

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231130008

沉积方向对珊瑚砂动剪切模量及阻尼比的影响*

徐子皓¹, 秦悠¹, 马维嘉², 陈国兴^{1,3}

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 211816; 2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094;
3. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏南京 211816)

摘要: 复杂地质赋存环境下珊瑚砂具有显著的各向异性特征, 颗粒的沉积方向显著影响其动力特性。对南沙岛礁珊瑚砂开展均等固结的共振柱试验, 探究了珊瑚砂颗粒的沉积方向角 φ (沉积面与水平面的夹角)和初始有效固结围压 σ'_0 对其动剪切模量 G 和阻尼比 λ 的影响。在给定 φ 下, G 随剪应变幅值 γ_a 增大而减小的速率随 σ'_0 的增大而增加; 给定 σ'_0 下, G 随 γ_a 增大而减小的速率随 φ 增大呈现先减后增的趋势, $\varphi = 60^\circ$ 时 $G-\gamma_a$ 曲线位于最下方。最大动剪切模量 G_0 随 φ 的增大表现出先减后增的现象, 且 φ 对 G_0 的影响随 σ'_0 的增大而降低。建立了考虑 φ 和 σ'_0 影响的修正Hardin模型, 预测和量测的 G_0 值偏差小于10%。动剪切模量比 $G/G_0-\gamma_a$ 曲线对 φ 不敏感, 结合修正Hardin模型和Davidenkov骨架曲线预测和量测的 G 值偏差小于15%。在陈国兴等(2006)提出的阻尼比经验模型中引入 φ 影响的修正项, 预测和量测的 λ 值偏差小于20%。

关键词: 珊瑚砂; 原生各向异性; 沉积角度; 动剪切模量; 阻尼比

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0535-09

Effect of Deposition Orientation on the Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Coral Sand

XU Zihao¹, QIN You¹, MA Weijia², CHEN Guoxing^{1,3}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;
2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
3. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 211816, China)

Abstract: Coral sand in complex geological environments exhibits significant anisotropic characteristics, with the sedimentation direction of the particles significantly affecting its dynamic properties. Resonant column tests with uniform consolidation were conducted on coral sand from Nansha Islands to explore the effects of the deposition orientations (φ) (the angle between the deposition plane and the horizontal plane) and the initial effective confining pressure (σ'_0) on its dynamic shear modulus G and damping ratio λ . At a given φ , the rate at which G decreased with increasing shear strain amplitude γ_a increased with increasing σ'_0 . At a given σ'_0 , the rate at which G decreased with increasing γ_a first decreased and then increased with increasing φ , with the $G-\gamma_a$ curve reaching its lowest position at $\varphi = 60^\circ$. Furthermore, the maximum shear modulus (G_0) exhibited an initial decrease followed by an in-

* 收稿日期: 2023-11-30; 修回日期: 2024-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278503, 52208350)资助

作者简介: 徐子皓(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事土动力学研究。E-mail: xzh9908@163.com

通信作者: 陈国兴(1963—), 男, 教授, 博导。主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: gxc6307@163.com

crease as φ increased, and the influence of φ on G_0 diminished with increasing σ'_v . A modified Hardin's model, which incorporated the influence of φ and σ'_v , was established. The deviations between the measured and predicted G_0 values were within 10%. The $G/G_0-\gamma_a$ curve was insensitive to φ , with deviations between the measured and predicted G values by both the modified Hardin's model and Davidenkov's skeleton curve falling within 15%. A correction term considering the influence of φ was introduced into the damping ratio empirical model proposed by Cheng Guoxing et al. (2006), with the deviation between the predicted and measured λ values being less than 20%.

Keywords: coral sand; inherent anisotropy; deposition orientation; dynamic shear modulus; damping ratio

0 引言

珊瑚砂属于碳酸钙含量 90% 以上的海洋生物成因的碳酸盐土,广泛分布于地震活动性高的南北纬 30° 间的热带、亚热带的珊瑚岛礁和滨海,包括我国南海^[1-3]。近年来,南海相关海域的岛礁建设和资源开发与日俱增,鉴于南海珊瑚礁所处的特殊地理位置及复杂的海洋环境,为了保证珊瑚礁场址及其上建设的建(构)筑物、基础设施的安全,深入研究珊瑚砂的动力特性是极为必要的。

国内外地震灾害现场调查表明,珊瑚砂液化是珊瑚岛礁重大地震灾害的主要原因之一^[4-6]。鉴于珊瑚砂岛礁所处的复杂海洋环境及人工吹填珊瑚砂的沉积特性,在珊瑚砂场地进行基础设施建设,不可避免地面临珊瑚砂特有的岩土力学问题。最大剪切模量 G_0 、动剪切模量 G 和阻尼比 λ 随剪应变幅值 γ_a 的关系曲线是最基本的土动力学特性参数,是岩土与地质工程问题数值分析和工程设计中不可或缺的参数^[3,7-8]。

G_0 通常可通过共振柱、循环试验和弯曲元试验确定^[8-10]。许多学者对影响砂类土 G_0 的物理状态参数(如有效围压 σ'_v 、孔隙比 e 或相对密度 D_r)和材料参数(如不均匀系数 C_u 、平均粒径 d_{50} 、细粒含量 FC 、颗粒形状、颗粒组构和矿物成分)进行了广泛的研究^[11-16]。同时,现有研究表明, σ'_v 、 C_u 、 d_{50} 等也是影响砂类土 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 曲线形状的主要影响因素^[17-19]。现有试验研究大多以石英砂为对象,珊瑚砂与石英砂的 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 关系的差异较大,石英砂 $G/G_0-\gamma_a$ 曲线的经验关系不适用于珊瑚砂^[3,14]。

复杂海洋环境中珊瑚砂独特的形成条件和过程使其具有粗糙的表面、丰富的内孔隙、形状不规则、孔隙比大、颗粒级配差、易破碎、易胶结等特点,致使珊瑚砂场地有显著的各向异性^[1,20-21]。同时,在潟湖、洼地、阶地、礁盘和水下斜坡等复杂地貌位置处,天然珊瑚砂土体具有复杂的沉积方向性,不同地貌处珊瑚砂土的力学特性存在明显差异^[22-24]。

沉积方向角 φ 可定义为沉积平面法线方向与竖应力方向之间的夹角,国内外学者对砂土沉积方向角 φ 对其力学性能的影响进行了大量的试验研究。J. R. F. Arthur 等^[25]发现 φ 不同的干砂试样达到失效所需的轴应变差异很大,且随 φ 的增大,大主应变呈现出先增大后减小的规律。M. Oda^[26]发现砂土的轴应变发展速率和最大切线模量随 φ 增大而增大。饱和硅质砂的抗剪强度和抗液化强度均随 φ 增大而降低;相同 φ 时,随着初始有效固结围压 σ'_v 的增大,砂土的各向异性逐渐消失^[27-28]。K. Zeng 等^[29]对具有不同 φ 的珊瑚砂进行剪切试验,发现珊瑚砂的摩擦角 φ_s 和压缩性随 φ 的减小而减小。然而,针对珊瑚砂沉积方向角 φ 的动力特性的研究相对较少,无法为南海珊瑚岛礁的建设提供科学、稳定、合理的依据。

本文通过制备不同 φ 的珊瑚砂试样,探究了 φ 和 σ'_v 对珊瑚砂动剪切模量 G 和阻尼比 λ 的影响,首次建立了考虑 φ 影响的预测 G 和 λ 的表达式,可为珊瑚岛礁场地的稳定性分析及抗震性能评价提供科学依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验珊瑚砂取自南沙群岛某岛礁,物相分析结

果表明,其碳酸钙(CaCO_3)含量约为90.28%^[30]。经测定^[1]:试验材料比重 $G_s = 2.80$,最大、最小孔隙比分别为1.72和0.99,平均粒径 $d_{50} = 0.31 \text{ mm}$,不均匀系数 $C_u = 4.67$,曲率系数 $C_c = 0.86$ 。珊瑚砂的颗粒分布曲线及电镜扫描图如图1所示。

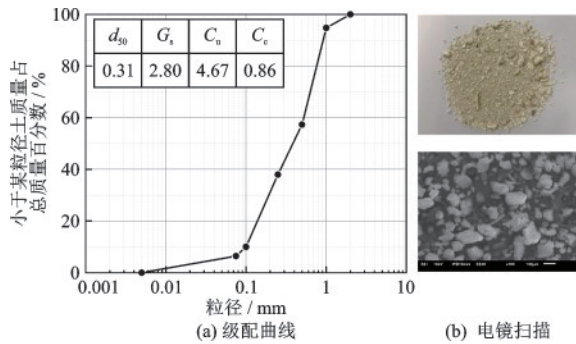


图1 珊瑚砂级配曲线及电镜扫描

Fig.1 Photos of particle grading curve and electron microscope scan for coral sand

1.2 试验装置及方案

试验仪器采用美国GCTS公司研制的TSH-100型共振柱仪(图2)。试验原理为固定-自由型共振柱测试法,通过强迫振动获取当前试样的共振频率,根据共振柱试验的基本原理和公式,土样的动剪切模量 G 通过试验仪器中加速度传感器测到的自由振动衰减波形的周期来计算:

$$G = \rho \left(\frac{2\pi f H}{\eta} \right)^2 \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; f 为试样共振频率; H 为试样高度; η 为扭转激振式的无量纲频率因子,可由下式确定:

$$\eta \tan \eta = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

式中, I 为试样转动惯量; I_0 为顶帽驱动系统转动惯量。

利用加速度传感器测得的自由振动波幅的衰减计算土样的阻尼比 λ 为:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (3)$$

式中, δ 为衰减对数。据此,可测试得到土样在剪应变水平 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 量级的 G 和 λ 。

1.3 试样制备

试验采用实心圆柱体试样,高 $H = 100 \text{ mm}$,直

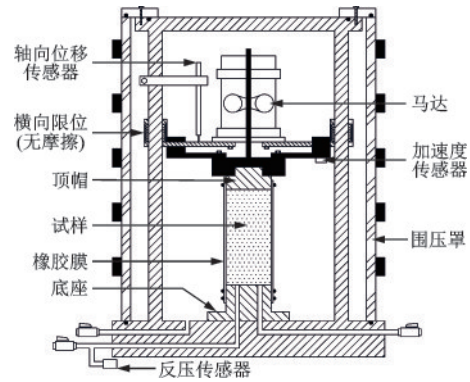


图2 GCTS TSH-100型共振柱仪原理

Fig.2 Schematic of GCTS TSH-100 resonant column apparatus

径 $d = 50 \text{ mm}$ 。为探究 φ 对珊瑚砂的 G 和 λ 的影响,使用图3的辅助设备完成不同 φ 的试样制备。具体的制样过程(图3)为:(1)通过辅助制样设备将制样模具倾斜 $90^\circ - \varphi$ 并固定,保证制样模具中轴线与水平线角度形成 $90^\circ - \varphi$;(2)采用干装法制样,利用漏斗和塑料管将5份相同质量的珊瑚砂依次、均匀导入制样模具内,通过控制砂粒的流速及落距,控制试样的初始相对密度为 $D_r = 45\%$,同时保证制样模具内珊瑚砂的沉积面始终水平;(3)对超出制样模具高度的珊瑚砂,使用挡板固定后,继续制样;(4)制备得到不同 φ 的试样如图4所示。

对于 $\varphi = 90^\circ$ (水平)的试样制备,将分层模具装入制样模具内部后(图5),水平放置制样模具,将均分成5等份的珊瑚砂通过漏斗装入每层隔板空间中,待所有隔板空间装满后,缓慢抽出分层模具,将

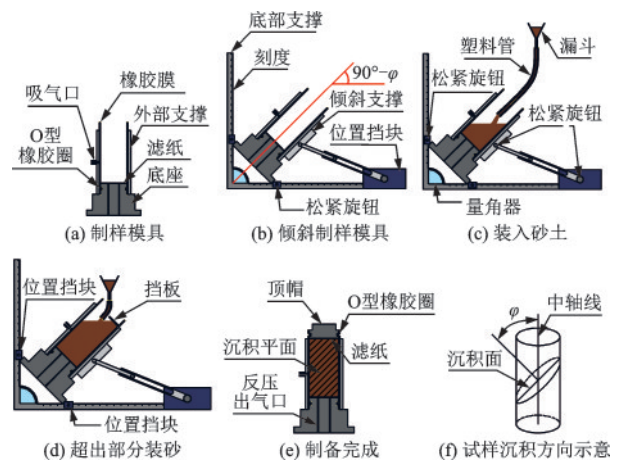


图3 不同沉积方向角的珊瑚砂试样的制备步骤

Fig.3 Steps for preparing coral sand specimens with different deposition orientation

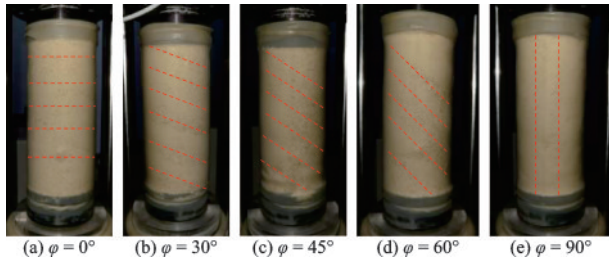


图4 不同 φ 试样的实物

Fig.4 Photographs of specimens with different φ

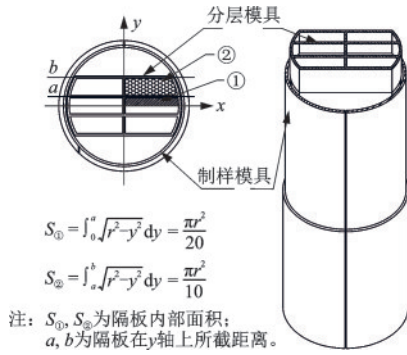


图5 分层模具示意

Fig.5 Diagram of the layered mold

剩余珊瑚砂平均装入分层模具,直至分层模具完全抽出制样模具,即可完成 $\varphi = 90^\circ$ 的试样制备。分层模具隔板的位置通过计算确定,使试样每层的体积相等,保证试样每层的 D_r 基本相同。相同 σ'_0 下固结后的相对密度 D_{rc} 基本相同(表1),表明试样的制样质量水平是一致的。

1.4 试验方案

通过气压固结试样:将制备好的试样安装于仪器底座,顶部与浮动扭转驱动装置及位移传感器连接,封闭压力室;对不同 φ 的试样依次进行 $\sigma'_0 = 50、100、200、300$ kPa的均等固结,试验工况见表1。

试样每级固结时间不少于100 min,待试样轴向应变率小于 $1 \times 10^{-3} \%$ /min时,可视为固结完成。固结完成后,先利用C.A.T.S软件对试样每隔1 Hz进行粗略扫描,扫频范围为50~150 Hz,确定试样共振频率的预估值;随后每隔0.2 Hz细致扫描一次,精确扫描至试样的共振频率,给出试样的共振频率以后,进入阻尼比试验模块,仪器停止振动,可得到一条自由振动衰减曲线,据此可计算出试样的阻尼比 λ 。逐级提升激振力,可测得试样在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 量级应变幅值下的 G 和 λ 值,并记录每级激振力相应的

表1 共振柱试验方案

Table 1 Scheme of the resonant column test

No.	$\varphi/(^\circ)$	σ'_0/kPa	$D_{rc}/\%$	e_c
1	0	50	46.1	1.38
2	0	100	48.0	1.37
3	0	200	49.6	1.36
4	0	300	51.3	1.35
5	30	50	46.4	1.38
6	30	100	48.1	1.37
7	30	200	50.0	1.36
8	30	300	51.5	1.34
9	45	50	45.9	1.38
10	45	100	47.7	1.37
11	45	200	50.4	1.35
12	45	300	51.1	1.35
13	60	50	46.2	1.38
14	60	100	48.3	1.37
15	60	200	50.3	1.35
16	60	300	51.6	1.34
17	90	50	46.4	1.38
18	90	100	48.5	1.37
19	90	200	50.1	1.35
20	90	300	51.8	1.34

剪应变幅值 γ_a 、动剪切模量 G 和阻尼比 λ 。

2 试验结果与分析

2.1 动剪切模量 G

图6展示了给定 φ 下 σ'_0 对 G 随 γ_a 变化的影响。可以看出: G 随 σ'_0 的增大而增大,与文献[10, 15]的珊瑚砂试验结果一致。 σ'_0 的增大会使土颗粒发生滑移和重新排列,相邻土颗粒间的接触增加,导致应力波在试样中的传播速度增大,从而使试样的 G 增大。同时,随着 σ'_0 的增大, G 随 γ_a 增大而减小的速率变快, σ'_0 显著影响 G 的衰减。

图7表明:给定 σ'_0 下, $G-\gamma_a$ 曲线随 φ 的增大呈现出先降低后略微升高的趋势, $\varphi = 60^\circ$ 时 $G-\gamma_a$ 曲线位于最下方。这是由于珊瑚砂属于无黏性土,一般认为其黏聚力非常小,可以忽略,其抗剪强度主

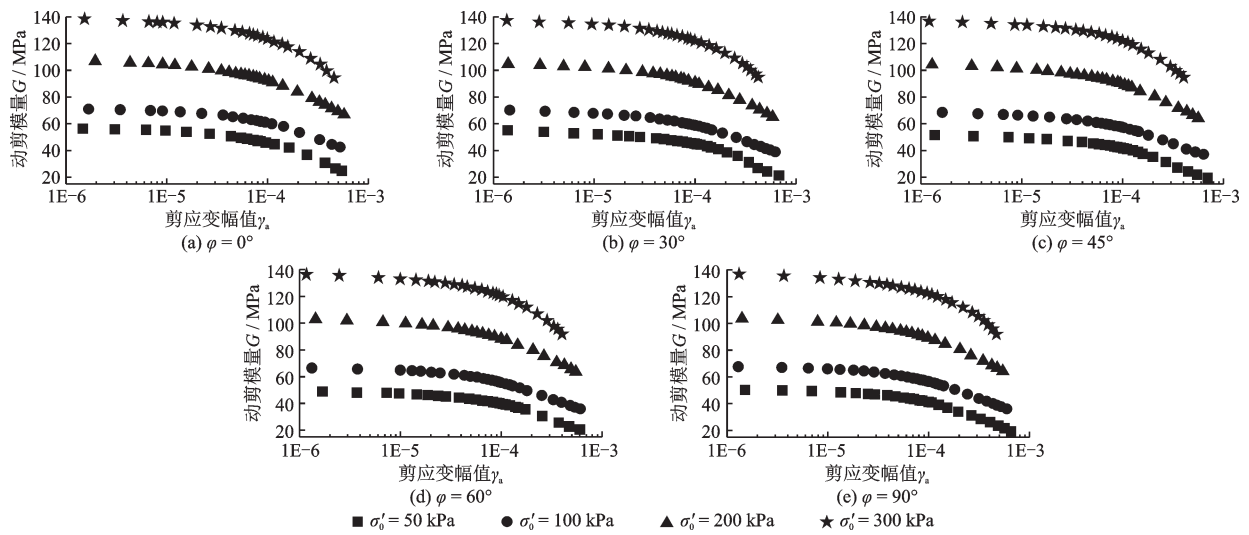


图6 给定 φ 下 σ'_0 对珊瑚砂 $G-\gamma_a$ 曲线的影响
Fig.6 Effect of σ'_0 on the $G-\gamma_a$ curves of coral sand specimens at specific φ

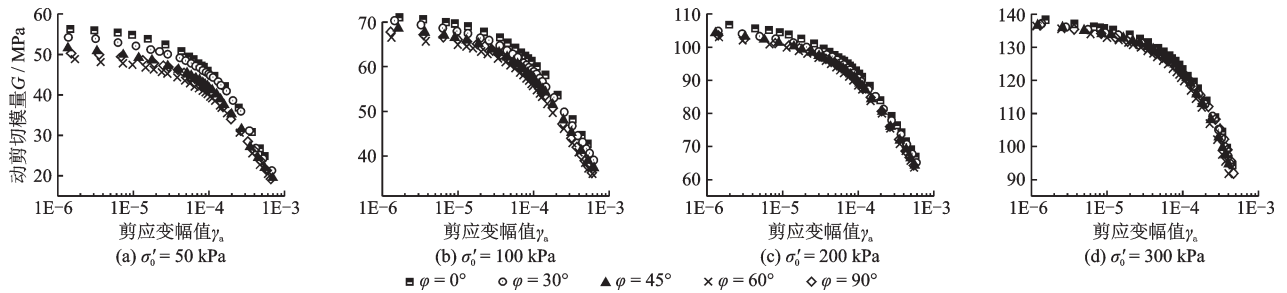


图7 给定 σ'_0 下 φ 对珊瑚砂 $G-\gamma_a$ 曲线的影响
Fig.7 Effect of φ on the $G-\gamma_a$ curves of coral sand specimens at specific σ'_0

要由内摩擦角 φ_s 决定,珊瑚砂颗粒的形状不规则,棱角度高,影响其 φ_s 大小的主要因素为颗粒间的滑动摩擦和咬合摩擦。当沉积方向 $\varphi = 0^\circ$ 时,两个砂土颗粒之间相当于水平层结构,只受到水平向滑动摩擦力的作用来抵抗剪切,随着沉积方向角逐渐增大,逐渐接近试样的破坏面与水平方向的夹角 $45^\circ + \varphi_s/2$ 时,珊瑚砂颗粒在动剪切作用下更容易发生错动和滑移,导致其模量降低^[29, 31]。G. X. Chen等^[1]对本文试验相同的珊瑚砂开展了一系列不排水单向剪切试验,发现在均等固结、单向加载方向角 $\alpha_m = 45^\circ$ 时,珊瑚砂的 $\varphi_s = 36.54^\circ$ 。即当 $\varphi = 60^\circ$ 时,更接近珊瑚砂试样的破坏面与水平方向的夹角,与试验现象相符。

同时,随着 σ'_0 的增大,不同 φ 试样的 $G-\gamma_a$ 曲线的差异逐渐减小,即试样的固有各向异性对 $G-\gamma_a$ 曲线的影响减小, γ_a 接近 10^{-3} 量级时不同 φ 试样的 G 趋于一致。

2.2 最大动剪切模量 G_0

最大动剪切模量 G_0 可按式(4)确定:

$$G_0 = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{1}{c + d\gamma_a} \quad (4)$$

式中, c, d 为试验数据的拟合参数。

图8给出了试样的 G_0 与 φ, σ'_0 的关系。给定 φ 时, G_0 与 σ'_0 近似成线性关系。给定 σ'_0 时, $\varphi = 60^\circ$ 时试样的 G_0 最小;且随 σ'_0 的增大,不同 φ 试样的 G_0 值的差异减小; φ 对 G_0 的影响随 σ'_0 增大而降低。

基于Hardin模型^[32], φ 对 G_0 的影响可表示为:

$$G_0 = AF(e_c) \left(\frac{\sigma'_0}{p_a} \right)^n \left(1 + \varphi \left(\frac{\sigma'_0}{p_a} \right)^m \right) \quad (5)$$

其中,孔隙比函数 $F(e_c)$ 为:

$$F(e_c) = \frac{(a - e_c)^2}{(1 + e_c)} \quad (6)$$

式中, A 为拟合系数; m 为考虑 φ 和 σ'_0 对 G_0 影响的修正系数; n 为应力指数; p_a 为一个标准大气压,取为

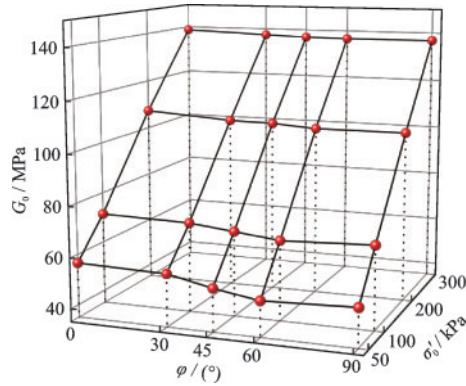


图8 G_0 和 φ 、 σ'_0 的关系曲线

Fig.8 Relationships of curves for $G_0-\varphi$ and $G_0-\sigma'_0$

100 kPa; e_c 为试样固结后孔隙比;依据文献[2], a 与颗粒形状有关的参数,对圆粒取2.17,对角粒取2.97。对试验珊瑚砂, $A = 70.34$, $a = 2.97$, $m = -0.005$, $n = 0.49$ [2]。

图9比较了不同 φ 的珊瑚砂试样的实测与预测 G_0 的值,两者的偏差在 $\pm 10\%$ 以内,表明式(5)的预测精度较高。

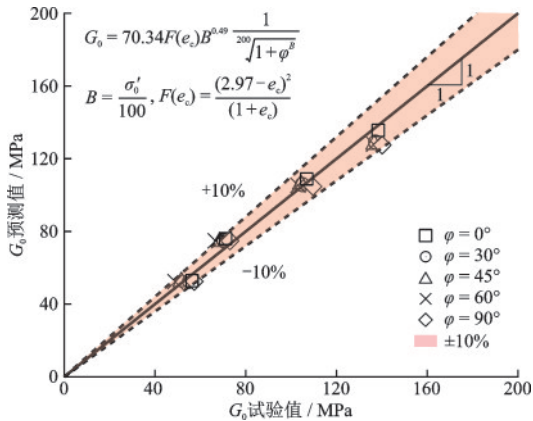


图9 不同 φ 和 σ'_0 下预测与实测 G_0 的比较

Fig.9 Comparison of predicted and measured G_0 with different φ

2.3 动剪切模量比与阻尼比

图10为给定 σ'_0 下动剪切模量比 G/G_0 和阻尼比 λ 随 γ_a 的变化。可以看出:对于给定的 σ'_0 ,不同 φ 试样的 $G/G_0-\gamma_a$ 曲线几近一致,且 λ 的变化差异较小。给定应变水平下, $G/G_0-\gamma_a$ 曲线的衰减率随 σ'_0 的增大而降低, λ 随 σ'_0 的增大而减小。全部试验工况的 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 数据处于一个窄带内(图11)。

不同 σ'_0 和 φ 试样的 $G/G_0-\gamma_a$ 曲线可用Daviden-

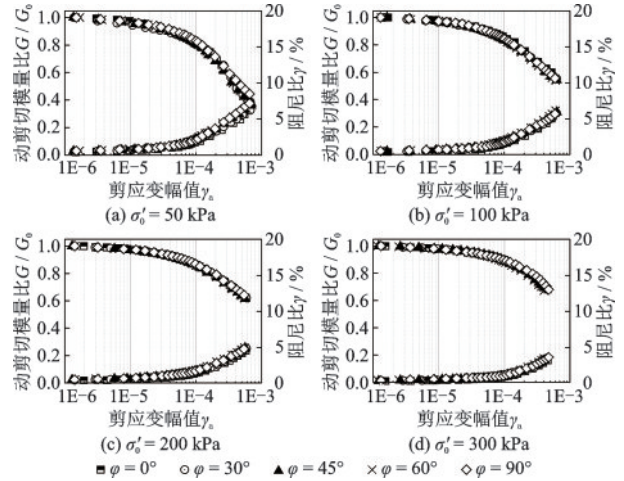


图10 给定 σ'_0 下珊瑚砂 G/G_0 和 λ 与 γ_a 的关系

Fig.10 The correlation between G/G_0 and λ with γ_a of coral sand at specific σ'_0

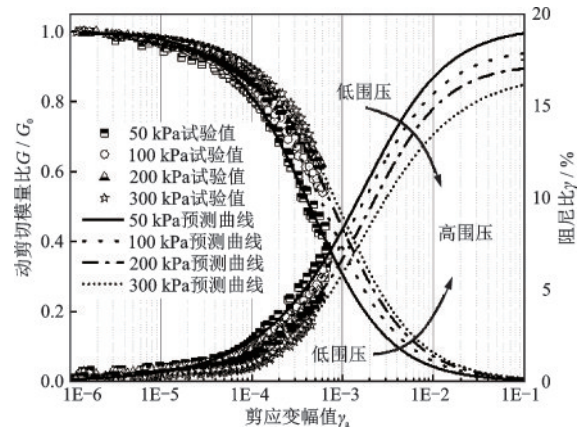


图11 所有测试试样的 G/G_0 和 λ 与 γ_a 关系

Fig.11 The correlation between G/G_0 and λ with γ_a for all measured data

kov模型 [33-34]描述:

$$\frac{G}{G_0} = 1 - \left[\frac{(\gamma_a/\gamma_r)^{2\beta}}{1 + (\gamma_a/\gamma_r)^{2\beta}} \right]^\alpha \quad (7)$$

式中, α 和 β 为拟合参数; γ_r 为参考剪应变,取 $G/G_0 = 0.5$ 时的 γ_a 值。

不同 σ'_0 和 φ 试样的 $\lambda-\gamma_a$ 曲线则可由陈国兴等 [34-35]提出的经验公式表示:

$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_0 \left(1 - \frac{G}{G_0} \right)^p \quad (8)$$

式中, λ_{\min} 为土的小应变阻尼比; λ_0 和 p 为拟合参数。对试验珊瑚砂, $\lambda_{\min} = 0.15$, $p = 1.025$; λ_0 与 φ 有关,可取为 $\lambda_0 = 5(\sum \varphi)^2 / \sum \varphi^2$ 。

如图12所示,预测与实测 G 值的偏差在 $\pm 15\%$

以内,预测与实测 λ 的偏差在 $\pm 20\%$ 以内。这表明:结合本文提出的预测 G_0 的修正公式(5)、表达式(7)可以较精确地预测不同 φ 试样的 G 值;而 φ 对 λ 的影响,尚需在经验表达式(8)的拟合系数 λ_0 中进一步考虑 φ 的影响。

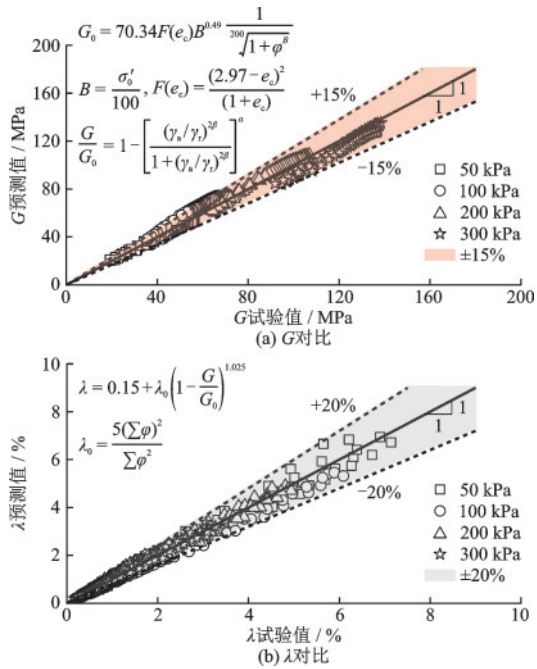


图 12 G 和 λ 预测与实测的比较

Fig.12 Comparison of predicted and measured G and λ

3 结 论

在潟湖、洼地、阶地、礁盘和水上斜坡等复杂地貌位置处,天然珊瑚砂土体具有复杂的沉积方向性,使珊瑚砂的力学特性产生明显差异。为保证珊瑚岛礁上军事和民用功能设施在强地震作用下的安全性,通过对具有不同颗粒沉积方向角 φ 的珊瑚砂试样开展的共振柱试验,探究了 φ 对珊瑚砂动剪切模量 G 和阻尼比 λ 的影响,主要结论如下:

(1) 给定 φ 下, G 随剪应变幅值 γ_a 增大而衰减的速率随初始有效围压 σ'_0 的增大而增加;给定 σ'_0 下,当 φ 逐渐接近 $45^\circ + \varphi_s/2$ 时, G 逐渐降低,试样更容易达到破坏状态,即 G 随 φ 增大呈现先减小后略微增大的趋势, $\varphi = 60^\circ$ 时 $G-\gamma_a$ 曲线位于最下方。

(2) 最大动剪切模量 G_0 随 φ 增大呈现出先减小后增大的现象,且 φ 的影响随 σ'_0 的增加而降低。基于Hardin模型,提出了考虑 φ 影响的 G_0 预测模型,

预测偏差在 $\pm 10\%$ 以内。

(3) φ 对动剪切模量比 $G/G_0-\gamma_a$ 曲线的影响不敏感, $G/G_0-\gamma_a$ 曲线可用Davidenkov模型描述,结合引入 φ 影响的 G_0 预测修正模型,可以较准确地预测不同 φ 试样的 G 值,其预测偏差小于 15% 。基于陈国兴等提出的阻尼比 λ 的经验模型,考虑 φ 的影响因素,预测偏差在 $\pm 20\%$ 以内。

参考文献:

- [1] Chen G X, Ma W J, Qin Y, et al. Liquefaction susceptibility of saturated coral sand subjected to various patterns of principal stress rotation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147 (9): 04021093.
- [2] Liang K, Chen G X, Du X L, et al. A unified formula for small-strain shear modulus of sandy soils based on extreme void ratios [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2023, 149 (2) : 04022127.
- [3] Chen G X, Liang K, Zhao K, et al. Shear modulus and damping ratio of saturated coral sand under generalized cyclic loadings [J]. Géotechnique, 2024, 74 (2) : 113-116.
- [4] Swan S W, Harris S K. The island of Guam Earthquake of August 8, 1993[R]. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research, 1993.
- [5] Medley E W. Geological engineering reconnaissance of damage caused by the October 15, 2006 Hawaii earthquakes[J]. ISSMGE International Journal of Geoenvironmental Case Histories, 2007, 1(2): 89-135.
- [6] Olson S M, Green R A, Lasley S, et al. Documenting liquefaction and lateral spreading triggered by the 12 January 2010 Haiti earthquake[J]. Earthquake Spectra, 2011, 27(Sup1): 93-116.
- [7] Chen G X, Wang Y Z, Zhao D F, et al. A new effective stress method for nonlinear site response analyses [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(6):1595-1611.
- [8] 唐鑫, 张吾渝, 童国庆, 等. 冻融循环作用下西宁地区黄土动力特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 887-895.
Tang X, Zhang W Y, Tong G Q, et al. Experimental study on dynamic characteristics of loess in xining area

- under freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(4): 887-895. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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.
- 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. (in Chinese)
- [11] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects (terzaghi lecture)[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1972, 98(6): 603-624.
- [12] Dutta T T, Saride S. Influence of shear strain on the Poisson's ratio of clean sands [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, 34(5): 1359-1373.
- [13] Wichtmann T, Hernández M A N, Triantafyllidis 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.
- [14] 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: 3843-3855.
- [15] 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.
- [16] Wu Q, Liu Q F, Zhuang H Y, et al. Experimental investigation of dynamic shear modulus of saturated marine coral sand [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 264: 112412.
- [17] 季伟伟, 杨庆, 孔纲强, 等. 孔隙液体相态对饱和砂土力学特性影响试验[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(4): 871-877.
- Ji W W, Yang Q, Kong G Q, et al. Triaxial test on mechanical properties of saturated sand influenced by pore liquid phase state [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(4): 871-877. (in Chinese)
- [18] 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 Q, Liu K, Guo Q Z, 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)
- [19] Dammala P K, Krishna A M, Bhattacharya S, et al. Dynamic soil properties for seismic ground response studies in Northeastern India [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 100: 357-370.
- [20] Wang X Z, Jiao Y Y, Wang R, et al. Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea [J]. *Engineering Geology*, 2011, 120(1-4): 40-47.
- [21] 张钰, 丁选明, 彭宇, 等. 珊瑚碎屑颗粒内孔隙特性微观试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(3): 497-503.
- Zhang Y, Ding X M, Peng Y, et al. Experimental study on inner pore morphology of coral clastic particles [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(3): 497-503. (in Chinese)
- [22] Qin Y, Ma W J, Xu Z H, et al. Effects of consolidation conditions on the dynamic shear modulus of saturated coral sand over a wide strain range [J]. *Engineering Geology*, 2023, 324: 107260.
- [23] Ma W J, Qin Y, Gao F, et al. Experimental study of the dynamic shear modulus of saturated coral sand under complex consolidation conditions [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(1): 214.
- [24] Zamanian M, Mollaei A V, Payan M. Directional strength and stiffness characteristics of inherently anisotropic sand: The influence of deposition inclination [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 137: 106304.
- [25] Arthur J R F, Chua K S, Dunstan T. Induced anisotropy in a sand [J]. *Geotechnique*, 1977, 27(1): 13-30.
- [26] Oda M. Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material [J]. *Soils and Foundations*, 1972, 12(1): 17-36.

- [27] Yu H, Zeng X, Li B, et al. Effect of fabric anisotropy on liquefaction of sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (5) : 765-774.
- [28] Li B, Zeng X, Yu H. Effect of fabric anisotropy on seismic response of strip foundations[M]. Geo-Risk: Risk Assessment and Management, 2011: 326-335.
- [29] Zeng K, Liu H. Effect of inherent anisotropy on the triaxial compression behavior of coral sand[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(5) : 04023033.
- [30] 秦悠, 杜歆宇, 马维嘉, 等. 各向异性固结下饱和珊瑚砂超静孔压增长的能量模式[J/OL]. (2023-01-16) [2023-11-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=K_cp52o2S7-ECpRKjZ5MOTSxNPPfojdaDf4g1kUsIXhiL63wAmTNh5BuCFSg0-vKKMywZ3Ks0zsBVy4-ndDJgrXI95Z_MU15aHY2qRbHCLCnZQK-KZ7sZOW5RukiVb8LzdC6LwmZJzhw=&-uniplatform=NZKPT&-language=CHS.
Qin Y, Du X Y, Ma W J, et al. An energy based model for generation of excess pore water pressure in saturated coral sand under anisotropic consolidation[J/OL]. (2023-01-16) [2023-11-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=K_cp52o2S7-ECpRKjZ5MOTSxNPPfojdaDf4g1kUsIXhiL63wAmTNh5BuCFSg0-vKKMywZ3Ks0zsBVy4-ndDJgrXI95Z_MU15aHY2qRbHCLCnZQK-KZ7sZOW5RukiVb8LzdC6LwmZJzhw=&-uniplatform=NZKPT&-language=CHS. (in Chinese)
- [31] 罗强, 汤振, 王忠涛, 等. 沉积方向对密砂固结排水剪切强度的影响研究[J]. 力学与实践, 2019, 41(2) : 164-170.
- Luo Q, Tang Z, Wang Z T, et al. Influence of sedimentary direction on shear strength of saturated dense sand in consolidated drained triaxial test[J]. Mechanics in Engineering, 2019, 41(2): 164-170. (in Chinese)
- [32] 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.
- [33] Martin P P, Seed H B. One-dimensional dynamic ground response analyses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, 108(7) : 935-952.
- [34] 陈国兴, 刘雪珠, 朱定华, 等. 南京新近沉积土动剪切模量比与阻尼比的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8) : 1023-1027.
Chen G X, Liu X Z, Zhu D H, 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)
- [35] 卜屹凡, 陈国兴, 周正龙, 等. 动剪切模量与阻尼比的共振柱和动三轴对比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(2) : 343-349.
Bu Y F, Chen G X, Zhou Z L, et al. Comparison research on the normalized dynamic shear modulus and damping ratio by resonant column and cyclic triaxial tests[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(2): 343-349. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)