

DOI: 10.11779/CJGE202203020

# 复杂应力条件下饱和珊瑚砂各向异性试验研究

马维嘉<sup>1</sup>, 秦 悠<sup>1</sup>, 王常德<sup>1</sup>, 陈国兴<sup>\*1,2</sup>

(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:** 各向异性是珊瑚砂的固有属性。对饱和南沙珊瑚砂开展了一系列不排水单向剪切试验, 探究了固结应力方向角  $\alpha_0$  和单向加载方向角  $\alpha_m$  对饱和珊瑚砂不排水反应的影响。 $\alpha_0$  和  $\alpha_m$  对饱和珊瑚砂的不排水反应均有显著影响, 且  $\alpha_0$  与  $\alpha_m$  的耦合作用对其不排水反应的影响更为复杂。对所有试验的应力条件, 饱和珊瑚砂的超静孔压  $u_e$  均呈现出先增大后减小的趋势。 $\alpha_0$  不同时饱和珊瑚砂的相变强度  $S_{PT}$ 、有效内摩擦角  $\phi'_{PT}$  与  $\alpha_m$  的关系存在显著差异。发现饱和珊瑚砂的相变强度  $S_{PT}$  与无量纲参数  $\beta$  存在事实上的线相关性, 其中,  $\beta$  是以  $\alpha_0$ ,  $\alpha_m$  为变量的余弦函数。随着广义剪应力  $q_g$  的增大, 饱和珊瑚砂呈现出明显的应变硬化现象。

**关键词:** 饱和珊瑚砂; 各向异性; 固结应力方向角; 单向加载方向角; 相变强度

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)03-0576-08

作者简介: 马维嘉(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事土动力学研究。E-mail:njtechmjw@163.com。

## Experimental study on anisotropy of saturated coral sand under complex stress conditions

MA Wei-jia<sup>1</sup>, QIN You<sup>1</sup>, WANG Chang-de<sup>1</sup>, CHEN Guo-xing<sup>1, 2</sup>

(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:** Anisotropy is the inherent property of coral sand. A series of undrained monotonic shear tests are carried out on the saturated Nansha coral sand by using the GDS hollow cylinder torsional shear apparatus. The effects of consolidation stress direction angle  $\alpha_0$  and monotonic loading direction angle  $\alpha_m$  on the undrained response of saturated coral sand are investigated. The test results show that  $\alpha_0$  and  $\alpha_m$  have significant influences on the undrained response of saturated coral sand. The undrained response characteristics of coral sand will become more complex under the coupling effects of  $\alpha_0$  and  $\alpha_m$ . For all the test conditions considered, the excess pore water pressure  $u_e$  of saturated coral sand presents contraction first and then dilatancy trend. The change of the shear resistance ( $S_{PT}$ ) and its effective angle ( $\phi'_{PT}$ ) mobilized at the phase transformation state along with  $\alpha_m$  are significantly different for various  $\alpha_0$ . There is a unique linear correlation between  $S_{PT}$  and the dimensionless parameter  $\beta$ , which is a cosine function with  $\alpha_0$  and  $\alpha_m$  as variables. With the increase of the generalized shear stress  $q_g$ , obvious strain hardening phenomenon can be observed for the samples.

**Key words:** saturated coral sand; anisotropy; consolidation direction angle; monotonic direction angle; shear resistance at phase transformation point

## 0 引言

碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )含量大于90%的碳酸盐砂通常被称为珊瑚砂, 其中珊瑚礁是最主要的有机起源, 也即珊瑚残骸经复杂的物理、生物、化学、搬运作用后沉积形成的特殊海洋土。珊瑚砂广泛分布于地震风险水平高的热带、亚热带海洋及岛礁。经测定, 南海珊瑚砂的碳酸钙含量高达90.28%<sup>[1]</sup>。由于珊瑚砂特殊的形成过程, 使其具有棱角度高、强度低、易破碎、形状不规则、存在内孔隙等特点<sup>[2-3]</sup>, 因此与陆源石英砂

相比, 珊瑚砂具有明显不同的力学特性。在中国“一带一路”倡议的框架下, 海洋工程建设已成为中国实施海洋战略、建设海洋强国的重要支撑。目前对珊瑚砂力学性质的认知尚处于起步阶段。因此, 为海洋工程建设提供坚实的科学依据, 深入研究复杂应力条件珊瑚砂的力学性质, 已成为中国当前亟需解决的基础

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678299); 国家重点研发计划项目(2018YFC1504301)

收稿日期: 2020-12-24

\*通信作者: (E-mail: gxc6307@163.com)

性科学问题。

各向异性是砂土的基本物理力学特性。各向异性包括原生各向异性及应力诱发各向异性。原生各向异性是指沉积过程中形成的颗粒形状、排列方式等不同而导致的力学性质差异; 应力诱发各向异性是指外荷载作用致使土颗粒的排列发生错动而导致的力学性质的差异<sup>[4]</sup>。不少学者开展了日本 Toyoura 砂的各向异性研究: Kato 等<sup>[5]</sup>对饱和 Toyoura 砂进行了一系列不排水三轴压缩试验, 研究了不同初始应力条件下 Toyoura 砂的剪胀以及剪缩现象。Yoshimine 等<sup>[6]</sup>利用空心圆柱扭剪仪对饱和 Toyoura 砂进行了应变控制的静力试验, 发现固结主应力方向角  $\alpha_0$  与中主应力系数  $b_0$  对 Toyoura 砂的孔压增长模式具有显著影响。此外, Wong 和 Arthur<sup>[7]</sup>的研究表明 Leighton Buzzard 砂的前期变形与应力诱发各向异性之间具有非常重要的联系, 而与原生各向异性及应力主轴旋转无关。Sato 等<sup>[8]</sup>认为  $\alpha_0$  本质上是反映砂土初始结构的各向异性。Chen 等<sup>[9]</sup>的研究表明, 应力主轴方向角  $\alpha$  对饱和南通海湾滩涂粉土的不排水响应具有较大影响, 由此会导致滩涂粉土具有很强的各向异性。

国内一些学者在土的各向异性方面也进行了一些研究。刘洋<sup>[4]</sup>考虑土的密实状态的影响, 从微观角度建立了物理参数明确的砂土应力诱发各向异性强度准则。于艺林等<sup>[10]</sup>研究了应力主轴方向角  $\alpha$  与中主应力系数  $b$  对含云母的南京细砂各向异性的影响, 结果表明, 南京细砂的强度随  $\alpha$  的增加呈现出先减小后增大的趋势, 且呈现出随  $b$  的增加而单调增大的趋势。罗强等<sup>[11]</sup>制备了具有不同沉积方向的福建砂, 探究了密实程度 (相对密度  $D_r = 40\%, 80\%$ ) 对福建砂强度的影响。结果表明, 松砂在沉积方向为竖直向时更易破坏; 密砂在沉积方向为水平向时更易破坏。杨仲轩等<sup>[12]</sup>比较了落砂法与湿捣法制备的丰浦砂试样不排水反应的差异, 发现试样制备方法会导致试样具有不同的各向异性, 落砂法试样具有强剪缩性, 湿捣法试样具有较大剪胀性。此外, 陈伟等<sup>[13]</sup>发现黄土的强度随着应力主轴方向角  $\alpha$  增加呈现出先减小后增大的趋势。

然而, 目前针对珊瑚砂各向性的研究还比较少: Aghajani 等<sup>[14]</sup>对饱和 Bushehr 珊瑚砂进行了一系列不排水单向剪切试验, 探究了应力主轴方向角  $\alpha$  对 Bushehr 珊瑚砂不排水反应的影响, 发现固结条件及加载条件对 Bushehr 珊瑚砂的破坏方式具有较大影响, 相变强度  $S_{PT}$  随  $\alpha$  的增加而逐渐降低。

本文利用 GDS 空心圆柱扭剪仪, 对饱和南沙珊瑚砂进行了一系列不排水单向剪切试验, 以探究固结和单向加载方向角对饱和南沙珊瑚砂静力特性的影响。

## 1 复杂应力路径的实现

Hight 等<sup>[15]</sup>针对空心圆柱试样提出了其加载参数 (轴力  $W$ 、扭矩  $M$ 、外压  $p_o$ 、内压  $p_i$ ) 与单元体所受应力参数 (轴向正应力  $\sigma_z$ 、径向正应力  $\sigma_r$ 、切线应力  $\sigma_\theta$ 、剪应力  $\tau_{z\theta}$ 、大主应力  $\sigma_1$ 、中主应力  $\sigma_2$ 、小主应力  $\sigma_3$ ) 之间的关系:

$$\sigma_z = W / [\pi(r_o^2 - r_i^2) + (p_o r_o^2 - p_i r_i^2) / (r_o^2 - r_i^2)] , \quad (1)$$

$$\sigma_r = (p_o r_o + p_i r_i) / (r_o + r_i) , \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = (p_o r_o - p_i r_i) / (r_o - r_i) , \quad (3)$$

$$\tau_{z\theta} = 3M / [2\pi(r_o^3 - r_i^3)] , \quad (4)$$

$$\sigma_1 = (\sigma_z + \sigma_\theta) / 2 + \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 / 4 + (\tau_{z\theta})^2} , \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \sigma_r , \quad (6)$$

$$\sigma_3 = (\sigma_z + \sigma_\theta) / 2 - \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 / 4 + (\tau_{z\theta})^2} . \quad (7)$$

空心圆柱试样受力与单元应力状态图如图 1 所示。

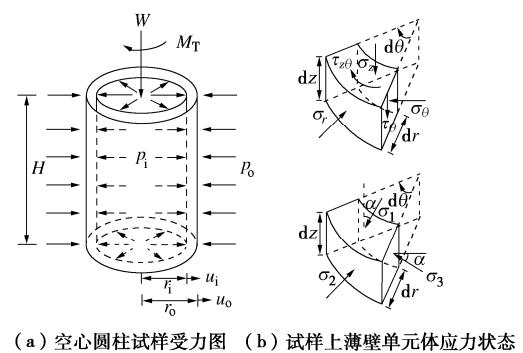


图 1 空心圆柱试样受力状态

Fig. 1 Hollow cylinder sample under loads

由于空心圆柱扭剪仪可以实现各种复杂应力状态, 因此可按试验要求较好地控制平均主应力  $p$ 、固结比  $R$ 、中主应力系数  $b$  及主应力方向角  $\alpha$  的变化。这 4 个基本参数的定义:

$$p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) / 3 , \quad (8)$$

$$R = \sigma'_1 / \sigma'_3 , \quad (9)$$

$$b = (\sigma'_2 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 - \sigma'_3) , \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma'_z - \sigma'_\theta} \right) . \quad (11)$$

因此, 由式 (1) ~ (11) 可计算出加载所需的参数。此外, 由于土体在定向剪切过程中产生了非单一应变及应力的变化, 因此采用广义剪应力  $q_g$  与广义剪应变  $\gamma_g$  以整体衡量土体的受力以及变形状态, 二者的表达式为

$$q_g = \sqrt{1/2[(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2]} , \quad (12)$$

$$\gamma_g = \sqrt{2/3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} , \quad (13)$$

式中, 大、中、小主应变 ( $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ ) 可由实测轴向应变  $\varepsilon_z$ 、径向应变  $\varepsilon_r$ 、环向应变  $\varepsilon_\theta$  以及扭剪应变  $\gamma_{z\theta}$  计算而得,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  的计算公式为

$$\varepsilon_1 = (\varepsilon_z + \varepsilon_\theta)/2 + \sqrt{[(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)/2]^2 + \gamma_{z\theta}^2}, \quad (14)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r, \quad (15)$$

$$\varepsilon_3 = (\varepsilon_z + \varepsilon_\theta)/2 - \sqrt{[(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)/2]^2 + \gamma_{z\theta}^2}. \quad (16)$$

## 2 试验设计

### 2.1 试验仪器

试验采用英国 GDS 空心圆柱扭剪仪 (HCA) 进行, 如图 2 所示。此台仪器能够独立控制轴力、扭矩、以及内外围压, 可实现不同应力路径的加载<sup>[16]</sup>。

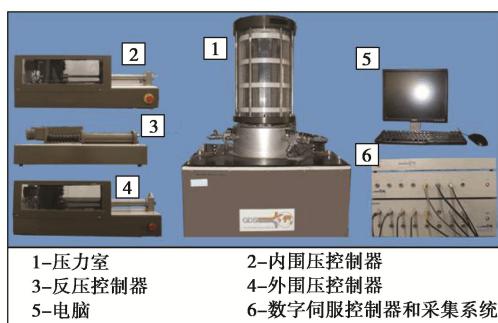


图 2 空心圆柱扭剪仪 (HCA)

Fig. 2 Hollow cylinder torsional apparatus

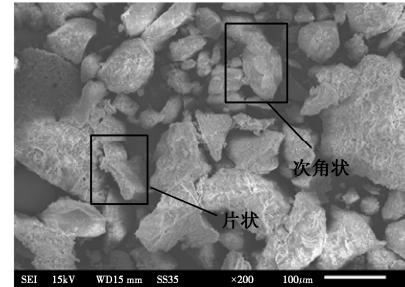
### 2.2 试验材料及试样制备

试验采用南沙群岛某岛礁的珊瑚砂, 图 3 (a) 为珊瑚砂的电镜扫描图像, 从图中可以看出, 珊瑚砂颗粒呈次角状-片状, 且表面较为粗糙。经测定, 本次试验用珊瑚砂的矿物成分为方解石、高镁方解石与文石。南海珊瑚砂的相对质量密度为 2.80, 最大孔隙比<sup>[17]</sup>为 1.72, 最小孔隙比采用“振动法”测得<sup>[18]</sup>, 其值为 0.99。珊瑚砂级配曲线如图 3 (b) 所示, 可得平均粒径为 0.31 mm, 根据土的工程分类标准<sup>[19]</sup>, 该砂的代码为 SP (级配不良砂)。

颗粒易破碎是珊瑚砂独有的特征, 孙宗勋<sup>[20]</sup>指出, 珊瑚砂在围压大于 100 kPa 的三轴压缩试验后会产生可测的颗粒破碎现象。在本次试验中, 平均有效主应力均保持在 100 kPa, 且从图 3 (b) 所测的试验前后级配曲线来看, 并无明显的颗粒破碎现象。

试验采用空心圆柱薄壁试样, 试样高  $H = 200$  mm, 外径  $r_o = 50$  mm, 内径  $r_i = 30$  mm。试验采用干装法制样并控制其相对密度  $D_r$  均为 45%。制样时, 将烘干的砂土按照级配对每层所需粒径颗粒的质量进行单独配制, 均分 8 层倒入承膜筒中, 各层之间进行刮毛处理, 以保证试样的均匀性。为使试样达到饱和, 制样完成后, 首先通入 15 min 的  $\text{CO}_2$  以置换土体中的

空气; 然后从试样底部通入无气水, 直至无气泡排出; 最后进行分级反压饱和, 直至反压达到 400 kPa。当试样的孔压系数  $B$  达到 0.97 以上时, 可认为此时砂土已达到饱和。



(a)

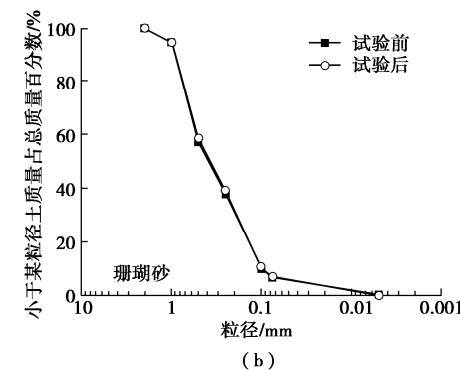


图 3 珊瑚砂颗粒电镜扫描图像及级配曲线

Fig. 3 Scanning electronic microscope graphs and grain-size distribution curve of coral sand

### 2.3 试验方案

为探究固结方向角  $\alpha_0$  与单向加载方向角  $\alpha_m$  对珊瑚砂静力特性的影响, 所有试样最终在初始平均有效主应力  $p'_0 = 100$  kPa、固结比  $R_c = 1.5$  的条件下, 选取  $\alpha_0$  为  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  进行各向异性固结, 并选取  $\alpha_m$  为  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ,  $90^\circ$  进行不排水单向加载试验, 固结与单向加载阶段的中主应力系数 ( $b_0$ ,  $b_m$ ) 均保持为 0.5; 为作对比, 进行了一组  $p'_0 = 100$  kPa 条件下的均等固结不排水单向加载试验。试验采用应力控制, 加载速率为 5 kPa/min, 具体试验方案见表 1。固结应力路径如图 4 所示, 单向加载应力路径如图 5 所示。

- ① 均等固结
- ② 各向异性固结  $\alpha_0=0^\circ, R_c=1.5$
- ③ 各向异性固结  $\alpha_0=45^\circ, R_c=1.5$
- ④ 各向异性固结  $\alpha_0=90^\circ, R_c=1.5$

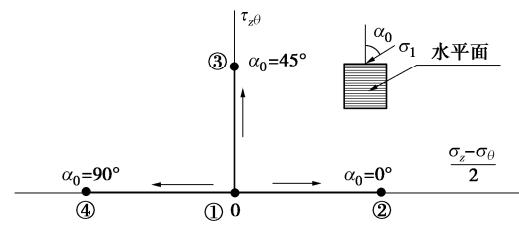


图 4 固结应力路径

Fig. 4 Stress paths of consolidations

需注意, 单向加载应力路径上任意一点和偏应力平面( $\sigma_z - \sigma_\theta$ )/2- $\tau_{z\theta}$ 原点的距离  $l$  与  $q_g$  的大小呈正比关系。对于某些单向加载应力路径,  $l$  在静力加载过程中并非持续增大, 从而导致  $q_g$  也并非持续增大。这是由于非均等固结条件下, 单向加载应力路径起点并非原点导致的。以  $\alpha_0 = 0^\circ$ ,  $R_c = 1.5$  的非均等固结条件为例(图 5(b)),  $\alpha_m = 90^\circ$  时单向加载应力路径先朝偏应力平面的原点移动, 此时  $l$  在逐渐减小, 意味着  $q_g$  在此工况的初期呈减小趋势, 直至单向加载应力路径达到原点, 此时  $q_g = 0$ ; 随后, 单向加载应力路径开始向远离原点的方向移动, 此阶段  $l$  逐渐增大,  $q_g$  也随之增大。类似的情况在  $R_c = 1.5$ ,  $\alpha_0 = 90^\circ$  且  $\alpha_m = 0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  条件下也有出现。 $q_g$  非持续线性增加的单向加载应力路径可能会对珊瑚砂的不排水响应产生影响。

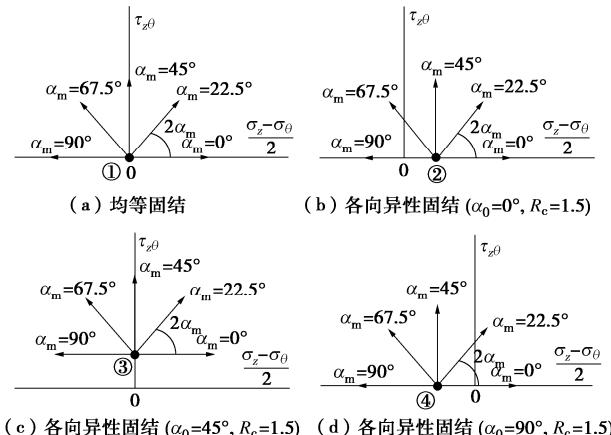


图 5 单向加载应力路径

Fig. 5 Stress paths of monotonic loadings

表 1 试验方案

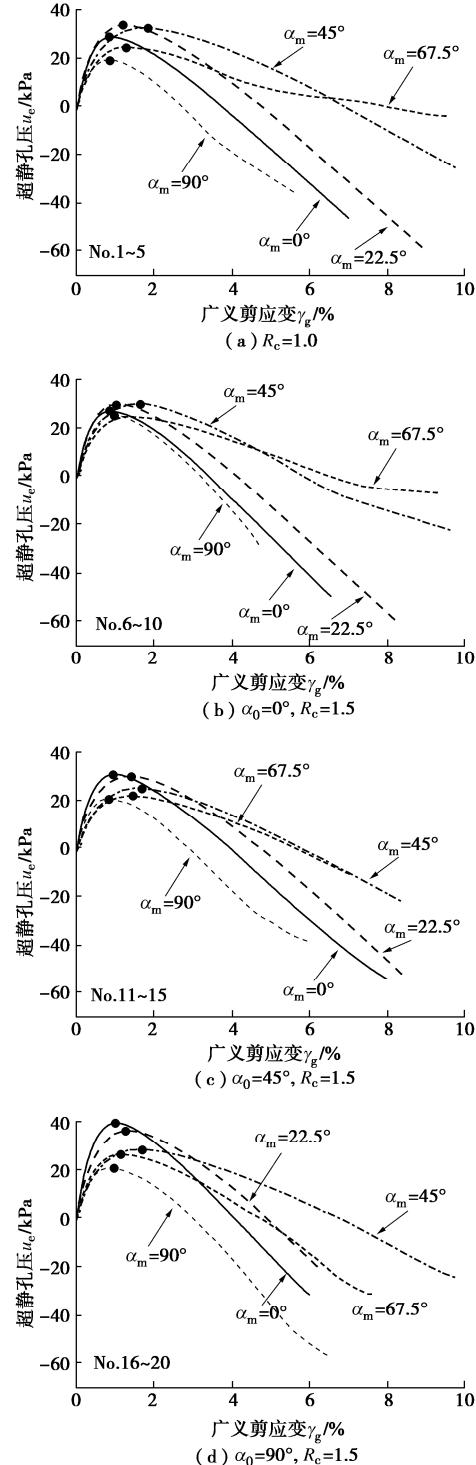
Table 1 Summary of test schemes

试验 编号/ No.	固结条件				加载条件		备注
	$p'_0$ /kPa	$b_0$	$R_c$	$\alpha_0/^\circ$	$b_m$	$\alpha_m/^\circ$	
1						0	均
2						22.5	等
3	100	—	1	—	0.5	45	固
4						67.5	结
5						90	
6						0	
7						22.5	
8	100	0.5	1.5	0	0.5	45	
9						67.5	
10						90	
11						0	各
12						22.5	向
13	100	0.5	1.5	45	0.5	45	异
14						67.5	性
15						90	固
16						0	结
17						22.5	
18	100	0.5	1.5	90	0.5	45	
19						67.5	
20						90	

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 饱和珊瑚砂超静孔压特性

图 6 为珊瑚砂超静孔压  $u_e$  随广义剪应变  $\gamma_g$  的发展趋势。随着单向加载应力的施加, 试样的  $u_e$  均呈现出先增大后减小趋势。这意味着珊瑚砂在不排水单向加载时呈现出先剪缩后剪胀的趋势。不论固结条件如何,

图 6 不同固结条件下饱和珊瑚砂  $u_e$  与  $\gamma_g$  之间的关系Fig. 6 Curves of  $u_e$  versus  $\gamma_g$  of saturated coral sand under various consolidation conditions

$\alpha_m = 45^\circ$  时  $u_e$  达到峰值所对应的  $\gamma_g$  最大, 意味着此工况下  $u_e$  随  $\gamma_g$  发展的速率最慢,  $\alpha_m$  为  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  时  $u_e$  达到峰值所对应的  $\gamma_g$  最小, 意味着此工况下  $u_e$  随  $\gamma_g$  发展的速率最快, 即轴应力对  $u_e$  的影响大于剪应力的影响。

### 3.2 饱和珊瑚砂的有效内摩擦角和相变强度

图 7 为珊瑚砂在不同固结及加载条件下的有效应力路径。所有试样的平均有效主应力  $p'$  均呈现出先减小后增大趋势。 $p'$  达到最小值时  $u_e$  达到最大值, 此时应力路径上对应的点为相变点 (PTS)。PTS 对应的广

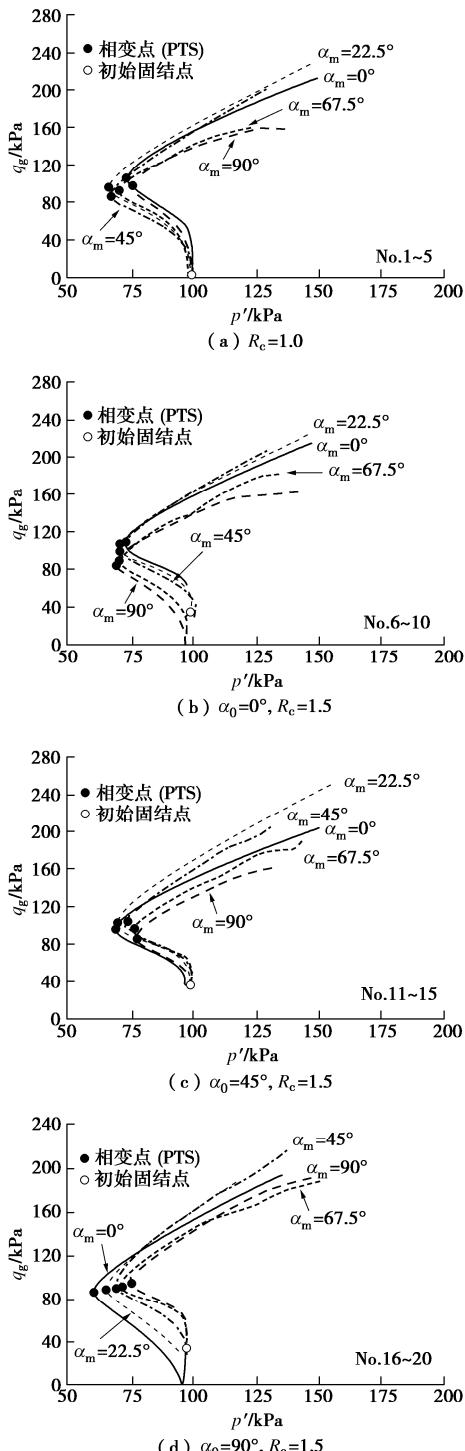


图 7 饱和珊瑚砂的有效应力路径

Fig. 7 Effective stress paths of saturated coral sand

义剪应力  $q_g$  即为相变强度  $S_{PT}$ , 对应的有效内摩擦角即为相变有效内摩擦角  $\phi'_{PT}$ 。图 8 展示了不同固结条件下  $\phi'_{PT}$  与  $\alpha_m$  的关系。 $\alpha_0 = 45^\circ$  时  $\phi'_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现出先增大后减小趋势, 且  $\alpha_m = 45^\circ$  时最大; 其他固结条件下,  $\phi'_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现出减小趋势。各向异性会导致珊瑚砂试样结构的差异, 因此不同固结条件下珊瑚砂的剪胀角  $\psi$  也有所不同, 经计算, 本次试验所用饱和珊瑚砂  $\psi$  的范围在  $2.4^\circ \sim 8.3^\circ$ 。

图 9 给出不同固结条件下的  $S_{PT}$  与  $\alpha_m$  关系。均等固结时  $S_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现出先减小后增大趋势, 且  $\alpha_m = 45^\circ$  时最小;  $\alpha_0 = 0^\circ$  时  $S_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现出逐渐减小趋势;  $\alpha_0 = 45^\circ$  时  $S_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现出先增大后减小趋势, 且  $\alpha_m = 45^\circ$  时最大;  $\alpha_0 = 90^\circ$  时  $S_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现出逐渐增大趋势, 即各向异性固结条件下珊瑚砂的  $S_{PT}$  总在  $\alpha_0$  方向上最大。

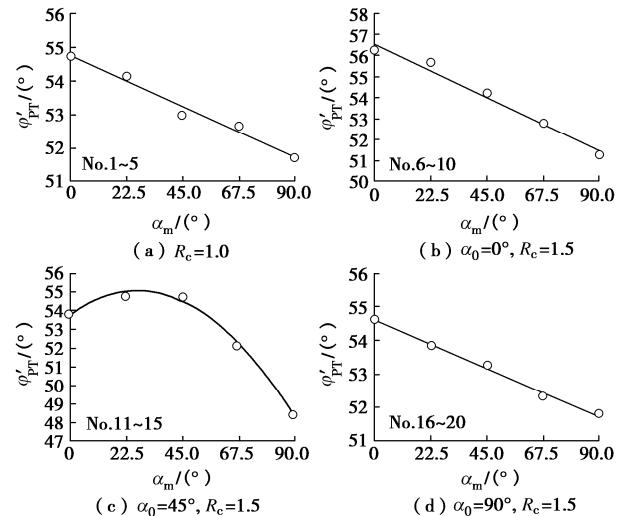


图 8 饱和珊瑚砂的  $\phi'_{PT}$  与  $\alpha_m$  的关系

Fig. 8 Curves of  $\phi'_{PT}$  versus  $\alpha_m$  of saturated coral sand

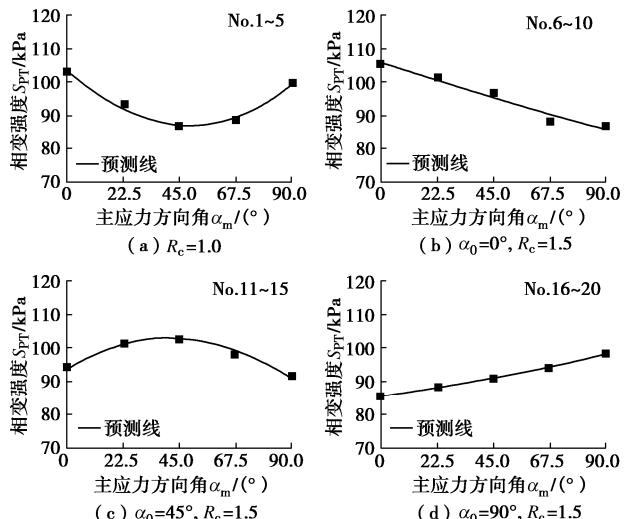


图 9 饱和珊瑚砂  $S_{PT}$  与  $\alpha_m$  的关系

Fig. 9 Curves of  $S_{PT}$  versus  $\alpha_m$  of saturated coral sand

为了分析各因素对  $S_{PT}$  的影响, 图 10 展示了  $R_c = 1.5$ ,  $b = 0.5$  时  $\alpha_0$ ,  $\alpha_m$  与  $S_{PT}$  的三维空间关系。可以发现: ①  $\alpha_0$  与  $\alpha_m$  两者相差越小, 对应的  $S_{PT}$  值越大, 且  $\alpha_0 = \alpha_m$  时  $S_{PT}$  达到峰值点(图 10 中的黑点); 反之, 若  $\alpha_0$  与  $\alpha_m$  两者相差越大, 对应的  $S_{PT}$  值越小。这意味着固结与加载条件耦合作用对  $S_{PT}$  具有较大影响。② 随着  $\alpha_0$  增大,  $S_{PT}$  呈现出减小的趋势。

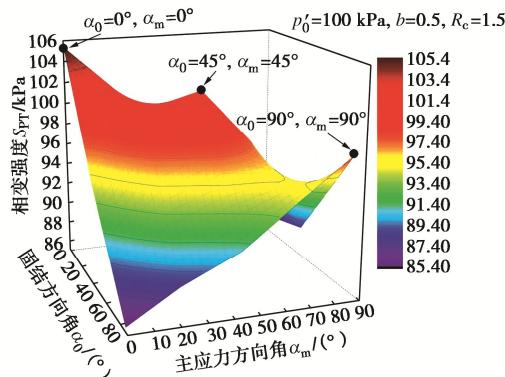


图 10 饱和珊瑚砂  $\alpha_0$ 、 $\alpha_m$  与  $S_{PT}$  的关系

Fig. 10 Relationship among  $\alpha_0$ ,  $\alpha_m$  and  $S_{PT}$  of saturated coral sand

引入参数  $\beta$  以描述不同  $\alpha_0$  与  $\alpha_m$  条件下饱和珊瑚砂  $S_{PT}$  的变化特征:

$$\beta = A_1 A_2, \quad (17)$$

式中,  $A_1$  描述  $\alpha_0$  与  $\alpha_m$  的差值对  $S_{PT}$  的影响,  $A_2$  描述  $\alpha_0$  的大小对  $S_{PT}$  的影响,  $A_1$ ,  $A_2$  均可用余弦函数表示为

$$A_1 = \cos(\alpha_m - \alpha_0), \quad (18)$$

$$A_2 = \cos(\alpha_0/2). \quad (19)$$

$S_{PT}$  与  $\beta$  的关系如图 11 所示。可以看出, 参数  $\beta$  可较好地将不同  $\alpha_0$ ,  $\alpha_m$  值的  $S_{PT}$  进行规范化, 二者具有较强的线相关性。

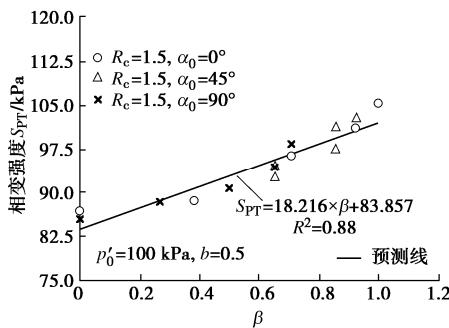


图 11 珊瑚砂  $S_{PT}$  与  $\beta$  的关系

Fig. 11 Correlation between  $S_{PT}$  and  $\beta$  of saturated coral sand

### 3.3 饱和珊瑚砂的应力-应变特性

图 12 为珊瑚砂广义剪应力  $q_g$  与广义剪应变  $\gamma_g$  之间的关系。加载初期 ( $\gamma_g < 0.5\%$ )、产生较大应变后 ( $\gamma_g > 1.0\%$ ) 所展示出的应力-应变关系的特征存在

显著差异。加载初期阶段, 在均等固结条件下,  $\alpha_m = 45^\circ$  时  $\gamma_g$  随  $q_g$  的线性变化而呈现出较快的发展趋势; 而  $\alpha_m = 0^\circ$  时  $\gamma_g$  随  $q_g$  的线性变化而呈现出较慢的发展趋势;  $R_c = 1.5$  时, 随着  $q_g$  的线性变化,  $\gamma_g$  总在  $\alpha_0 = \alpha_m$  的方向发展最缓慢。大应变阶段,  $\gamma_g$  随  $q_g$  的发展速率随  $\alpha_m$  的增大呈现出先减小后增大趋势, 且在  $\alpha_m$  大于  $67.5^\circ$  后改变了趋势。究其原因, 可发现对于

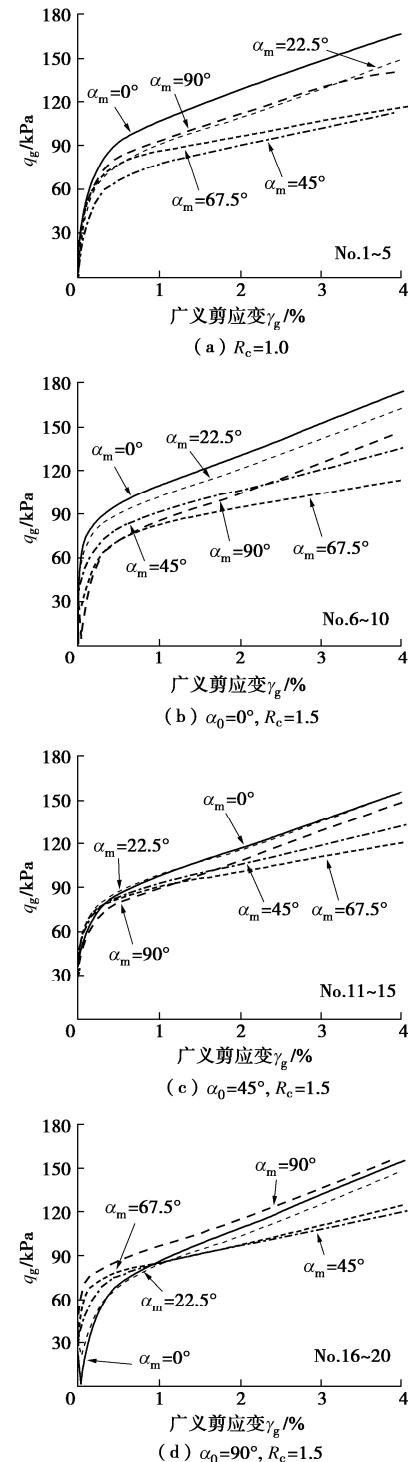


图 12 饱和珊瑚砂  $q_g$  与  $\gamma_g$  的关系

Fig. 12 Curves of  $q_g$  versus  $\gamma_g$  of saturated coral sand

编号 9, 10, 16, 17 的工况,  $q_g$  呈现出先减小后增大趋势, 并非持续的线性增加, 这就导致单向加载应力部分抵消了固结应力的作用, 土粒在单向加载应力作用下重新排列, 使其强度有所增加。此外, 不论何种固结及加载条件下, 试样均呈现出应变硬化现象, 试验过程中并未观测到峰值强度, 这是由于应力控制的加载条件所致。

## 4 结 论

通过饱和珊瑚砂的不排水单向剪切试验, 发现固结方向角  $\alpha_0$  及单向加载方向角  $\alpha_m$  对珊瑚砂静力特性有显著影响, 得到以下 4 点结论。

(1) 珊瑚砂超静孔压  $u_e$  随广义剪应变  $\gamma_g$  的增加呈现出先增大后减小的趋势, 且  $\alpha_m = 45^\circ$  时  $u_e$  随  $\gamma_g$  的发展速率最慢,  $\alpha_m$  为  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  时  $u_e$  随  $\gamma_g$  的发展速率最快。

(2) 均等固结及  $R_c = 1.5$  且  $\alpha_0$  为  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  的非均等固结时, 珊瑚砂相变内摩擦角  $\phi'_{PT}$  均随  $\alpha_m$  的增大呈现出减小趋势; 仅在  $R_c = 1.5$ ,  $\alpha_0 = 45^\circ$  的非均等固结时,  $\phi'_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现出先增大后减小趋势。

(3) 固结条件对珊瑚砂相变强度  $S_{PT}$  有显著影响: 均等固结时  $S_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现先减小后增大趋势;  $\alpha_0 = 0^\circ$  时  $S_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现减小趋势;  $\alpha_0 = 45^\circ$  时  $S_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现出先增大后减小趋势;  $\alpha_0 = 90^\circ$  时  $S_{PT}$  随  $\alpha_m$  增大呈现增大趋势。引进参数  $\beta$  可较好地规范化不同的固结和加载条件的  $S_{PT}$ 。

(4)  $\alpha_m$  对珊瑚砂应力 - 应变关系有较大影响, 且应力 - 应变关系在广义偏应力  $q_g$  持续、非持续线性增加的单向加载应力路径下所表现出来的特征是不同的。

## 参 考 文 献:

- [1] 马维嘉, 陈国兴, 李磊, 等. 循环荷载下饱和南沙珊瑚砂的液化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 981–988. (MA Wei-jia, CHEN Guo-xing, LI Lei, et al. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated coral sand in Nansha Islands under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 981–988. (in Chinese))
- [2] 朱长岐, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831–1836. (ZHU Chang-qi, CHEN Hai-yang, MENG Qing-shan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1831–1836. (in Chinese))
- [3] 陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1389–1392. (CHEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1389–1392. (in Chinese))
- [4] 刘洋. 砂土的各向异性强度准则: 应力诱发各向异性[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 460–468. (LIU Yang. Anisotropic strength criteria of sand: stress-induced anisotropy [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 460–468. (in Chinese))
- [5] KATO S, ISHIHARA K, TOWHATA I. Undrained shear characteristics of saturated sand under anisotropic consolidations[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(1): 1–11.
- [6] YOSHIMINE M, ISHIHARA K, VARGAS W. Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(3): 179–188.
- [7] WONG R K S, ARTHUR J R F. Induced and inherent anisotropy in sand[J]. Géotechnique, 1985, 35(4): 471–481.
- [8] SATO K, YOSHIDA N. Effect of Principal stress direction on undrained cyclic shear behaviour of dense sand[C]// Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, 1999: 542–547. Brest.
- [9] CHEN G X, WU Q, ZHOU Z L, et al. Undrained anisotropy and cyclic resistance of saturated silt subjected to various patterns of principal stress rotation[J]. Géotechnique, 2020, 70(4): 317–331.
- [10] 于艺林, 张建民, 童朝霞, 等. 定轴排水剪切试验中各向异性砂土的力学响应[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1637–1642. (YU Yi-ling, ZHANG Jian-min, TONG Zhao-xia, et al. Behavior of anisotropic mica sand under fixed principal stress axes drained shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1637–1642. (in Chinese))
- [11] 罗强, 李晓磊, 王忠涛. 初始各向异性砂土不排水剪切特性试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2019, 59(6): 629–637. (LUO Qiang, LI Xiao-lei, WANG Zhong-tao. Experimental study of shear behavior of inherent anisotropy sand in undrained condition[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019, 59(6): 629–637. (in Chinese))
- [12] 杨仲轩, 李相崧, 明海燕. 砂土各向异性和不排水剪切特性研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2009, 26(2): 158–163. (YANG Zhong-xuan, LI Xiang-song, MING Hai-yan. Fabric

- anisotropy and undrained shear behavior of granular soil[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2009, **26**(2): 158 – 163. (in Chinese))
- [13] 陈伟, 张吾渝, 常立君, 等. 定向剪切应力路径下击实黄土各向异性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 2): 4320 – 4324. (CHEN Wei, ZHANG Wu-yu, CHANG Li-jun, et al. Experimental study of anisotropy of compacted loess under directional shear stress path[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S2): 4320 – 4324. (in Chinese))
- [14] AGHAJANI F H, SALEHZADEH H. Anisotropic behavior of the Bushehr carbonate sand in the Persian Gulf[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, **8**(10): 8197 – 8217.
- [15] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. Géotechnique, 1983, **33**(4): 355 – 383.
- [16] CHEN G X, ZHOU Z L, PAN H, et al. The influence of undrained cyclic loading patterns and consolidation states on the deformation features of saturated fine sand over a wide strain range[J]. Engineering Geology, 2016, **204**: 77 – 93.
- [17] Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density: ASTM D. 4254—14[S]. 2006.
- [18] Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table: ASTM D. 4253—14[S]. 2006.
- [19] 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 2008. (GB/T 50145—2007 Standard for Engineering Classification of Soil[S]. 2008. (in Chinese))
- [20] 孙宗勋. 南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J]. 热带海洋学报, 2000, **19**(2): 1 – 8. (SUN Zong-xun. Engineering properties of coral sands in Nansha Islands[J]. Tropic Oceanology, 2000, **19**(2): 1 – 8. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 – 4548, 国内统一刊号 CN 32 – 1124/TU, 国内发行代号 28 – 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)