $e_0$ 从大到小次序的序号。表 2 总结了部分典型的 $G_0$ 经验模型<sup>[5-6,10,12]</sup>。采用现有 $G_0$ 模型对南沙珊瑚砂 $G_0$ 值进行预测,如图 7 所示。可以发现:式(2)形式的 $G_0$ 模型,尤其是Menq<sup>[5]</sup>模型和Senetakis等<sup>[10]</sup>模型预测结果的离散性较小;陆源砂砾土的 $G_0$ 模型低估了约 40% 的南沙珊瑚砂 $G_0$ 值。

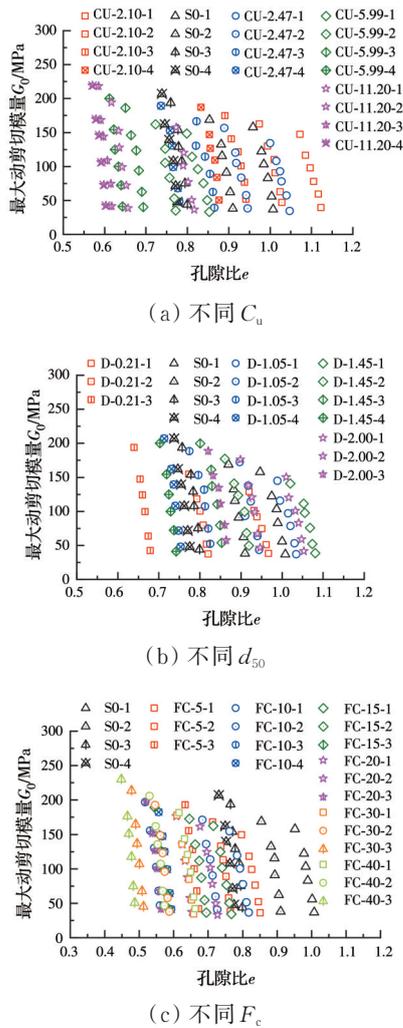


图 6 珊瑚砂的  $G_0$  试验结果  
 Fig. 6 The measured  $G_0$  of coral sand

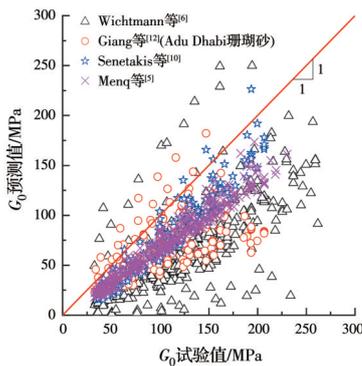


图 7 陆源砂砾土模型预测的南沙珊瑚砂  $G_0$  与试验值对比  
 Fig. 7 The predicted  $G_0$  by the empirical equations of terrigenous sandy and gravelly soils versus the measured  $G_0$  of Nansha coral sand

基于式(2)的形式建立珊瑚砂的  $G_0$  预测模型。图 8 为相同  $\sigma'_0$  (150 kPa) 下珊瑚砂  $G_0$  与  $e$  的关系, 可以发现: 1) 双对数坐标中, 同一  $\sigma'_0$  下的  $G_0$ - $e$  呈直线关系, 其斜率即为式(2)中的参数  $c$ ; 2) 不同级配的  $\lg G_0$ - $\lg e$  曲线互相平行, 说明参数  $c$  的取值

(-0.924) 与级配无关, 与 Payan 等<sup>[9]</sup> 的结论一致; 3) 同一  $\sigma'_0$  下, 珊瑚砂的  $G_0$ - $e$  曲线随  $C_u$  的增大而降低 (图 8(a)), 随  $d_{50}$  的增大而上移 (图 8(b)), 以  $F_c \approx 20\%$  为界, 随  $F_c$  的增大先降低后稍微上移 (图 8(c))。将  $G_0$  按  $G_0/e^{-0.924}$  进行规范化, 如图 9 所示, 在双对数坐标中,  $G_0/e^{-0.924}$ - $\sigma'_0/P_a$  同样呈直线关系, 其斜率即为式(2)中的参数  $n$ ,  $\sigma'_0/P_a=1.0$  时对应的  $G_0/e^{-0.924}$  值即为式(2)中的参数  $A$ 。不同工况下, 采用式(2)拟合的参数  $A$  和  $n$  的最佳拟合结果见表 1。

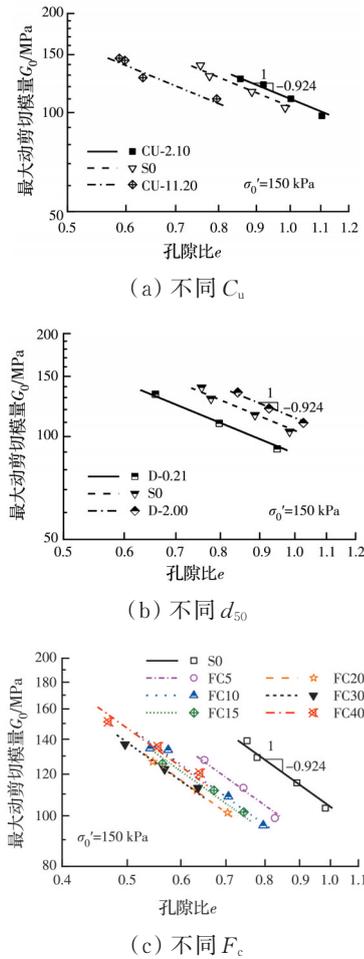


图 8  $G_0$  与  $e$  的关系

Fig. 8 Relationship between  $G_0$  and  $e$  of coral sand

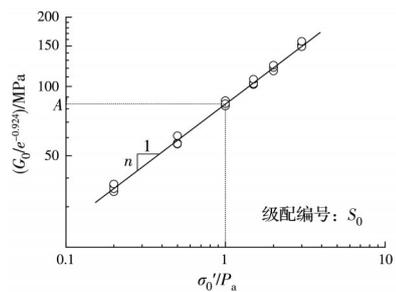


图 9 珊瑚砂的  $G_0/e^{-0.924}$  和  $\sigma'_0/P_a$  的关系  
 Fig. 9 Relationship between  $G_0/e^{-0.924}$  and  $\sigma'_0/P_a$  of coral sand

表 2 考虑级配影响的砂砾土  $G_0$  经验模型汇总

Table 2 Summary of the  $G_0$  empirical equations considering the effect of gradations of granular soils

| 文献来源                        | 试验材料  | $G_0$ 公式 | 模型参数                      |                          |                     |
|-----------------------------|-------|----------|---------------------------|--------------------------|---------------------|
|                             |       |          | $A/\text{MPa}$            | $B$ 或 $c$                | $n$                 |
| Wichtmann 等 <sup>[6]</sup>  | 石英砂   | 式(1)     | $156.3 + 0.313C_u^{2.98}$ | $1.94\exp(-0.066C_u) -$  | $0.40C_u^{0.18}$    |
| Menq <sup>[5]</sup>         | 砂砾土   | 式(2)     | $67.1C_u^{-0.2}$          | $1 - (d_{50}/20)^{0.75}$ | $0.48C_u^{0.09}$    |
| Senetakis 等 <sup>[10]</sup> | 天然石英砂 | 式(2)     | $57.01 - 5.88C_u$         | $-0.98 - 0.28C_u$        | 0.47                |
|                             | 破碎石英砂 |          | $78.15 - 9.45C_u$         | $-0.98 - 0.28C_u$        | 0.63                |
|                             | 火山砂   |          | $52.02 - 3.04C_u$         | $-0.98 - 0.28C_u$        | 0.55                |
| Ha Giang 等 <sup>[12]</sup>  | 珊瑚砂   | 式(2)     | $115.371\exp(-0.107C_u)$  | $4.416\exp(-0.29C_u)$    | $0.421C_u^{-0.125}$ |

2.2  $G_0$  预测模型

通常假设  $C_u$ 、 $d_{50}$  和  $F_c$  对砂砾土  $G_0$  的影响相互独立<sup>[9]</sup>, 则式(2)可改写为

$$G_0 = A_1(C_u)A_2(d_{50})A_3(F_c)e^{-0.924 \cdot (\sigma'_0/P_a)^{n_1(C_u)n_2(d_{50})n_3(F_c)}} \quad (5)$$

式中:  $A_1$ 、 $n_1$  是与  $C_u$  有关的函数;  $A_2$ 、 $n_2$  是与  $d_{50}$  有关的函数;  $A_3$ 、 $n_3$  是与  $F_c$  有关的函数。

CU 组试样的  $d_{50}$  几近相同,  $F_c = 0\%$ , 参数  $A$  和  $n$  的变化主要由  $C_u$  的变化引起, 参数  $A$  随  $C_u$  的增大而减小, 且减小的速率逐渐减慢(图 10(a)); 参数  $n$  随  $C_u$  的增大而增大, 且增大速率逐渐减慢(图 10(b))。参数  $A_1$  和  $n_1$  的最佳拟合表达式为

$$A_1 = 228.85 - 163.37 \times \frac{C_u^{2.04}}{0.88 + C_u^{2.04}} \quad (6)$$

$$n_1 = 0.56 \times \frac{C_u^{2.04}}{0.88 + C_u^{2.04}} \quad (7)$$

D 组试样的  $C_u$  几近相同,  $F_c = 0\%$ , 将 D 组试验

结果拟合的  $A$  和  $n$  分别对  $A_1$  和  $n_1$  规准化, 得到消除  $C_u$  影响的  $A_2(A/A_1)$  和  $n_2(n/n_1)$ 。  $A_2$  随  $d_{50}$  的增大而线性增大(图 10(c)),  $n_2$  随  $d_{50}$  的增大而线性减小(图 10(d)), 由此, 参数  $A_2$ 、 $n_2$  可表示为

$$A_2 = 0.92 + 0.137d_{50} \quad (8)$$

$$n_2 = 1.02 - 0.065d_{50} \quad (9)$$

FC 组土样的  $C_u$  和  $d_{50}$  均随  $F_c$  变化(表 1)。同样, FC 组试验结果拟合的  $A$  和  $n$  分别对  $A_1 \times A_2$  和  $n_1 \times n_2$  规准化, 消除  $C_u$  和  $d_{50}$  的影响, 得到  $A_3(A/A_1/A_2)$  和  $n_3(n/n_1/n_2)$  随  $F_c$  的变化关系。  $A_3$  随  $F_c$  的增大而略有减小(图 10(e)),  $n_3$  随  $F_c$  无明显变化规律(图 10(f))。  $F_c$  从 0% 增加至 40%,  $A_3$  和  $n_3$  的变化均不超过 5%。因此, 相比于  $C_u$  和  $d_{50}$  对珊瑚砂  $G_0$  的影响,  $F_c$  的影响可以忽略。  $F_c$  对珊瑚砂  $G_0$  影响的根本原因是:  $F_c$  变化引起  $C_u$  和  $d_{50}$  的改变, 从而导致珊瑚砂的  $G_0$  发生变化, 也即,  $C_u$  和  $d_{50}$  对  $G_0$  的影响隐含了  $F_c$  对  $G_0$  的影响。

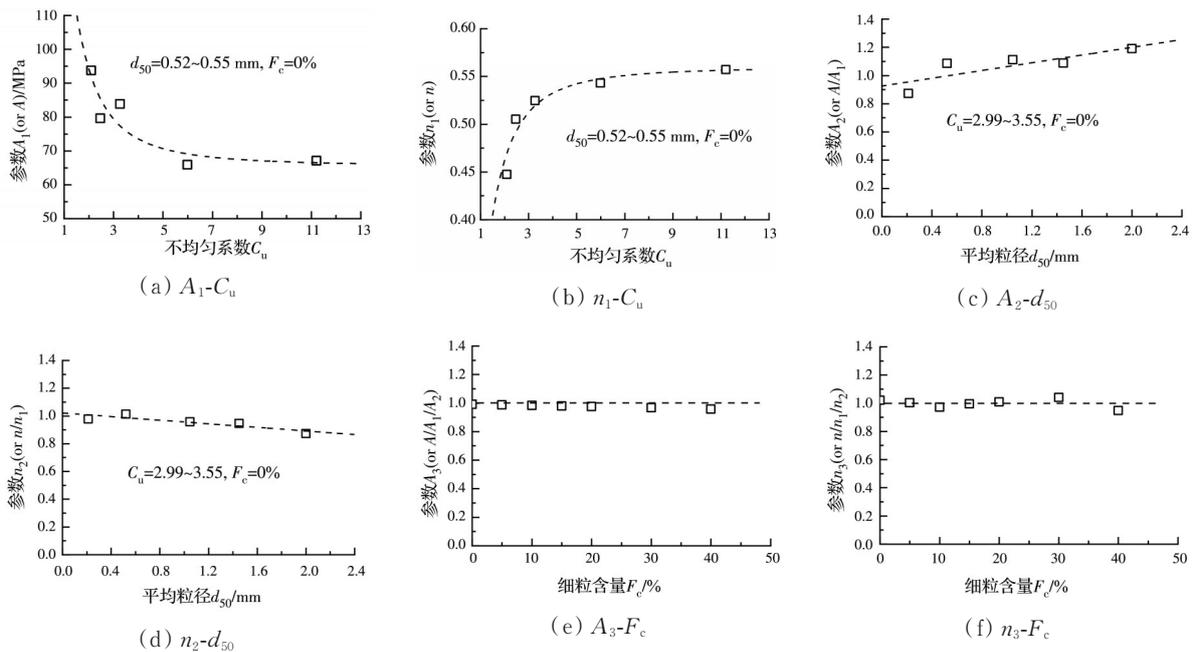


图 10 物理性能指标  $C_u$ 、 $d_{50}$  和  $F_c$  对  $G_0$  预测模型参数的影响

Fig. 10 The influence of properties index  $C_u$ ,  $d_{50}$  and  $F_c$  on the parameters of  $G_0$  prediction equation

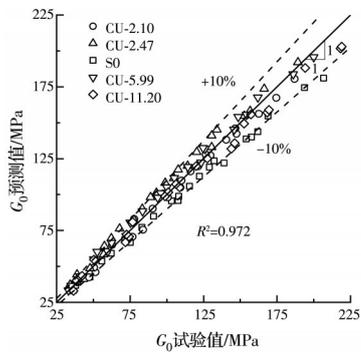
现有研究表明:砂类土的  $G_0$  和  $\sigma'_0$  的关系与颗粒类型(颗粒形状、矿物特性)有很强的相关性<sup>[10,12,16]</sup>。引入修正系数  $A'$ ,以考虑颗粒类型等未涉及因素对珊瑚砂  $G_0$  的综合影响,则珊瑚砂  $G_0$  经验模型可采用式(10)表示。

$$G_0 = A' A_1 (C_u) A_2 (d_{50}) e^{-0.924 (\sigma'_0 / P_a)^{n_1 (C_u) n_2 (d_{50})}} \quad (10)$$

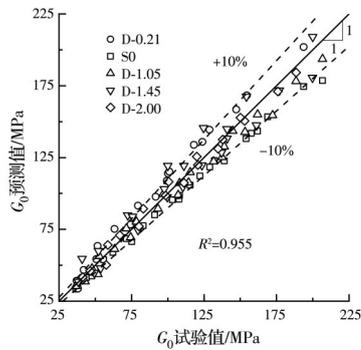
### 3 $G_0$ 预测模型验证

图 11(a)、(b)对比了基于 CU 组和 D 组试验结果建立的  $G_0$  预测模型的预测值和试验值。由图可见,预测值的相对误差基本都不超过 10%,且散点均匀地分布在 45° 线两侧。

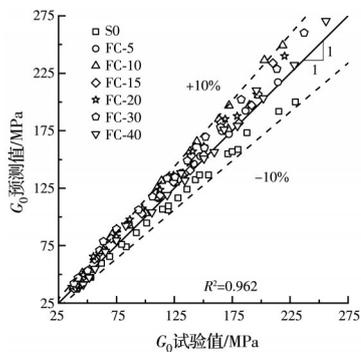
在  $G_0$  预测模型式(10)中,  $F_c$  的影响是隐式的,



(a) CU 组



(b) D 组



(c) FC 组

图 11 珊瑚砂的  $G_0$  预测值与试验值的对比

Fig. 11 Comparison between the predicted and measured  $G_0$  of coral sand

FC 组的  $G_0$  预测值和试验值的对比结果如图 11(c) 所示,相对误差不超过 10%,说明  $F_c$  对珊瑚砂  $G_0$  的影响确实已隐含在  $C_u$  和  $d_{50}$  对  $G_0$  的影响中。

为验证  $G_0$  预测模型式(10)对不同海洋珊瑚砂的适用性,对西沙岛礁珊瑚砂试样也进行了共振柱试验,并获取了文献中其他 3 个海洋珊瑚砂的  $G_0$  试验值<sup>[12-13,17-18]</sup>,相应的物理性质指标见表 3。不同海洋珊瑚砂的  $e_{max}$  和  $e_{min}$  具有显著差异,主要原因是不同海洋珊瑚砂的颗粒形状差异较大,且其矿物成分不完全相同,如南沙珊瑚砂主要为珊瑚碎屑,颗粒多为粒状和杆状;而西沙珊瑚砂含有较多的贝壳碎屑,多片状颗粒,颗粒的不规则性强于南沙珊瑚砂。如图 12(a)所示,当不考虑珊瑚砂颗粒类型影响时( $A'$  统一取 1.0),对不同海洋的珊瑚砂,  $G_0$  预测模型式(10)预测值与试验值的散点不再均匀地分布在 45° 线两侧,在比例上存在一定差异,需向两侧旋转偏移一定角度,但同类珊瑚砂的  $G_0$  预测值与试验值散点的离散程度比较小,说明式(10)可靠地揭示了级配特征对珊瑚砂  $G_0$  的影响,只需对  $G_0$  预测模型式(10)进行简单修正,即可适用于不同海洋珊瑚砂的  $G_0$  预测。

表 3 不同海洋珊瑚砂的物理性能指标

Table 3 Index properties of coral sands from different seas

| 名称                               | $G_s$ | $C_u$ | $d_{50}/\text{mm}$ | $F_c/\%$ | $e_{min}$ | $e_{max}$ | $A'$ |
|----------------------------------|-------|-------|--------------------|----------|-----------|-----------|------|
| Dabaa <sup>[13]</sup>            | 2.79  | 2.40  | 0.31               | 8.75     | 0.75      | 1.04      | 0.94 |
| Abu Dhabi (S) <sup>[12]</sup>    | 2.79  | 3.46  | 0.73               |          | 0.90      | 1.33      | 1.00 |
| Abu Dhabi (VS) <sup>[12]</sup>   | 2.79  | 5.43  | 0.43               |          | 0.51      | 0.96      | 0.86 |
| Abu Dhabi (S1) <sup>[12]</sup>   | 2.79  | 1.86  | 0.23               |          | 0.93      | 1.47      | 0.89 |
| Abu Dhabi (SVS) <sup>[12]</sup>  | 2.79  | 5.43  | 0.43               |          | 0.65      | 1.13      | 0.95 |
| Puerto Rico (CR) <sup>[17]</sup> | 2.86  | 2.10  | 0.38               |          | 1.34      | 1.71      | 1.44 |
| Puerto Rico <sup>[18]</sup>      | 2.87  | 1.75  | 0.13               | <5       | 1.34      | 1.75      | 1.87 |
| 西沙(本文)                           | 2.80  | 3.27  | 0.52               |          | 0.99      | 1.72      | 1.42 |

根据图 12(a),颗粒类型修正系数  $A'$  的取值列于表 3。由图 3 可知,极限孔隙比  $e_{max}$  和  $e_{min}$  与颗粒级配、颗粒形状等特征具有显著相关性。Yilmaz 等<sup>[19]</sup>、Chen 等<sup>[20]</sup>采用极限孔隙比作为综合表征土体物理特征内在物理量,并用于评估饱和砂砾土的液化敏感性。笔者参考上述研究,同样采用极限孔隙比综合反映土体级配、形状、矿物类别等因素,评估  $G_0$  模型的系数  $A'$ ,并进一步发现  $A'$  随珊瑚砂  $e_{max}$  和  $e_{min}$  的增大而增大,可采用式(11)估算。

$$A' = 0.95 + 0.032 \times \left( \frac{e_{min} + e_{max}}{2} \right)^{7.10} \quad (11)$$

根据式(11)估算  $A'$ ,式(10)计算的不同海洋珊瑚砂  $G_0$  预测值与试验值的对比如图 12(b)所示,除

个别数据点外,  $G_0$  预测模型式(10)对不同类型珊瑚砂  $G_0$  的预测误差小于 20%, 且散点也均匀地分布在 45° 线两侧。对于  $G_0$  的预测, 这样的误差在工程实践中是可以接受的。这表明  $G_0$  预测模型式(10)具有较好的普适性。

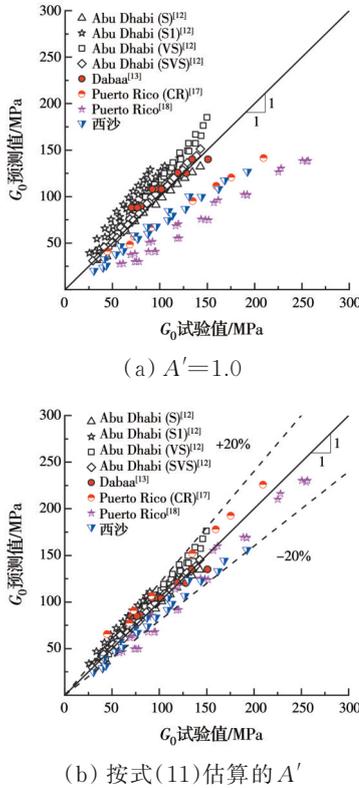


图 12 不同海洋珊瑚砂的  $G_0$  预测值与试验值的对比  
**Fig.12 Comparison between the predicted and measured  $G_0$  for coral sands from different seas**

### 4 结论

通过 15 组不同级配的南沙珊瑚砂的共振柱试验, 研究了孔隙比  $e$ 、平均有效围压  $\sigma'_0$ 、不均匀系数  $C_u$ 、平均粒径  $d_{50}$  和细粒含量  $F_c$  对最大动剪切模量  $G_0$  的影响, 主要结论如下:

- 1) 陆源砂砾土的  $G_0$  经验模型低估了约 40% 的珊瑚砂  $G_0$  值。
- 2) 同一  $\sigma'_0$  下, 珊瑚砂的  $G_0$ - $e$  曲线随  $C_u$  的增大而降低, 随  $d_{50}$  的增大而升高, 以  $F_c \approx 20\%$  为界, 随  $F_c$  的增大先减小后稍微增大。
- 3)  $F_c$  对  $G_0$  影响的本质是不同  $F_c$  的珊瑚砂具有不同的  $C_u$  和  $d_{50}$ ,  $C_u$  和  $d_{50}$  对  $G_0$  的影响隐含  $F_c$  对珊瑚砂  $G_0$  的影响。基于 Hardin 模型, 提出了与  $C_u$ 、 $d_{50}$  相关的珊瑚砂  $G_0$  预测模型。
- 4) 引入与  $e_{max}$  和  $e_{min}$  有关的修正系数  $A'$ , 以考虑  $G_0$  预测模型建模过程中未涉及的颗粒类型等复杂

因素的综合影响。采用南沙、西沙及文献中其他 3 类的珊瑚砂对模型进行验证, 结果表明,  $G_0$  预测模型适用于不同海洋的各类珊瑚砂。

### 参考文献

[1] YANG J, GU X Q. Shear stiffness of granular material at small strains: Does it depend on grain size [J]. *Geotechnique*, 2013, 63(2): 165-179.

[2] 顾晓强, 杨峻, 黄茂松, 等. 砂土剪切模量测定的弯曲元、共振柱和循环扭剪试验[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(4): 740-746.  
 GU X Q, YANG J, HUANG M S, et al. Combining bender element, resonant column and cyclic torsional shear tests to determine small strain shear modulus of sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 740-746. (in Chinese)

[3] 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.

[4] HARDIN B O, RICHART F E Jr. Elastic wave velocities in granular soils [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1963, 89(1): 33-65.

[5] MENQ F. *Dynamic properties of sandy and gravelly soils* [D]. Austin: The University of Texas, 2003.

[6] WICHTMANN T, TRIANTAFYLIDIS T. Influence of the grain-size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus  $G_{max}$  [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(10): 1404-1418.

[7] LIU X, YANG J. Influence of size disparity on small-strain shear modulus of sand-fines mixtures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 115: 217-224.

[8] 毕昇, 陈国兴, 周正龙, 等. 细粒含量及固结应力对饱和砂土动剪切模量和阻尼比影响试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(Sup1): 48-52.  
 BI S, CHEN G X, ZHOU Z L, et al. Experimental study on influences of fines content and consolidation stress on shear modulus and damping ratio of saturated sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(Sup1): 48-52. (in Chinese)

[9] PAYAN M, et al. Effect of particle shape and validity of  $G_{max}$  models for sand: A critical review and a new expression [J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 72: 28-41.

[10] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS

- K. The small-strain shear modulus and damping ratio of quartz and volcanic sands [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012, 35(6): 20120073.
- [11] 梁珂, 何杨, 陈国兴. 南沙珊瑚砂的动剪切模量和阻尼比特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(1): 23-31, 38. LIANG K, HE Y, CHEN G X. 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)
- [12] 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.
- [13] MORSY A M, SALEM M A, ELMAMLOUK H H. Evaluation of dynamic properties of calcareous sands in Egypt at small and medium shear strain ranges [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 116: 692-708.
- [14] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(5): 591-602.
- [15] CHEN G X, ZHAO D F, CHEN W Y, et al. Excess pore-water pressure generation in cyclic undrained testing [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(7): 04019022.
- [16] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K. Normalized shear modulus reduction and damping ratio curves of quartz sand and rhyolitic crushed rock [J]. *Soils and Foundations*, 2013, 53(6): 879-893.
- [17] CATANO J, PANDO M A. Static and dynamic properties of a calcareous sand from southwest Puerto Rico [C]//GeoFlorida 2010. February 20-24, 2010, Orlando, Florida, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2010: 842-851.
- [18] WANG Y. Dynamic properties of fine liquefiable sand and calcareous sand from resonant column testing [D]. Austin: The University of Texas, 2003.
- [19] YILMAZ Y, MOLLAMAHMUTOGLU M. Characterization of liquefaction susceptibility of sands by means of extreme void ratios and/or void ratio range [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(12): 1986-1990.
- [20] CHEN G X, WU Q, SUN T, et al. Cyclic behaviors of saturated sand-gravel mixtures under undrained cyclic triaxial loading [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2021, 25(4): 756-789.

(编辑 王秀玲)