

珊瑚砂与土工格栅界面的剪切特性及本构模型

陈建峰¹, 刘哲宁¹, 向 焱¹, 马 超¹, 高俊丽²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海大学 力学与工程科学学院 土木工程系, 上海 200444)

摘要: 采用南海原位级配珊瑚砂和聚丙烯双向土工格栅, 开展了不同法向应力下珊瑚砂和筋土界面大型直剪试验。试验结果表明, 珊瑚砂和筋土界面剪应力—剪切位移曲线呈现明显的应变软化特征, 峰值抗剪强度线呈现双折线形态, 残余抗剪强度线则呈现较好的线性关系; 各级法向应力下珊瑚砂与土工格栅界面摩擦比均值达到 1.37 左右, 远高于石英砂与土工格栅界面摩擦比, 说明在珊瑚砂中加筋能充分发挥加筋效果; 珊瑚砂和筋土界面在剪切过程中总体上经历了相对剪缩—相对剪胀—相对剪缩的过程, 对珊瑚砂加筋可显著减小其剪缩变形; 珊瑚砂和筋土界面直剪试验试样的相对破碎率接近, 均随法向应力的增大而增大, 但增幅逐渐趋缓。采用邓肯—张模型和剪切软化模型分别描述南海原位级配珊瑚砂与聚丙烯双向土工格栅界面峰前和峰后剪应力—剪切位移曲线, 所建立的筋土界面本构模型能够很好地反映其剪切特性。

关键词: 珊瑚砂; 土工格栅; 大型直剪试验; 颗粒级配; 本构模型

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Shear Characteristics and Constitutive Model of Interface Between Coral Sand and Geogrid

CHEN Jianfeng¹, LIU Zhening¹, XIANG Ye¹, MA Chao¹, GAO Junli²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, College of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Large direct shear tests were conducted on the in-situ graded coral sand in the South China Sea and the interface between the coral sand and polypropylene biaxial geogrid under different normal stresses. The test results show that the shear stress-shear displacement curves of coral sand and reinforcement-soil interface show obvious strain softening characteristics. The peak

shear strength lines of both show a bilinear form, and the residual shear strength lines of both show a good linear relationship. The average interface friction ratio between coral sand and geogrid at all levels of normal stress is about 1.37, which is much higher than that between siliceous sand and geogrid, indicating that the reinforcement effect can be mobilized in the reinforced coral sand. During the shearing process of coral sand and reinforcement-soil interface, the samples generally experienced a “relative shear shrinkage-relative shear dilatancy-relative shear shrinkage”, and reinforced coral sand can significantly reduce the shear shrinkage deformation. The relative breakage rates of the samples in the direct shear test and the reinforcement-soil interface direct shear test are close and increase with the increase of the normal stress. The Duncan-Chang model and shear softening model are used to respectively describe the pre peak and post peak of shear stress-displacement curves of the South China Sea and polypropylene biaxial geogrid interface. The interface constitutive model established can well reflect its shear characteristics.

Keywords: coral sand; geogrid; large-scale direct shear test; gradation; constitutive model

珊瑚砂也称为钙质砂, 大多分布于热带和亚热带地区, 如波斯湾、红海、印度西部海域、中美洲海域等地^[1-3]。我国的珊瑚砂广泛分布于南海诸岛及南海北部沿岸, 其中西沙群岛和南沙群岛的岛、礁、暗沙大多由珊瑚砂构成^[1]。南海具有重要的战略价值、丰富的油气资源和渔业资源, 因此, 对南海珊瑚砂开展相关研究具有重要的理论意义和应用价值^[4]。

然而由于珊瑚砂特殊的海相成因以及沉积前未经长途搬运, 形成的土颗粒呈散粒体, 具有多孔隙

收稿日期: 2022-10-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(22120230302)

第一作者: 陈建峰, 教授, 工学博士, 主要研究方向为地质工程。E-mail: jf_chen@tongji.edu.cn



(含有内孔隙)、形状不规则、易破碎、易压缩等特点,是一种特殊类土^[5-7]。土工合成材料已广泛应用于地基、边坡、挡墙、路堤等的构筑,形成加筋土结构^[8],其具有施工方便、稳定性及抗震性能好、变形适应能力强、造价低廉、绿色环保等优点,在珊瑚砂岛礁建设中有广阔的应用前景^[2]。

土工合成材料与土体相互作用形成复合体,提高了土体的强度及稳定性^[9]。目前国内外学者在筋土相互作用机理方面已开展了较多研究。Anubhav和Basudhar^[10]开展圆状砂和棱角状砂与有纺土工织物界面直剪试验,探究颗粒形状对筋土界面特性的影响。徐超等^[11]和Sweta等^[12]开展不同剪切速率下的筋土界面直剪试验,探究剪切速率对筋土界面特性的影响。Infante等^[13]、Namjoo等^[14]选取土工布、土工格栅等作为加筋材料,对比不同筋材对砂土的加筋效果。王协群等^[15]、Xu等^[16]开展了一系列大型直剪试验,研究了填料的压实度、含水率对筋—土界面力学特性的影响规律。

目前筋土相互作用的研究大多基于石英砂,基于珊瑚砂开展筋土相互作用的研究还很少。本文选用南海原位级配珊瑚砂和聚丙烯(PP)双向土工格栅,开展不同法向应力下珊瑚砂和筋土界面大型直剪试验,研究剪应力—剪切位移关系、抗剪强度特性、垂向位移—剪切位移关系和颗粒破碎特征,并提出可以描述南海原位级配珊瑚砂与聚丙烯双向土工格栅界面剪切特性的本构模型。

1 界面大型直剪试验

1.1 试验设备

采用HM-5780大型直剪仪开展室内筋土界面直剪试验。该直剪仪由剪切盒、法向加载系统、水平伺服系统和控制系统组成。上、下剪切盒尺寸分别为305mm×305mm×102mm和405mm×305mm×102mm。水平伺服系统推动下剪切盒水平位移对试样进行直剪,剪切过程中剪切面积保持不变。试验

采用位移控制。

1.2 试验材料

试验材料包括填料和筋材。填料为取自中国南海西沙群岛的原位级配珊瑚砂,级配曲线如图1所示,其不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为5.68和0.69,最大干密度 ρ_{dmax} 和最小干密度 ρ_{dmin} 分别为 $1.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.41\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。依据《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)^[17],南海原位级配珊瑚砂为级配不良砾砂。图2为珊瑚砂试样照片。试验前均对试样进行干燥处理。

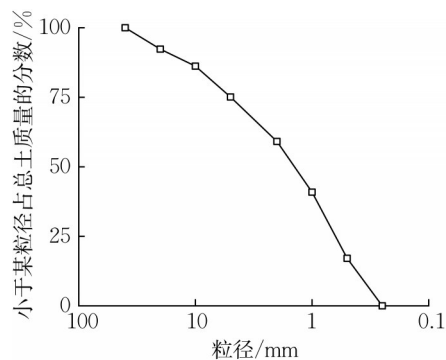


图1 珊瑚砂级配曲线

Fig. 1 Grading curve of coral sand



图2 珊瑚砂试样

Fig. 2 Sample of coral sand

筋材为山东泰安现代塑料有限公司生产的TGSG50-50聚丙烯(PP)双向土工格栅,其技术指标如表1所示。试样尺寸为409 mm×305 mm。

表1 土工格栅技术指标

Tab. 1 Technical indexes of geogrid

单位面积质量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	筋材厚度/mm	网孔尺寸/ (mm×mm)	极限拉伸强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)		极限延伸率/ %		纵向不同延伸率时的拉伸 强度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)		横向不同延伸率时的拉伸 强度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	
			纵向	横向	纵向	横向	2%	5%	2%	5%
570	5.2	34.5×34.5	49.1	49.0	11.1	14.7	17.7	34.4	17.7	34.0

1.3 试验方法

共开展7组珊瑚砂直剪试验及7组筋土界面直

剪试验。依据加筋珊瑚砂结构应力水平及已有研究成果^[18-19],设置法向应力为25 kPa、50 kPa、75 kPa、

100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa。试验中填料压实度取 $\lambda=0.9$ 。制样时根据干密度 $\rho_d=\lambda\rho_{dmax}$ 和剪切盒的尺寸计算所需填料的质量,分4次装入剪切盒中并压实至指定高度。当填土至筋材高度时通过专用夹具将筋材与下剪切盒固定,随后安装上剪切盒并继续填土。试验剪切速率设置为 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,当剪切位移达到50 mm时试验结束。

2 试验结果

2.1 剪应力-剪切位移关系

图3为南海原位级配珊瑚砂直剪试验曲线,图中 σ_n 为法向应力。由图可见,珊瑚砂剪应力初期增长较快,达到峰值后下降,呈现明显的应变软化特征;随着剪切位移的进一步增大,剪应力又有所回升。这是由于剪切带颗粒破碎和旋转持续发生,大颗粒不断被破碎为小颗粒并填充于大颗粒间孔隙,导致剪切带附近颗粒接触再次增强。金宏旭^[20]对不均匀系数 $C_u=2.293$ 、曲率系数 $C_c=0.981$ 、相对密度 $D_r=80\%$ 的珊瑚砂开展直剪试验,也观察到了剪应力峰后再次上升的现象,与本文的试验结果一致。

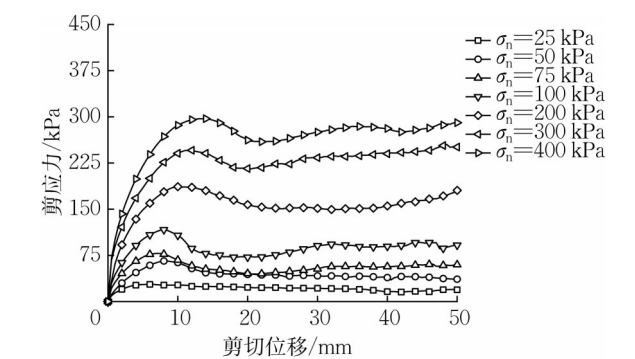


图3 珊瑚砂直剪试验曲线

Fig. 3 Relationship between shear stress and shear displacement of coral sand

图4为筋土界面直剪试验曲线。由图可见,南海原位级配珊瑚砂与土工格栅界面在不同法向应力下的剪应力—剪切位移曲线与珊瑚砂曲线一样,也

呈现明显的应变软化特征,但峰后残余阶段曲线比较平缓,没有出现如图3所示的剪应力再次上升现象,这可能是由于土工格栅限制了珊瑚砂颗粒旋转和位置调整,使得剪切带附近颗粒接触没有再次增强。

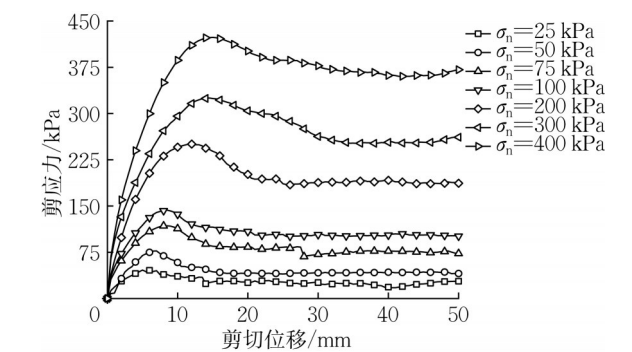


图4 筋土界面直剪试验曲线

Fig. 4 Relationship between shear stress and shear displacement of reinforcement-soil interface

2.2 抗剪强度特性

图5为南海原位级配珊瑚砂和筋土界面抗剪强度与法向应力关系曲线。由图可见,珊瑚砂和筋土界面的峰值抗剪强度线均呈现双折线形态,双折线的分界点对应的法向应力为100 kPa,超过100 kPa后强度线斜率变小。其原因是法向应力增大使颗粒间接触咬合作用增强,剪切过程中珊瑚砂颗粒破碎增多、剪切带颗粒变细,使得珊瑚砂及筋土界面似黏聚力增大而内摩擦角变小,这将在2.3节中作进一步讨论。而珊瑚砂和筋土界面残余抗剪强度线则整体上呈现较好的线性关系。

由图5还可看到,筋土界面峰值和残余强度线均大于相对应的珊瑚砂强度线。

表2为试验获得的抗剪强度参数。由表可见,珊瑚砂和筋土界面在法向应力100~400 kPa时的似黏聚力均分别较法向应力25~100 kPa时的值显著增大,而内摩擦角则明显减小。筋土界面峰值和残余内摩擦角均大于相对应的珊瑚砂内摩擦角。

筋土界面摩擦比 $f_{g(e)}$ 能够反映加筋效果,定义如式(1)所示^[21]:

表2 抗剪强度参数							
Tab. 2 Shear strength parameters of test							
强度类型	法向应力/kPa	珊瑚砂			筋土界面		
		似黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	R^2	似黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	R^2
峰值强度	25~100	2.56	48.1	0.983	13.51	53.0	0.997
	100~400	61.35	31.4	0.994	56.94	42.5	0.998
残余强度	25~400	7.99	37.2	0.990	0.48	41.5	0.998

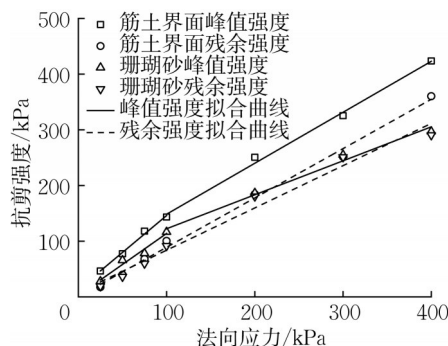


图5 抗剪强度—法向应力关系

Fig. 5 Relationship between shear strength and normal stress

$$f_g(\delta) = \frac{\tau_{\max}(\delta)}{\tau_{s, \max}(\delta)} \quad (1)$$

式中: $\tau_{\max}(\delta)$ 为不同法向应力下筋土界面峰值抗剪强度; $\tau_{s, \max}(\delta)$ 为不同法向应力下珊瑚砂的峰值抗剪强度。

图6为筋土界面摩擦比与法向应力关系曲线。由图可见,各级法向应力下珊瑚砂与土工格栅界面摩擦比均大于1,均值达到1.37左右,远高于石英砂与土工格栅界面摩擦比,后者一般为0.7~0.9^[22]。原因可能是南海原位级配珊瑚砂颗粒表面粗糙、形状不规则,使珊瑚砂颗粒与土工格栅肋条之间相互作用强。本试验结果表明,在南海原位级配珊瑚砂中加筋能充分发挥加筋效果,可显著提高珊瑚砂的强度。

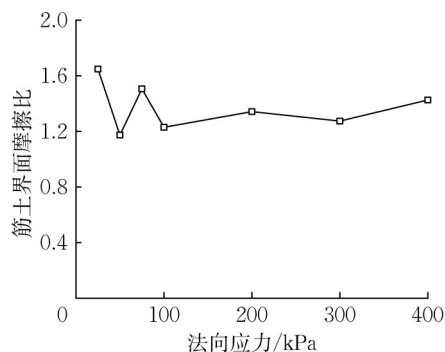


图6 筋土界面摩擦比—法向应力关系

Fig. 6 Relationship between reinforcement-soil interface friction ratio and normal stress

2.3 垂向位移—剪切位移关系

定义垂向位移随剪切位移增大而减小为相对剪缩、垂向位移随剪切位移增大而增大为相对剪胀。图7为南海原位级配珊瑚砂直剪试验中垂向位移与剪切位移关系曲线。由图可见,珊瑚砂总体上经历了相对剪缩—相对剪胀—相对剪缩的变形过程;随着法向应

力的增大,相对剪胀越来越弱,而相对剪缩越来越显著。在法向应力达到400 kPa时,无相对剪胀发生,而全程表现为剪缩,最终垂向位移达到-3.2 mm。

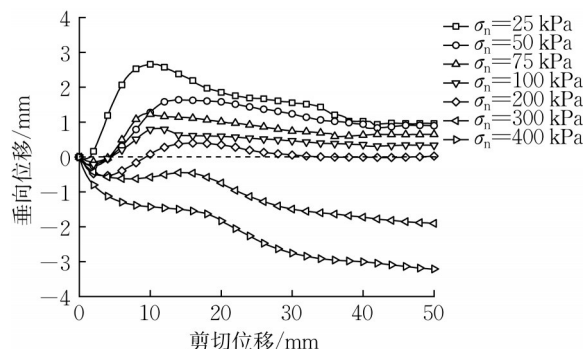


图7 珊瑚砂直剪试验垂向位移—剪切位移关系

Fig. 7 Relationship between vertical displacement and shear displacement of coral sand

图8为筋土界面直剪试验中垂向位移与剪切位移关系曲线。由图可见,试样总体上也经历了相对剪缩—相对剪胀—相对剪缩的变形过程;相较相同法向应力下的珊瑚砂直剪试验,试样相对剪胀得到增强,而相对剪缩显著减弱。在法向应力不大于100 kPa时,剪切后期试验相对剪缩很不明显;在法向应力达到400 kPa时,最终垂向位移为-1.2 mm、仅为珊瑚砂垂向位移的38%,说明加筋能够显著减小珊瑚砂的剪缩变形。

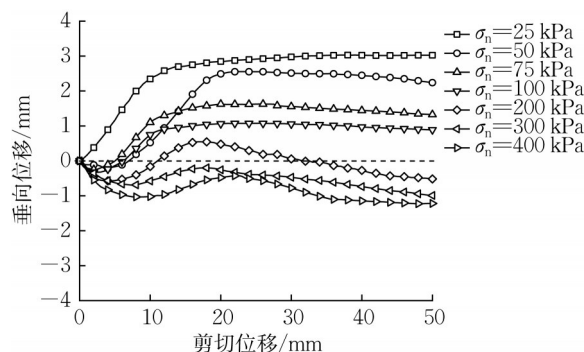


图8 筋土界面直剪试验垂向位移—剪切位移关系

Fig. 8 Relationship between vertical displacement and shear displacement of reinforcement-soil interface

由图7和图8还可见,在法向应力不大于100 kPa时,珊瑚砂和筋土界面直剪试验试样均表现为剪胀;而当法向应力大于100 kPa后,试样则主要表现为剪缩。剪缩是由于法向应力增大以及剪切过程中颗粒破碎增多所致,这也解释了珊瑚砂和筋土界面的峰值抗剪强度线为双折线且其分界点对应法

向应力为100 kPa的原因。

2.4 颗粒破碎分析

珊瑚砂不同于石英砂的一个重要特性是颗粒易破碎。采用Hardin^[23]提出的相对破碎率 B_r 对珊瑚砂破碎程度进行量化,为

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (2)$$

式中: B_t 为总破碎率,为试验前与试验后整体破碎率的差,在级配曲线中表示为试验前曲线与 $d=0.074$ mm、累计质量分数为100%和0所围曲线面积跟试验后曲线与 $d=0.074$ mm、累计质量分数100%和0所围曲线面积的差值;初始破碎率 B_p 为试验前曲线与 $d=0.074$ mm、累计质量分数100%和0所围曲线的面积。

试验后对南海原位级配珊瑚砂试样进行筛分得到相对破碎率,如图9所示。由图可见,珊瑚砂和筋土界面直剪试验试样的相对破碎率很接近,后者总体上略微大于前者。两者在法向应力25 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa和400 kPa下对应的相对破碎率分别约为1.54%、5.16%、7.94%、9.20%和9.82%,即破碎率均随法向应力的增大而增大,但增幅逐渐趋缓。对2层聚丙烯土工格栅加筋的南海原位级配珊瑚砂开展了大三轴试验^[2],围压为150 kPa、300 kPa和450 kPa下珊瑚砂试样剪切破坏后其破碎率分别为2.7%、7.8%和10.4%。大三轴试验的试样体积与本文大型直剪试验的试样体积相当,表明在相同应力条件下直剪试验和大三轴试验试样的相对破碎率较一致。

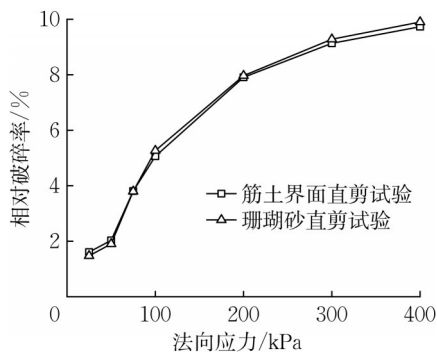


图9 相对破碎率—法向应力关系

Fig. 9 Relationship between relative breakage rate and normal stress

3 筋土界面本构模型

根据筋土界面直剪试验结果建立南海原位级配

珊瑚砂与聚丙烯双向土工格栅界面本构模型。

3.1 强度包络线

试验得到的峰值强度与法向应力关系曲线分段线性拟合效果较好,因此选择摩尔—库仑准则分段描述二者关系,为

$$\begin{cases} \tau_p = c_1 + \sigma_n \tan \varphi_1 & \sigma_n \leq 100 \\ \tau_p = c_2 + \sigma_n \tan \varphi_2 & \sigma_n > 100 \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ_p 为峰值强度; σ_n 为法向应力; c_1 、 c_2 为似黏聚力; φ_1 、 φ_2 为内摩擦角。取值见表2。

残余强度与法向应力关系线性拟合效果较好,也选择摩尔—库仑准则描述,为

$$\tau_r = c_3 + \sigma_n \tan \varphi_3 \quad (4)$$

式中: τ_r 为残余强度; c_3 为残余似黏聚力; φ_3 为残余内摩擦角。取值见表2。

3.2 峰前模型

图4所示剪应力—剪切位移曲线在峰前表现出明显的非线性,曲线的切线模量发生软化,且初始切线模量与法向应力有关。因此,选择邓肯—张模型模拟峰前剪应力—剪切位移曲线。

非线性的剪应力—剪切位移曲线通过Kondner^[24]提出的双曲线模型进行拟合,如式(5):

$$\tau = \frac{\delta}{a + b\delta} \quad (5)$$

式中: τ 为剪应力; δ 为剪切位移; a 为初始切线模量 E_i 的倒数; b 为界面极限强度 τ_{ult} 的倒数。

初始剪切模量 E_i 随法向应力 σ_n 的增大而增大,可以用Janbu^[25]提出的经验公式拟合 E_i 与 σ_n 的关系,为

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n \quad (6)$$

式中: K 为量纲为一系数; p_a 为标准大气压; n 为量纲为一指数。界面极限强度通过破坏比定义,为

$$R_f = \frac{\tau_p}{\tau_{ult}} \quad (7)$$

式中: R_f 为破坏比,小于1,即峰值强度恒小于极限强度。为确定公式中的参数,变换式(5)为

$$\frac{\delta}{\tau} = a + b\delta \quad (8)$$

即 $\delta/\tau - \delta$ 呈线性关系,如图10所示。拟合 $\delta/\tau - \delta$ 可以得到 a 和 b ,进而可以获得 E_i 和 R_f 的值,如表3所示。 R_f 的均值为0.723。

对式(6)等号两边取对数可以变换为

$$\lg \left(\frac{E_i}{P_a} \right) = \lg K + n \lg \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right) \quad (9)$$

即 $\lg(E_i/P_a) - \lg(\sigma_n/P_a)$ 呈线性关系,如图11所示。

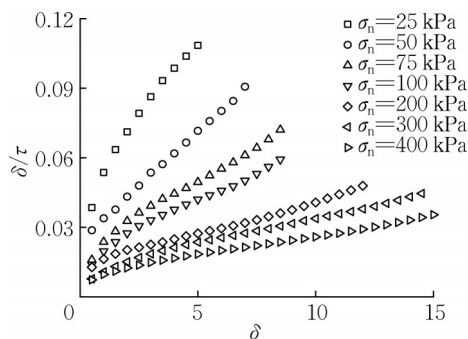


图 10 珊瑚砂与土工格栅界面 $\delta/\tau-\delta$ 关系

Fig. 10 Relationship between $\delta/\tau-\delta$ of coral sand-geogrid interface

表 3 筋土界面的 E_i 、 R_i 值
Tab. 3 Values of E_i and R_i

σ_n/Pa	τ_p/kPa	a	$E_i/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	b	τ_{ult}/kPa	R_i
25	46.090	0.039	25.867	0.015	67.069	0.687
50	77.220	0.024	41.034	0.009	106.610	0.724
75	117.900	0.018	54.526	0.006	159.744	0.738
100	143.370	0.016	62.775	0.005	196.850	0.728
200	250.400	0.014	73.855	0.003	364.964	0.686
300	325.200	0.011	94.967	0.002	427.350	0.761
400	423.510	0.009	111.235	0.002	578.035	0.733

拟合可以得到 $K=563.975, n=0.493$ 。

3.3 峰后模型

珊瑚砂与土工格栅界面的剪应力—剪切位移曲线在峰后也表现出非线性,表现为强度软化。Esterhuizen 等^[26]提出了用于描述筋土界面峰后剪应力—剪切位移关系的剪切软化模型,该模型采用归一化的参数反映峰后剪切软化特性,分别定义了剪切应力系数 R 和剪切位移系数 D 为

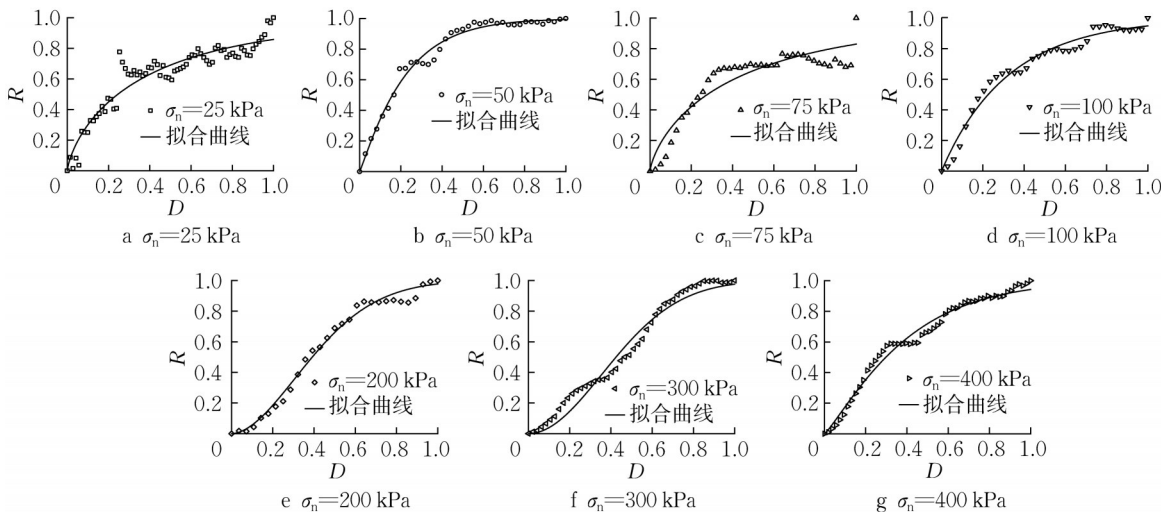


图 12 珊瑚砂与土工格栅界面 $R-D$ 关系

Fig. 12 Relationship between $R-D$ of coral sand-geogrid interface

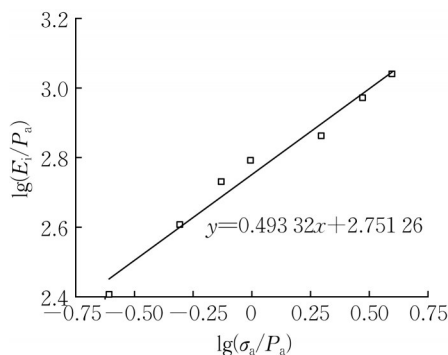


图 11 珊瑚砂与土工格栅界面 $\lg(E_i/P_a)-\lg(\sigma_n/P_a)$ 关系

Fig. 11 Relationship between $\lg(E_i/P_a)-\lg(\sigma_n/P_a)$ of coral sand-geogrid interface

$$R = \frac{\tau_p - \tau}{\tau_p - \tau_r} \quad (10)$$

$$D = \frac{\delta - \delta_p}{\delta_r - \delta_p} \quad (11)$$

式中: τ 介于峰值强度 τ_p 和残余强度 τ_r 之间; δ 介于峰值强度对应剪切位移 δ_p 和残余强度对应剪切位移 δ_r 之间,即 R 和 D 的取值范围均为 0 到 1。

根据剪切应力系数 R 和剪切位移系数 D 的定义,绘制 $R-D$ 关系曲线。可以发现二者呈非线性关系,可以采用以 e 为底的指数函数进行拟合,为

$$R = 1 - e^{-AD^B} \quad (12)$$

式中: A 、 B 为拟合函数参数,量纲为一。

拟合结果如图 12 所示,拟合函数参数如表 4 所示。由表 5 可见, $R-D$ 关系曲线的拟合结果较好、所选指数函数拟合精度较高,可以认为峰后模型合理可靠。

表 4 峰后模型参数			
Tab. 4 Parameters of post-peak model			
σ_n/kPa	参数		R^2
	A	B	
25	1.953	0.737	0.893
50	5.045	1.079	0.981
75	1.768	0.730	0.862
100	2.968	0.977	0.970
200	3.790	1.811	0.988
300	3.735	1.967	0.974
400	2.853	1.168	0.982

3.4 筋土界面本构模型验证

将模型参数代入上述峰前和峰后筋土界面本构模型,得到剪应力—剪切位移关系曲线,并与试验值进行对比,如图 13 所示。由图可见,两者吻合很好,说明本文建立的筋土界面本构模型能够反映南海原位级配珊瑚砂与土工格栅界面剪切特性。

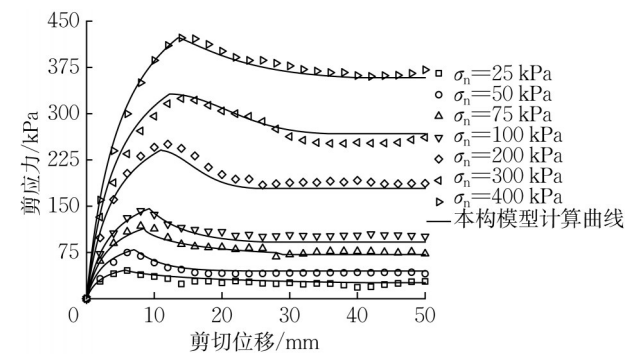


图 13 试验和本构模型计算界面特性
Fig. 13 Experimental and interface behavior calculated by constitutive model

4 结论

采用南海原位级配珊瑚砂和聚丙烯双向土工格栅,开展不同法向应力下珊瑚砂和筋土界面大型直剪试验,研究剪应力—剪切位移关系、抗剪强度特性、垂向位移—剪切位移关系和颗粒破碎特征,提出了可以描述南海原位级配珊瑚砂与聚丙烯双向土工格栅界面剪切特性的本构模型,得到以下主要结论:

(1)珊瑚砂和筋土界面剪应力—剪切位移曲线呈现明显的应变软化特征。珊瑚砂直剪试验曲线峰后残余阶段因剪切带颗粒破碎和旋转导致颗粒接触再次增强;筋土界面直剪试验因土工格栅限制了珊瑚砂颗粒旋转和位置调整,峰后残余阶段曲线平缓。

(2)珊瑚砂和筋土界面峰值抗剪强度线均呈现双折线形态,双折线分界点对应的法向应力为 100 kPa,超过 100 kPa 后强度线斜率变小,珊瑚砂及

筋土界面似黏聚力增大而内摩擦角变小,残余抗剪强度线整体上呈现较好的线性关系。

(3)由于南海原位级配珊瑚砂颗粒表面粗糙、形状不规则,各级法向应力下珊瑚砂与土工格栅界面摩擦比均值达到 1.37 左右,远高于石英砂与土工格栅界面摩擦比,表明在南海原位级配珊瑚砂中加筋能充分发挥加筋效果。

(4)珊瑚砂和筋土界面剪切过程中,试样总体上都经历了相对剪缩—相对剪胀—相对剪缩的变形过程;筋土界面直剪试验试样相对剪胀得到增强,相对剪缩显著减弱。对珊瑚砂加筋可显著减小剪缩变形。

(5)珊瑚砂和筋土界面直剪试验试样的相对破碎率很接近,相对破碎率均随法向应力的增大而增大、但增幅逐渐趋缓。

(6)采用邓肯—张模型和剪切软化模型分别描述南海原位级配珊瑚砂与聚丙烯双向土工格栅界面峰前和峰后剪应力—剪切位移曲线,所建立的筋土界面本构模型能够很好地反映其剪切特性。

作者贡献声明:

陈建峰:研究概念生成,研究资金获取,研究课题监管与指导,论文审阅与修订。

刘哲宁:资料查询,试验研究,数据整理与分析,论文初稿撰写。

向 焯:试验研究。

马 超:试验研究。

高俊丽:试验指导,论文审阅。

参考文献:

- [1] 刘崇权,杨志强,汪稔. 钙质土力学性质研究现状与进展[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 74.
LIU Chongquan, YANG Zhiqiang, WANG Ren. Research status and development of mechanical properties of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(4): 74.
- [2] FARIA N V, FERNANDES D D P. Geotechnical characterization of calcareous sands in the northeastern coast of Venezuela [C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials. Buenos Aires:IOS Press, 2015: 1153-1160.
- [3] CHEN J F, AKOSAH S, MA C, GIDIGASU S. Large-scale triaxial tests of reinforced coral sand with different grain size distributions [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2023, 30(6): 561.
- [4] 余克服,张光学,汪稔. 南海珊瑚礁:从全球变化到油气勘探—第三届地球系统科学大会专题评述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1287.

- YU Kefu, ZHANG Guangxue, WANG Ren. Studies on the coral reefs of the South China Sea: From global change to oil-gas exploration—Thematic Review of the Third Earth System Science Conference[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(11): 1287.
- [5] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 钙质砂室内载荷试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 147.
- WANG Xinzhi, WANG Ren, MENG Qinsan, *et al.* Study of plate load test of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 147.
- [6] 孟庆山, 秦月, 汪稔. 珊瑚礁钙质沉积物液化特性及其机理研究[J]. *土工基础*, 2012, 26(1): 21.
- MENG Qinsan, Qin Yue, WANG Ren. Liquefaction characteristics and mechanism of coral reef sediments[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2012, 26(1): 21.
- [7] 汪稔, 吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究—从事珊瑚礁研究30年[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(1): 202.
- WANG Ren, WU Wenjuan. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs - Engaged in coral reef research for 30 years [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1): 202.
- [8] CHEN J F, GUO X P, SUN R, *et al.* Physical and numerical modelling of strip footing on geogrid reinforced transparent sand [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(2): 399.
- [9] 张琬, 许强, 陈建峰, 等. 加筋土边坡筋材拉力分布与分区[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(6): 28.
- ZHANG Wan, XU Qiang, CHEN Jianfeng, *et al.* Distribution and zoning of reinforcement loads for reinforced soil slopes[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(6): 28.
- [10] ANUBHAV, BASUDHAR P K. Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28(4): 403.
- [11] 徐超, 孟凡祥. 剪切速率和材料特性对筋—土界面抗剪强度的影响[J]. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3101.
- XU Chao, MENG Fanxiang. Effects of shear rate and material properties on shear strength of geosynthetic—soil interface[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3101.
- [12] SWETA K, HUSSAINI S K K. Effect of shearing rate on the behavior of geogrid-reinforced railroad ballast under direct shear conditions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46(3): 251.
- [13] Infante D J U, Martinez G M A, Arrua P A, *et al.* Shear Strength Behavior of Different Geosynthetic Reinforced Soil Structure from Direct Shear Test [J]. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2016, 2(2): 1.
- [14] Namjoo A M, Jafari K, Toufigh V. Effect of particle size of sand and surface properties of reinforcement on sand-geosynthetics and sand-carbon fiber polymer interface shear behavior[J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 24: 100403.
- [15] 王协群, 张俊峰, 邹维列, 等. 格栅—土界面抗剪强度模型及其影响因素[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(4): 133.
- WANG Xiequn, ZHANG Junfeng, ZOU Weilie, *et al.* A shear strength model of geogrid—soil interface and its influence factors[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(4): 133.
- [16] XU C, LIANG C, SHEN P P, *et al.* Experimental and numerical studies on the reinforcing mechanisms of geosynthetic-reinforced granular soil under a plane strain condition[J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(2): 466.
- [17] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001(2009年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for geotechnical investigation: GB 50021—2001 (2009 Version) [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018.
- [18] WANG X Z, WANG X, JIN Z C, *et al.* Shear characteristics of calcareous gravelly soil[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76: 561.
- [19] WANG X Z, WANG X, JIN Z C, *et al.* Investigation of engineering characteristics of calcareous soils from fringing reef [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 134: 77.
- [20] 金宏旭. 砂土静动力特性及其关联性的单剪试验研究[D]. 温州: 温州大学, 2020.
- JIN Hongxu. Simple shear experimental study on monotonic cyclic behavior and correlations of sands [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2020.
- [21] 中华人民共和国交通部. 公路工程土工合成材料试验规程: JTG E50—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- Ministry of Communications of the People's Republic of China. Test Methods of Geosynthetics for Highway Engineering: JTG E50—2006 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2006.
- [22] 杨广庆, 徐超, 张孟喜, 等. 土工合成材料加筋土结构应用技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- YANG Guangqing, XU Chao, ZHANG Mengxi, *et al.* Technical guide for application of geosynthetics reinforced earth structures[M]. Beijing: People's Communications Press, 2016.
- [23] HARDIN B O. Crushing of soil particles [J]. *Journal of Geotechnical Engineering-Asce*, 1985, 111(10): 1177.
- [24] KONDNER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils [J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, 1963, 89(1): 289.
- [25] JANBU N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests [C]// *Proceedings of the 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Wiesbaden: [S.n.], 1963: 19-25.
- [26] ESTERHUIZEN J J B, FLIZ G M, DUNCAN J M. Constitutive behavior of geosynthetic interface [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(10): 834.