

考虑法向刚度影响的钙质砂-钢界面剪切试验研究

方敏慧¹, 李雨杰², 沈侃敏³, 王宽君³, 国振^{1*}

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021;

3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 海洋环境中沉积的钙质砂与常规陆源砂的物理力学性质差异显著。本文基于自主研发的多功能界面剪切设备, 开展了一系列砂-钢界面剪切试验, 着重分析了法向刚度、砂土类型对砂-钢界面单向剪切行为的影响, 并进行了不同法向刚度下的钙质砂-钢界面循环剪切试验。试验结果表明, 界面表观黏聚力 c 、摩擦角 δ 随法向刚度 K 的增加分别表现出增加、减小的趋势; 与石英砂相比, 钙质砂形状更加不规则, 颗粒咬合效应明显, 钙质砂-钢界面摩擦角、表观黏聚力均高于石英砂-钢界面; 石英砂-钢界面表现出明显的剪缩, 而钙质砂-钢界面多表现为剪胀。法向刚度 K 主要通过影响竖向应力进而影响钙质砂-钢界面剪切行为。法向刚度越大, 法向应力随循环次数衰减越快, 界面强度弱化越显著。本研究厘清了法向刚度对钙质砂-钢界面剪切特性的影响机制, 可为南海岛礁地层基础设计提供必要的参考。

关键词: 钙质砂; 法向刚度; 颗粒形状; 循环弱化; 界面摩擦角; 界面黏聚力

中图分类号: TU462

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)01-0017-08

Experimental study on calcareous sand-steel interface shearing considering the effects of the normal stiffness

FANG Min-hui¹, LI Yu-jie², SHEN Kan-min³, WANG Kuan-jun³, GUO Zhen^{1*}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China;

3. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang, China)

Abstract: The physical and mechanical properties of calcareous sand deposited in marine environment are significantly different from those of conventional terrestrial sand. Based on the self-developed multi-functional interface shear equipment, a series of sand-steel interface shear tests were carried out in this paper. The effects of normal stiffness and sand type on the unidirectional shear behavior of sand-steel interface, and the cyclic shear tests of calcareous sand-steel interface under different normal stiffness were investigated. The results show that the interface apparent cohesion c increases with the increase of normal stiffness K , while the friction angle δ decreases with the increase of the normal stiffness K . Compared with quartz sand, the shape of calcareous sand is more irregular, thus the occlusal effect of particles is obvious. The friction angle and apparent cohesion of calcareous sand-steel interface are higher than those of quartz sand-steel interface. The interface between quartz sand and steel shows the obvious shrinkage, while the interface between calcareous sand and steel shows the dilation. The normal stiffness K affects the shear behavior of calcareous sand-steel interface by affecting the vertical stress. The greater the normal stiffness, the faster the normal stress decays with the number of cycles, and the more significant the interface strength weakens. Moreover, this paper clarifies the influence mechanism of normal stiffness on the shear characteristics of calcareous sand-steel interface, which can provide necessary reference for the foundation design of islands and reefs in South China Sea.

Key words: calcareous sand; normal stiffness; particle shape; cyclic degeneration; interface friction angle; interface cohesion

收稿日期: 2021-9-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52101334, 52108356); 浙江省自然科学基金项目(LHZ19E090003)。

作者简介: 方敏慧(1999—), 女, 硕士, 主要从事地基稳定性、微生物加固方面的研究工作。E-mail: 22112248@zju.edu.cn。

*通信作者: 国振(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: nehzoug@163.com。

0 引言

钙质砂在低纬度海域分布较为广泛,在我国主要分布在南海岛礁环境中。由于其特殊的生物成因,钙质砂具有多孔隙、高棱角、形状不规则、弱胶结、低硬度等性质^[1-3],导致钙质砂和常规陆源砂的物理力学性质差异显著。钙质砂地层不良的力学特性也带来一些工程问题。20世纪60年代,伊朗波斯湾桩基施工时出现了钙质砂地层中大直径管桩的溜桩问题。在澳大利亚 North Rankin 平台的桩基施工时,打入桩(120 m)的平均桩侧摩阻力只有 10~40 kPa^[4]。虽然钙质砂比石英砂具有更高的界面摩擦角,但其发挥的桩侧摩阻力却很低,尤其是对于锤击贯入施工。这主要是由打桩过程中钙质砂颗粒的大量破碎和胶结结构损坏引起的。颗粒破碎导致桩侧的土体体缩,围压减小,胶结结构破坏引起应变软化,二者对桩土界面位置摩阻力的弱化远超打桩带来的挤密效应。

JARDINE 等^[5]、CARNEIRO 等^[6]指出桩土界面剪切行为可以通过等刚度剪切试验来模拟,如图1所示,图中 G 为对应深度土层的剪切模量, D 为桩径。采用等刚度法向边界比常应力法向边界更加合适。在剪切过程中,由于砂土具有显著的剪胀特性,剪切区厚度会逐渐变化,导致法向应力进行相应的调整。当剪缩时,法向应力减小,发挥出的抗剪强度也会较低;当剪胀时,法向应力增加,发挥出的抗剪强度则较高。而法向刚度 K 则与桩径和该位置处土体的剪切模量相关。芮圣洁等^[7]利用大型环剪仪,研究了钙质砂-钢界面循环剪切下剪切刚度与阻尼比的演化过程。夏玉云等^[8]利用室内试验、标准贯入试验、现场载荷试验和动力触探试验研究了不同振动碾压遍数下吹填珊瑚砂地基的工程特性。刘俊伟等^[9]、MORTARA 等^[10]利用多功能界面剪切仪(等刚度法向边界),研究了砂土界面单向以及循环剪切行为。界面的法向刚度是决定界面剪切行为至关重要的参数。LEHANE 等^[11]提出等刚度剪切试验中法向应力和法向位移之间的关系式:

$$K = -\Delta\sigma_n / \Delta\mu_n \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma_n$ 为法向应力增量, kPa; $\Delta\mu_n$ 为法向位移增量, mm。

目前尚缺少关于法向刚度对钙质砂-钢界面单向、循环剪切行为的试验研究。由于缺少相应的

颗粒形状量化方法,关于钙质砂、石英砂的形状特性对界面剪切行为的影响也不清晰。鉴于此,本文针对南海岛礁钙质砂,开展了不同法向刚度下钙质砂-钢界面单向、循环剪切试验研究,利用 QICPIC(动态粒度粒形分析仪)设备量化颗粒形状,并与石英砂-钢界面剪切行为进行对比分析。试验结果可为南海岛礁地层基础设计提供必要的参考。

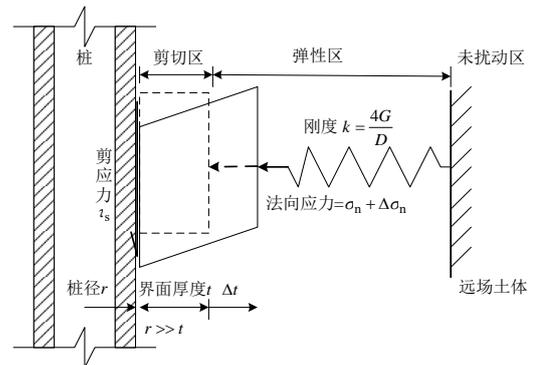


图1 等刚度界面剪切示意图

Fig. 1 Schematic diagram of constant stiffness interface shearing

1 试验概述

1.1 试验材料

本文试验用钙质砂取自南海岛礁某泻湖,其颗粒比重为 2.81。级配曲线如图2所示,中值粒径 $d_{50}=0.4$ mm,不均匀系数 $C_u=d_{60}/d_{10}=3.54$,曲率系数 $C_c=(d_{30})^2/(d_{10}\times d_{60})=1.317$ 。试验中,采用相同级配的福建标准石英砂进行对比,其颗粒比重为 2.65。

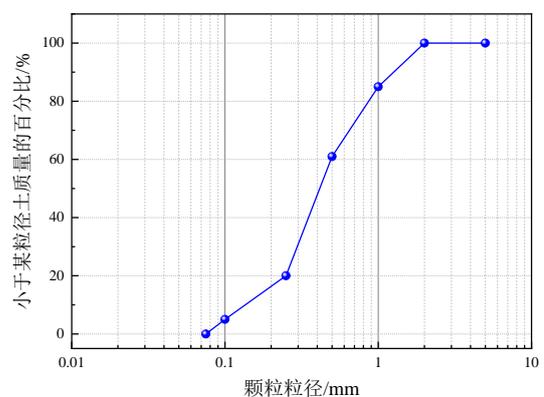


图2 级配曲线

Fig. 2 Distribution curve of particle size

1.2 试验装置

本文试验基于多功能界面剪切设备^[12],通过切向和法向两套高精度伺服系统来调控界面上的

法向刚度。常应力、常体积状态分别对应法向刚度为 0 和无穷大的情况。常应力状态下, 维持法向应力恒定, 剪切时法向位移不断调整; 常体积状态下, 控制法向位移恒定, 法向应力不断调整。在试验之前, 首先对仪器刚度进行校核, 见图 3, 校核结果表明仪器满足试验要求。

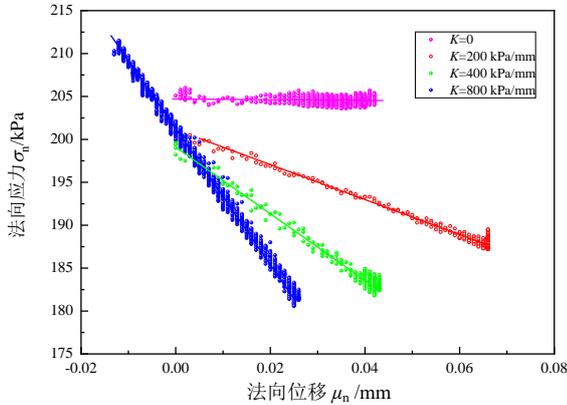


图 3 等刚度界面剪切仪器校核

Fig. 3 Verification of constant stiffness interface shearing instrument

此外, 本文还采用 QICPIC (动态粒度粒形分析仪) 设备刻画钙质砂与石英砂颗粒的形状特征^[13-14]。QICPIC 测试基于光学成像原理, 设备如图 4 所示, 主要包括脉冲光源、扩束装置、分散装置、成像镜及相机部分。测量时, 从高频脉冲光源发出的脉冲光, 经过光束扩束器, 得到平行的脉冲光, 在测试区域内脉冲光照射在分散好的单个颗粒上, 经过特殊的光学成像系统, 得到每个颗粒与投影方向正交方位的清晰图像。检测得到的大量图像数据经电脑处理后, 可给出单颗粒特写图像, 或经统计的全部样品的粒形特征信息和粒度分布结果。选择 50 g 有代表性的砂样, 与水均匀混合, 然后快速倒入分散装置, 形成颗粒流, 通过相机捕捉其二维投影形状并进行统计量化。

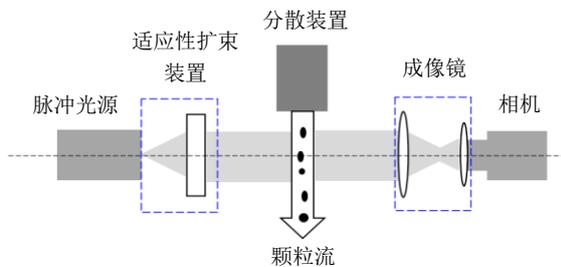


图 4 QICPIC 设备

Fig. 4 QICPIC equipment

1.3 试验步骤

在试验前, 采用无气水洗砂去除颗粒表面盐

分, 之后放入 110 °C 烘箱烘干 24 h 进行试验。本试验采用落雨法装样, 试样直径 61.8 mm, 高度 30 mm, 相对密实度控制在 70%左右。分 3 层装样, 每层 10 mm, 装样完成后, 用毛刷对顶部砂表面轻轻抚平, 避免砂面凹凸产生的应力分布不均匀现象。试验所用钢界面为 45 号钢, 钢界面尺寸为 70 mm×80 mm, 界面粗糙度 R_a 在 $3.25 \pm 0.05 \mu\text{m}$ 内, 接近常规的海洋管桩外侧的表面粗糙度^[15]。试验加载方式见表 1, 单向剪切控制剪切速率为 1 mm/min, 剪切位移终值为 5 mm。循环剪切位移幅值为 1 mm, 剪切速率为 1 mm/min。

表 1 试验加载方式

Table 1 Test scheme

砂土类型	剪切类型	$K/(\text{kPa}/\text{mm})$	$R_a=3.25 \mu\text{m}$
			σ_{n0}/kPa
钙质砂	单向	0/200/400/800	100/200/400/800
石英砂	单向	0/200/400/800	100/200/400/800
钙质砂	循环	0/200/400/800	200

2 结果与分析

2.1 单向剪切

图 5 (a~d) 给出了不同法向刚度下钙质砂、石英砂-钢界面剪应力-剪位移之间的关系。其中, C 代表钙质砂, Q 代表石英砂。可以发现, 随着剪位移的增加, 剪应力首先迅速增加然后趋于稳定, 剪应力-剪位移具有较好的指数关系, 法向刚度对剪应力-剪位移曲线形式影响不大。法向应力越高, 界面则发挥出越高的抗剪强度, 钙质砂-钢界面发挥的抗剪强度高于石英砂-钢界面。当法向应力为 400 kPa、法向刚度为 0 时, 钙质砂、石英砂-钢界面在 5 mm 剪切位移下发挥的界面抗剪强度分别为 262.6 kPa 和 202.4 kPa, 钙质砂-钢界面表现出较弱的硬化趋势, 而石英砂-钢界面表现出较弱的软化趋势; 当法向应力为 400 kPa、法向刚度为 800 kPa/mm 时, 钙质砂、石英砂-钢界面在 5 mm 剪切位移下发挥的界面抗剪强度分别为 233.6 kPa 和 164.2 kPa, 钙质砂-钢界面依旧表现出硬化趋势, 而石英砂-钢界面表现出明显的软化趋势。

图 6 (a~d) 给出了不同法向刚度下法向位移-剪位移之间的关系。可以看出, 界面剪胀性与砂土类型、法向应力、法向刚度具有明显相关性。钙质砂-钢界面剪胀性明显高于石英砂-钢界面,

法向力、法向刚度均会抑制界面剪胀性，负的法向位移代表剪胀。当法向力为 100 kPa 时，0、200、400、800 kPa/mm 法向刚度下钙质砂-钢界面在 5 mm 位移处对应的剪胀量分别为-0.117 mm、-0.077 mm、-0.009 mm 和-0.022 mm；而石英砂-钢界面在 5 mm 位移处对应的剪缩量分别为 0.074 mm、

0.015 mm、0.029 mm 和 0.033 mm。界面胀缩具有明显的法向应力相关性，在较低法向应力的情况下，钙质砂-钢界面先剪缩后剪胀，在较高法向应力的情况下剪胀特性则被抑制。在相同法向应力的情况下，在 5 mm 位移处，钙质砂-钢界面剪胀性一般比石英砂-钢界面明显。

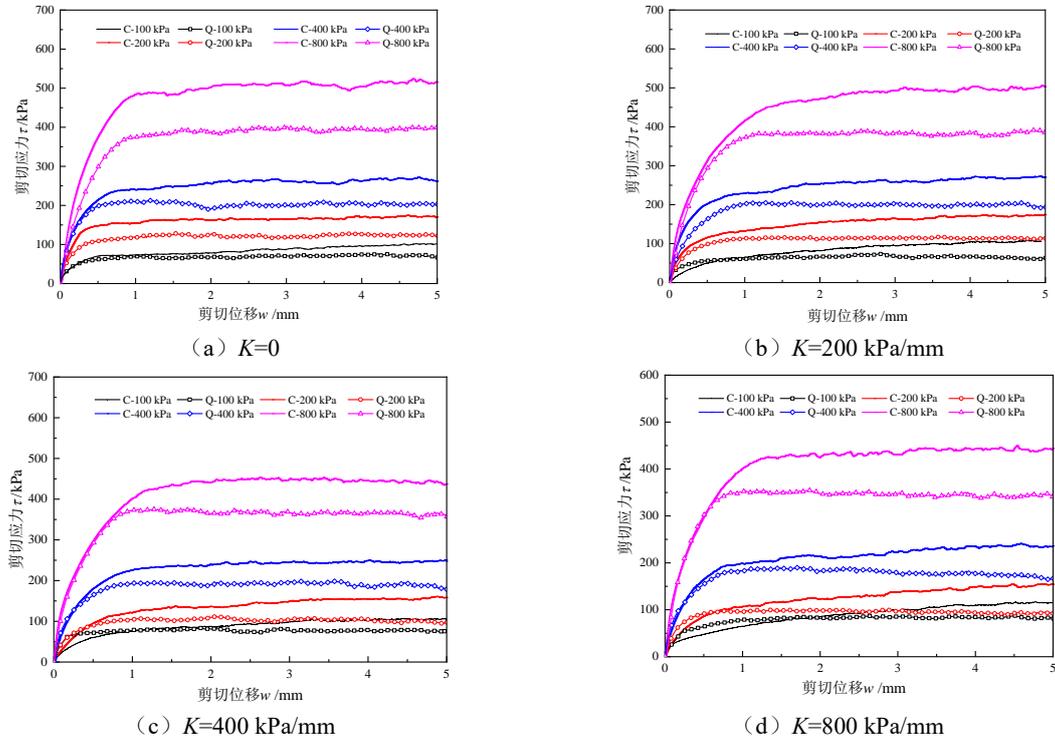


图 5 剪应力-剪位移关系

Fig. 5 Relationship between the shear stress and shear displacement

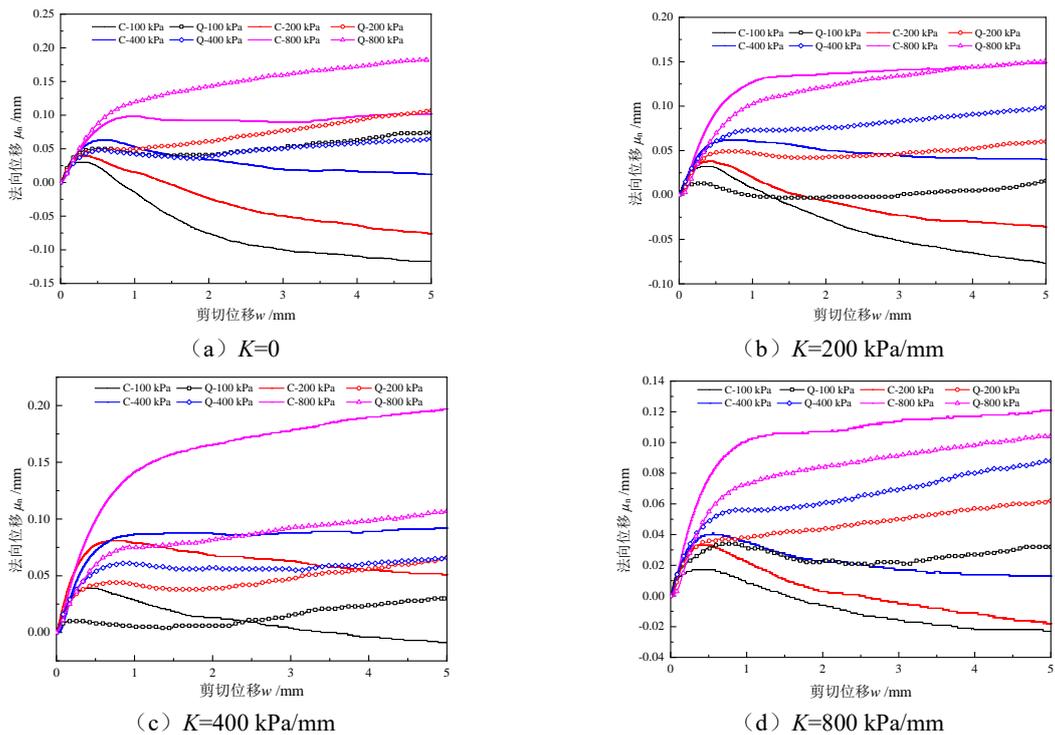


图 6 法向位移-剪位移关系

Fig. 6 Relationship between the normal displacement and shear displacement

图 7 给出了不同刚度下峰值抗剪强度 (τ_{max}) - 法向应力 (σ_n) 对应的关系。可以发现, 等刚度法向边界下峰值抗剪强度和法向应力仍可以用库伦-摩尔准则拟合。图 8 给出了不同法向刚度下钙质砂 (石英砂)-钢界面摩擦角 δ 和表观黏聚力 c 。法向刚度对界面抗剪强度指标影响显著, 随着法向刚度的增加, 界面摩擦角表现出减小的趋势, 钙质砂-钢界面的黏聚力表现出增加的趋势, 石英砂-钢界面黏聚力则先略微减小再增加, 但总体而言, 仍表现出增加的趋势。对于钙质砂而言, 当法向刚度从 0 增加至 800 kPa/mm 时, 其界面摩擦角 δ 由 31.4°减小至 27.5°, 而界面黏聚力 c 则由 28.5 kPa 增加为 56.9 kPa。钙质砂与常规无黏性土不同, 常规无黏性土的黏聚力一般认为为 0, 而钙质砂由于颗粒形状不规则, 会存在颗粒咬合效应。因此, 抗剪强度指标包括表观黏聚力和摩擦角^[16]。另外, 钙质砂-钢界面的表观黏聚力和摩擦角一般高于石英砂-钢界面。

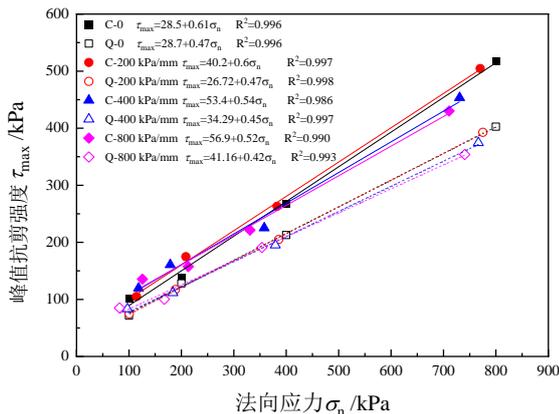


图 7 法向应力-峰值抗剪强度

Fig. 7 Relationship between the normal stress and peak shear strength

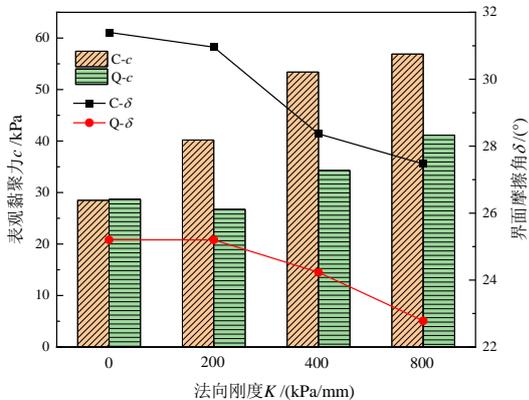


图 8 界面摩擦角与表观黏聚力

Fig. 8 Friction angle and apparent cohesion of interface

2.2 颗粒形状分析

由上一节可知, 钙质砂-钢界面抗剪强度指标

高于石英砂-钢界面, 这主要归因于砂颗粒形状。本文利用 QICPIC 对钙质砂、石英砂颗粒形状进行了量化。采用球度 S 、凸度 C 、长宽比 AR 这 3 个参数对颗粒形状进行评估, 如图 9 所示。球度 S 定义为等面积圆周长与颗粒周长之比, 凸度 C 定义为颗粒面积与将颗粒凹入部分填充后形成的凸多边形面积之比, 长宽比 AR 定义为最小外接平行线距离与最大外接平行线距离之比。3 个参数的范围均为 0~1, 参数越大, 表明颗粒形状越规则, 越接近圆形。

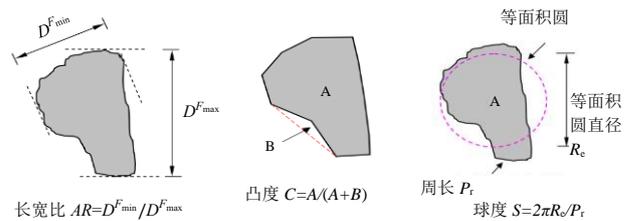


图 9 形状参数定义

Fig. 9 Definition of shape parameters

图 10 给出了 QICPIC 仪器捕捉的钙质砂与石英砂的颗粒形状二值图, 二值图指砂颗粒在某一个位置下的形状投影。直观看来, 钙质砂形状比石英砂更加不规则, 石英砂颗粒更接近于圆形。



图 10 砂颗粒二值图

Fig. 10 Binary image of sand particles

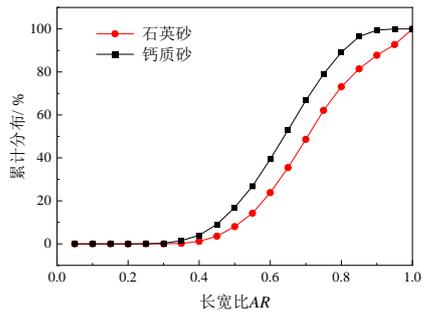
图 11 (a~c) 给出了石英砂与钙质砂的 3 个形状参数的累计分布曲线, 可以看出钙质砂的长宽比 AR 、球度 S 、凸度 C 的累计分布曲线均位于石英砂左侧。YANG 等^[14]采用 AR_{50} 、 C_{50} 、 S_{50} 的加权平均值去量化颗粒形状, 本试验中钙质砂、石英砂所对应的形状参数平均值分别为 0.78、0.83, 这表明钙质砂形状比石英砂更加不规则。

颗粒形状致使砂-钢界面表现出不同的剪切行为, 由于钙质砂颗粒形状不规则, 棱角突出, 与界面的咬合程度要高于形状规则, 表面光滑的石英砂, 因而, 钙质砂-钢界面的抗剪强度指标均高于石英砂-钢界面。

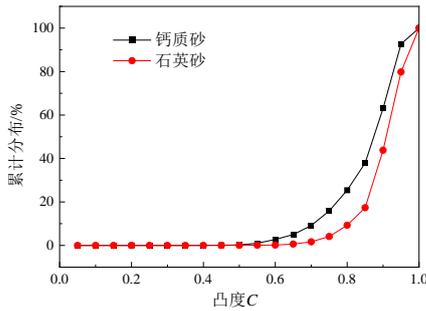
2.3 循环剪切

在风暴潮等荷载循环作用下, 海洋基础底部钙质砂可能出现显著的颗粒破碎现象, 界面抗力逐渐退化, 从而弱化基础的承载性能。因此, 本文开展了不同法向刚度下钙质砂-钢界面循环剪切

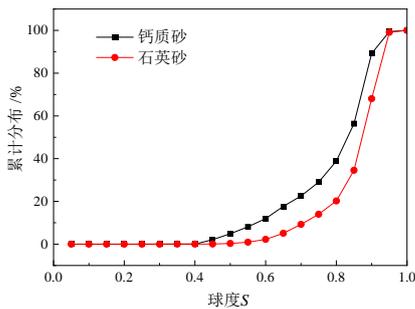
试验。



(a) 长宽比累计分布



(b) 凸度累计分布



(c) 球度累计分布

图 11 颗粒形状参数累计分布

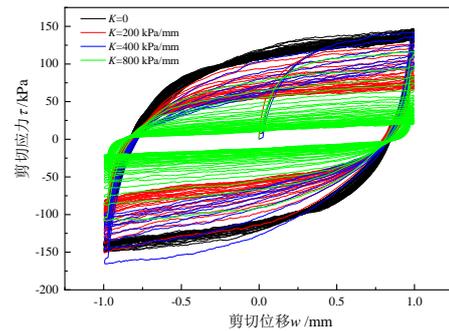
Fig. 11 Cumulative distribution of particle shape parameters

图 12 (a~c) 给出了初始法向应力为 200 kPa 下的循环界面剪切剪应力-剪位移、剪位移-法向位移、应力路径的关系。从图 12 (a) 可知， $K=800 \text{ kPa/mm}$ 时，当循环次数从 $N=1$ 增加到 $N=20$ ，峰值抗剪强度从 116.7 kPa 降低至 34.6 kPa。抗剪强度衰减主要发生在前 10 个循环内，往后衰减速率显著降低，但还未稳定，仍以一定速率衰减。当循环次数为 1 时，剪应力-剪位移滞回圈面积最大，耗散能量多；随着循环次数的增加，滞回圈的面积不断减小，耗散能量逐渐减小。

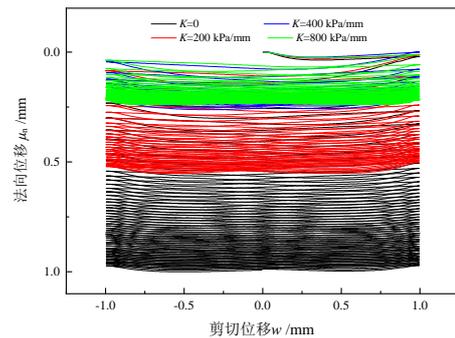
从图 12 (b) 可以看出，单次循环内界面表现出剪缩-剪胀-剪缩交替出现的情况，整体表现出剪缩的规律。因此，等刚度情况下，单次循环内的法向力也呈现出减小-增加-减小的规律。随着循环次数的增加，单次循环内的界面土体减

缩程度逐渐减小并且趋于稳定。 $K=0$ 的情况下，竖向总体压缩量越大， $K=800 \text{ kPa/mm}$ 的情况下，竖向总体压缩量最小，表明较大法向刚度界面对竖向位移的适应性更好，可保证不出现较大的竖向位移。

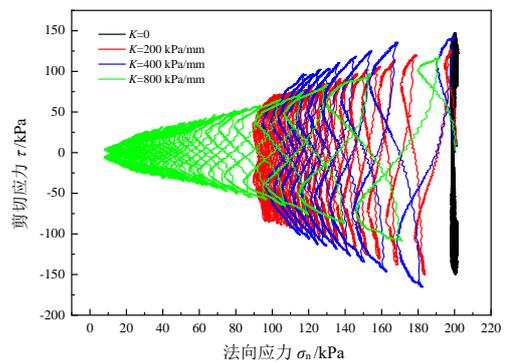
图 12 (c) 给出了不同法向刚度下应力路径的曲线。可以发现，在 $K=0$ 的情况下，循环弱化效应并不显著。当 $K=800 \text{ kPa/mm}$ 的情况下，则表现出明显的循环弱化效应。法向刚度越大，“蝴蝶状”应力路径越明显。



(a) 剪切位移-剪切应力



(b) 剪切位移-法向位移



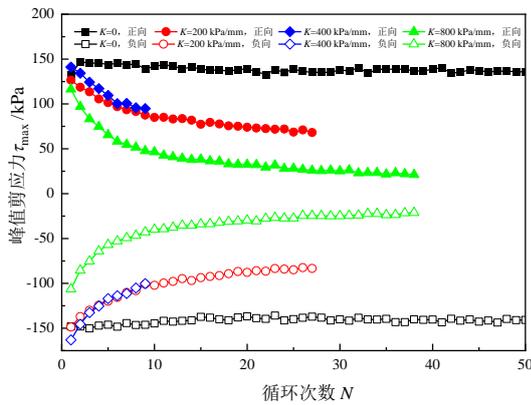
(c) 应力路径

图 12 界面循环剪切

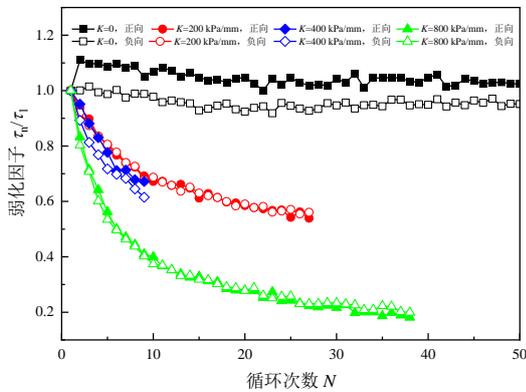
Fig. 12 Results of interfacial cyclic shear test

图 13 (a~b) 给出了不同刚度下峰值抗剪强度、弱化因子随循环次数之间的关系。弱化因子定义为第 N 次循环剪切下的峰值剪应力与第一次剪切的峰值剪应力之比。一般而言，在较高法向刚度情

况下, 峰值剪应力 τ_{max} 衰减越快, 衰减幅度越大。当循环次数为 9 次时, 0、200、400、800 kPa/mm 的法向刚度下正向峰值剪应力分别为 139.1 kPa、87.5 kPa、94.8 kPa、47.7 kPa。大致规律是法向刚度下, 弱化因子衰减速率越快, 衰减程度越大。循环剪切 9 次后, 0、200、400、800 kPa/mm 的法向刚度下正向剪切弱化因子分别为 1.049, 0.692, 0.672, 0.409。法向刚度为 0 时, 峰值抗剪强度保持恒定, 弱化因子也维持在 1 左右。这主要是由于法向刚度越大, 相同法向位移情况下, 法向应力衰减程度较大, 进而导致峰值抗剪强度弱化。



(a) 峰值剪应力-循环次数



(b) 弱化因子-循环次数

图 13 界面抗剪强度衰减特征

Fig. 13 Attenuation characteristics of interface shear strength

3 结论与展望

本文利用多功能界面剪切设备, 开展了不同法向刚度下钙质砂、石英砂-钢界面剪切试验。主要得出以下结论:

- (1) 界面表观黏聚力 c 、摩擦角 δ 随着法向刚度的增加分别表现出增加、减小的趋势。
- (2) 钙质砂较石英砂具有更加不规则的形状, 存在颗粒咬合效应。钙质砂-钢界面的表观黏

聚力和摩擦角均高于石英砂-钢界面。钙质砂-钢界面剪胀特点比石英砂-钢界面更明显。

(3) 法向刚度主要通过影响竖向应力进而影响钙质砂-钢界面剪切行为。法向刚度越大, 法向应力随循环次数衰减越快, 减小幅度越大, 进而导致界面发挥出较小的抗剪强度。

本文研究厘清了法向刚度对钙质砂-钢界面剪切特性的影响机制, 可为南海岛礁地层基础设计提供必要的参考。

参考文献

[1] SALEM M, ELMAMLOUK H, AGAIBY S. Static and cyclic behavior of north coast carbonate sand in Egypt[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 55(12): 83-91.

[2] 汪轶群, 洪义, 国振, 等. 南海钙质砂宏观细观破碎力学特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 199-206.
WANG Yi-qun, HONG Yi, GUO Zhen, et al. Macro-and meso-mechanical properties of calcareous sand in South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 199-206.

[3] 任玉宾, 王胤, 杨庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 491-497.
REN Yu-bin, WANG Yin, YANG Qing. Effect of particle size distribution and shape on permeability of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 491-497.

[4] 张静学. 注浆加固在填土地基中适用性和要点的探讨[J]. 地基处理, 2020, 2(5): 424-428.
ZHANG Jing-xue. Discussion on applicability and key points of grouting reinforcement in filled soil foundation [J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(5): 424-428.

[5] JARDINE R J, CHOW F C, MATSUMOTO T, et al. A new design procedure for driven piles and its application to two Japanese clays[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils & Foundation, 2008, 38(1): 207-219.

[6] CARNEIRO D, WHITE D J, DANZIGER F A B, et al. A novel approach for time-dependent axial soil resistance in the analysis of subsea pipelines[J]. Computers & Geotechnics, 2015, 69(10): 641-651.

[7] 芮圣洁, 国振, 王立忠, 等. 钙质砂与钢界面循环剪切刚度与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 78-86.
RUI Sheng-jie, GUO Zhen, WANG Li-zhong, et al. Experimental study on cyclic shear stiffness and damping ratio at the interface between calcareous sand and steel[J].

- Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 78-86.
- [8] 夏玉云, 乔建伟, 刘争宏, 等. 振动碾压对吹填珊瑚砂地基工程特性影响的试验研究[J]. 地基处理, 2020, 31(4): 277-284.
- XIA Yu-yun, QIAO Jian-wei, LIU Zheng-hong, et al. Experimental study on effect of vibration rolling on engineering characteristics of coral sand foundation[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 31(4): 277-284.
- [9] 刘俊伟, 张忠苗, 俞峰, 等. 基于恒刚度剪切试验的预制桩侧阻退化估计[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 725-729.
- LIU Jun-wei, ZHANG Zhong-miao, YU Feng, et al. Estimation of lateral resistance degradation of prefabricated piles based on constant stiffness shear test[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 725-729.
- [10] MORTARA G, MANGIOLA A, Ghionna V N. Cyclic shear stress degradation and post-cyclic behavior from sand-steel interface direct shear tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(7): 739-752.
- [11] LEHANE B M, WHITE D J. Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(4): 1039-1052.
- [12] LI Y J, GUO Z, WANG L Z. Interface shear behavior between MICP-treated calcareous sand and steel[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(2): 04020455.
- [13] RUI S J, GUO Z, SI T L. Effects of particle shape on the liquefaction resistance of calcareous sand[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2020, 137: 106302.
- [14] YANG J, LUO X D. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 84: 196-213.
- [15] LI Y J, GUO Z, WANG L Z. Shear resistance of MICP cementing material at the interface between calcareous sand and steel[J]. Materials letters, 2020, 274: 128009.
- [16] WANG X Z, WANG X, JIN Z C. Shear characteristics of calcareous gravelly soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2017(76): 561-573.

【简讯】

关于举办优秀论文评选的通知

为提高《地基处理》期刊的学术水平和论文质量,鼓励和培育优秀作者,本刊自2022年1月开始开展优秀论文评选活动,评选活动每两年一次,对评选出的优秀论文将给予表彰,现将首次优秀论文评选的有关事项通知如下:

一、评选范围

2022—2023年在《地基处理》期刊上刊发的论文。

二、评选程序

参考科学计量指标定量(引用量、下载量等),经专家推选,由《地基处理》编辑委员会评选优秀论文十篇。评选结果在地基处理网站上进行公示,并在2024年第十八届全国地基处理学术讨论会上颁发证书和奖金。

《地基处理》编辑部
2022年1月12日