

DOI: 10.11779/CJGE20231283

钙质砂-蛇皮仿生界面循环剪切特性研究

崔昊^{1,2}, 刘汉龙^{2,3}, 肖杨^{*2,3}

(1. 重庆大学光电工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 3. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 钙质砂与结构物界面的动力响应对海洋岩土工程中构筑物的整体稳定性具有重要意义。蛇皮仿生界面是基于蛇腹部鳞片的几何非对称性发展起来的新型界面形式, 因其在剪切时表现出的摩擦各向异性而受到研究者关注。基于界面直剪仪, 开展了一系列钙质砂-蛇皮仿生界面循环剪切试验, 探究了法向应力、剪切位移幅值以及界面表观形态对界面循环剪切刚度、阻尼比的影响。试验结果表明: 法向应力增加导致界面剪切刚度增加, 阻尼比降低; 剪切刚度随剪切位移增加而降低, 阻尼比则增加; 鳞片几何特征比增加会使剪切刚度降低, 阻尼比增加。此外, 相同鳞片几何特征比下剪切刚度随鳞片高度增加而增加, 阻尼比则降低。数据拟合表明: 剪切刚度和阻尼比与法向应力分别呈线性关系和对数关系, 与剪切位移幅值分别呈反比例关系和对数关系, 与鳞片几何特征比都呈幂函数关系。研究成果将为蛇皮仿生界面在海洋抗拔桩的应用提供重要的理论基础。

关键词: 钙质砂; 蛇皮仿生界面; 循环剪切; 剪切刚度; 阻尼比

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)05-1014-11

作者简介: 崔昊(1991—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事微生物加固土及土-结构物相互作用力学特性与本构关系研究。E-mail: cqcuiaohao1@163.com。

Cyclic shearing characteristics of calcareous sand-snake skin-inspired interfaces

CUI Hao^{1,2}, LIU Hanlong^{2,3}, XIAO Yang^{2,3}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In marine geotechnical engineering, the dynamic response of the calcareous sand-structure interfaces is critical to the overall stability of structures. The snake skin-inspired interface is a new type of interface developed based on the geometric asymmetry of the ventral scales of snakes, which has attracted the attention of researchers due to the frictional anisotropy during shearing. Based on the direct shear apparatus for interface, a series of cyclic shear tests are carried out on the interfaces between calcareous sand and snake skin-inspired steel surfaces. The effects of normal stress, cyclic amplitude and apparent interface shape on the shear stiffness and damping ratio are investigated. The test results show that increasing the normal stress increases the shear stiffness of interface and decreases the damping ratio. Increasing the cyclic amplitude leads to a decrease in the shear stiffness and an increase in the damping ratio. The shear stiffness decreases with the increase in the scale geometric ratio, while the damping ratio shows the opposite trend. In addition, for the same scale geometric ratio, the shear stiffness increases with the increase in scale height, while the damping ratio decreases. The data fitting results show that the shear stiffness and damping ratio have a linear and logarithmic relationship with the normal stress, respectively. The shear stiffness and damping ratio have an inverse reduction and logarithmic relationship with the shear displacement amplitude, respectively. The power function can represent the relationship between the shear stiffness and the scale geometric ratio, as well as the relationship between the damping ratio and scale geometric ratio. The research results in this study will provide an important theoretical basis for the application of snake skin-inspired interfaces in marine uplift piles.

Key words: calcareous sand; snake skin-inspired interface; cyclic shear; shear stiffness; damping ratio

0 引言

钙质砂广泛存在于世界低纬度地区的大陆架和沿

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078085, 52378325)

收稿日期: 2023-12-28

*通信作者 (E-mail: hhuxyanson@163.com)

海地区,是由贝壳和珊瑚等海洋生物的碎片或残骸经破碎沉积产生的,其主要成分为碳酸钙^[1]。钙质砂在形成过程中保留了原生生物骨骼的微观结构,其一般具有形状不规则、内孔隙发育、单颗粒强度低和易破碎的特点^[2]。钙质砂与结构物之间的接触在海洋岩土工程建设中较常见,如海洋风机和海洋钻井平台的桩基础^[3-4]。钙质砂作为一种力学性质不良的建筑材料,其与结构物之间的相互作用对构筑物的整体稳定性和安全运营十分重要。研究表明,土与结构物之间传递荷载时,结构物附近的薄层土体处最容易发生应变局部化,产生开裂、滑移和破坏,因此土-结构物界面的力学特性值得关注^[5-6]。

针对砂-结构物界面的剪切行为,目前已用学者对诸如砂的相对密度^[7-9]、颗粒形状^[10-11]、颗粒尺寸^[12-13]、级配^[14]等因素开展研究。实际工程中,由于地震、交通和波浪荷载等对结构物的作用,砂-结构物界面常遭受循环荷载,通常需要计算界面的循环剪切刚度和阻尼比来反映其动力响应特征。已有研究表明,法向应力、剪切位移幅值、结构物材质、颗粒形状和粒径等都会对界面循环剪切刚度和阻尼比产生影响^[15-16]。

海洋平台的抗拔桩在贯入阶段需要尽可能的减小桩侧摩阻力,而在运营阶段则需要桩基提供更大的侧摩阻力以抵抗上拔力,因此需要一种能够根据使用工况调整侧摩阻力的桩基形式。近年来,蛇在运动时腹部鳞片与接触材质之间的摩擦各向异性(frictional anisotropy)逐渐受到人们的重视。Marvi等^[17]的研究表明蛇在运动过程中可通过肌肉调整腹部鳞片的张开角度来调整摩擦以保证不同的运动状态。此后,

Martinez等^[18]根据仿生学原理,将多种蛇的腹部鳞片结构抽象化为蛇皮仿生界面,并开展了界面直剪试验,结果表明蛇皮仿生界面具有明显的摩擦各向异性。之后,Stutz等^[19]的研究进一步表明砂-蛇皮仿生界面的强度和剪胀性与仿生界面的表观形态有关,并认为鳞片的几何特征比能合理反应蛇皮仿生界面的力学特征。此外,O'Hara等^[20-21]对蛇皮仿生模型桩开展的离心机试验表明桩侧摩阻力以及桩周土体扰动均与仿生桩的桩身鳞片排布方向有关。Zhong等^[22]通过离散元数值模拟方法同样证明了蛇皮仿生桩在竖向荷载作用下表现出了摩擦各向异性。上述研究的试验材料主要为石英砂,而钙质砂的力学特性显然与石英砂不同。Xiao等^[23]针对钙质砂-蛇皮仿生界面开展了静荷载直剪试验,表明除摩擦各向异性外,钙质砂-蛇皮仿生界面同样存在颗粒破碎各向异性 (particle breakage anisotropy)。

综上所述,已有研究对钙质砂-蛇皮仿生界面的力学行为的研究有限,尤其是钙质砂-蛇皮仿生界面循环荷载作用下的动力响应问题一直未有学者进行系统性研究。因此,本文针对钙质砂-蛇皮仿生界面开展了一系列循环直剪试验,研究了法向应力、剪切位移幅值和蛇皮仿生界面表观形态对剪切刚度和阻尼比的影响,为蛇皮仿生界面在海洋平台抗拔桩的应用提供一定理论参考。

1 试验介绍

1.1 试验设备

本试验采用南京泰克奥科技公司生产的液晶微控直剪仪 TKA-DDS-10,界面剪切试验系统如图1所示。

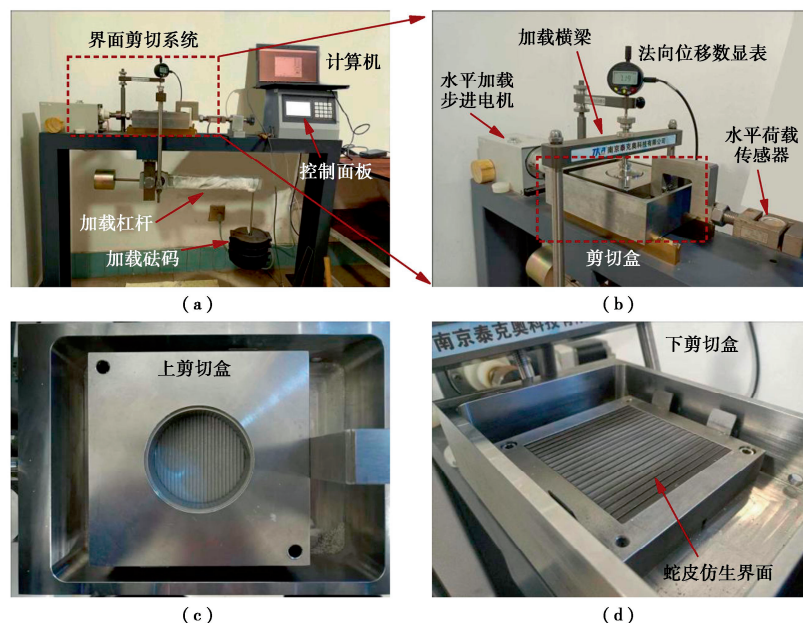


图1 界面剪切试验设备

Fig. 1 Test equipment for interface shear

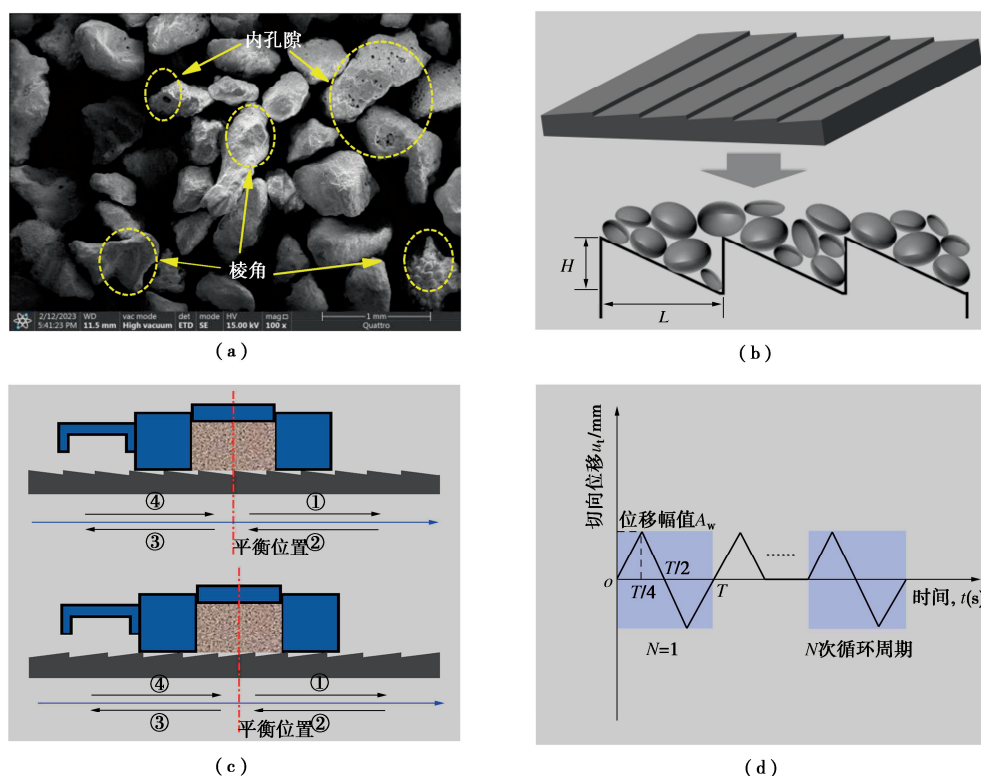


图2 试验材料与循环剪切加载路径

Fig. 2 Test materials and cyclic shear loading path

该直剪仪可通过电脑软件实现单调和循环加载并精确控制剪切速率和剪切位移, 剪切速率变化范围为 $0.001 \sim 2.4 \text{ mm/min}$ 。法向荷载通过加载砝码和杠杆施加。法向位移通过法向位移数显表显示并直接传输给电脑软件记录, 剪应力由水平荷载传感器测量, 分辨率为 1 N 。上剪切盒内部尺寸为直径 61.8 mm , 高度为 22 mm , 如图 1(c) 所示, 下剪切盒尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm}$, 如图 1(d) 所示。采用下界面配置, 即蛇皮仿生界面安装在下剪切盒中, 钙质砂试样安装在上剪切盒中, 剪切时上剪切盒保持不动, 下剪切盒带动蛇皮仿生界面在导轨上水平移动。

1.2 钙质砂与蛇皮仿生界面

本研究所用钙质砂取自中国南海某岛礁, 相对质量密度为 2.78 , 通过 X 射线衍射分析 (XRD) 可知, 该钙质砂的主要成分为碳酸钙, 含量约为 95.9% , 其余杂质主要为碳酸镁, 含量约为 4% 。试验前将钙质砂清洗以去除表面盐分并在 105° 烘箱中烘干 24 h 。通过标准筛对钙质砂进行筛分, 选取粒径范围为 $0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$ 的砂样开展试验, 砂样的最大和最小孔隙比分别为 1.196 , 0.817 。图 2(a) 为 100 倍率下扫描电子显微镜拍得的钙质砂照片, 可以发现, 钙质砂表面内孔隙发育, 同时砂颗粒棱角较多, 形状不规则。

Martinez 等^[18]的研究表明蛇皮仿生界面的鳞片结构为直角三角形时, 界面表现出更强的摩擦各向异性,

同时认为蛇腹部鳞片几何形状的非对称性带来的摩擦各向异性要比鳞片的柔性和鳞片张开角度变化更具有工程研究意义。基于上述原因, 本文试验采用的蛇皮仿生界面的鳞片结构为直角三角形, 如图 2(b) 所示。同时, 考虑到海洋工程中的桩基础一般采用钢材质, 因此本试验中的蛇皮仿生界面采用不锈钢加工而成, 其弹性模量为 194 GPa , 极限刚拉强度不小于 515 MPa , 洛氏硬度不大于 92 。蛇皮仿生钢板的尺寸为 $99.5 \text{ mm} \times 99.5 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm}$, 其尺寸略小于下剪切盒内尺寸, 以保证钢板可顺利安放在下剪切盒中。为保证循环剪切时蛇皮仿生钢板不在下剪切盒中移动, 钢板安装完后用塑料薄片填充钢板与下剪切盒内壁之间的空隙。蛇皮仿生钢板的尺寸大于上剪切盒中砂样尺寸, 可保证剪切过程中砂样与钢板之间的接触面积保持不变。从图 2(b) 可以看出, 蛇皮仿生界面的鳞片结构主要有鳞片高度 H 和鳞片长度 L 两个几何参数。为了探究蛇皮仿生界面表观几何形态对界面循环剪切动力响应的影响, 本试验选择了 6 种蛇皮仿生界面, 鳞片的高度分别为 $0.5, 1.0 \text{ mm}$, 对应的鳞片长度分别为 $2.5, 5.0, 10, 5.0, 10, 20 \text{ mm}$ 。两种鳞片高度的蛇皮仿生界面的鳞片几何特征比 L/H 分别为 $5, 10, 20$ 。

1.3 试验方案与试验流程

本文研究的钙质砂-蛇皮仿生界面循环剪切试验采用带活塞的漏斗对干燥状态的钙质砂自然落砂装

样, 试样高度为 20 mm, 试样相对密实度为 90%。装样时将所需的钙质砂按质量分为 3 等份, 采用分层装样法以保证试样的均匀性。每层装样完毕后将试样表面轻轻抚平, 垫上圆形木块, 之后用橡胶锤轻轻敲击木垫块, 将试样压实至设置的装样高度, 尽量减小压实试样过程中产生的颗粒破碎。此外, 用细铁丝在上一层的砂样表面划线, 保证两层试样之间无明显分界。

采用砝码进行竖向加载, 待固结稳定后进行界面循环剪切试验, 所施加的加载路径如图 2 (c) 所示。第一个循环自平衡位置开始, 到达设定的剪切位移幅值, 之后反向剪切, 如图 2 (c) 中的①→②→③→④, 定义①和④分别为正方向的加载和卸载阶段, ②和③分别为反方向的卸载和加载阶段。此外, 由于蛇皮仿生界面上鳞片几何结构的非对称性, 界面剪切试验分别为两种加载路径: 正向剪切为尾向剪切 (caudal shearing), 反向剪切为颅向剪切 (cranial shearing); 正向剪切为颅向剪切, 反向剪切为尾向剪切。其中, 尾向剪切的定义为砂试样顺着鳞片结构的斜边移动, 模拟了蛇在向前运动时腹部鳞片闭合的情况; 颅向剪切的定义为砂试样逆着鳞片结构的直角边移动, 模拟了蛇在攀爬状态下腹部鳞片张开的情况^[18-19]。

钙质砂-蛇皮仿生界面循环剪切过程中剪切速率保持不变, 设定为 0.8 mm/min, 图 2 (d) 为循环剪切加载的波形, 其中 T 为一个循环周期, A_w 为剪切位移幅值。表 1 为本文开展的所有循环剪切试验, 共计 24 组。其中, 试验组 T1~T8 主要分析了法向应力的影响, T9~T14 主要分析了剪切位移幅值的影响, T15~T24 主要分析了蛇皮仿生界面表观形态的影响。

2 剪切刚度与阻尼比的定义

土体剪切刚度和阻尼比常被用来分析循环荷载下土体的动力响应^[16]。剪切刚度是指剪应力与所对应的剪切位移的比值, 反映了土体抵抗剪切变形的能力。阻尼比是表征土体循环剪切过程中能量耗散快慢的参量, 通常阻尼比越大循环剪切过程中能量耗散越快。在计算剪切刚度时本文采用 Vieira 等^[24]提出的割线刚度定义:

$$K = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{u_{t,\max} - u_{t,\min}} \quad (1)$$

式中: $u_{t,\max}$ 和 $u_{t,\min}$ 分别为循环剪应力滞回圈中最大和最小剪切位移, 其绝对值一般为剪切位移幅值; τ_{\max} 和 τ_{\min} 分别为应力滞回圈中的最大和最小剪切位移幅值对应的剪应力。

表 1 界面循环剪切试验方案

Table 1 Cyclic test programs of interface

编号	表观形态	法向应力/kPa	位移幅值/mm	循环次数/次	加载路径
T1	$H0.5L5.0$	100	1.6	15	尾向→ 颅向
T2	$H0.5L5.0$	200	1.6	15	
T3	$H0.5L5.0$	400	1.6	15	
T4	$H0.5L5.0$	800	1.6	15	
T5	$H0.5L5.0$	100	1.6	15	颅向→ 尾向
T6	$H0.5L5.0$	200	1.6	15	
T7	$H0.5L5.0$	400	1.6	15	
T8	$H0.5L5.0$	800	1.6	15	
T9	$H0.5L5.0$	200	0.8	15	尾向→ 颅向
T10	$H0.5L5.0$	200	2.4	15	
T11	$H0.5L5.0$	200	3.2	15	
T12	$H0.5L5.0$	200	0.8	15	颅向→ 尾向
T13	$H0.5L5.0$	200	2.4	15	
T14	$H0.5L5.0$	200	3.2	15	
T15	$H0.5L2.5$	200	1.6	15	尾向→ 颅向
T16	$H0.5L10$	200	1.6	15	
T17	$H1.0L5.0$	200	1.6	15	
T18	$H1.0L10$	200	1.6	15	
T19	$H1.0L20$	200	1.6	15	颅向→ 尾向
T20	$H0.5L2.5$	200	1.6	15	
T21	$H0.5L10$	200	1.6	15	
T22	$H1.0L5.0$	200	1.6	15	
T23	$H1.0L10$	200	1.6	15	
T24	$H1.0L20$	200	1.6	15	

注: $H0.5L5.0$ 表示蛇皮仿生界面的表观形态为鳞片高度 $H = 0.5$ mm, $L = 5.0$ mm, 其他以此类推; 尾向→颅向表示正向剪切为尾向剪切, 反向剪切为颅向剪切的加载路径, 颅向→尾向表示正向剪切为颅向剪切, 反向剪切为尾向剪切的加载路径。

按照式 (1) 计算得到的剪切刚度即为应力滞回圈中正、负剪应力峰值连线的斜率, 如图 3 所示。阻尼比的计算方法采用 Nye 等^[25]、刘飞禹等^[15, 26]和芮圣洁等^[16]提到的计算公式:

$$D = \frac{1}{2} \left(\frac{S}{4\pi S_1} + \frac{S}{4\pi S_2} \right) \quad (2)$$

式中: S 为应力滞回圈的面积; S_1 和 S_2 分别为图 3 中左右两个三角形阴影区域的面积。

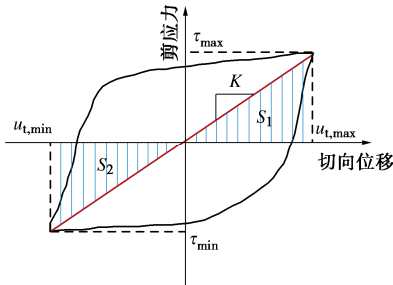


图 3 剪切刚度和阻尼比示意图

Fig.3 Schematic diagram of shear stiffness and damping ratio

3 试验结果分析

3.1 钙质砂-蛇皮仿生界面典型的强度变化

以法向应力 $\sigma_n = 200$ kPa, 蛇皮仿生界面表观形态

为 $H0.5L5.0$, 剪切位移幅值 $A_w = 1.6$ mm, 循环次数为 15 次的工况为例, 本文试验在两种加载路径下界面循环剪切的强度变化如图 4 所示。

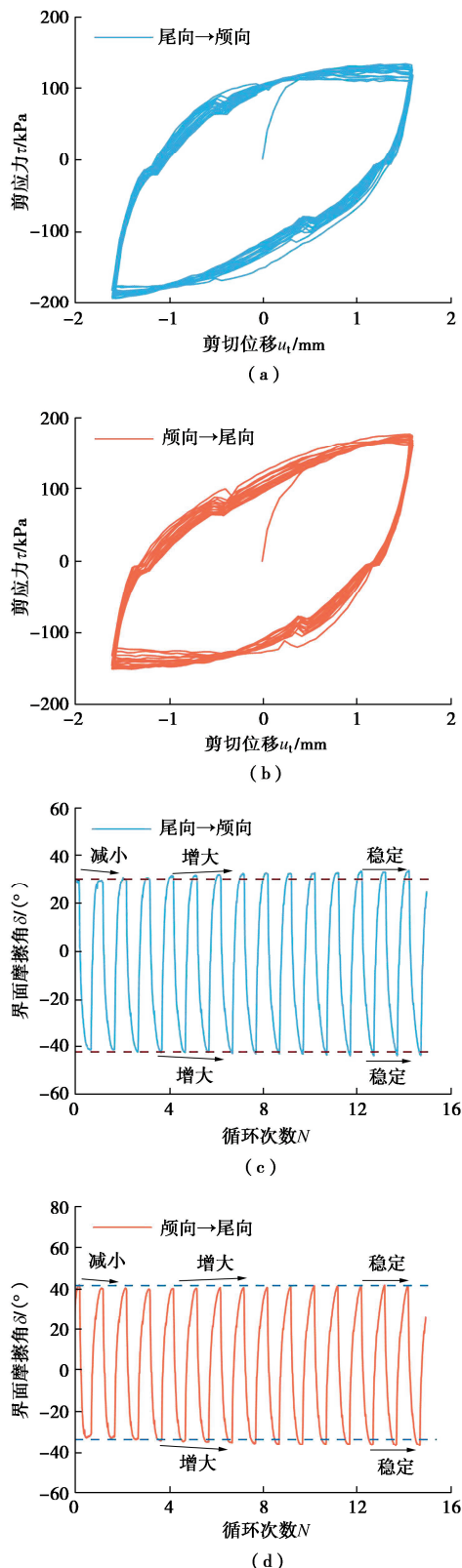


图 4 两种加载路径下界面循环剪切强度

Fig. 4 Change of cyclic shear strength under two loading paths

从图 4 (a), (b) 可以看出, 两种加载路径下钙质砂-蛇皮仿生界面的剪应力-剪切位移关系形成的滞

回圈都呈现出明显的非对称性。尾向→颅向加载路径下正向剪切应力小于反向剪应力, 而颅向→尾向加载路径下正向剪应力大于反向剪切应力。根据 Xiao 等^[23]的研究表明, 钙质砂-蛇皮仿生界面尾向剪切时的强度小于颅向剪切, 因此循环剪切时应力滞回圈表现出非对称性。此外, 可以发现两种加载路径下的应力滞回圈形状基本互为反对称。

从图 4 (c), (d) 可以看出, 两种循环加载路径下正向剪切时钙质砂发挥的界面摩擦角都呈现先减小后增大, 在 10 次循环后逐渐稳定的趋势; 反向剪切时第 1 个循环内发挥的界面摩擦角则都小于后续的其他循环, 界面摩擦角呈现先随循环次数增加而增大, 之后逐渐稳定的趋势。主要是由于首次循环正向剪切时钙质砂颗粒与仿生界面鳞片结构之间的咬合作用较大, 在随后的剪切过程中咬合作用由于砂颗粒的运动有所减弱, 随着循环次数的增加, 试样逐渐被循环剪密, 砂颗粒之间及砂颗粒与界面之间的咬合作用逐渐增加并趋于稳定。

3.2 法向应力的影响

研究表明, 法向应力不仅影响界面的剪切强度, 同时会影响界面的剪切刚度和阻尼比等动力响应特征^[15-16, 26]。图 5 给出了剪切位移为 1.6 mm, 蛇皮仿生界面表观形态为 $H0.5L5.0$, 钙质砂-蛇皮仿生界面在两种循环加载路径下和不同法向应力下的剪切刚度和阻尼比。

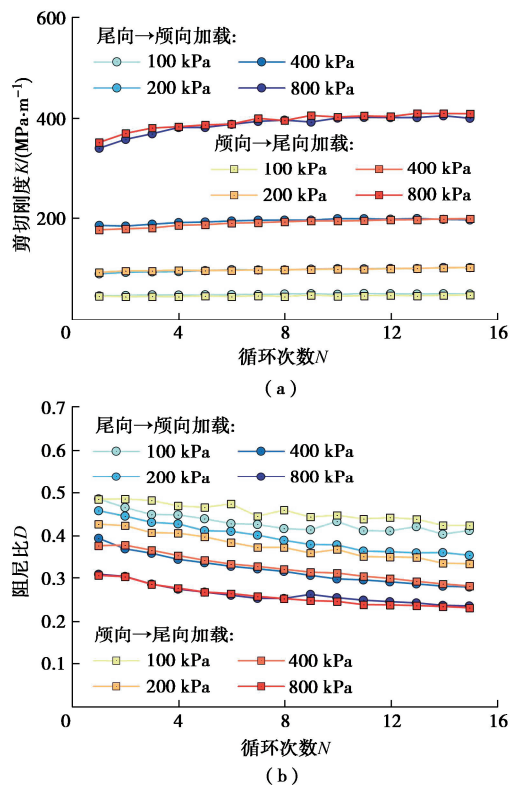


图 5 不同法向应力下两种加载路径的剪切刚度和阻尼比

Fig. 5 Shear stiffnesses and damping ratios of two loading paths under different normal stresses

由图 5 (a) 可知, 钙质砂-蛇皮仿生界面在两种加载路径和不同法向应力水平下的剪切刚度都随循环次数增大而增加, 表明界面剪切过程中发生了剪切硬化现象, 且前几次循环中剪切刚度增长较快, 随着循环次数增加剪切刚度增长速率逐渐减小, 剪切刚度趋于稳定, 这与图 4 (c), (d) 中对界面摩擦角的分析结果相符合。此外, 循环加载路径为尾向→颅向剪切时的剪切刚度与颅向→尾向剪切接近, 说明加载路径对剪切刚度的影响较小。两种加载路径下界面剪切刚度都随法向应力的增加而增加, 这主要是由于界面剪切本身是一种摩擦行为, 界面剪切强度符合莫尔-库仑定理, 因此法向应力的增加会导致界面剪切刚度的提升^[15-16]。

钙质砂-蛇皮仿生界面在两种加载路径和不同法向应力下的阻尼比随循环次数的变化规律如图 5 (b) 所示。从图 5 (b) 中可以看到, 各工况下的界面阻尼比随循环次数的增加逐渐减小, 其变化趋势与剪切刚度相反, 表明随着循环次数增加界面剪切时的能量耗散速率逐渐减小, 主要是由于钙质砂逐渐被循环剪密, 砂颗粒的位置趋于稳定, 循环剪切时输入的能量由于砂颗粒间的咬合作用增加而被存储。此外, 由图 5 (b) 可知, 法向应力越大, 界面阻尼比越小, 说明低法向应力下的界面循环剪切能量耗散更快。同时, 可以发现较高法向应力下 (400, 800 kPa) 两种循环加载路径下的阻尼比接近, 较低法向应力下 (100, 200 kPa) 两者之间有差异, 但是随着循环次数的增加两种加载路径下的阻尼比逐渐趋同。

为了进一步探究钙质砂-蛇皮仿生界面循环剪切刚度和阻尼比与法向应力之间的关系, 将剪切位移为 1.6 mm, 蛇皮仿生界面表观形态为 $H0.5L5.0$ 时各法向应力下第 1 次、第 5 次、第 10 次和第 15 次循环时的剪切刚度和阻尼比绘制于图 6。从图 6 (a), (b) 中可以看出, 两种加载路径下 4 个循环次数时的剪切刚度和法向位移之间均呈现良好的线性关系, 所有数据拟合的决定系数 R^2 均接近于 1.0, 说明单次循环的剪切刚度随法向应力的增大等比例增大, 这与芮圣洁等^[16]得到的结论一致。图 6 (c), (d) 的拟合结果显示 4 个循环次数时的阻尼比随法向应力的增加均呈对数下降。

3.3 剪切位移幅值的影响

图 7 为法向应力为 200 kPa, 蛇皮仿生界面表观形态为 $H0.5L5.0$ 时两种循环加载路径下不同剪切位移幅值时的界面剪切刚度和阻尼比。从图 7 (a) 可以发现: 无论是尾向→颅向循环剪切还是颅向→尾向循环剪切, 剪切位移幅值越大, 剪切刚度越小; 剪切位移幅值较小时, 剪切刚度在循环初期随循环次数增加而

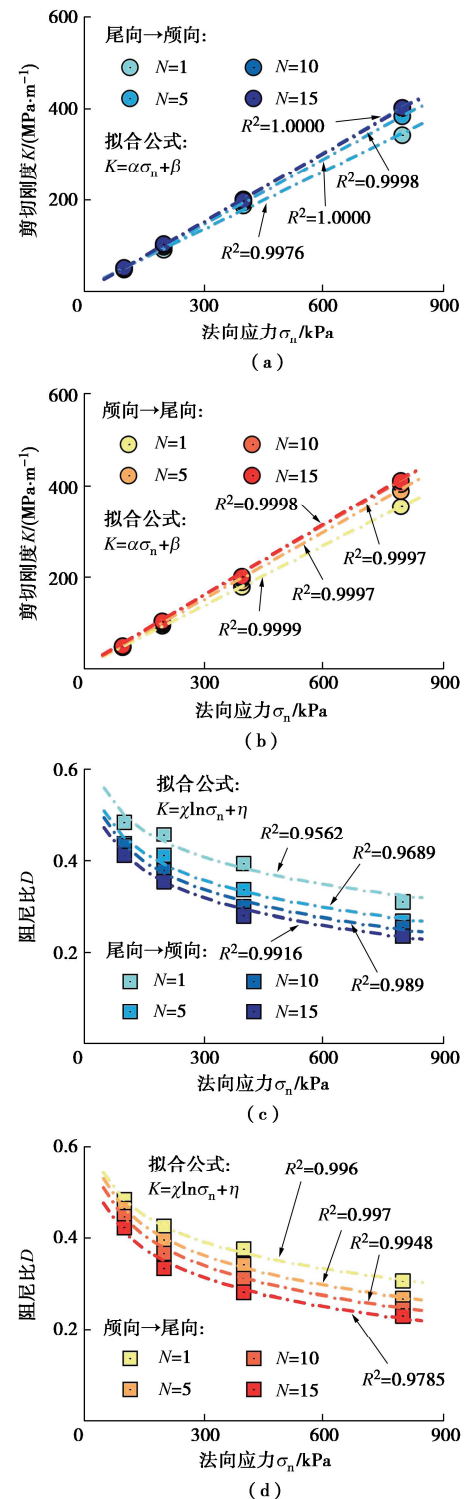


图 6 剪切刚度和阻尼比与法向应力的关系

Fig. 6 Relationship among shear stiffness, damping ratio and normal stress

增加的趋势更加明显。图 7 (b) 表明, 界面阻尼比同样受剪切位移幅值的影响, 表现出随剪切位移幅值的增加而增加, 表明剪切位移幅值的增大加快了循环剪切过程中的能量耗散, 这主要是由于大剪切位移幅值下砂颗粒受剪切作用而发生的位置调整更加频繁, 颗粒的翻滚更加剧烈, 颗粒之间难以形成稳定的咬合作用, 因此能量在颗粒的不断翻滚和位置调整中迅速耗

散。此外,大剪切位移幅值下钙质砂颗粒破碎较多导致耗能量增加也可能是阻尼比增加的原因^[16]。

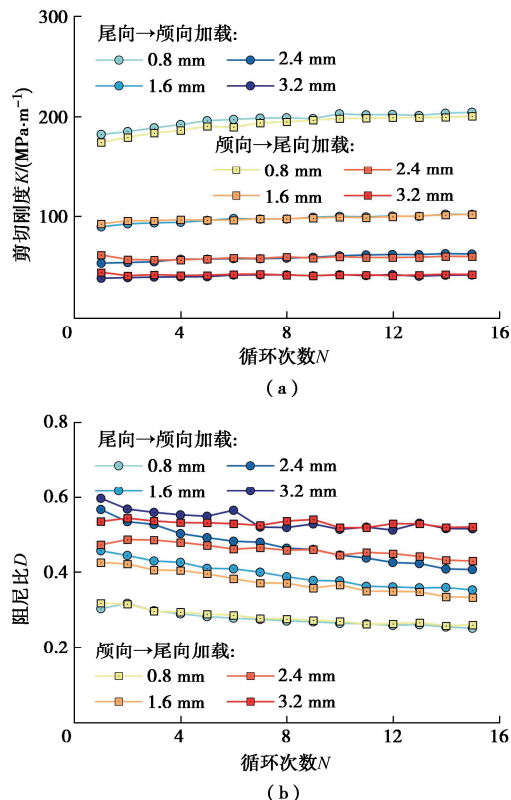


图 7 不同剪切位移幅值下两种加载路径的剪切刚度和阻尼比

Fig. 7 Shear stiffnesses and damping ratios of two loading paths under different amplitudes of shear displacement

图 8 为法向应力为 200 kPa, 蛇皮仿生界面表观形态为 $H0.5L5.0$ 时, 各剪切位移幅值下循环次数为 1, 5, 10, 15 时的界面剪切刚度和阻尼比关系。芮圣洁等^[16]比较了反比例函数和对数函数对剪切刚度和剪切位移幅值之间的拟合效果, 发现反比例函数能更好地反映两者之间的关系。本文采用反比例函数对试验结果进行了最佳拟合, 如图 8 (a), 8 (b) 所示, 可以发现反比例函数同样适用于两种循环加载路径下的界面剪切刚度和剪切位移幅值之间的拟合关系。图 8 (c), 8 (d) 为阻尼比与剪切位移幅值之间的关系, 可以发现两者之间的关系可以用对数函数实现良好的拟合。

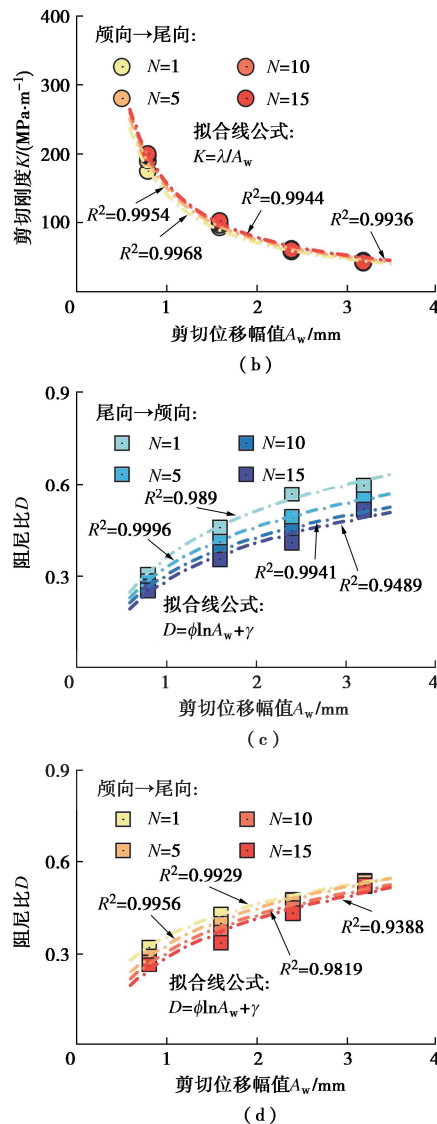
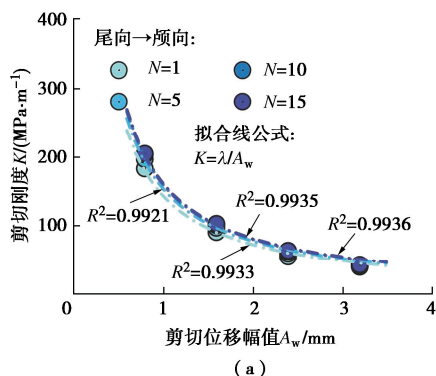


图 8 剪切刚度和阻尼比与剪切位移幅值的关系

Fig. 8 Relationship among shear stiffness, damping ratio and amplitude of shear displacement

3.4 蛇皮仿生界面表观形态的影响

结构物表面的表观形态不同会导致不同的表面粗糙度, 而界面剪切时表面粗糙度会对界面的力学特性产生重要影响, 这主要是由于表面粗糙度的不同会改变界面的破坏模式: 当粗糙度较低时, 界面破坏模式为完全滑动破坏 (a full sliding failure); 随着粗糙度的增加, 由于土颗粒与粗糙面之间和咬合作用增加, 界面破坏模式转变为土体破坏 (soil failure)^[27-28]。砂-蛇皮仿生界面的静荷载试验结果表明, 利用鳞片几何特征比 L/H 表征蛇皮仿生界面的粗糙度可以合理地反映界面的力学行为, 同时界面的强度和摩擦角随鳞片几何特征比的增加而减小, 表明鳞片几何特征比的增加会降低蛇皮仿生界面的粗糙度^[18-19, 23]。图 9, 10 分别为法向应力为 200 kPa, 剪切位移为 1.6 mm, 两种鳞片高度下不同界面表观形态时的界面循环剪切刚

度和阻尼比随循环次数的变化情况。从图中可以看出, 在相同鳞片高度和相同加载路径下, 剪切刚度随鳞片几何特征比的增加而降低, 表明界面粗糙度减小可以降低界面的循环剪切强度。此外, 阻尼比则随鳞片几何特征比的增加而增加, 表明界面粗糙度较低时界面循环剪切时的能量耗散更快, 主要是由于砂颗粒与低粗糙度的蛇皮仿生界面之间的咬合作用较弱, 砂颗粒在剪切过程中更容易沿剪切方向平移运动, 导致能量被迅速消耗。

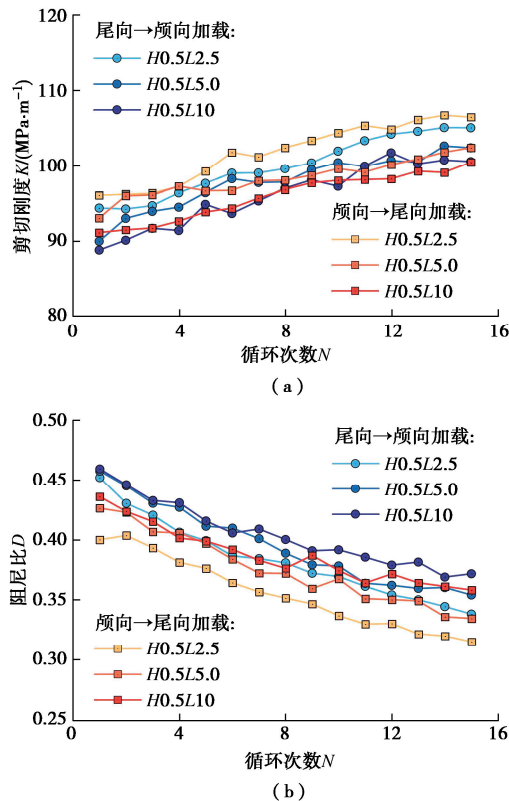


图 9 $H=0.5$ mm 时不同界面表观形态下两种加载路径的剪切刚度和阻尼比

Fig. 9 Shear stiffnesses and damping ratios of two loading paths under different apparent shapes of interface at $H=0.5$ mm

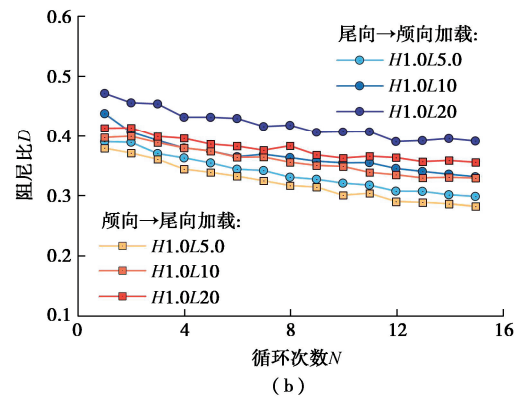
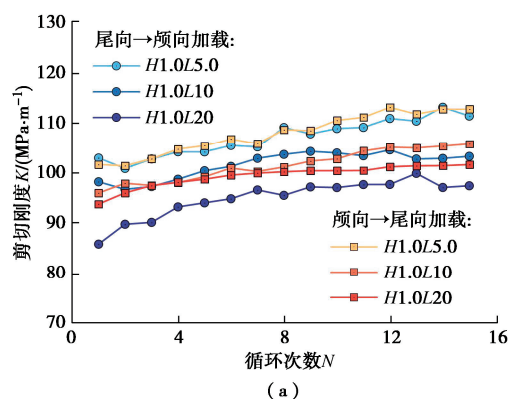


图 10 $H=1.0$ mm 时不同界面表观形态下两种加载路径的剪切刚度和阻尼比

Fig. 10 Shear stiffnesses and damping ratios of two loading paths under different apparent shapes of interface at $H=1.0$ mm

图 11 为法向应力为 200 kPa, 剪切位移为 1.6 mm, 相同鳞片几何特征比 ($L/H=5$) 和不同鳞片高度 (H 为 0.5, 1.0 mm) 下两种循环加载路径的剪切刚度和阻尼比随循环次数的变化情况。从图 11 中可以看出, 相同鳞片几何特征比下界面剪切刚度随鳞片高度增加而增加, 阻尼比随鳞片高度增加而降低, 主要是由于蛇皮仿生界面上凸起鳞片的高度较大时可提供更大的粗糙度, 钙质砂颗粒与蛇皮仿生界面之间的咬合作用更强, 界面强度较大且循环剪切时的能量更多被存储下来。

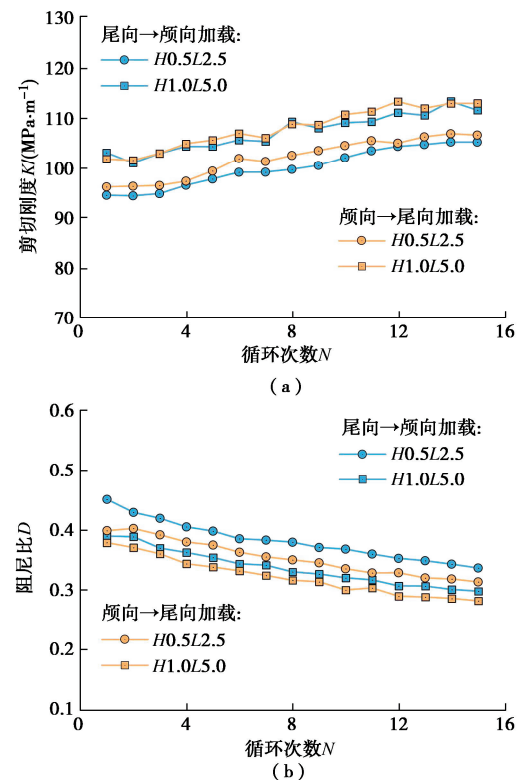


图 11 相同 L/H 不同鳞片高度下界面剪切刚度和阻尼比

Fig. 11 Shear stiffnesses and damping ratios of interface with same L/H and different scale heights

图 12, 13 分别为法向应力为 200 kPa, 剪切位移为 1.6 mm, 两种鳞片高度和两种循环加载路径下循环次数分别为 1, 5, 10, 15 次时的界面剪切刚度-鳞片几何特征比关系和阻尼比-鳞片几何特征比关系。从图中可以发现, 各剪切工况下的界面剪切刚度和鳞片几何特征比之间呈幂函数下降趋势。除其中 3 组数据的拟合结果的决定系数小于 0.9 之外, 其余的阻尼比和鳞片几何特征比之间的关系均可用幂函数实现良好的拟合。

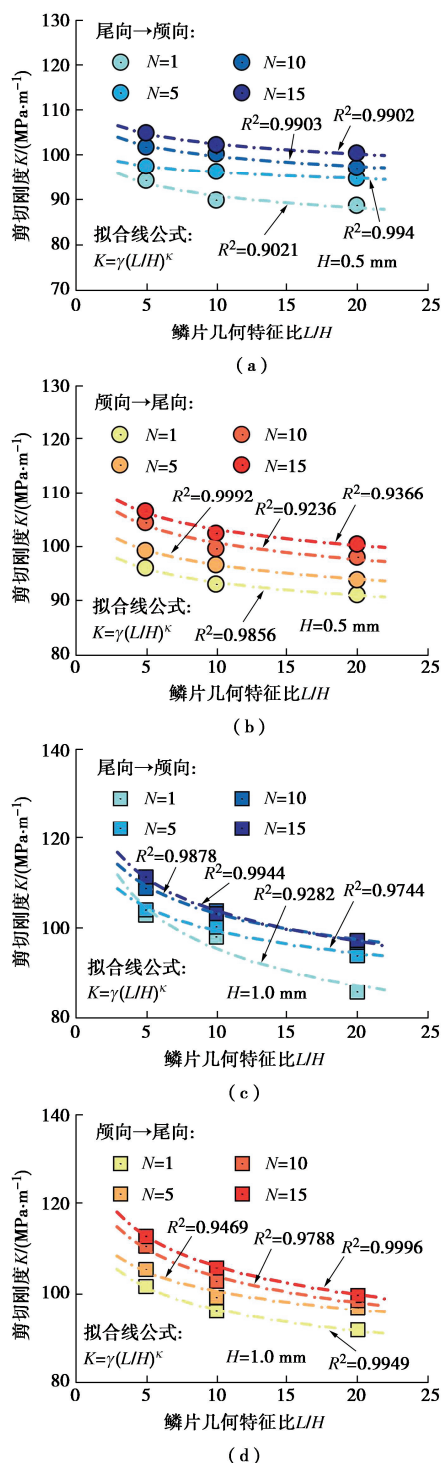


图 12 剪切刚度与鳞片几何特征比的关系

Fig. 12 Relationship between shear stiffness and scale geometric ratio

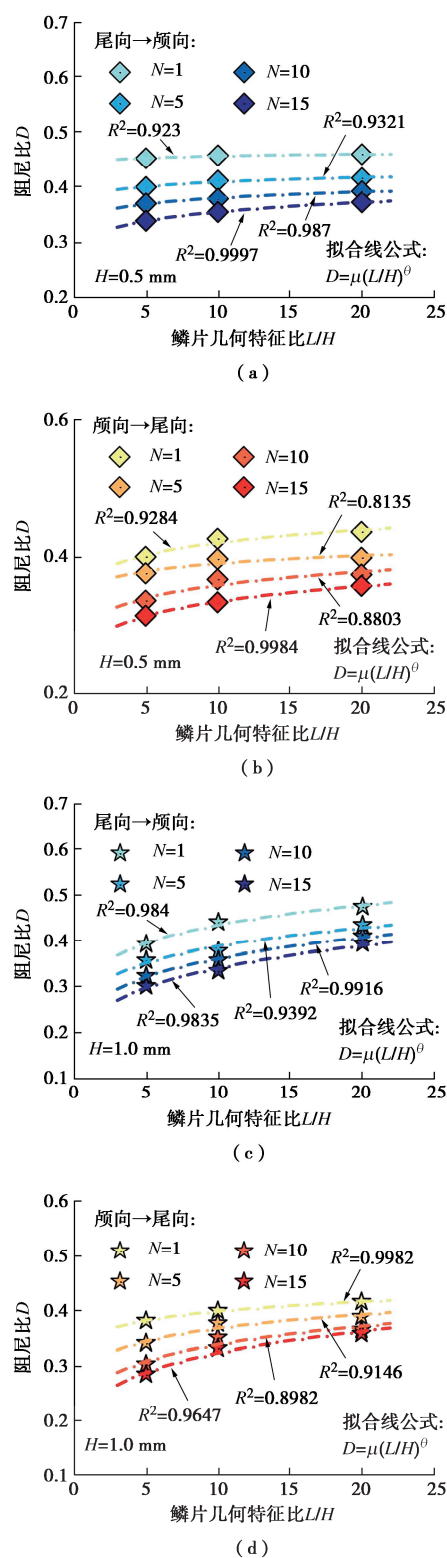


图 13 阻尼比与鳞片几何特征比的关系

Fig. 13 Relationship between damping ratio and scale geometric ratio

4 结 论

本文基于界面直剪仪, 对钙质砂-蛇皮仿生界面开展了一系列循环剪切试验, 研究了法向应力水平、循

环剪切位移幅值和蛇皮仿生界面表观形态对界面循环剪切动力响应的影响。得出4点结论。

(1) 钙质砂-蛇皮仿生界面的应力滞回圈表现出非对称性,同时尾向→倾向加载路径和倾向→尾向加载路径下的应力滞回圈形状基本互为反对称。

(2) 钙质砂-蛇皮仿生界面表现出循环硬化,剪切刚度随循环次数增加而增加,阻尼比随循环次数增加而降低。

(3) 法向应力和剪切位移幅值对界面动力响应具有重要影响,表现为法向应力的增加会线性增加界面剪切刚度,同时阻尼比随法向应力增加呈对数下降趋势;剪切位移幅值的增加会导致剪切刚度呈反比例关系下降,而阻尼比则随剪切位移幅值的增加呈对数增加趋势。

(4) 蛇皮仿生界面的表观形态对剪切刚度和阻尼比具有显著影响,表现为剪切刚度随鳞片几何特征比的增加呈幂函数增加,阻尼比则呈幂函数下降。同时,相同鳞片几何特征比下,鳞片高度越大,剪切刚度越大,阻尼比越小。

参考文献:

- [1] 王新志,汪稔,孟庆山,等. 南沙群岛珊瑚礁灰岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(11): 2221-2226. (WANG Xinzhi, WANG Ren, MENG Qingshan, et al. Research on characteristics of coral reef calcareous rock in Nansha islands[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(11): 2221-2226. (in Chinese))
- [2] LIU L, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, **56**(10): 1502-1513.
- [3] 吴京平,楼志刚. 海洋桩基工程中的钙质土[J]. 海洋工程, 1996, **14**(3): 75-83. (WU Jingping, LOU Zhigang. Research on the behavior of calcareous soils in offshore pile foundations[J]. The Ocean Engineering, 1996, **14**(3): 75-83. (in Chinese))
- [4] PENG Y, LIU H L, LI C, et al. The detailed particle breakage around the pile in coral sand[J]. Acta Geotechnica, 2021, **16**(6): 1971-1981.
- [5] SABERI M, ANNAN CD, KONRAD JM, et al. A critical state two-surface plasticity model for gravelly soil-structure interfaces under monotonic and cyclic loading[J]. Comput Geotech, 2016, **80**: 71-82.
- [6] SABERI M, ANNAN C, KONRAD J. Constitutive modeling of gravelly soil-structure interface considering particle breakage[J]. J Eng Mech, 2017, **143**(8): 04017044.
- [7] LINGS M L, DIETZ M S. The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation[J]. Soils and Foundations, 2005, **45**(6): 1-14.
- [8] 闫澍旺,林澍,贾沼霖,等. 海洋土与钢桩界面剪切强度的大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(3): 495-501. (YAN Shuwang, LIN Shu, JIA Zhaolin, et al. Large-scale direct shear tests on shear strength of interface between marine soil and steel piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(3): 495-501. (in Chinese))
- [9] 胡黎明,濮家骊. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 431-435. (HU Liming, PU Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 431-435. (in Chinese))
- [10] LASHKARI A, JAMALI V. Global and local sand - geosynthetic interface behaviour[J]. Géotechnique, 2021, **71**(4): 346-367.
- [11] QANNADIZADEH A, SHOURIJEH P T, LASHKARI A. Laboratory investigation and constitutive modeling of the mechanical behavior of sand - GRP interfaces[J]. Acta Geotechnica, 2022, **17**(10): 4253-4275.
- [12] HAN F, GANJU E S, SALGADO R, et al. Effects of interface roughness, particle geometry, and gradation on the sand - steel interface friction angle[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, **144**(12): 04018096.
- [13] SU L J, ZHOU W H, CHEN W B, et al. Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface[J]. Measurement, 2018, **122**: 339-346.
- [14] WANG H L, ZHOU W H, YIN Z Y, et al. Effect of grain size distribution of sandy soil on shearing behaviors at soil - structure interface[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, **31**(10): 04019238.
- [15] 刘飞禹,王攀,王军,等. 筋-土界面循环剪切刚度与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 1): 159-165. (LIU Feiyu, WANG Pan, WANG Jun, et al. Experimental research on reinforcement-soil interface stiffness and damping ratio under cyclic shearing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S1): 159-165. (in Chinese))
- [16] 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 Shengjie, GUO Zhen, WANG Lizhong, et al.

- Experimental study of cyclic shear stiffness and damping ratio of carbonate sand-steel interface[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(1): 78-86. (in Chinese))
- [17] MARVI H, COOK J P, STREATOR J L, et al. Snakes move their scales to increase friction[J]. *Biotribology*, 2016, **5**: 52-60.
- [18] MARTINEZ A, PALUMBO S, TODD B D. Bioinspiration for anisotropic load transfer at soil-structure interfaces[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, **145**(10): 04019074.
- [19] STUTZ H H, MARTINEZ A. Directionally dependent strength and dilatancy behavior of soil - structure interfaces[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, **16**(9): 2805-2820.
- [20] O' HARA K B, MARTINEZ A. Monotonic and cyclic frictional resistance directionality in snakeskin-inspired surfaces and piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, **146**(11): 04020116.
- [21] O' HARA K B, MARTINEZ A. Load transfer directionality of snakeskin-inspired piles during installation and pullout in sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, **148**(12): 04022110.
- [22] ZHONG W H, LIU H L, WANG Q, et al. Investigation of the penetration characteristics of snake skin-inspired pile using DEM[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, **16**: 1849-1865.
- [23] XIAO Y, CUI H, SHI J Q, et al. Shear response of calcareous sand-steel snake skin-inspired interfaces[J]. *Acta Geotech*, 2024, **19**(3): 1517-1527.
- [24] VIEIRA C S, LOPES M L, CALDEIRA L M. Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests[J]. *Geosynthetics International*, 2013, **20**(1): 26-38.
- [25] NYE C J, FOX P J. Dynamic shear behavior of a needle-punched geosynthetic clay liner[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(8): 973-983.
- [26] 刘飞禹, 施 静, 王 军, 等. 三明治形加筋土筋-土界面动力剪切特性[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(6): 1991-1998. (LIU Feiyu, SHI Jing, WANG Jun, et al. Dynamic shear behavior of interface for clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(6): 1991-1998. (in Chinese))
- [27] KOU H L, DIAO W Z, ZHANG W C, et al. Experimental study of interface shearing between calcareous sand and steel plate considering surface roughness and particle size[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, **107**: 102490.
- [28] SAMANTA M, PUNETHA P, SHARMA M. Effect of roughness on interface shear behavior of sand with steel and concrete surface[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2018, **14**(4): 387-398.