

DOI: 10.11779/CJGE202208003

细粒含量对饱和珊瑚砂动力变形特性影响试验研究

吴 琦^{1,2}, 杨铮涛¹, 刘 抗¹, 陈国兴^{*1,2}

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏南京 210009)

摘要: 为了满足南沙珊瑚岛礁及近岸军事与民事功能设施建设对珊瑚砂动力特性参数的急迫需要, 系统而深入地研究珊瑚砂动力变形特性已是一项紧迫的科学任务。利用共振柱对取自南沙群岛某岛礁的珊瑚砂开展了系列动剪切模量和阻尼比特性试验研究, 探究相对密度 D_r 、初始有效围压 σ'_m 、细粒含量 F_c 对南沙珊瑚砂动力变形的影响。试验结果表明: 反映 σ'_m 对最大动剪切模量 G_{max} 影响程度的应力指数 n 是与土性相关的常数; 结合文献中 3 类砂类土的 G_{max} 试验数据, 发现随等效骨架孔隙比 e_{sk}^* 的增大各砂类土的应力修正最大动剪切模量 $G_{max}/(\sigma'_m/p_a)^n$ 单调减小, 且两者呈现较好的幂函数关系; 在同一应变水平下, 珊瑚砂动剪切模量 G 随 F_c 的增大而减小, 随 D_r 、 σ'_m 的增大而增大; 当剪应变 $\gamma < 10^{-4}$ 时, F_c 、 D_r 与 σ'_m 对阻尼比影响不大, 而 $\gamma > 10^{-4}$ 时, F_c 、 D_r 与 σ'_m 对阻尼比影响显著; D_r 与 σ'_m 对动剪切模量比 G/G_{max} 影响不明显; 而当 $0\% \leq F_c \leq 30\%$ 时, 随 F_c 增大 $G/G_{max} - \gamma$ 衰减曲线不断下降, 给出了珊瑚砂 Davidenkov 模型拟合参数 A 、 B 的建议值, 且发现参考剪应变 γ_0 随 F_c 线性减小。

关键词: 珊瑚砂; 细粒含量; 最大动剪切模量; 动剪切模量比; 阻尼比

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)08-1386-11

作者简介: 吴 琦(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事混合料动力特性试验研究。E-mail: qw09061801@163.com。

Experimental study on influences of fines content on dynamic deformation characteristics of saturated coral sand

WU Qi^{1,2}, YANG Zheng-tao¹, LIU Kang¹, CHEN Guo-xing^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to meet the urgent need for the cyclic characteristic parameters of coral sand in the proper engineering analysis of both military and civilian function facilities located in Nansha reefs and offshore marine areas, it is an important and emergent scientific task to study the dynamic deformation characteristics of the coral sand of the Nansha Islands in China. A series of resonance column tests are carried out on the saturated coral sand specimens from Nansha Islands. The aim of the tests is to investigate the effects of relative density D_r , initial effective confining pressure σ'_m and fines content F_c on the dynamic deformation characteristics of the specimens. The test results show that the stress exponent n , reflecting the rates of G_{max} increment due to the enhancement of σ'_m , presents a soil-specific constant. Synthesising the test data here and from three saturated sandy soils in the literatures, it is found that the stress-corrected maximum shear modulus $G_{max}/(\sigma'_m/p_a)^n$ decreases monotonically with the increase of the equivalent skeleton void ratio e_{sk}^* , and a power relationship between $G_{max}/(\sigma'_m/p_a)^n$ and e_{sk}^* is then obtained. At the same strain level, the dynamic shear modulus G of the coral sand decreases with the increase of F_c , and increases with the increase of D_r and σ'_m . F_c , D_r and σ'_m have few effects on the damping ratio when the shear strain $\gamma < 10^{-4}$, but have a significant effect on the damping ratio when $\gamma > 10^{-4}$. D_r and σ'_m have no obvious influences on the dynamic shear modulus ratio G/G_{max} . When $0\% \leq F_c \leq 30\%$, the $G/G_{max} - \gamma$ attenuation curve continues to decline with the increase of F_c . The recommended values of fitting parameters A and B of the Davidenkov model for the coral sand are given, and it is found that the reference shear strain γ_0 decreases linearly with F_c .

Key word: coral sand; fines content; maximum dynamic shear modulus; dynamic shear modulus ratio; damping ratio

0 引言

随着“一带一路”倡议及“海洋强国”战略的稳步推进, 中国南海岛礁的建设正在持续进行。目前南

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008206); 国家重点发展计划项目(2018YFC1504301)

收稿日期: 2021-09-19

*通信作者(E-mail: gxc6307@163.com)

海许多工程都采用珊瑚砂作为回填土, 为保证建设的安全性, 珊瑚砂动力特性的研究势在必行。珊瑚砂作为珊瑚岛礁的岩土介质, 其碳酸钙含量高达90%以上。因其在沉积过程中与陆源砂具有较大差异, 因而具有棱角度高、强度低、易破碎、形状不规则、存在内孔隙等特点^[1]。珊瑚砂场地产生动力失稳的现象常有发生, 例如1993年关岛地震、2006年夏威夷地震、2010年海地地震, 都有珊瑚砂发生严重液化和侧向滑移的现象, 并造成大量港口设施和港地建筑破坏^[2]。因此, 岛礁珊瑚砂的动力变形特性已然成为科研人员关注的重要对象。

动剪切模量G、最大剪切模量 G_{\max} 、动剪切模量比 G/G_{\max} 和阻尼比 λ 与剪应变 γ 的关系曲线是工程场地地震效应评价的最基本参数。目前国内外已有学者对珊瑚砂动力变形特性开展了研究。刘鑫等^[3]对南海珊瑚砂进行了系列共振柱试验, 结果表明: 当 $\gamma < 0.1\%$ 时, G/G_{\max} 随 γ 的衰减速率比石英砂快, 并提出了修正的双曲模型计算珊瑚砂的 G/G_{\max} 和 λ ; 在相同条件下, 珊瑚砂的 G_{\max} 、 λ 都比石英砂大, 这与Pando等^[4]和Carraro等^[5]的试验结论一致。而Catano等^[6]对CaboRojo珊瑚砂研究发现: 珊瑚砂的G比石英砂的小, 但珊瑚砂与石英砂的 λ 相比无明显差异。Jafarian等^[7]试验发现: Bushehr珊瑚砂的 G/G_{\max} 和 λ 对相对密度 D_r 并不敏感, 但初始有效围压 σ'_m 对其的影响较为显著, σ'_m 越大, G/G_{\max} 衰减越慢, λ 越小。Pham等^[8]指出: 珊瑚砂在均等固结下的 G_{\max} 随 σ'_m 与 D_r 的增大而单调增大; 并给出了颗粒级配对珊瑚砂的 G_{\max} 有很大影响的结论。梁珂等^[9]经系统研究发现相同 σ'_m 下, 不同海域的珊瑚砂 G_{\max} 的分布存在上下边界限, 并引入极限孔隙比的概念, 提出了针对不同类别、不同级配砂土预测 G_{\max} 的新模型。Morsy等^[10]通过共振柱对埃及Dabaa和Agami珊瑚砂进行了研究, 试验发现: 最小阻尼比对 σ'_m 不敏感; 珊瑚砂颗粒的不规则性导致珊瑚砂的 G_{\max} 随 σ'_m 的增长而增加的速度比石英砂大。高冉等^[11]指出岛礁钙质砂的动态变形模量 E_d/E_0 与归一化轴向应变 $\varepsilon_m/\varepsilon_r$ 之间的关系不受干密度和颗粒级配的影响, 具有很好的统一性。梁珂等^[12-13]分别对南海珊瑚砂与常规陆源砂进行了对比试验研究, 结果表明: 同一试验条件下珊瑚砂的 G_{\max} 比陆源砂大, 陆源砂的 G_{\max} 、 G/G_{\max} 及 λ 的经验模型并不适用与珊瑚砂, 并给出了适用于珊瑚砂 G/G_{\max} 以及 λ 随 γ 变化的经验公式及其相关的参数。史金权等^[14]利用多方向弯曲元测试对波斯湾人工岛礁的珊瑚砂 G_{\max} 进行研究, 各向同性固结下, 钙质砂的 G_{\max} 各向异性显著, 表现为水平向 G_{\max} 值大于垂直向 G_{\max} 。上述研究成果为深入认识珊瑚砂动力变形特性提供了重要参考。

需要指出的是, 王刚等^[15]、张家铭等^[16]、Hall等^[17]、Wei等^[18]分别从应力、应变、围压以及级配等因素进行珊瑚砂颗粒破碎研究并发现: 珊瑚砂在常规工程应力水平下就很容易被压碎且产生细粒(粒径小于0.075 mm), 形成具有不同细粒含量的珊瑚砂类土。已有研究成果表明, 细粒含量 F_C 对土体力学特性影响显著^[19-20]。如胡明鉴等^[21]试验表明: 促使珊瑚砂渗透性发生明显变化的是细粒, 珊瑚砂的渗透系数随 F_C 的增大而减小, 当 $F_C > 24\%$, 渗透性基本保持不变。张晨阳等^[22]开展了不同 F_C 的珊瑚砂三轴固结排水剪切试验, 试验发现: 土样剪胀性随 F_C 的增大而逐渐减弱, 土体强度稳定性随 F_C 的增大先减小后增大, 当 $F_C = 10\%$ 时, 体强度稳定性最差。王刚等^[15]研究发现: 在较大的循环应力比($CSR > 0.6$)作用下, 珊瑚砂会产生明显的尖角磨损, 从而导致其 F_C 增大, 循环应力比或循环振次越大, F_C 增加约明显, 但其增加速率逐渐降低。综上, F_C 增大会显著改变土体动力学特性, 鉴于南沙岛礁建设的工程愈来愈多且规模庞大, 有必要深入开展不同 F_C 的南海珊瑚砂的G和 λ 的试验研究, 以满足南海岛礁建设的迫切需要。

基于南沙海域地震频发的场地特性与岛礁基础设施建设的工程背景, 本文旨在探究 F_C 对珊瑚砂动力变形特性的影响。针对珊瑚砂进行共振柱试验, 探究了 F_C 、 D_r 以及 σ'_m 对珊瑚砂G、 G_{\max} 、 G/G_{\max} 衰退曲线和 λ 增长曲线的影响规律, 建立珊瑚砂 G_{\max} 的统一评价方法, 并给出考虑 F_C 影响的珊瑚砂 G/G_{\max} 随剪应变衰退的预测模型, 以期为南沙海域抗震区划与南沙岛礁工程的建设提供参考。

1 二元介质理论

理想二元介质材料特性的砂类土中的颗粒接触状态主要分为两大类^[23-26]: ①接触状态1。类砂粒土为主体骨架由砂粒构成的土体。细粒的含量较少时, 各砂粒直接接触, 而细粒仅处于砂粒间的孔隙中, 此时颗粒间的接触状态为1-1; 随细粒的不断增多, 一部分细粒填充在砂粒间的孔隙中, 另一部分参与砂粒间的直接接触, 但土体的主骨架仍由砂粒组成, 此时颗粒间的接触状态为1-2。②接触状态2。类细粒土为主体骨架由细粒构成的土体。当细粒的含量超过某一定值时, 主体骨架的构成由砂粒转为细粒, 此时细粒间直接接触, 而砂粒间无直接接触。但细粒间的接触受砂颗粒的影响, 影响程度随 F_C 的增加呈现出减小的趋势。

Rahman等^[27]提出区分类砂粒土与类细粒土颗粒

接触状态的阈值细粒含量 F_{Cth} 半经验公式:

$$F_{\text{Cth}} = 0.40 \times \left(\frac{1}{1 + \exp(0.5 - 0.13 \cdot \chi)} + \frac{1}{\chi} \right), \quad (1)$$

式中, $\chi = d_{10}^s / d_{50}^f$ 为颗粒粒径比, d_{50}^s 为纯砂粒有效粒径, d_{50}^f 为纯细粒平均粒径。

Thevanayagam 等^[28]为研究细粒参与土颗粒组成土体骨架的程度, 提出了等效骨架孔隙比 e_{sk}^* 的概念, e_{sk}^* 为组成砂类土骨架颗粒间的孔隙体积与骨架颗粒体积之比:

$$e_{\text{sk}}^* = \frac{e + (1 - b_0) \cdot F_C}{1 - (1 - b_0) \cdot F_C}, \quad (2)$$

式中, b_0 为细粒影响系数, 且 $0 \leq b_0 \leq 1$ 。Mohammadi 等^[29]建立了 b_0 的简化计算方法:

$$b_0 = \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{0.3}{k} \right] \right\} \left(r \times \frac{F_C}{F_{\text{Cth}}} \right)^r, \quad (3)$$

其中, $r = \chi^{-1}$, $k = 1 - r^{0.25}$ 。

2 试验内容与方法

2.1 试验仪器

试验设备采用美国 GCTS 公司的 TSH-100 型高精度固定-自由型共振柱测试系统。固结压力通过气压伺服系统控制, 采用全自动悬浮扭转驱动系统激振试样顶部。土样剪应变由顶部马达延长臂上加速度传感器测得, 通过八通道数字采集系统记录 0.2 ms 间隔的土体应变响应曲线, 可获得土体共振频率、最大剪切应变、剪切波速、剪切模量等参数, 精度可达 10^{-6} 。

2.2 试验材料及试样制备

试验采用南沙群岛某岛礁的珊瑚砂, 是由一种海洋生物残骸经物理、化学、生物作用形成的特殊海洋土, 珊瑚砂颗粒的成分主要为文石和高镁方解石, 且 CaCO_3 占 90%以上, 属于钙质砂, 经测定其相对质量密度为 2.80。珊瑚砂颗粒棱角度高、易胶结、易破碎、且表面粗糙并含内孔隙等性质^[30-31], 珊瑚砂特殊的物理特性致其工程力学性质比一般陆源沉积物相比有很大的差异。

将 0.075 mm 以下的珊瑚砂颗粒视为细粒, 而其余的颗粒作为砂粒。将不同质量的细粒与砂粒均匀混合获取具有不同细粒含量 F_C 的珊瑚砂。纯砂粒、纯细粒及具有不同 F_C 的珊瑚砂的级配曲线如图 1 所示。表 1 给出了与之相对应的珊瑚砂基本物理参数指标, 其中最大、最小孔隙比采用 ASTM 规范方法测得^[32-33], 鉴于《土工试验方法标准: GB/T 50123—2019》^[34]建议的“锤击法”会引起珊瑚砂颗粒破碎, 从而改变其级配特征, 导致测试结果不准确, 本试验所用珊瑚砂的最小孔隙比采用 ASTM D 4253—16 “振动法”测

得^[33]。结合式 (1) 可确定试验所用珊瑚砂 $F_{\text{Cth}} = 30\%$ 。

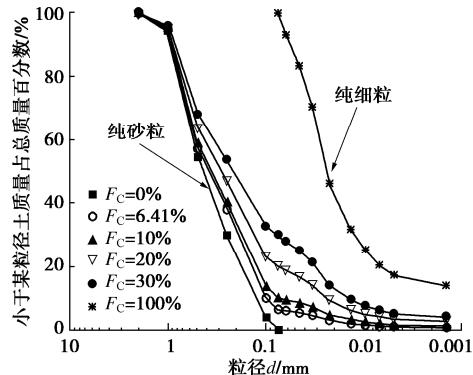


图 1 珊瑚砂级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of coral sand

表 1 纯砂粒、纯细粒及不同 F_C 的珊瑚砂基本物理指标

Table 1 Index properties of clean sand, pure fines and coral sand with varying F_C

物理 指标	细粒含量 $F_C/\%$					
	0	6.41	10	20	30	100
e_{\max}	1.79	1.72	1.70	1.65	1.62	1.52
e_{\min}	1.12	0.99	0.91	0.77	0.69	0.89
d_{50}/mm	0.44	0.38	0.35	0.28	0.21	0.03
C_u	4.53	5.41	6.58	17.82	23.69	—
C_c	0.91	0.71	0.84	1.59	1.19	—

注: e_{\max} 为最大孔隙比; e_{\min} 为最小孔隙比; d_{50} 为平均粒径; C_u 为不均匀系数; C_c 为曲率系数。

采用干装法制备重塑样^[35]。将珊瑚砂均分 4 层倒入空心圆柱模具的承膜筒内, 为保证试样均匀性, 各层土之间刮毛处理^[28]。装样完成后, 联合使用 CO_2 置换、通入无气水及分级反压饱和的方法对试样进行饱和, 当孔压系数 $B \geq 0.97$, 认为试样完全饱和, 对饱和后的试样进行逐级等压固结。固结完成后, 对试样进行各应变范围的动剪切模量与阻尼比测试。为研究松散、中密和密实 3 种不同状态对珊瑚砂动力变形特性的影响, 将 D_f 分别设置为 30%, 45% 及 70%。考虑 F_C , D_f 及 σ'_m 的珊瑚砂动力变形试验方案见表 2。

表 2 珊瑚砂动力变形试验方案

Table 2 Test programs for dynamic deformation characteristics of coral sand

细粒含量 $F_C/\%$	相对密度 $D_f/\%$	初始有效围压 σ'_m/kPa
0	30, 45, 70	100, 200, 300
10	30, 45, 70	100, 200, 300
20	30, 45, 70	100, 200, 300
30	30, 45, 70	100, 200, 300

3 试验结果与分析

3.1 动剪切模量

图 2 为饱和珊瑚砂的 G 与 γ 的关系曲线。由图 2

可知: F_C 对具有不同 D_r 和 σ'_m 的饱和珊瑚砂 G 特性有较为显著的影响, 当 D_r 为定值时, G 随 γ 的增大出现衰减的现象, 且 G 与 γ 的这种衰减关系不随 F_C 及 σ'_m 的变化而改变。当 $1 \times 10^{-6} < \gamma < 1 \times 10^{-5}$, 珊瑚砂处于弹性工作状态, γ 的增大没有引起 G 明显变化, 当 $1 \times 10^{-5} < \gamma < 1 \times 10^{-3}$ 时, 珊瑚砂处于弹—塑性工作状态, γ 越大, 珊瑚砂的塑性状态越明显, 该应变阶段, G 随 γ 的增大迅速衰减, 且衰减速率逐渐增大。对于同一应变水平, 当 $0\% \leq F_C \leq 30\%$ 时, G 随 F_C 的增大而减小, 表明 F_C 的增大会使珊瑚砂的刚度降低; 值得关注的是, $G - \gamma$ 曲线的整体衰减速率随 F_C 的增大略有增强, 这是因为: 对于二元介质材料, 随 F_C 的增大, 组成砂类土骨架的砂粒量减少, 部分细粒替代减少的砂粒参与构建砂类土骨架, 从而减少构力链传递的颗粒间的接触面积; 此外, 另一部分细粒仅填充在土骨架的孔隙内, 未构力链。两者的共同作用导致珊瑚砂的砂粒—砂粒之间的强骨架力链减少, 且部分砂粒—砂粒之间的强骨架力链被砂粒—粉粒弱骨架力链代替, 从而导致珊瑚砂的整体刚度降低, 且促使珊瑚砂的非线性特性增强。此外, G 随 σ'_m 及 D_r 的增大而增大, 该结果与 Liu 等^[36]针对南沙珊瑚砂的研究结论相一致; 但同等条件下, F_C 的增大导致珊瑚砂 G 的衰减程度明显小于 σ'_m 或 D_r 增大导致珊瑚砂 G 的增强程度; 且当 σ'_m 一定时, D_r 越大, 由 F_C 增大引起的饱和珊瑚砂 G 的降低范围越小。

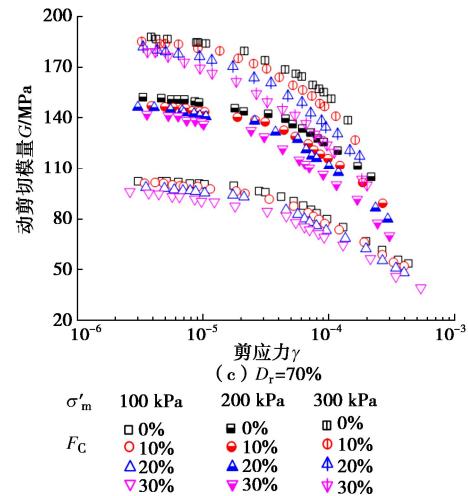
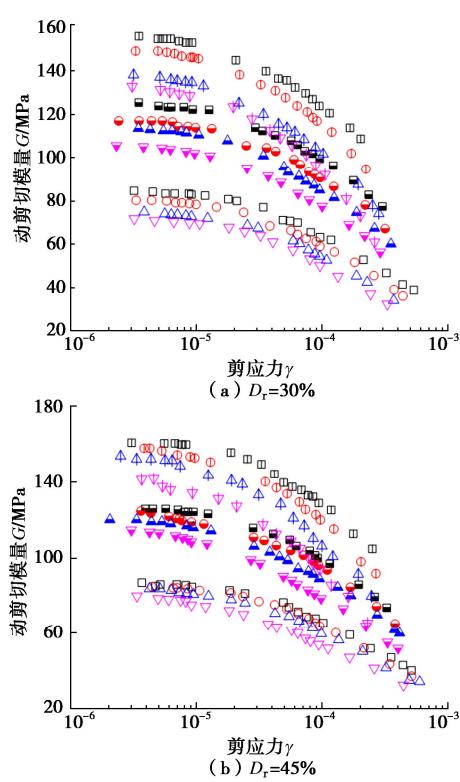


图 2 不同 F_C , D_r 及 σ'_m 下饱和珊瑚砂的 $G - \gamma$ 曲线

Fig. 2 Curves of $G - \gamma$ of saturated coral sand with different F_C , D_r and σ'_m

3.2 最大动剪切模量

最大动剪切模量 G_{max} 是预测土体动力变形与反映土体动力学特性的基础参数, G_{max} 一般是指 $\gamma \leq 10^{-6}$ 时对应的 G 。Hardin 等^[37]提出了 G 与 γ 的双曲线模型, 然后根据 G 的倒数与 γ 的线性关系, 可得到 G_{max} 的计算方法:

$$G_{max} = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{1}{a_1 + b_1 \gamma} , \quad (4)$$

式中, a_1 和 b_1 均为 $1/G$ 与 γ 的线性拟合参数。

砂类土 G_{max} 一般采用 Hardin 模型表示, 其表达式为

$$G_{max} = A_H \cdot e^{-d_H} \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n . \quad (5)$$

式中 A_H 为与土类相关的材料参数; p_a 为标准大气压, 其值取 100 kPa; e 为孔隙比; d_H 为拟合参数; n 为应力指数。

图 3 为饱和珊瑚砂的 G_{max} 与归准化后初始有效围压 σ'_m / p_a 的关系曲线。当其他条件相同时, G_{max} 随 σ'_m / p_a 增大而增大, 且两者基本呈现指数相关性。对比发现: 应力指数 n 对 F_C 和 D_r 的敏感性较小, 且 $n \approx 0.56$, 该现象与 Iwasaki 等^[38]、Yang 等^[39]及 Chien 等^[40]的试验结果基本一致, 但对于不同类型的土, n 差异很大。此外, 上述学者的研究还发现 n 对 e 的敏感性也较小。

图 4 为饱和珊瑚砂的 $G_{max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 与 F_C 关系曲线。由图 4 可知: 当 F_C 相同时, $G_{max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 随 D_r 的增大而显著增大; 当 D_r 相同时, $G_{max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 都随 F_C 的增大而线性减小。这是因为, 当 D_r 相同时, 组成土骨架的砂粒随 F_C 的增大而逐渐减少, 且被部分细颗粒所替代, 致使试样刚度降低, $G_{max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 下降。

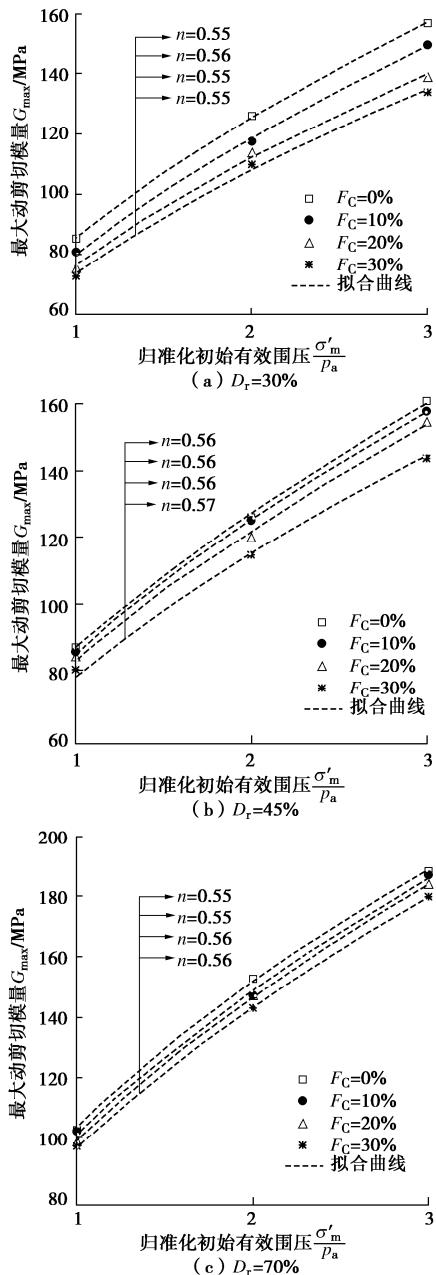
图3 饱和珊瑚砂 G_{\max} 与 σ'_m / p_a 的关系曲线

Fig. 3 Relationship between G_{\max} and σ'_m / p_a for saturated coral sand

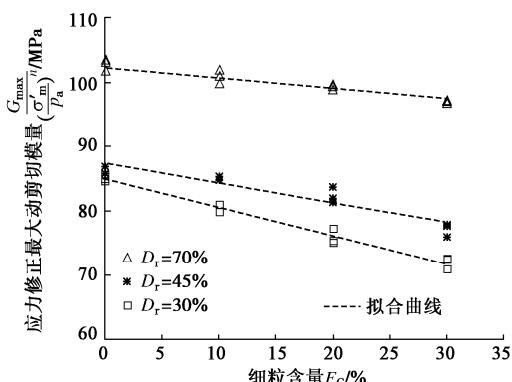
图4 饱和珊瑚砂 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 与 F_C 的关系曲线

Fig. 4 Relationship between $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ and F_C for saturated coral sand

图5为 e 与 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 的关系曲线。当 F_C 为定值时, $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 随 e 的增大而减小, 这是因为随 e 的增加, 土体由密实状态向松散状态转变, 颗粒间的接触面积随之减小, 从而导致 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 的降低。此外, $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 与 e 呈现出较好的幂函数关系, 这表明给定 F_C 时, Hardin模型表达珊瑚砂的 G_{\max} 是合理的; 但随 F_C 的增大, $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 与 e 的关系曲线有所下降, 这表明Hardin模型并不能将不同 F_C 的 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 与 e 的关系曲线归准化。因此, 对于具有不同 F_C 的砂土, e 并不是描述其 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 的有效物理特性指标。

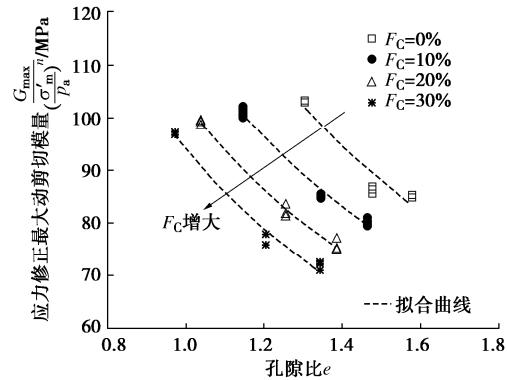
图5 饱和珊瑚砂 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 与 e 的关系曲线

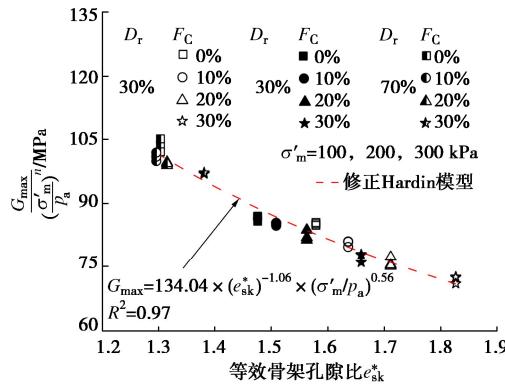
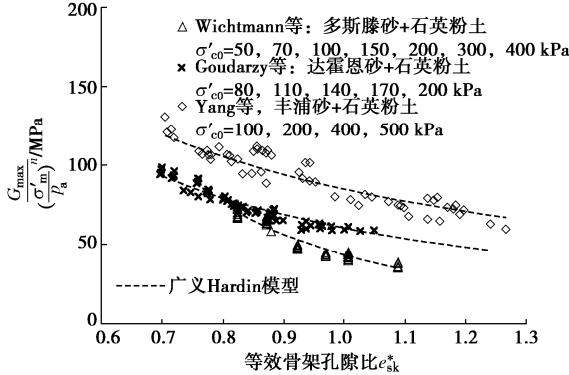
Fig. 5 Relationship between $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ and e for saturated coral sand

图6为饱和珊瑚砂的 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 与 e_{sk}^* 的关系曲线。与液化强度 CRR- e_{sk}^* 的关系类似^[24], 珊瑚砂的 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 同样随 e_{sk}^* 的增大而减小, 且 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 与 e_{sk}^* 的试验数据点有较好的相关性, 且两者的相关性与 F_C , σ'_m 和 D_r 的大小基本无关。这说明, e_{sk}^* 是能全面反映 F_C , e 及 D_r 等各因素对珊瑚砂 G_{\max} 影响的较为适用的物理参数。至此, 可建立基于二元介质模型的广义 Hardin 模型:

$$G_{\max} = M_1 (e_{sk}^*)^{-M_2} (\sigma'_m / p_a)^n \quad . \quad (6)$$

式中, M_1 和 M_2 为拟合参数, 考虑到 n 对 F_C 和 D_r 的不敏感性, 珊瑚砂的应力指数 n 取平均值 0.56。

利用文献[39, 41, 42]的三类含细粒砂土试验数据对广义 Hardin 模型的准确性与合理性进行进一步验证。图7为文献所述三类砂类土的 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 与 e_{sk}^* 的关系曲线以及试验相关信息。由图7可知, 与本文试验结果相一致, 已有文献中三类含细粒砂土的 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 均呈现随 e_{sk}^* 的增大而减小的趋势, 并且 $G_{\max}/(\sigma'_m / p_a)^n$ 与 e_{sk}^* 之间呈现出较好的幂函数关系。这表明基于二元介质模型的广义 Hardin 模型是一个合理表征各类含细粒砂土 G_{\max} 的有效方法。

图 6 饱和珊瑚砂 $G_{\max}/(\sigma'_m/p_a)^n$ 与 e_{sk}^* 的关系曲线Fig. 6 $G_{\max}/(\sigma'_m/p_a)^n$ versus e_{sk}^* for saturated coral sand图 7 文献中所述三类砂土的 $G_{\max}/(\sigma'_m/p_a)^n$ 与 e_{sk}^* 的关系曲线Fig. 7 $G_{\max}/(\sigma'_m/p_a)^n$ versus e_{sk}^* for three types of sand in literatures

3.3 动剪切模量比与阻尼比曲线

为系统分析 F_C , D_r , σ'_m 对珊瑚砂动剪切模量比的影响, 采用三参数 Davidenkov 模型^[38]对南沙珊瑚砂归一化动剪切模量拟合分析:

$$\frac{G}{G_{\max}} = 1 - \left[\frac{(\gamma/\gamma_0)^{2B}}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2B}} \right]^A, \quad (7)$$

式中, A 和 B 为拟合参数, γ_0 为参考剪应变, γ_0 取 $G/G_{\max} = 0.5$ 时对应的剪应变^[43]。需指出, 三参数模型退化为双曲线模型时的 $A = 1$, $B = 0.5$ ^[44]。

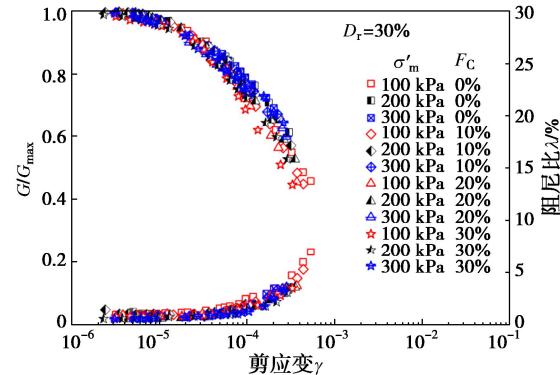
对珊瑚砂的 λ 随 γ 的变化关系采用陈国兴等^[45]提出的经验公式进行拟合分析:

$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_0 \times (1 - G/G_{\max})^\beta, \quad (8)$$

式中, λ_{\min} 为初始阻尼比, 即在小应变情况下所对应的土体阻尼比, 与土的类型及初始应力状态条件相关, λ_0 和 β 为阻尼比曲线的形状系数。

图 8 给出了以 $D_r = 30\%$ 为例, 不同 σ'_m 下饱和珊瑚砂的 γ 与 G/G_{\max} 及 λ 的关系曲线, 需指出 $D_r = 45\%$ 或 70% 与 $D_r = 30\%$ 时得出的试验结论基本一致。图 9 为以 $F_C = 20\%$ 为例, 不同 D_r 下 G/G_{\max} 与 λ 随 γ 的变化关系, 其他不同 F_C 下的珊瑚砂试验结果与 $F_C = 20\%$ 时的类似。由图 8, 9 可知: 珊瑚砂呈现出明显的强非线性与滞后性特征, 即 $\gamma < 10^{-5}$ 时, 不同 σ'_m 以及 D_r

的珊瑚砂 G/G_{\max} 随 γ 的增大均略有衰减, 同时 λ 随 γ 的增大均略有增长; 当 $\gamma > 10^{-5}$ 时, 随 γ 的增大, G/G_{\max} 迅速衰退, λ 则开始逐渐增长, 且增长速度随 γ 增加而变大; 不同 σ'_m 与 D_r 下的珊瑚砂 G/G_{\max} 随动剪应变的变化差别较小, 随 σ'_m 的增大 G/G_{\max} 有所抬升, 没有明显表现出模量比随 σ'_m 的增大而增大的趋势, 这与丁祖德等^[46]对昆明泥炭质土的研究结果一致; 而随 σ'_m , D_r 的增加, 珊瑚砂的 λ 随 γ 的变化较小。



② γ 在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 应变范围内, G/G_{\max} 衰退曲线随 F_C 的变化较小, 近乎重叠, 同时阻尼比曲线几乎不增长, 这表明 F_C 对 G/G_{\max} 衰退曲线以及阻尼比曲线在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 应变范围并不敏感; 在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 应变范围内, F_C 的变化对 G/G_{\max} 与 λ 的影响较大, 二者的分布范围明显增大, 且 G/G_{\max} 曲线衰减速率与阻尼比曲线增长速率随 γ 增大越来越大, 细粒的能量耗散效果逐步体现。③就珊瑚砂阻尼比曲线而言, 在 3 个 D_r 下, 纯砂粒 (即 $F_C = 0\%$) 与含细粒的珊瑚砂在剪应变较小时的阻尼比曲线差异较大, 且这种现象随 D_r 的增加更为明显, 而细粒的多与少对大应变时的阻尼比影响并不是特别大, 究其原因: 细粒在砂颗粒之间充当润滑剂的作用, 细粒的加入会显著影响砂粒之间的摩擦力, 但 F_C 的大小并不会明显加剧这种润滑作用, 这就导致细粒对阻尼比曲线有显著的影响。

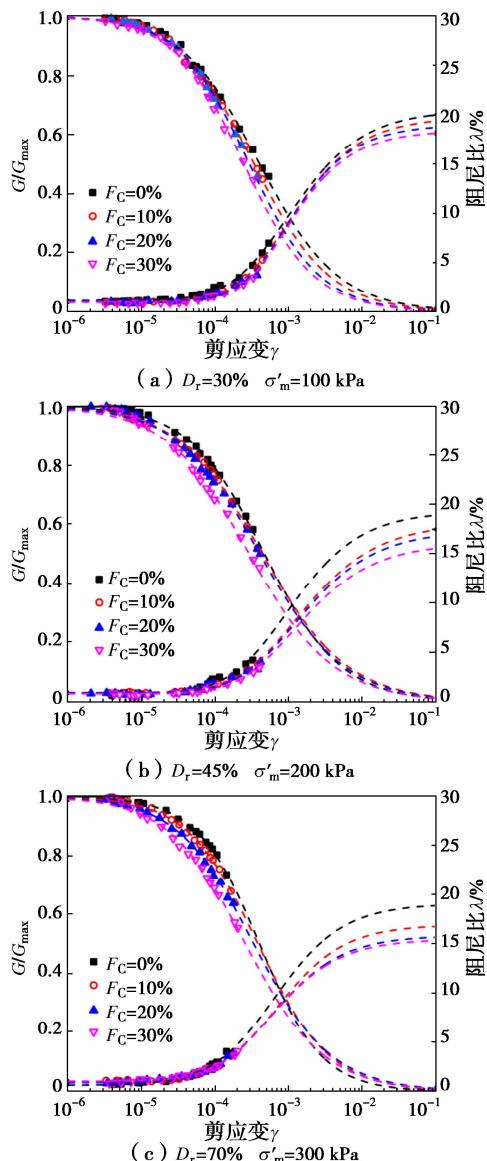


图 10 不同 F_C 下珊瑚砂 G/G_{\max} 与 λ 随 γ 的变化关系

Fig. 10 Relationship between G/G_{\max} , λ and γ of coral sand with different F_C

袁晓铭等^[47]、Kokusho 等^[48]和刘鑫等^[3]分别给出了国内常规土体 (黏土、粉质黏土、粉土、砂土、淤泥质土)、Toyour 砂以及 4 类珊瑚砂的 $G/G_{\max} - \gamma$ 与 $\lambda - \gamma$ 曲线分布统计范围。图 11 为不同 F_C 的南沙珊瑚砂归一化动剪切模量及阻尼比试验结果与上述研究成果的对比, 分析可知: 本试验珊瑚砂的结果处于刘鑫等^[3]给出的 4 种珊瑚砂的 $G/G_{\max} - \gamma$ 分布范围内, 且与 Seed 等^[49]给出的砂土建议的 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线分布范围基本吻合; 当 $F_C = 30\%$ 时, 南沙珊瑚砂试验结果超出了袁晓铭等^[47]给出的 $G/G_{\max} - \gamma$ 下边界范围; 南沙珊瑚砂的 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线形态与袁晓铭等^[47]及 Kokusho 等^[48]研究给出的曲线形态有明显的差异, 且珊瑚砂的 G/G_{\max} 随 γ 衰减的速率明显加快。这与 Liu 等^[5]的试验结论一致。此外, 刘鑫等^[3]给出的珊瑚砂 $\lambda - \gamma$ 分布曲线包含了本试验珊瑚砂阻尼比分布曲线, 但下边界明显超出了 Totour 砂及 Seed 等^[48]建议的砂土 $\lambda - \gamma$ 分布范围。这是因为, 与大部分常规砂土相比, 珊瑚砂具有更明显的棱角度、更低的强度、更丰富的内孔隙等特点, 且本试验中细颗粒的加入进一步降低了珊瑚砂的骨架力链, 从而导致其与常规砂土相比具有更强的非线性及低耗能特性。

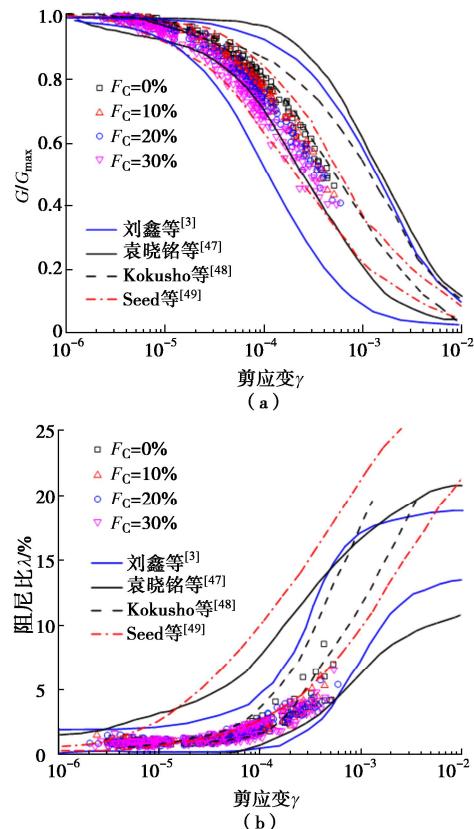


图 11 珊瑚砂试样 $G/G_{\max} - \gamma$ 与 $\lambda - \gamma$ 曲线

Fig. 11 $G/G_{\max} - \gamma$ and $\lambda - \gamma$ curves of coral sand specimens

对珊瑚砂 G/G_{\max} 与 γ 的关系使用 Davidenkov 三参数模型进行拟合, 其中的 A , B , γ_0 三参数在非线

性拟合时具有比较强的随机性, 且与土性以及试验条件有关, G/G_{\max} 衰退曲线与 3 个参数密切相关。图 12 给出了不同 σ'_m , D_r 下饱和珊瑚砂 F_C 与拟合参数 A 和 B 关系曲线, 由图可知, σ'_m , D_r 以及 F_C 对参数 A 和 B 的影响并不明显, 因此推荐对于珊瑚砂使用 Davidenkov 模型三参数模型拟合时, 参数 A 和 B 的分别可取为 1.08 和 0.42。参考剪应变主要受 F_C 影响。图 13 给出了饱和珊瑚砂 F_C 与 γ_0 之间的关系曲线, 由图可见: D_r , σ'_m 与 F_C 均有显著影响, 当 σ'_m , D_r 为定值时, γ_0 随 F_C 的增大而线性减小; σ'_m , D_r 对 γ_0 也有所影响, 但 γ_0 随 σ'_m , D_r 的变化规律不明显。

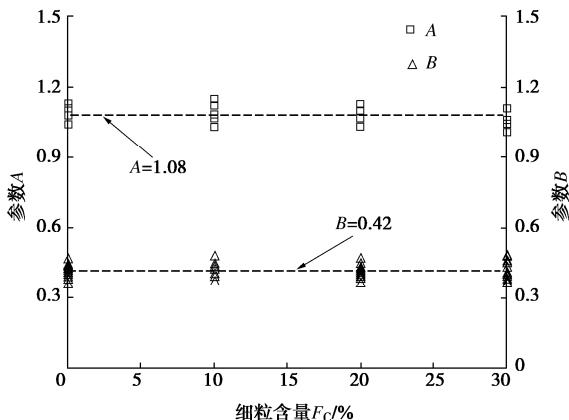


图 12 不同 D_r , σ'_m 下饱和珊瑚砂 F_C 与 A , B 的关系

Fig. 12 Relationship between F_C and A , B of saturated coral sand with different D_r and σ'_m

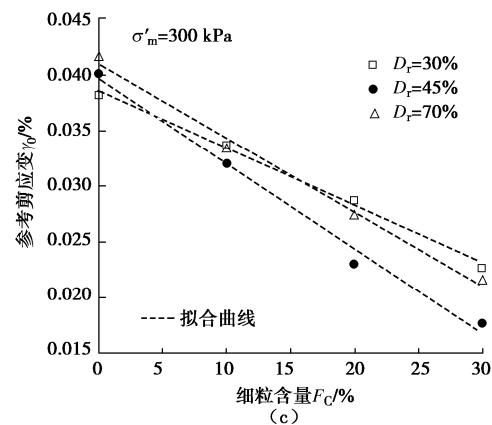
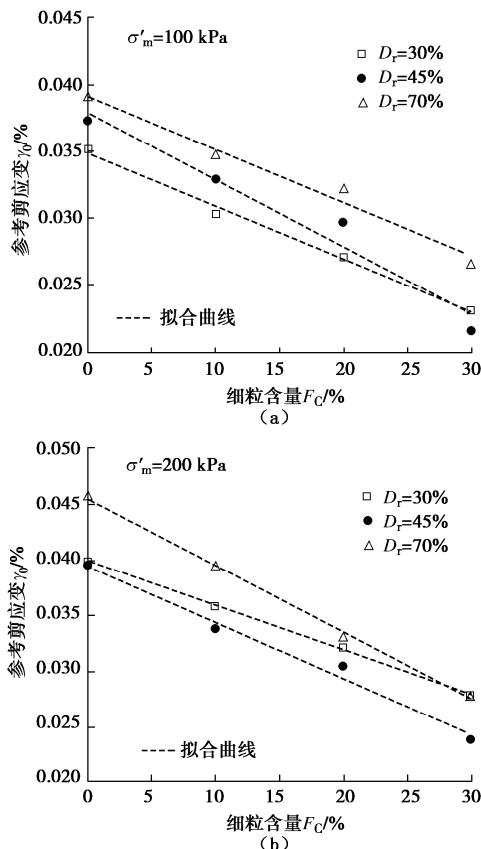


图 13 不同 D_r , σ'_m 下饱和珊瑚砂 F_C 与 γ_0 的关系

Fig. 13 Relationship between F_C and γ_0 of saturated coral sand with different D_r and σ'_m

4 结 论

利用 GCTS 共振柱试验仪对南沙群岛某岛礁珊瑚砂开展系列试验, 分析了珊瑚砂最大动剪切模量 G_{\max} 特性、阻尼比 λ 特性及动剪切模量比 G/G_{\max} 的衰减特性, 着重探究了细粒含量 F_C 的影响, 得到以下 3 点结论。

(1) 在剪应变发展的全部范围内, 随 σ'_m , D_r 的增大, G 增大, 但 G 随 F_C 的增大而减小; 在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 的应变范围内动模量衰减和阻尼比增长速率较为缓慢, 而在 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 的应变范围内动模量衰减速率以及阻尼比的增加速率明显增大, 且速率随应变增大而增大。

(2) 应力修正最大动剪切模量 $G_{\max}/(\sigma'_m/p_a)^n$ 随 D_r 的增大而增大, 随 F_C 的增大而线性减小, 引入二元介质理论, 利用等效骨架孔隙比 e_{sk}^* 描述珊瑚砂的物理状态, 建立了砂类土 G_{\max} 的广义 Hardin 模型, 并用已有文献数据验证了广义模型的普适性。

(3) $G/G_{\max} - \gamma$ 衰退曲线随 F_C 的增大呈现出“由高到低”的变化, 而随 σ'_m , D_r 的增大 $G/G_{\max} - \gamma$ 衰退影响不是很明显; 同时 $\lambda - \gamma$ 增长曲线在大应变时均随 F_C 的增大也呈现出“由高到低”的变化, 而在小应变时 σ'_m , D_r 以及 F_C 对 λ 的影响不大; 并基于 F_C 给出了珊瑚砂 G/G_{\max} 随 γ 衰退的预测模型。

参 考 文 献:

- [1] 刘汉龙, 张宇, 郭伟, 等. 微生物加固钙质砂动孔压模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 790–801.
(LIU Han-long, ZHANG Yu, GUO Wei, et al. A prediction model of dynamic pore water pressure for MICP-treated calcareous sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2021, **40**(4): 790 – 801. (in Chinese))
- [2] 袁晓铭, 张文彬, 段志刚, 等. 珊瑚土工程场地地震液化特征解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 2): 3799 – 3811. (YUAN Xiao-ming, ZHANG Wen-bin, DUAN Zhi-gang, et al. Analysis for characteristics of seismic liquefaction in engineering sites of coralline soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S2): 3799 – 3811. (in Chinese))
- [3] 刘鑫, 李飒, 刘小龙, 等. 南海钙质砂的动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1773 – 1780. (LIU Xin, LI Sa, LIU Xiao-long, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of calcareous sands in the South China Sea[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1773 – 1780. (in Chinese))
- [4] PANDO M A, SANDOVAL E A, CATANO J. Liquefaction susceptibility and dynamic properties of calcareous sands from Cabo Rojo, Puerto Rico[C]// Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, 2012.
- [5] CARRARO J, BORTOLOTTO M. Stiffness degradation and damping of carbonate and silica sands[M]//Frontiers in Offshore Geotechnics III. Boca Raton: CRC Press, 2015: 1179 – 1183.
- [6] CATANO J, PANDO M A. Static and dynamic properties of a calcareous sand from southwest Puerto Rico[C]// GeoFlorida 2010. Orlando, 2010.
- [7] JAFARIAN Y, JAVDANIAN H. Dynamic properties of calcareous sand from the Persian Gulf in comparison with siliceous sands database[J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, **18**(2): 245 – 249.
- [8] PHAM H H G, VANI P O V, IMPE W V, et al. Effects of grain size distribution on the initial strain shear modulus of calcareous sand[C]// 16th Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. ICE Publishing, 2015: 3177 – 3182.
- [9] 梁珂, 陈国兴, 杭天柱, 等. 砂类土最大动剪切模量的新预测模型[J]. 岩土力学, 2020, **41**(6): 1963 – 1970, 1982. (LIANG Ke, CHEN Guo-xing, HANG Tian-zhu, et al. A new prediction model of small-strain shear modulus of sandy soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(6): 1963 – 1970, 1982. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] 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 Jian-hong. 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))
- [12] 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 Ke, HE Yang, CHEN Guo-xing. 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))
- [13] 梁珂, 陈国兴, 何杨, 等. 基于相关函数理论的动模量和阻尼比计算新方法[J]. 岩土力学, 2019, **40**(4): 1368 – 1376, 1386. (LIANG Ke, CHEN Guo-xing, HE Yang, et al. A new method for calculation of dynamic modulus and damping ratio based on theory of correlation function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(4): 1368 – 1376, 1386. (in Chinese))
- [14] 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 Jin-quan, XIAO Yang, LIU Han-long, 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))
- [15] 王刚, 查京京, 魏星. 循环三轴应力路径下钙质砂颗粒破碎演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 755 – 760. (WANG Gang, ZHA Jing-jing, WEI Xing. Evolution of particle crushing of carbonate sands under cyclic triaxial stress path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 755 – 760. (in Chinese))
- [16] 张家铭, 张凌, 蒋国盛, 等. 剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(10): 2789 – 2793. (ZHANG Jia-ming, ZHANG Ling, JIANG Guo-sheng, et al. Research on particle crushing of calcareous sands under triaxial shear[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(10): 2789 – 2793. (in Chinese))
- [17] HALL E B, GORDON B B. Triaxial testing with large-scale high pressure equipment[J]. Laboratory Shear Testing of

- Soils, 1963, **361**: 315 – 328.
- [18] WEI H Z, ZHAO T, HE J Q, et al. Evolution of particle breakage for calcareous sands during ring shear tests[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(2): 04017153.
- [19] 吴琪, 陈国兴, 朱雨萌, 等. 基于等效骨架孔隙比指标的饱和砂类土抗液化强度评价[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(10): 1912 – 1922. (WU Qi, CHEN Guo-xing, ZHU Yu-meng, et al. Evaluating liquefaction resistance of saturated sandy soils based on equivalent skeleton void ratio[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(10): 1912 – 1922. (in Chinese))
- [20] 吴琪, 刘抗, 郭启洲, 等. 基于二元介质模型的砂类土小应变剪切模量评价方法[J]. 岩土力学, 2020, **41**(11): 3641 – 3650. (WU Qi, LIU Kang, GUO Qi-zhou, et al. A new method for evaluating small-strain shear modulus of sandy soils based on binary medium model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(11): 3641 – 3650. (in Chinese))
- [21] 胡明鉴, 崔翔, 王新志, 等. 细颗粒对钙质砂渗透性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(8): 2925 – 2930. (HU Ming-jian, CUI Xiang, WANG Xin-zhi, et al. Experimental study of the effect of fine particles on permeability of the calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(8): 2925 – 2930. (in Chinese))
- [22] 张晨阳, 谌民, 胡明鉴, 等. 细颗粒组分含量对钙质砂抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2019, **40**(增刊1): 195 – 202. (ZHANG Chen-yang, CHEN Min, HU Ming-jian, et al. Effect of fine particles content on shear strength of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(S1): 195 – 202. (in Chinese))
- [23] 吴琪, 陈国兴, 周正龙, 等. 基于颗粒接触状态理论的粗细粒混合料液化强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(3): 475 – 485. (WU Qi, CHEN Guo-xing, ZHOU Zheng-long, et al. Experimental investigation on liquefaction resistance of fine-coarse-grained soil mixtures based on theory of intergrain contact state[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(3): 475 – 485. (in Chinese))
- [24] KARIM M E, ALAM M J. Effect of non-plastic silt content on the liquefaction behavior of sand-silt mixture[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **65**: 142 – 150.
- [25] THEVANAYAGAM S, MARTIN G R. Liquefaction in silty soils—screening and remediation issues[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, **22**(9/10/11/12): 1035 – 1042.
- [26] LASHKARI A. Recommendations for extension and re-calibration of an existing sand constitutive model taking into account varying non-plastic fines content[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **61/62**: 212 – 238.
- [27] RAHMAN M M, LO S R, GNANENDRAN C T. On equivalent granular void ratio and steady state behaviour of loose sand with fines[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(10): 1439 – 1456.
- [28] THEVANAYAGAM S, SHENTHAN T, MOHAN S, et al. Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(10): 849 – 859.
- [29] MOHAMMADI A, QADIMI A. A simple critical state approach to predicting the cyclic and monotonic response of sands with different fines contents using the equivalent intergranular void ratio[J]. Acta Geotechnica, 2015, **10**(5): 587 – 606.
- [30] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998, **19**(1): 32 – 37, 44. (LIU Chong-quan, WANG Ren. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, **19**(1): 32 – 37, 44. (in Chinese))
- [31] 汪稔, 宋朝景, 赵焕庭, 等. 南沙群岛珊瑚礁工程地质[M]. 北京: 学出版社, 1997. (WANG Ren, SONG Chao-jin, ZHAO Huan-ting, et al. Engineering Geology of Coral Reefs in Nansha Islands[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese))
- [32] ASTM D4254-14. Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density[S]. Annual Book of ASTM standards, 2006.
- [33] ASTM D4253-16. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table[S]. Annual Book of ASTM Standards, 2016.
- [34] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019(Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [35] 马维嘉, 陈国兴, 吴琪. 复杂加载条件下珊瑚砂抗液化强度试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(2): 535 – 542, 551. (MA Wei-jia, CHEN Guo-xing, WU Qi. Experimental study on liquefaction resistance of coral sand under complex

- loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(2): 535 – 542, 551. (in Chinese))
- [36] LIU X, LI S, SUN L Q. The study of dynamic properties of carbonate sand through a laboratory database[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, **79**(7): 3843 – 3855.
- [37] 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.
- [38] IWASAKI T, TATSUOKA F. Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands[J]. Soils and Foundations, 1977, **17**(3): 19 – 35.
- [39] YANG J, LIU X. Shear wave velocity and stiffness of sand: the role of non-plastic fines[J]. Géotechnique, 2016, **66**(6): 500 – 514.
- [40] CHIEN L K, OH Y N. Influence of fines content and initial shear stress on dynamic properties of hydraulic reclaimed soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(1): 242 – 253.
- [41] GOUDARZY M, RAHMAN M M, KÖNIG D, et al. Influence of non-plastic fines content on maximum shear modulus of granular materials[J]. Soils and Foundations, 2016, **56**(6): 973 – 983.
- [42] WICHTMANN T, NAVARRETE HERNÁNDEZ M A, TRIANTAFYLLOIDIS T. On the influence of a non-cohesive fines content on small strain stiffness, modulus degradation and damping of quartz sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, **69**: 103 – 114.
- [43] DARENDELİ M B. Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves[M]. Austin: The University of Texas at Austin, 2001.
- [44] MARTIN P P, SEED H B. One-dimensional dynamic ground response analyses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, **108**(7): 935 – 952.
- [45] 陈国兴, 刘雪珠, 朱定华, 等. 南京新近沉积土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 1023 – 1027. (CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu, ZHU Ding-hua, et al. Experimental studies on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of recently deposited soils in Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(8): 1023 – 1027. (in Chinese))
- [46] 丁祖德, 黄娟, 袁铁映, 等. 昆明泥炭质土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(12): 3627 – 3634. (DING Zu-de, HUANG Juan, YUAN Tie-ying, et al. Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio of peaty soil in Kunming[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(12): 3627 – 3634. (in Chinese))
- [47] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(4): 133 – 139. (YUAN Xiao-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, **20**(4): 133 – 139. (in Chinese))
- [48] KOKUSHO T. Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range[J]. Soils and Foundations, 1980, **20**(2): 45 – 60.
- [49] SEED H B, IDRISI I M. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis[R]. Berkeley: University of California, 1970.