

DOI: 10.11779/CJGE20221302

颗粒级配和表面纹理对饱和砂-钢界面剪切强度的影响

李逸凡^{1,2}, 李大勇^{*3}, 张雨坤²

(1. 潍坊学院建筑工程学院, 山东 潍坊 261041; 2. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

3. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 钢桩和钢制吸力基础广泛应用于海洋工程, 土体与基础结构界面力学特性决定着其承载能力。通过饱和砂-钢界面排水剪切试验, 揭示了颗粒级配、表面纹理和法向边界条件对界面剪切特性的影响规律。研究表明: 由于颗粒剪切方式和孔隙水压力消散方式的不同, 常法向应力 (CNL) 下剪应力-位移曲线出现明显的应变软化现象。变法向应力 (VNL) 下, 界面剪切强度随法向应力的增大不断提高。对于光滑和凸起构造, 界面摩擦角随不均匀系数 C_u 的增加基本呈线性增长。对于凹槽构造, 界面摩擦角随 C_u 的增加而减小。饱和砂-粗糙度钢板界面剪切效能的发挥受水的影响显著, 砂与钢板之间水膜的存在减弱了砂颗粒和钢界面的摩擦, 使得界面摩擦性能不能完全发挥。

关键词: 界面剪切特性; 颗粒级配; 表面纹理构造; 法向边界条件; 界面摩擦系数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)02-0335-10

作者简介: 李逸凡(1986—), 女, 博士, 副教授, 主要从事海洋岩土和土力学等方面的教学和科研工作。E-mail: 570183501@qq.com。

Effects of grain size distribution and surface texture on shear behaviors at saturated sand-steel interface

LI Yifan^{1,2}, LI Dayong³, ZHANG Yukun²

(1. School of Architecture and Engineering, Weifang University, Weifang 261041, China; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster

Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. College of Pipeline and Civil

Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The steel piles and steel suction caissons are widely used in ocean engineering, in which the mechanical behaviors of the interface between soils and foundations determine their bearing capacities. A series of saturated sand-steel interface drained shear tests are conducted to reveal the effects of the grain size distribution, surface texture and normal confinement conditions on interfacial shear behaviors. The research shows that due to the differences in the shear mode of sand particles and the dissipation of the pore water pressure, the shear stress-displacement curve under a constant normal load (CNL) experiences an obvious strain-softening phenomenon, whereas the maximum shear stress increases with the increase of the normal stress increment under a variable normal load (VNL). For the smooth and convex surfaces, the interfacial friction angle increases linearly with the increase of C_u . For the groove surfaces, the interfacial friction angle decreases with the increase of C_u . The shear efficiency of the saturated sand-steel plate interface is greatly influenced by water, and the presence of the water film weakens the friction between sand particles and steel plates, thus, the maximum efficiency cannot be developed on interfaces.

Key words: interfacial shear behavior; grain size distribution; surface texture; normal confinement condition; interface friction coefficient

0 引言

跨海桥梁、海底隧道工程、海底管线、海上风力与光伏发电等涉海工程得到了大力发展, 推动了海洋资源全面开发利用。饱和土体与基础的相互作用决定着工程的安全性和稳定性具有重要影响, 一直是海洋岩土工程领域的热点重要问题。

针对砂与结构的界面力学特性, 学者们进行了大

量的界面试验研究, 得到以下共识: 界面的剪切特性受到诸多因素的影响, 包括土体性质、相对密实度、颗粒级配、约束条件、表面结构特征等方面^[1-3]。常用的法向边界条件包括 3 种: 常应力 (CNL)、常位移

基金项目: 山东科技大学科研创新团队项目 (2015TDJH104)

收稿日期: 2022-10-26

*通信作者 (E-mail: ldy@upc.edu.cn)

(CND) 和常刚度 (CNS)。其中, CNL 是界面试验中采用最多的边界条件, 测得的界面摩擦角可直接应用于工程实践, 预测界面抗剪强度, 分析土体破坏模式^[4]。在许多实际工程中, 也会遇到界面法向应力或法向位移在剪切过程中不是恒定的情况, 对于预制桩沉桩过程、边坡中的锚杆经受边坡较大变形过程、吸力基础负压沉贯过程等, 多采用 CNS 边界条件研究土-结构界面力学特性^[5-6]。通过对比 CNL 和 CNS 条件下界面剪切试验结果, 发现边界条件对界面强度有显著影响^[7-8]。结构表面粗糙度是影响界面力学特性的重要因素^[9], 考虑在结构表面设置规则或随机几何构造, 提出了多种粗糙度指标与界面强度相关联, 以评价界面力学特性^[2, 10]。但目前鲜有考虑结构表面三维形貌、纹理特征(凹/凸)等因素的影响, 对土-结构界面相互作用机制影响的需深入研究。大量试验证实了砂土平均粒径和颗粒级配对界面力学机制有显著影响, 但是关于界面强度与平均粒径和颗粒级配的关系, 试验结论还不统一: 在相同试验条件下, 细粒砂土-粗糙结构界面摩擦角高于粗粒土^[11], 级配良好砂的界面摩擦角高于级配不良砂^[12-13]; 而有些试验得到了完全相反的结论^[14-16]; Su 等^[17]认为界面强度受平均粒径 D_{50} 和粗糙度的相对尺寸大小控制, 当砂粒能紧密贴合粗糙表面时才能获得最大摩阻力, 但没有深入讨论粒径组分与粗糙度的关系。

综上所述, 土-结构界面剪切特性受到结构表面构造形式和颗粒级配的共同控制, 需要提出一种综合考虑结构表面三维形貌和颗粒级配对界面强度影响的评价方法。界面剪切试验研究主要集中在 CNL 和 CNS 条件下对界面剪切特性的分析, 而法向应力不断变化 (VNL) 的条件下, 土体粒径分布对饱和砂土-不同表面纹理界面剪切特性的影响尚未得到充分研究。

本文设计了多种表面构造形式的钢板, 提出了同时考虑分形维数和加权平均粒径的新粗糙度评价指标, 该指标能够描述传统粗糙度指标无法描述的表面形貌差异。采用 GDS 界面剪切仪, 开展了 CNL 和 VNL 条件下不同粒径级配饱和砂土与不同表面纹理钢板界面剪切试验, 分析了法向边界条件、颗粒级配对界面强度的影响及界面剪切机理。为了深入研究饱和土体-结构界面力学特性及新型基础结构研发, 提供了参考依据。

1 粗糙度评价

大量试验表明, 结构表面粗糙度是影响土-结构界面力学特性的重要因素^[18-19]。目前有几种粗糙度参数的定义可量化结构表面的粗糙度: 参考长度 L_m

($L_m=0.8\sim 2.5\text{ mm}$ ^[20], 或 $L_m=D_{50}$ ^[21]) 范围内最大峰谷距 R_{\max} , 粗糙度剖面坐标的粗糙高度(绝对值)的平均值 R_a 。不同粒径的土体在同一粗糙度结构表面具有不同剪切强度, 因此 Uesugi^[22]考虑土体粒径的影响首次提出相对粗糙度 R_n ($R_n=R_{\max}/D_{50}$), 并广泛被采用^[23]。Subba 等^[24]认为加权平均粒径 D_{av} (D_{av} =粒径级配曲线与 y 轴包围的面积/100) 适用于包括所有细粒土在内的所有粒径情况, 而不是像 D_{50} 这种特定的尺寸, 提出了采用 R_n/D_{av} 评价表面粗糙度更加合理。

以上传统粗糙度评价参数仅为描述结构表面二维剖线的参数, 无法描述整个结构面的三维形貌。分形几何之父 Mandelbro 为准确地描述自然界中的粗糙度, 提出了描述几何形状复杂程度的统计量分形维数 (fractal dimension)。一般认为, 分形维数 D 与表面形貌的幅值变化剧烈程度有关, D 值大, 则表面高频成分多、细节丰富。 D 值小, 则表面空间波长相对长, 微观结构简单。分形维数一般采用盒维数法计算:

$$D = \frac{\lg(N/N_0)}{\lg(r/r_0)} \quad (1)$$

式中: r_0 为初始的测量间距; N 为覆盖粗糙表面所用的边长为 r 立方体的个数; N_0 为覆盖粗糙表面所用的边长为 r_0 立方体的个数。

综上所述, 分形维数 D 在描述结构表面三维粗糙形态上具有很大优势。土体作为具有散粒性的材料, 与粗糙结构表面相互作用时, 界面抗剪强度与土体粒径大小密不可分。加权平均粒径 D_{av} 更能反映砂土整体粒径级配情况。因此, 为体现表面粗糙度与界面剪切强度更好的相关性, 本文考虑分形维数提出新的粗糙度评价指标:

$$R_r = D \frac{R_a}{D_{av}} \quad (2)$$

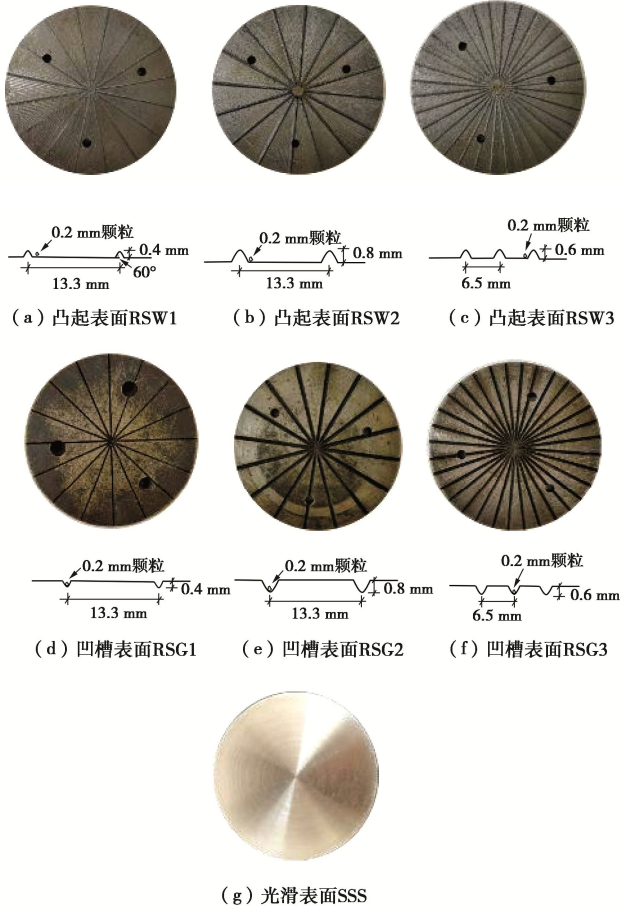
2 试验方法

2.1 上部材料: 不同粗糙度钢板

上部结构材料采用 7 种表面构造形式不同的 Q235 普通碳素结构钢圆板, 直径 68 mm, 厚 8 mm。为研究表面构造形式和粗糙度对界面力学特性的影响, 将钢板表面加工设计为光滑表面 (SSS)、凸起表面 (RSW1, RSW2, RSW3)、凹槽表面 (RSG1, RSG2, RSG3), 具体表面特征及起伏尺寸见图 1。

采用式 (2), 计算上述钢板表面粗糙度。式中分形维数 D 需借助移动式三维激光扫描仪和 Image J 图像处理软件得到。采用三维激光扫描仪对试验中不同表面构造的钢板表面进行扫描。该扫描仪扫描精度可达 0.05 mm, 扫描速度为 18000 测量/s, 十字交叉光束单条扫

描线宽为 300 mm/束, 扫描仪的最高分辨率为 0.1 mm。采集的钢板粗糙表面如图 2 所示。利用 Image J 图像处理软件对图 2 的三维表面图片处理后计算分形维数。Image J 软件计算表面分形维数流程如图 3 所示。



(g) 光滑表面SSS
图 1 试验所用钢板

Fig. 1 Steel plates used in tests

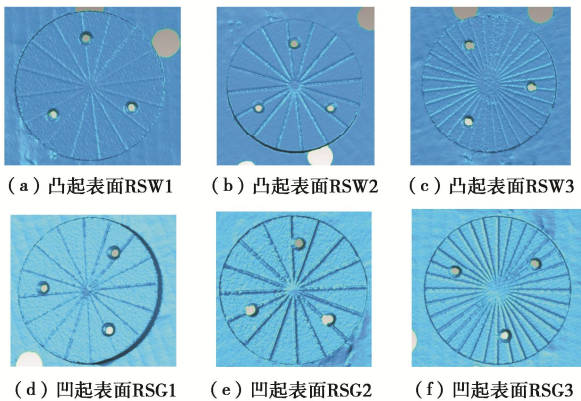


图 2 三维激光扫描成图的钢板粗糙表面图片

Fig. 2 Laser-scanned images of different rough surfaces

2.2 下部材料: 不同级配饱和细砂

本文试验所用石英砂(QS)取自中国青岛金沙滩(图4)。利用X射线衍射分析法及布拉格方程可以对砂样进行物相鉴定, 试验用砂由65%石英、32.5%长石、1.5%白云石、0.7%方解石、0.1%玉髓、0.1%褐铁

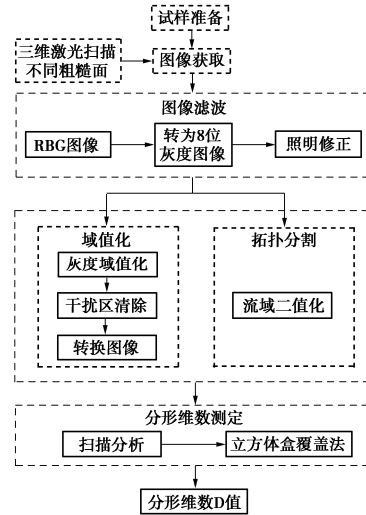
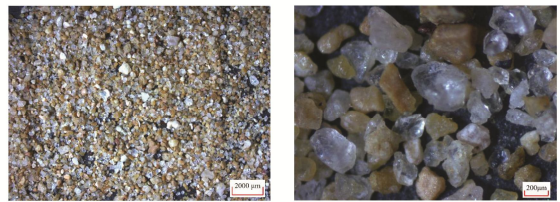


图 3 Image J 计算分形维数流程图

Fig. 3 Flow chart of surface fractal dimension calculated by Image J software

矿化脉石英、0.1%玻璃质组成。图 4 (a), (b) 分别为 6.3 倍和 50 倍率下采用卡尔·蔡司牌 Stemi 2000-C 型研究级体式显微镜得到的石英砂颗粒照片。图 4(b) 可以看出主要矿物石英表面呈毛玻璃状, 单颗粒发育有裂纹, 沿裂纹常呈凹坑状。长石呈灰黄色、黄褐色, 具腊状光泽, 表面多呈毛纹状。整个砂粒半混圆状、次棱角状, 个别为棱角状, 磨圆度中等。



(a) 6.3 倍 (b) 50 倍

图 4 显微镜下石英海砂颗粒照片

Fig. 4 Microscopic images of quartz sand particles

根据第 1 节对粗糙度评价参数的分析可知, 砂粒径与表面粗糙度共同控制砂与粗糙界面的力学特性。然而可能会出现平均粒径 D_{50} 相同但粒径分布不同的情况, 使得粗糙度评价指标无法准确评价界面力学特性。为探究粒径分布对饱和砂-钢界面力学特性的影响, 将烘干后的砂筛分成 0.075~1 mm 不同颗粒大小, 分组照片如图 5 所示。然后将筛分后不同粒径和质量的砂粒按照一定比例进行混合, 得到不同粒径分布曲线, 如图 6 所示。本研究考虑 4 种粒径分布, 为了消除不均匀系数 C_u 以外其他因素的影响, 保证砂的最大、最小和平均粒径 D_{50} 保持一致。为准确控制砂样初始相对密实度, 减小试验误差, 对 4 种试样按照《土工试验方法标准》进行基本物理指标试验, 得到不同颗粒级配砂土的最大、最小干密度 $\rho_{dmax/min}$ 并计算砂样质量 m_s 。表 1 列出了试样的基本物理参数。

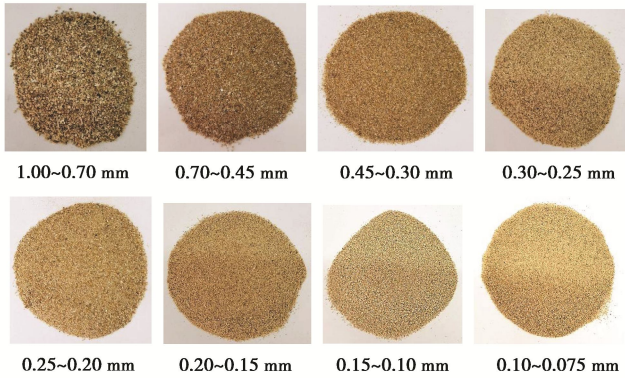


图5 不同粒径范围砂粒照片

Fig. 5 Sand particles at different ranges of grain sizes

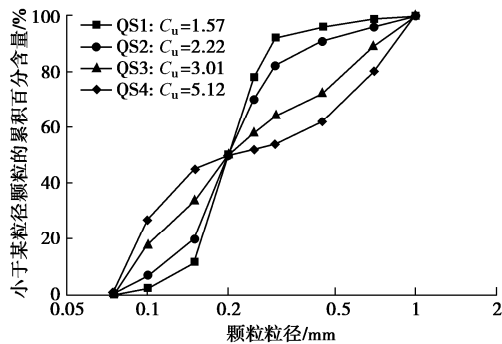


图6 试样粒径分布

Fig. 6 Grain size distributions of the testing soils

表1 试样基本物理参数

Table 1 Soil properties

编号	C_u	C_c	D_{50}/mm	D_{av}/mm	相对密实度 $D_r/\%$	e_{max}	e_{min}	砂样质量/g
QS1	1.57	0.99	0.22		90	1.10	0.61	129.81
QS2	2.22	1.23	0.20	0.25		1.01	0.56	128.67
QS3	3.01	0.80		0.33		0.98	0.63	124.28
QS4	5.12	0.33		0.36		1.02	0.65	122.63

由图6可知, 试样QS4比QS1粗粒含量高, 且级配良好。仅凭平均粒径 D_{50} 不能体现砂土试样的粒径分布, 而加权平均粒径 D_{av} 考虑了所有粒径情况。表2总结了试验中7种钢板表面的不同粗糙度评价指标。

表2 粗糙度评价指标

Table 2 Surface roughnesses of different interfaces

表面类型	R_{max}/mm	R_n	R_a/mm	D	R_r			
					QS1	QS2	QS3	QS4
SSS	0	0	0	0	0	0	0	0
RSW1	0.4	2	0.0365	1.7252	0.286	0.252	0.191	0.175
RSW2	0.8	4	0.0678	1.8269	0.563	0.495	0.375	0.344
RSW3	0.6	3	0.1043	1.9251	0.913	0.803	0.608	0.558
RSG1	0.4	2	0.0365	1.421	0.236	0.207	0.157	0.144
RSG2	0.8	4	0.0678	1.5376	0.474	0.417	0.316	0.290
RSG3	0.6	3	0.1043	1.9047	0.903	0.795	0.602	0.552

2.3 试验仪器

剪切试验采用英国GDS公司生产的界面剪切仪(图7(a))。试验过程能够在一个方向进行连续剪切, 并保持剪切面积不变, 研究土-结构界面在大位移条件下的界面力学特性。扭矩、轴向压力和剪切速率通过GDSLab软件线性或周期性增加, 来模拟基础沉没及使用期间所受的可变荷载。该仪器通过上部轴向压杆施加轴压, 压力杆底面直径68 mm, 高度128 mm, 如图7(b)所示。压杆底面可安装不同粗糙度钢板, 与下部环刀内土体形成界面系统, 通过底座的旋转来实现剪切。界面剪切试验仪环刀直径70 mm, 高度22 mm, 剪切面积 38.48 cm^2 。

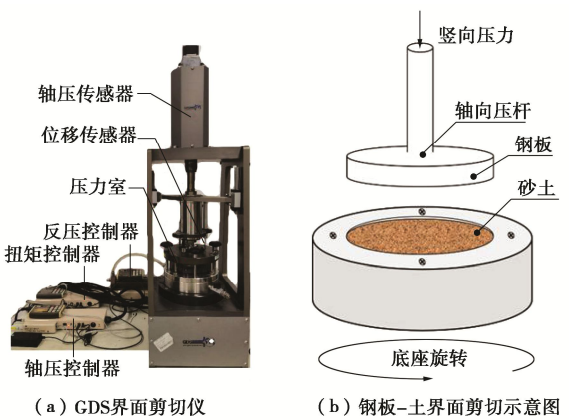


图7 GDS界面剪切仪

Fig. 7 GDS interface shear apparatus

2.4 试验方案

试验方案研究了以下变量的影响: ①法向边界条件; ②颗粒级配; ③表面纹理特征。试验过程如下: 为防止试验过程中砂样溢出, 装样高度为20 mm。将试验用砂分4层装入剪切平台的环刀内, 每层5 mm, 控制每层装入相同质量的砂样, 至预定高度20 mm。装样完成后, 安装压力室, 利用虹吸法向压力室内注入蒸馏水。静置使砂土试样达到饱和状态。具体试验方案见表3。另外, 为研究饱和砂、干砂对界面强度的影响, 开展QS2干砂与7种钢板的剪切试验, 共计70组试验。

表3 饱和砂土-钢界面剪切方案

Table 3 Shear tests on saturated interfaces

表面类型	试样	CNL/kPa	VNL/kPa	剪切位移/L/mm	剪切速率/ $(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$
SSS, RSW1, RSW2, RSW3, RSG1, RSG2, RSG3	QS1, QS2, QS3, QS4	100	0~100	100	1.0

3 试验结果与讨论

3.1 表面纹理特征的影响

(1) 界面剪应力-位移曲线

图 8 为 CNL 和 VNL 条件下, QS2 饱和砂与 7 种不同粗糙度钢板在 100 mm 剪切位移下的界面剪应力-剪切位移曲线。两种边界条件下, 最大剪应力(VNL)和峰值剪应力(CNL)均随粗糙度的增大而增加。由图 8 (a) 可知, VNL 条件下, 法向应力由 0 逐渐增大到 100 kPa, 剪应力随剪切位移的增大基本呈线性增长。不会出现软化现象, 无法得到界面的峰值剪应力。从图 8 (b) 中可以发现, CNL 条件下, 饱和砂土-钢界面剪应力-剪切位移曲线均表现为初始快速线性增大随后呈现非线性部分直至峰值。峰值后剪应力减小, 随着剪切位移增大界面剪应力出现 3 种变化趋势: 逐渐增大 (RSW), 保持稳定 (RSG), 逐渐减小 (SSS)。显然峰值后界面剪应力变化趋势与表面纹理构造相关。对比图 8 (b) 中的 RSW1 和 RSG3 剪应力-位移曲线可以发现, RSG3 的峰值应力为 50.5 kPa, 高于 RSW1 峰值应力 48.1 kPa, 但 RSW1 在剪切位移 10 mm 后的残余强度超过了 RSG3。这是由于凸起构造引起沿垂直界面方向更大范围的土颗粒扰动, 使得一些没有剪碎的大颗粒翻滚上来。与较小颗粒形成的接触力链相比, 较大的颗粒形成的接触力链提供了更大的剪切应力, 剪应力、摩擦系数随着剪切位移的增大而呈现波动增长趋势。说明不同纹理构造对较大位移时的残余强度产生影响。

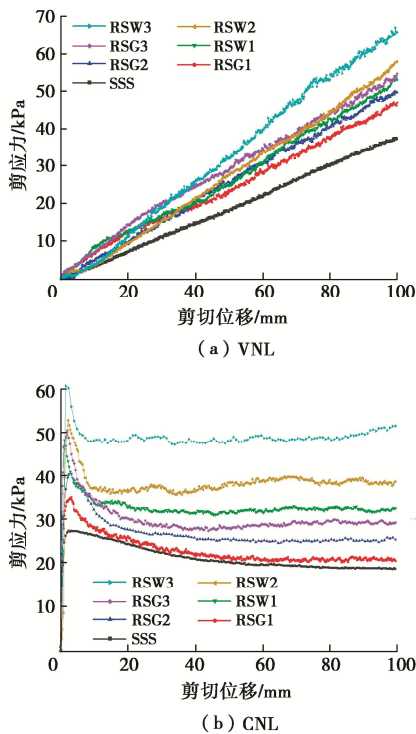


图 8 不同粗糙度下界面剪切应力-剪切位移关系 (QS2)
Fig. 8 Curves of shear stress-shear displacement for different interfaces under VNL and CNL conditions

表面构造形式、粗糙度不同, 界面剪切机制存在显著差异。结合图 9 结构表面构造形式与颗粒剪切相互作用示意图进行分析。区域 I (平均粒径显著大于凹槽或凸起尺寸): 界面摩阻力由滑动摩擦 F_1 构成; 区域 II: 界面摩阻力由土体内部摩擦 F_2 构成; 区域 III: 界面摩阻力由凸起纹理引起的被动摩擦 F_3 构成。在区域 III 中, 由于凸起纹理的扰动, 颗粒翻越、提升、转动从低势能状态变为高势能状态, 要消耗额外能量^[25], 同时颗粒和凸起纹理产生互锁作用。互锁机制对界面抗剪强度影响较大, 与纹理尺寸/粒径之值有关, 当比值在 1.0~4.0 时, 可以建立较高的互锁作用^[26]。同时, 剪切过程中, 随着颗粒-颗粒咬合与颗粒-凸起纹理互锁作用的增加, 不规则颗粒移动 (滑动、翻滚) 受到显著限制, 导致界面剪切强度提高。因此 F_3 显著大于 F_1 和 F_2 。

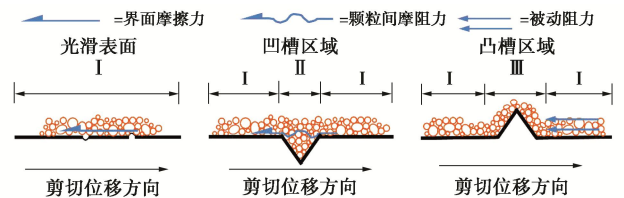


图 9 砂与粗糙表面剪切阻力示意图

Fig. 9 Mobilization mechanism of interface shear strength

RSW 界面剪应力主要由 F_1 和 F_3 构成, RSG 型由 F_1 和 F_2 构成。因此在表面纹理尺寸和条数相同的情况下, CNL 和 VNL 条件下, RSW 的界面峰值应力和最大剪应力皆大于 RSG 型。如, VNL 条件下, RSW1、RSW2、RSW3 的最大剪应力分别为 53.7、57.9、67.0 kPa, RSG1、RSG2、RSG3 的峰值剪应力分别为 47.0、49.8、54.8 kPa; CNL 条件下, RSW1、RSW2、RSW3 的峰值剪应力分别为 48.1、52.7、60.5 kPa, RSG1、RSG2、RSG3 的峰值剪应力分别为 35.0、40.2、50.5 kPa。

对比图 8 (a), (b) 发现, VNL 条件下最大剪应力明显高于 CNL 条件下的峰值剪应力。造成 CNL 和 VNL 条件下剪应力-剪切位移曲线差异性的主要原因如下: 由于 CNL 条件下法向应力一直保持在 100 kPa, 上部钢板体积无法变化, 在较短时间内下部土颗粒发生挤压, 颗粒咬合作用强。界面处土颗粒在重新排列过程中发生翻滚需要的能量增大, 故界面剪切强度迅速达到峰值。同时, 由于界面另一侧是钢材, 界面处孔隙水只能向土体方向扩散。CNL 条件下, 孔隙水压力短时间内发生较大累积导致界面剪切强度达到峰值后迅速降低。随后界面附近的土颗粒翻转结束后排列稳定, 继而发生剪切、磨损破坏, 界面剪应力逐渐减小, 后续变化趋势与粗糙度相关。VNL 条件下法向应力由 0 逐渐增大, 界面孔隙水压力逐渐消散。剪切过

程初期,法向应力较小,界面剪切以滑移剪切为主,表现出较低的剪应力。随着法向应力的增大,土体密实度逐渐增大。砂土颗粒之间的接触面积不断增大,颗粒发生翻滚使得界面剪应力逐渐提高。剪切后期随着法向应力和位移慢慢增大,颗粒逐渐被压碎,破碎的颗粒填补孔隙使得砂土更加密实,砂粒间的咬合作用越强,颗粒间越不易相互错动、翻滚,使得界面剪切应力不断提高,说明边界条件对界面剪切特性有显著影响。

(2) 摩擦系数-粗糙度关系

从表 2 中的各个粗糙度指标可以发现: RSW1 与 RSG1、RSW2 与 RSG2、RSW3 与 RSG3 的 R_{max} 、 R_n 及 R_a 值相同; 但根据试验结果, 显然 RSW 和 RSG 系列界面强度相差较大。图 10 为 CNL 和 VNL 条件下界面摩擦系数与 R_r 的关系图, 从图中可以发现, 各个界面的 R_r 值虽然不同, 仍不能很好体现粗糙度和界面摩擦系数之间的关系。分形维数 D 能够反映表面凸起构造在高频成分中所占的比例, 但其在本质上属于绝对粗糙度, 结合 R_a 与 D_{av} 之后, 反而减弱了凸起构造在界面强度中的比例。这是由于传统的粗糙度指标忽略了表面纹理构造的影响。

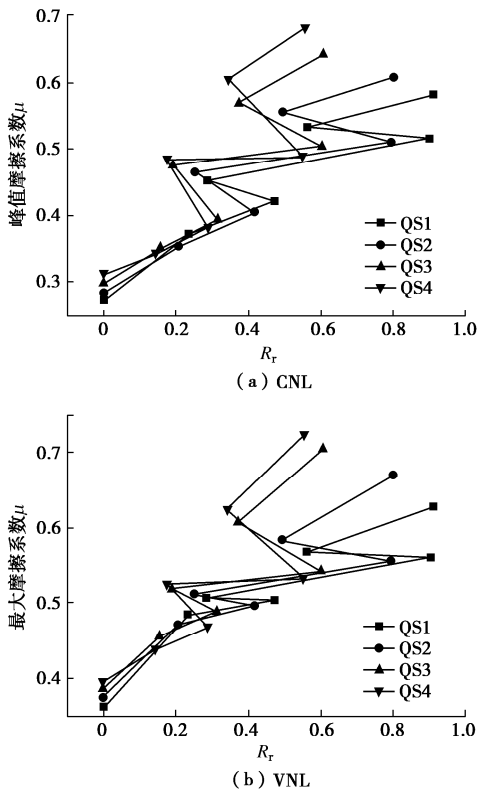


图 10 界面峰值和最大摩擦系数-粗糙度 R_r 关系曲线

Fig. 10 Interface friction coefficient versus interface roughness R_r

传统粗糙度指标只考虑颗粒粒径和结构面的契合程度, 忽略了纹理构造的影响。根据 3.1 (1) 节中对不同纹理构造摩擦机制分析可知, 当 R_n 或 R_{max} 值

相同时, 凸起构造比凹陷构造更能调动界面处颗粒的活跃程度, 可以获得更大的界面剪切强度, 粗糙度评价指标应予以考虑。

将本次试验所得的摩擦系数 μ 和 R_a 的关系数据绘制了图 11。为了将 RSG 凹槽和 RSW 凸起构造在数值上进行区别, 将结构表面设置为水平面, 水平面以下即凹槽纹理以负数表示。

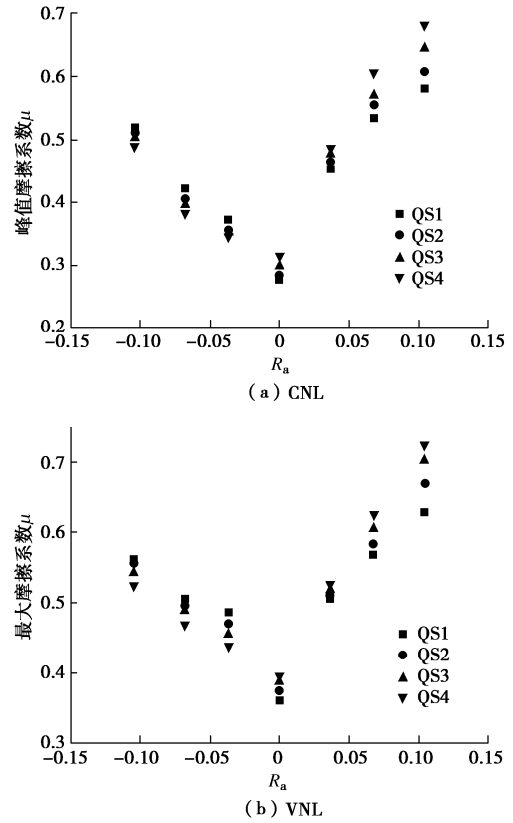


图 11 界面峰值/最大摩擦系数-粗糙度 R_a 关系

Fig. 11 Interface friction coefficient versus interface roughness R_a

从图 11 中可以发现, RSG 凹槽系列的粗糙度指标偏大, 需要对其进行折减, 用于定量评价凹槽结构表面摩擦系数。凹槽纹理粗糙度折减系数 β 计算公式如下:

$$\beta = \frac{\mu - \mu_{光滑}}{\mu_{凸} - \mu_{光滑}}, \quad (3)$$

式中, β 取值范围为 0~1。当结构表面纹理为凸起时, $\mu = \mu_{凸}$, 此时 $\beta = 1$, 表明界面粗糙度无需折减; 当结构表面光滑时, $\mu = \mu_{光滑}$, 此时 $\beta = 0$, 粗糙度指标为 0; 当结构表面纹理为凹槽时, $\mu = \mu_{凹}$, 此时对本文提出的考虑分形维数的粗糙度指标 R_r 进行折减。

将凹槽 RSG 系列与 4 组饱和砂土的界面试验结果代入式 (3) 中, 并拟合得到粗糙度折减系数与本文所提粗糙度指标 R_r 的关系曲线 (图 12):

$$\beta = 0.633 - 0.634 \times 0.021^{(R_r)} = 0.633 -$$

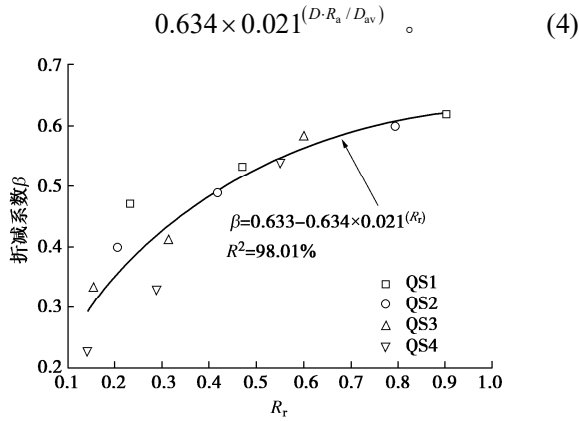


图 12 界面粗糙度折减系数 β -粗糙度 R_r 关系曲线

Fig. 12 Curves of interface roughness reduction factor-roughness R_r

综上所述, 对本文提出的考虑分形维数粗糙度评价指标, 即式 (2) 进行修正, 得到

$$R_r = \beta \cdot D \frac{R_a}{D_{av}} \quad (5)$$

式 (5) 考虑了结构表面三维粗糙形态、纹理构造对界面强度的影响。

将 4 组饱和砂土界面试验得到的摩擦系数与修正之后的粗糙度指标 R_r 关系绘制了图 13。

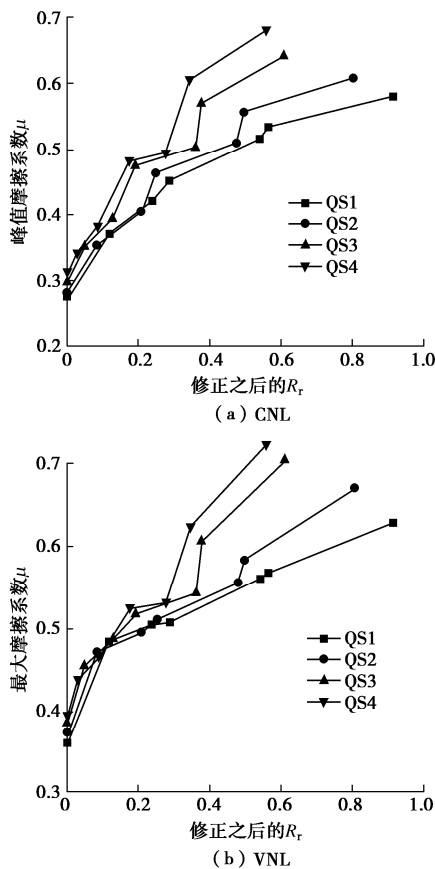


图 13 界面峰值/最大摩擦系数-修正后粗糙度 R_r 关系

Fig. 13 Interface friction coefficient versus corrective interface roughness R_r

从图 13 中可以看出, 界面摩擦系数随修正之后粗糙度指标 R_r 的增加而增大, 呈现良好的正相关性。结合图 11 可以发现, 凸起构造对界面强度的影响更加显著, 造成不同粒径分布的饱和砂土界面摩擦系数差异性逐渐增大。

3.2 颗粒级配的影响

为了更好地了解不同粒径分布的饱和砂对界面力学特性的影响, 图 14 给出了 CNL 和 VNL 条件下饱和砂-钢界面有效峰值摩擦角 δ'_p 和最大摩擦角 δ'_{max} 随不均匀系数 C_u 的变化情况。随着 C_u 的增加, 饱和砂土与不同纹理构造钢板剪切时界面摩擦角的变化趋势有显著不同。对于 SSS 和凸起构造 RSW 型钢板, CNL 和 VNL 条件下界面峰值和最大摩擦角随不均匀系数 C_u 的增加基本呈线性增长。即粒径越不均匀, 界面的强度越高。相反地, 对于凹槽构造 RSG 型, 随着 C_u 的增加, CNL 和 VNL 条件下界面摩擦角均线性减小。即粒径越均匀, 界面的强度越高。

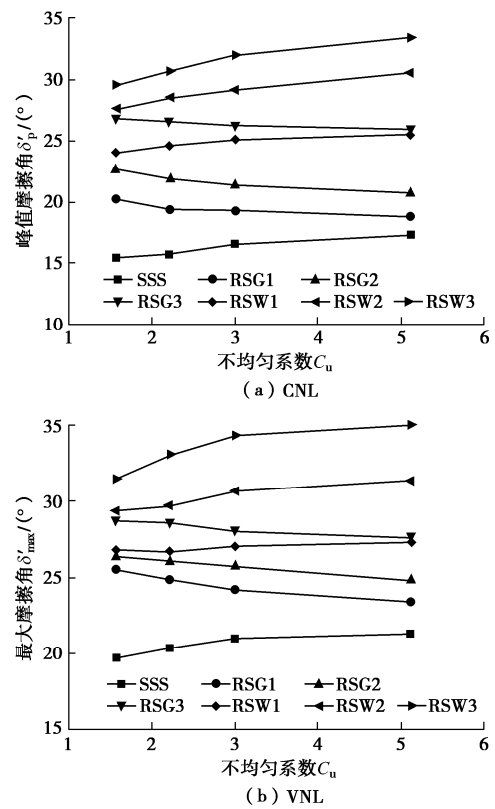


图 14 界面峰值/最大摩擦角-不均匀系数 C_u 关系

Fig. 14 Variations of interface friction angle with C_u

为解释不同纹理构造下摩擦角随不均匀系数的变化机理, 以两种极端情况 ($C_u=1$ 和 $C_u>5$) 进行说明。假设 $C_u=1$ 的砂粒由粒径为 0.2 mm 的圆球构成(本文 4 组试样 D_{50} 均为 0.2 mm), $C_u>5$ 的砂粒为级配良好砂。以 SSS、RSG1 和 RSW1 三种表面为例, 如图 15 所示。对于凹槽纹理构造 (图 15 (a), (b)), $C_u=1$

和 $C_u > 5$ 的砂粒剪切界面不同：图中界面处橙色颗粒在剪切过程中活跃移动。图 15 (a) 中的橙色均匀颗粒基本契合结构表面凹槽纹理，界面处所有颗粒在剪切过程中均被动员，颗粒间形成接触力链。界面强度由颗粒-结构间滑动摩擦、凹槽处颗粒-颗粒间摩擦以及凹槽内的颗粒在被挤出过程中与凹槽壁形成被动阻力构成。观察图 15 (b) 中剪切界面，由于颗粒级配良好，剪切过程中凹槽容易被小颗粒紧密填满，产生一个新的有效界面（图中橙色颗粒下方）。界面强度主要由颗粒-结构间滑动摩擦、凹槽处颗粒-颗粒内摩擦构成。因此，在图 14 中，CNL 和 VNL 条件下，凹槽结构的界面摩擦角均随 C_u 的增加线性减小。

对于光滑和凸起纹理构造（图 15 (c) ~ (f)），剪切界面即为结构表面， $C_u=1$ 和 $C_u > 5$ 两种情况下剪切强度在土体颗粒与结构表面之间的传递机制一致。造成界面强度差异的原因有两个：①颗粒与结构表面的接触面积；②颗粒间接触力链的互锁机制。对比图 15 (c) ~ (f) 发现， $C_u=1$ 均匀颗粒与结构表面的接触面积显然小于 $C_u > 5$ 级配良好的情况，在颗粒形状、硬度相同的情况下，与结构表面紧密贴合的级配良好砂粒具有更高的滑动摩擦力。在界面剪切过程中，剪切强度由颗粒间形成的接触力链传递。对于 $C_u=1$ 的情况，由于颗粒大小一致，移动过程中不会产生颗粒间的互锁效应，荷载的传递相对均匀。而对于 $C_u > 5$ 的情况，接触力链包括大小不一的颗粒间的互锁效应，这种非均匀的荷载传递导致剪切带的应变颗粒形成较高局部接触力链^[27]，从而产生了较大的界面剪切强度。故从图 14 中可以发现，光滑和凸起纹理结构的界面摩擦角均随 C_u 的增加线性增大。

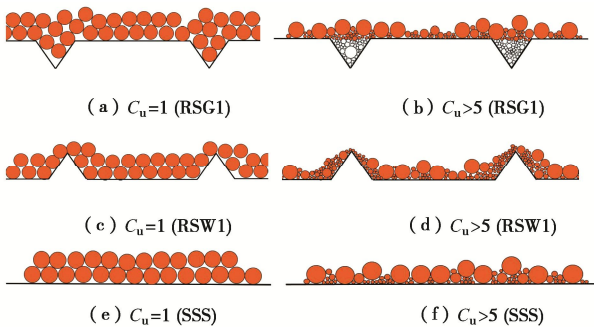


图 15 界面颗粒与表面纹理作用示意图

Fig. 15 Interpretation of interface interactions

3.3 饱和砂与干砂界面归一化效能参数

Koerner^[29]采用了归一化的界面效能参数 E 表征界面强度，归一化的界面峰值（CNL 条件下）或最大（VNL 条件下）效能参数 E 为

$$E = \frac{\tan \delta_p}{\tan \phi_p} \text{ 或 } E = \frac{\tan \delta_{\max}}{\tan \phi_p} \quad (6)$$

式中： δ_p 为 CNL 条件下界面峰值摩擦角； δ_{\max} 为 VNL 条件下界面最大摩擦角，饱和土体时，采用有效界面摩擦角； ϕ_p 为砂土峰值内摩擦角，通过 ShearTrac-II 型应变控制式直剪仪在法向应力 100 kPa，剪切速率 1 cm/min 下进行剪切试验获得。以 QS2 为例，干砂 $\phi_p = 40.7^\circ$ ，饱和砂 $\phi'_p = 33.9^\circ$ 。

图 16 给出了 CNL 和 VNL 条件下，QS2 干砂和饱和砂归一化效能参数 E 和粗糙度 R_r 的关系。从图 16 中可以看出：①CNL 和 VNL 条件下界面效能参数 E 均随 R_r 的增加而增大，说明表面粗糙度可以有效动员界面剪切强度；②干砂的界面效能参数明显大于同等条件下饱和砂的，且随着粗糙度的增加，两者差距逐渐增大，说明水对饱和砂-钢界面强度有一定的抑制作用；③干砂-RSW2、3 界面的效能参数 E 大于 1，即 $\delta > \phi$ ，与文献[7, 23]试验结果一致，说明凸起纹理构造可以调动大于土体内摩擦角的界面摩擦角。而饱和砂-钢界面的效能参数均小于 1，即 $\delta < \phi$ 。这是由于砂土和钢是性质差别悬殊的两种材料，分子间附着力较小，饱和土体与钢之间存在水膜。在剪切作用下，水膜起到一定润滑作用，界面上覆盖水膜的分子链尾端之间的相互作用减弱了砂颗粒和钢界面的摩擦，使得界面摩擦性能不能完全发挥，证实了水对砂土-粗糙界面强度有显著影响。

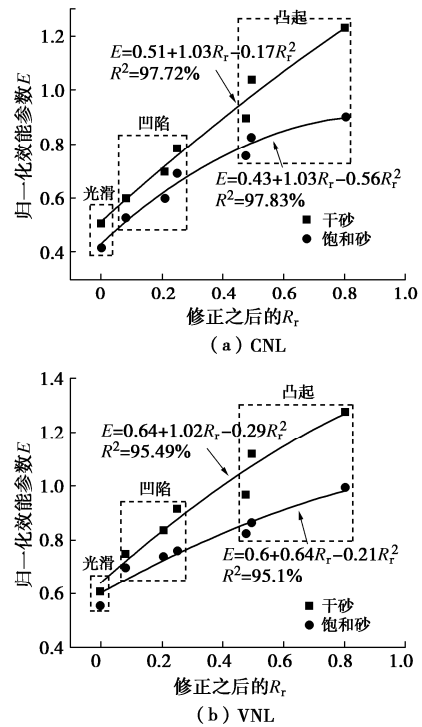


图 16 归一化效能参数-修正后粗糙度 R_r 关系

Fig. 16 Normalized interface friction coefficient versus corrective corrected roughness R_r

4 结 论

本文介绍了不同粒径级配饱和砂土与不同表面纹理钢板界面试验的研究结果。通过 VNL 和 CNL 条件下的界面试验, 研究了界面结构特征和粒径分布对界面强度和力学行为的影响, 得到以下 4 点结论。

(1) 考虑结构表面三维粗糙形态、纹理构造对界面强度的影响, 对凹槽纹理进行折减, 获得了凹槽纹理粗糙度折减系数 β 与粗糙度 R_f 的关系曲线及经验公式。提出了修正之后的粗糙度指标 R_f 计算公式, 具有广泛的适用性。

(2) CNL 条件下, 饱和砂-钢界面剪切行为多表现为软化型, 峰值后随着剪切位移的增大, 界面剪应力变化趋势与表面纹理构造相关。VNL 条件下, 法向应力由 0 逐渐增大, 界面强度随法向应力的增大不断提高。

(3) 对于光滑和凸起构造, 界面摩擦角随不均匀系数 C_u 的增加基本呈线性增长。对于凹槽构造, 界面摩擦角随 C_u 的增加而减小。

(4) 饱和砂-粗糙度钢板界面剪切效能的发挥受到水的影响显著, 饱和砂与钢板之间水膜的存在减弱了砂颗粒和钢界面的摩擦, 使得界面摩擦性能不能完全发挥。

参考文献:

- [1] CANAKCI H, HAMED M, CELIK F, et al. Friction characteristics of organic soil with construction materials[J]. *Soils and Foundations*, 2016, **56**(6): 965-972.
- [2] FARHADI B, LASHKARI A. Influence of soil inherent anisotropy on behavior of crushed sand-steel interfaces[J]. *Soils and Foundations*, 2017, **57**(1): 111-125.
- [3] 李大勇, 侯新宇, 张雨坤, 等. 相对密度对沉贯中吸力基础桶壁-砂土界面力学特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2022, **44**(9): 1598-1607. (LI Dayong, HOU Xinyu, ZHANG Yukun, et al. Effects of relative densities on mechanical characteristics of interface between sand and suction caisson during penetration[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, **44**(9): 1598-1607. (in Chinese))
- [4] VAFAEI N, FAKHARIAN K, SADREKARIMI A. Sand-sand and sand-steel interface grain-scale behavior under shearing[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, **30**: 100636.
- [5] PORCINO D, FIORAVANTE V, GHIONNA V, et al. Interface behavior of sands from constant normal stiffness direct shear tests[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2003, **26**(3): 289-301.
- [6] WANG J F, LIU S, CHENG Y P. Role of normal boundary condition in interface shear test for the determination of skin friction along pile shaft[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, **54**(9): 1245-1256.
- [7] NARDELLI A, CACCIARI P P, FUTAI M M. Sand-concrete interface response: the role of surface texture and confinement conditions[J]. *Soils and Foundations*, 2019, **59**(6): 1675-1694.
- [8] AFZALI-NEJAD A, LASHKARI A, MARTINEZ A. Stress-displacement response of sand-geosynthetic interfaces under different volume change boundary conditions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, **147**(8): 04021062.
- [9] HAMMOUD F, BOUMEKIK A. Experimental study of the behaviour of interfacial shearing between cohesive soils and solid materials at large displacement[J]. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2006, **71**(1): 63-80.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 刘飞禹, 王攀, 王军, 等. 颗粒粒径对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(1): 150-156. (LIU Feiyu, WANG Pan, WANG Jun, et al. Influence of soil particle size on monotonic and cyclic direct shear behaviors of geogrid-soil interface[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(1): 150-156. (in Chinese))
- [13] 王军, 施静, 刘飞禹, 等. 砂土颗粒级配对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J]. *岩土力学*, 2019, **40**(1): 109-117. (WANG Jun, SHI Jing, LIU Feiyu, et al. Effect of particle gradation on static and dynamic direct shear properties of geogrid-sand interface[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(1): 109-117. (in Chinese))
- [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] 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.

- [16] 刘亚琼. 粗颗粒含量对粗粒土-混凝土结构接触面剪切力学性质的影响[J]. 工程勘察, 2022, **50**(2): 7-12. (LIU Yaqiong. Influence of coarse particle content on shear mechanical properties of interface between coarse grained soil and concrete structure[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2022, **50**(2): 7-12. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] TEHRANI F S, HAN F, SALGADO R, et al. Effect of surface roughness on the shaft resistance of non-displacement piles embedded in sand[J]. Géotechnique, 2016, **66**(5): 386-400.
- [19] 金子豪, 杨奇, 陈琛, 等. 粗糙度对混凝土-砂土接触面力学特性的影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(3): 754-765. (JIN Zihao, YANG Qi, CHEN Chen, et al. Experimental study on effects of the roughness on mechanical behaviors of concrete-sand interface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(3): 754-765. (in Chinese))
- [20] YOSHIMI Y, KISHIDA T. A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces[J]. Geotechnical Testing Journal, 1981, **4**(4): 145.
- [21] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. Soils and Foundations, 1986, **26**(4): 139-149.
- [22] UESUGI M, KISHIDA H. Influential factors of friction between steel and dry sands[J]. Soils and Foundations, 1986, **26**(2): 33-46.
- [23] MARTINEZ A, FROST J D. The influence of surface roughness form on the strength of sand-structure interfaces[J]. Géotechnique Letters, 2017, **7**(1): 104-111.
- [24] SUBBA R K S, ALLAM M M, ROBINSON R G, et al. Interfacial friction between sands and solid surfaces[J]. Geotechnical Engineering, 1998, **131**(2): 75-82.
- [25] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guangxin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [26] 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.
- [27] CABALAR A F, DULUNDU K, TUNCAY K. Strength of various sands in triaxial and cyclic direct shear tests[J]. Engineering Geology, 2013, **156**: 92-102.
- [28] KOERNER R M. Designing with Geosynthetics[M]. Engelwood Cliffs: Prentice Hall Inc, 1990.

第十一届软土地基地下工程岩土问题国际研讨会通知

第十一届软土地基地下工程岩土问题国际研讨会 (IS-Macau 2024) 将于 2024 年 6 月 14 日—17 日在中国澳门特别行政区举行。本次会议由澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室 (IoTSC)、土木与环境工程系与国际土力学与岩土工程学会 (ISSMGE) TC204 共同举办。大会主席为澳门大学周万欢教授、东南大学徐涛副教授; 副主席为剑桥大学 Giulia Viggiani 教授; 秘书为澳门大学管铮博士。研讨会的主题为“智慧城市隧道与地下空间建设”, 具体包括: 软土基本性质; 本

构与数值模型; 软土地基处理新技术; 大数据、人工智能和机器学习在隧道和地下工程中的应用; 地下基础设施韧性与可持续发展; 隧道与地下施工智能监测与可视化技术; 观测法在地下工程中的应用; 现场案例研究。

大会组委会诚邀业界专家学者、工程技术人员、管理人员和企业代表等拨冗莅临, 共襄盛会!

会议网站: <https://is-macau2024.skliotsc.um.edu.mo>

咨询邮箱: ismacau2024@um.edu.mo

(会议组委会)