

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.011

郭聚坤,雷胜友,魏道凯,等.粗糙度对结构物-细砂界面剪切特性的影响[J].水利水运工程学报,2019(3):85-94.(GUO Jukun, LEI Shengyou, WEI Daokai, et al. Effects of roughness on shear properties of structure-sands interface[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(3): 85-94. (in Chinese))

# 粗糙度对结构物-细砂界面剪切特性的影响

郭聚坤<sup>1,2</sup>,雷胜友<sup>1</sup>,魏道凯<sup>2</sup>,寇海磊<sup>3</sup>,王瑞<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 山东交通职业学院 公路与建筑系,山东 潍坊 261206;  
3. 中国海洋大学 工程学院,山东 青岛 266100)

**摘要:**下部基础与土体界面的剪切特性对于整个结构的安全施工至关重要,地基上部土层中多见砂土层,砂粒径大小和结构物表面粗糙程度会影响下部基础的受力特性,对于研究砂土层下部基础的侧摩阻力具有重要意义。利用改进后的直剪仪,进行粒组为0.075~0.150 mm,0.150~0.300 mm的砂与人造粗糙混凝土板、钢板的界面剪切试验,研究不同砂粒组、不同粗糙度、不同法向应力下的钢-砂和混凝土-砂界面抗剪强度和界面剪切强度指标。结果表明:界面剪切应力-剪切位移关系可用双曲线模型描述,试验峰值剪切应力与模型峰值剪切应力的比值为0.85~0.95;峰值剪切应力随法向应力和粗糙度的增大而增加,粒组Ⅰ的较粒组Ⅱ略大,混凝土-砂界面峰值剪切应力较钢-砂界面的大;对于未刻纹路的结构物-砂界面剪切面为一移动的水平面,刻有纹路的结构物-砂界面剪切面由不断的水平剪切面和动态曲形剪切面构成;界面摩擦角随粗糙度增大而增加,粒组Ⅰ的抗剪强度指标较粒组Ⅱ略大,钢-砂界面摩擦角集中在23°~28°,混凝土-砂界面摩擦角集中在25°~31°。研究成果可为砂土层桩侧摩阻力估计和数值模拟提供参考。

**关键词:**砂;粗糙度;粒组;剪切面;界面摩擦角

**中图分类号:** TU473      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-640X(2019)03-0085-10

在河流、海洋工程中,地基上部土层中多见细砂层,其与下部基础的界面摩阻力是下部结构承载力的重要组成部分,研究结构物-砂土界面剪切特性具有重要的工程价值。室内直剪试验是研究结构物-土界面剪切特性的重要途径,国内外学者对此进行了广泛的试验研究。夏红春等<sup>[1]</sup>利用超高压直残剪试验系统研究了粗糙钢板-标准砂界面剪切特性,指出在高法向应力下剪应力-位移关系呈现应变软化、线性强化和应变强化3种类型。Mortara等<sup>[2]</sup>进行了常刚度条件下的钢-硅质砂界面剪切试验,强调剪切应力的退化对终值剪切应力的重要影响。田建勃等<sup>[3]</sup>研究了砂粒径对界面力学特性的影响,认为界面厚度随砂粒径的增大而增加。陆勇等<sup>[4]</sup>研究了结构面峰谷距与砂平均粒径相对尺度对界面剪切特性的影响,认为存在“极限相对尺度”和“临界相对尺度”。徐超等<sup>[5]</sup>进行了标准砂-土工格栅界面循环剪切试验,认为加筋可有效限制界面法向位移。王军等<sup>[6]</sup>进行了标准砂-玻璃纤维大型直剪试验,指出格栅纵横肋的合理搭配比例能够显著提高界面剪切强度。梁越等<sup>[7]</sup>利用改进的直剪仪研究了不同预压时间下的钢-土界面剪切特性,发现极限剪应力与预压时间成正比关系,在法向应力较小时极限剪应力的时效性较明显。Liu等<sup>[8]</sup>进行了砂-土工合成材料循环后单剪试验,指出峰值和残余剪应力与正应力、循环次数呈正相关关系,界面表观黏聚力和摩擦角随剪切

收稿日期:2018-07-25

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51879246,51408439);潍坊市科技发展计划资助项目(2017GX083);中国海洋大学青年英才工程计划项目(841717014);山东省职业教育技艺技能传承创新平台(公路工程智慧检测技术传承创新平台)资助项目

**作者简介:**郭聚坤(1986—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要从事结构物-土体界面剪切特性方面的研究。

E-mail:gjk\_1986@126.com 通信作者:寇海磊(E-mail:kou123321@126.com)

强度增加而增大。赵联桢等<sup>[9]</sup>研究了冻砂土与结构接触面在恒温条件下的剪切特性。肖杰等<sup>[10]</sup>利用大型界面直剪仪研究了硫酸腐蚀对砂-混凝土界面剪切性状的影响,用双曲线模型对剪应力-位移关系进行了较好的拟合。Farhadi 等<sup>[11]</sup>研究了砂的初始各向异性对钢-砂界面剪切行为的影响,指出峰值剪应力和最大剪胀角受层面倾角影响较大。Gu 等<sup>[12]</sup>通过室内试验和离散元模拟比较,从宏观和微观角度研究了界面应变局部化和剪胀行为,提供了一种基于剪切带临界状态的定量建模方法。金子豪等<sup>[13]</sup>研究了粗糙度对混凝土-砂界面力学特性的影响,指出平均粒径大于 0.7 mm 的粗砂和细砾,剪切带厚度约为  $5D_{50}$ 。

本文利用改进的室内直剪仪,选取粒径为 0.075~0.150 mm 和 0.150~0.300 mm 的两组砂,进行砂与人造粗糙钢板和混凝土板的界面剪切试验,重点探讨法向应力变化、粒组变化、粗糙度变化、结构物材料变化对界面剪切特性的影响。

## 1 界面剪切试验

### 1.1 试验设备

界面剪切试验所用直剪仪是在室内应变控制式直剪仪基础上经过改进制作而成,如图 1 所示。上剪切盒放置砂土和透水石,砂土体积为  $30 \text{ cm}^2 \times 1.25 \text{ cm}$ ,下剪切盒经机械加工而成,盒内放入钢板或混凝土板,因钢板、混凝土板与下剪切盒结合密实,为避免产生气压,同时方便取样,在下盒底面正中央打一贯穿圆孔,改进后的直剪仪下盒如图 2 所示。由于砂土边缘距离结构物边缘为 17 mm,可保证试验过程中砂土与钢板的接触面积保持不变。

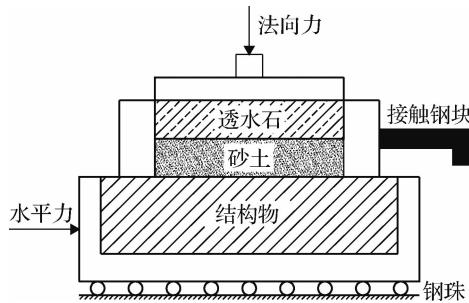


图 1 改进后的直剪仪示意图

Fig. 1 Sketch of improved direct shear apparatus

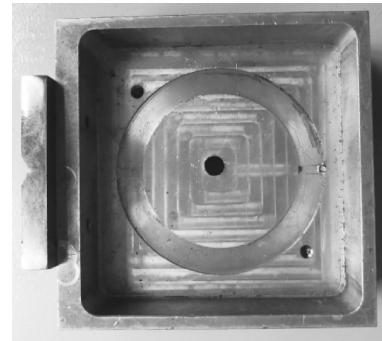


图 2 改进后的直剪仪下盒

Fig. 2 Lower box for improved direct shear apparatus

### 1.2 试验材料

试验所用砂土取自潍坊,界面剪切试验选用经筛分、烘箱烘干后的两种粒径组的砂,分别为粒组 I (0.075~0.150 mm)、粒组 II (0.150~0.300 mm)。试验所用砂土的主要物理力学指标见表 1。

试验所用钢板为不锈钢材料,产自潍坊本地钢材公司,钢板经机械加工制作而成,尺寸为  $10.1 \text{ cm} \times 9.6 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ ,4 个角位置处设  $\varphi 6 \text{ mm}$  的倒圆角。钢板共 4 块,可模拟 4 种不同表面粗糙度的结构物,其中粗糙度 I 的钢板表面不做任何处理,粗糙度 II、粗糙度 III 和粗糙度 IV 的钢板采用机械设备在其表面分别刻 5 道、7 道和 9 道纹路,纹路为倒三角形,纹路长度方向与界面剪切方向相垂直,试验所用钢板如图 3 所示。试验所用混凝土尺寸同钢板,为保证混凝土块能够较好地与下剪切盒契合,经机械加工一钢试模,内模空间尺寸与钢板尺寸一致,如图 4 所示。混凝土板经预制而成,配比为石:砂:水:水泥 = 905:905:240:475,其中石子的粒径范围为 4.75~9.50 mm。养护完成后的混凝土板共 4 块,随即制作同钢板粗糙度 II, III, IV

一致的混凝土板,粗糙度 I 的混凝土板不做处理,如图 5 所示。钢板、混凝土板制作完成后,其表面粗糙度采用灌砂法<sup>[14]</sup>测量,用平均灌砂深度  $h$  表示处理面的粗糙度,  $h$  越大则粗糙度越大。具体方法为:用 4 片塑料板将试块处理面围起来,使塑料板的最高平面和处理面的最高点平齐,在表面灌入粉细砂(0.075~0.150 mm)且与塑料板顶面抹平,然后测得灌入砂的体积,重复测量 3 次,则平均灌砂深度( $h$ )=砂的体积  $V$ /处理面表面积  $S$ 。假定粗糙度 I, II, III 和 IV 的平均灌砂深度为  $h_1, h_2, h_3$  和  $h_4$ , 计算结果如表 2 所示。

表 1 试验土样主要物理力学性质指标

Tab. 1 Main physical and mechanical properties of soil

粒组/mm	天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	内摩擦角/°
0.075~0.150	1.35	33.6
0.150~0.300	1.37	33.9

表 2 试块表面粗糙度

Tab. 2 Surface roughness of test block samples

试块	平均灌砂深度/mm			
	粗糙度 I	粗糙度 II	粗糙度 III	粗糙度 IV
钢块	0	0.056	0.081	0.102
混凝土块	0	0.073	0.093	0.116

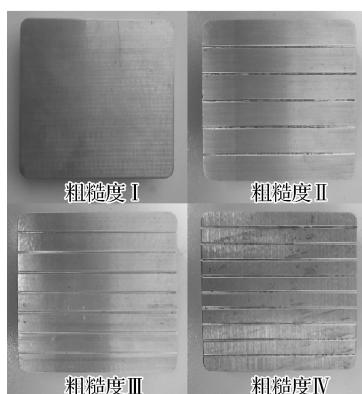


图 3 试验所用钢板

Fig. 3 Steel plate used in the test

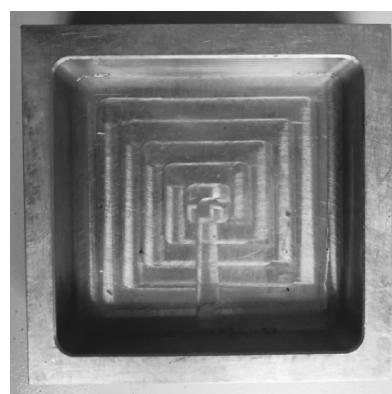


图 4 试验所用混凝土试模

Fig. 4 Template of concrete used in the test

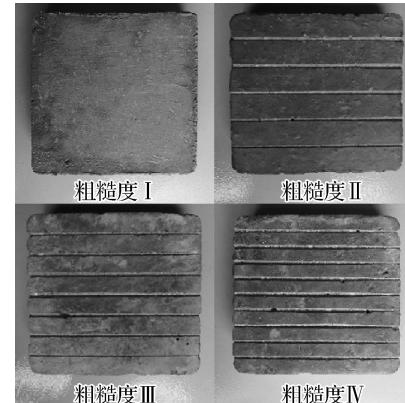


图 5 试验所用混凝土板

Fig. 5 Concrete plate used in the test

### 1.3 试验方案

下剪切盒分别放入粗糙度 I~IV 的钢板和粗糙度 I~IV 的混凝土板,上剪切盒分别填入粒组 I(0.075~0.150 mm)和粒组 II(0.150~0.300 mm)的砂土,为保证砂样初始状态的一致性,对于同一粒组的砂,向上剪切盒加入相同质量的砂,且每组试验均在法向应力 50 kPa 下预压 5 min,然后在法向应力 50, 100, 150 和 200 kPa 作用下进行剪切试验,界面剪切试验共 64 组。试验采用位移控制加载方式,剪切速率设定在 0.8 mm/min。

## 2 试验机理分析

### 2.1 界面抗剪强度

根据试验得到的粗糙度 I~IV 的钢板、混凝土板与粒组 I, II 的砂界面剪切应力-剪切位移数据可知:剪切应力随着剪切位移增大而增加,在剪切初始阶段,剪切应力的增速最快,随着剪切位移的增加,剪切应力增速变缓,直至达到剪切应力峰值,之后剪切应力基本趋于稳定,但出现小幅度波动,整体略有软化的趋势。因剪切应力-剪切位移曲线的形状接近双曲线,采用 Clough 和 Duncan 提出的双曲线模型<sup>[15]</sup>对试验数据进行研究,模型计算式为:

$$\tau = \omega / (a + b\omega) \quad (1)$$

式中: $a$  为初始剪切刚度  $K_s$  的倒数;  $b$  为极限剪切应力  $\tau_u$  的倒数。双曲线模型计算式及相关试验数据见表 3~4,  $\tau_f$  为试验峰值剪切应力,  $\tau_u$  为模型峰值剪切应力。

从表 3 和 4 可以看出:① 在同一粗糙度和粒组条件下, 试验峰值剪切应力随法向应力的增大而增加。② 在同一法向应力和粒组条件下, 试验峰值剪切应力随粗糙度的增大而增加, 峰值剪切应力从粗糙度 I 到粗糙度 II 的增加值最大, 而峰值剪切应力从粗糙度 II 到粗糙度 III 及从粗糙度 III 到粗糙度 IV 的增加值相对较小, 且比较接近, 原因是钢和混凝土所刻纹路的数量均为 0, 5, 7, 9 道, 从粗糙度 I 到粗糙度 II、粗糙度 II 到粗糙度 III、粗糙度 III 到粗糙度 IV 钢板的平均灌砂深度增加值分别为 0.056, 0.025 和 0.021 mm, 混凝土板的平均灌砂深度增加值分别为 0.073, 0.020 和 0.023 mm, 平均灌砂深度的增加值越大, 说明粗糙度提高得越大, 故峰值剪切应力变化越大; 峰值剪切位移随粗糙度的增大也基本呈现出相同的规律, 且从粗糙度 I 到粗糙度 II 的增加值最大。③ 在同一粗糙度和法向应力条件下, 粒组 I 和粒组 II 的试验峰值剪切应力比较接近, 但粒组 II 要小于粒组 I, 这与砂本身的粗糙度及砂与结构物的接触面积有关系, 绘制结构物-砂剪切面形成示意图(见图 6(a)和(b))。在粗糙度 I 条件下, 由于粒组 I 的粒径要小于粒组 II 的粒径, 其与结构物的接触面积更大, 导致粒组 I 的峰值剪切应力要比粒组 II 的略大一些; 在粗糙度 II, III 和 IV 条件下, 峰值剪切应力由三部分组成。为更好地分析界面剪切强度构成, 绘制结构物-砂界面剪切面构成示意图(见图 6(c)和(d))。一部分为未刻纹路区域得到的结构物-砂界面剪切应力(区域 1 和区域 3), 一部分为刻纹路区域的砂-砂界面剪切应力(区域 2), 另一部分为相邻区域交界处棱角提供的剪切应力。由于纹路的宽度和深度相对砂粒径较大, 一定数量的砂在剪切过程中就一直嵌锁在纹路内, 这样在纹路处相当于发生了砂的内部剪切现象, 即砂与砂的界面剪切。④ 从钢-砂界面和混凝土-砂界面的试验峰值剪切应力来看, 前者数值要小于后者, 这与钢和混凝土本身的材料属性和表面粗糙度有关系。⑤ 通过界面拟合公式获取的峰值剪切应力来看, 模型峰值剪切应力随着法向应力、粗糙度和粒组的变化规律和通过试验获取的相应数值的变化规律是类似的, 且试验峰值剪切应力和模型峰值剪切应力的比值为 0.85~0.95, 说明通过双曲线模型对试验数据进行分析较合理。

表 3 钢-砂界面拟合公式及试验数据

Tab. 3 Fitting formula and experimental data of interface between steel and sand

粗糙度	粒组 I				粒组 II					
	$\sigma/kPa$	拟合公式	$\tau_f/kPa$	$\tau_u/kPa$	$\tau_f/\tau_u$	$\sigma/kPa$	拟合公式	$\tau_f/kPa$	$\tau_u/kPa$	$\tau_f/\tau_u$
I	50	$\tau = \omega/(0.011 + 0.043\omega)$	21.74	23.26	0.935	50	$\tau = \omega/(0.012 + 0.043\omega)$	21.42	23.26	0.921
	100	$\tau = \omega/(0.0071 + 0.021\omega)$	43.64	48.78	0.895	100	$\tau = \omega/(0.0087 + 0.021\omega)$	42.85	48.78	0.878
	150	$\tau = \omega/(0.0057 + 0.014\omega)$	65.23	74.07	0.881	150	$\tau = \omega/(0.0060 + 0.014\omega)$	64.59	73.53	0.878
	200	$\tau = \omega/(0.0040 + 0.010\omega)$	85.54	96.15	0.890	200	$\tau = \omega/(0.0041 + 0.011\omega)$	84.59	93.46	0.905
II	50	$\tau = \omega/(0.0091 + 0.034\omega)$	27.46	29.50	0.931	50	$\tau = \omega/(0.011 + 0.035\omega)$	26.82	28.49	0.941
	100	$\tau = \omega/(0.0079 + 0.018\omega)$	49.36	57.14	0.864	100	$\tau = \omega/(0.0094 + 0.018\omega)$	48.72	55.56	0.877
	150	$\tau = \omega/(0.0061 + 0.012\omega)$	73.16	84.75	0.863	150	$\tau = \omega/(0.0058 + 0.012\omega)$	72.68	82.64	0.879
	200	$\tau = \omega/(0.0040 + 0.0088\omega)$	99.50	113.64	0.876	200	$\tau = \omega/(0.0048 + 0.0088\omega)$	98.71	113.64	0.869
III	50	$\tau = \omega/(0.012 + 0.031\omega)$	28.72	32.79	0.876	50	$\tau = \omega/(0.012 + 0.032\omega)$	28.09	31.15	0.902
	100	$\tau = \omega/(0.0094 + 0.017\omega)$	50.63	58.82	0.861	100	$\tau = \omega/(0.0084 + 0.017\omega)$	49.99	57.80	0.865
	150	$\tau = \omega/(0.0069 + 0.011\omega)$	75.07	87.72	0.856	150	$\tau = \omega/(0.0065 + 0.012\omega)$	73.95	85.47	0.865
	200	$\tau = \omega/(0.0045 + 0.0084\omega)$	102.52	119.05	0.861	200	$\tau = \omega/(0.0045 + 0.0085\omega)$	101.25	117.65	0.861
IV	50	$\tau = \omega/(0.012 + 0.031\omega)$	29.36	32.68	0.898	50	$\tau = \omega/(0.012 + 0.032\omega)$	28.88	31.75	0.910
	100	$\tau = \omega/(0.0079 + 0.017\omega)$	51.74	59.52	0.869	100	$\tau = \omega/(0.0079 + 0.017\omega)$	51.26	58.82	0.871
	150	$\tau = \omega/(0.0054 + 0.011\omega)$	79.19	90.91	0.871	150	$\tau = \omega/(0.0062 + 0.011\omega)$	78.87	92.59	0.852
	200	$\tau = \omega/(0.0038 + 0.0084\omega)$	104.74	119.05	0.880	200	$\tau = \omega/(0.0043 + 0.0083\omega)$	103.63	120.48	0.860

表 4 混凝土-砂界面拟合公式及试验数据  
Tab. 4 Fitting formula and experimental data of interface between concrete and sand

粒组 I						粒组 II					
粗糙度	$\sigma/kPa$	拟合公式	$\tau_f/kPa$	$\tau_u/kPa$	$\tau_f/\tau_u$	粗糙度	$\sigma/kPa$	拟合公式	$\tau_f/kPa$	$\tau_u/kPa$	$\tau_f/\tau_u$
I	50	$\tau = \omega/(0.0099 + 0.039\omega)$	24.44	25.97	0.941	I	50	$\tau = \omega/(0.011 + 0.039\omega)$	23.96	25.38	0.944
	100	$\tau = \omega/(0.0081 + 0.019\omega)$	48.24	54.05	0.893		100	$\tau = \omega/(0.010 + 0.018\omega)$	47.77	54.35	0.879
	150	$\tau = \omega/(0.0068 + 0.012\omega)$	71.57	82.64	0.866		150	$\tau = \omega/(0.0076 + 0.012\omega)$	70.62	81.97	0.862
	200	$\tau = \omega/(0.0052 + 0.0092\omega)$	95.38	108.70	0.877		200	$\tau = \omega/(0.0055 + 0.0091\omega)$	94.43	109.89	0.859
II	50	$\tau = \omega/(0.016 + 0.032\omega)$	29.36	31.75	0.925	II	50	$\tau = \omega/(0.018 + 0.032\omega)$	28.88	31.45	0.918
	100	$\tau = \omega/(0.0099 + 0.016\omega)$	55.07	62.50	0.881		100	$\tau = \omega/(0.010 + 0.016\omega)$	54.12	61.35	0.882
	150	$\tau = \omega/(0.0074 + 0.010\omega)$	85.06	97.09	0.876		150	$\tau = \omega/(0.0082 + 0.010\omega)$	84.59	98.04	0.863
	200	$\tau = \omega/(0.0062 + 0.0080\omega)$	108.71	125.00	0.870		200	$\tau = \omega/(0.0061 + 0.0081\omega)$	107.60	123.46	0.872
III	50	$\tau = \omega/(0.015 + 0.030\omega)$	30.95	33.56	0.922	III	50	$\tau = \omega/(0.012 + 0.031\omega)$	30.15	31.95	0.944
	100	$\tau = \omega/(0.013 + 0.015\omega)$	58.72	68.49	0.857		100	$\tau = \omega/(0.012 + 0.015\omega)$	57.61	65.79	0.876
	150	$\tau = \omega/(0.0081 + 0.0099\omega)$	87.76	101.01	0.869		150	$\tau = \omega/(0.0081 + 0.010\omega)$	86.81	100.00	0.868
	200	$\tau = \omega/(0.0062 + 0.0075\omega)$	114.74	133.33	0.861		200	$\tau = \omega/(0.0060 + 0.0077\omega)$	112.68	129.87	0.868
IV	50	$\tau = \omega/(0.012 + 0.0303\omega)$	31.58	33.00	0.957	IV	50	$\tau = \omega/(0.011 + 0.031\omega)$	30.95	31.85	0.972
	100	$\tau = \omega/(0.010 + 0.015\omega)$	61.10	68.49	0.892		100	$\tau = \omega/(0.010 + 0.015\omega)$	60.62	68.03	0.891
	150	$\tau = \omega/(0.0086 + 0.0095\omega)$	90.14	105.26	0.856		150	$\tau = \omega/(0.0072 + 0.0099\omega)$	89.82	101.01	0.889
	200	$\tau = \omega/(0.0064 + 0.0073\omega)$	117.91	136.99	0.861		200	$\tau = \omega/(0.0062 + 0.0075\omega)$	116.80	133.33	0.876

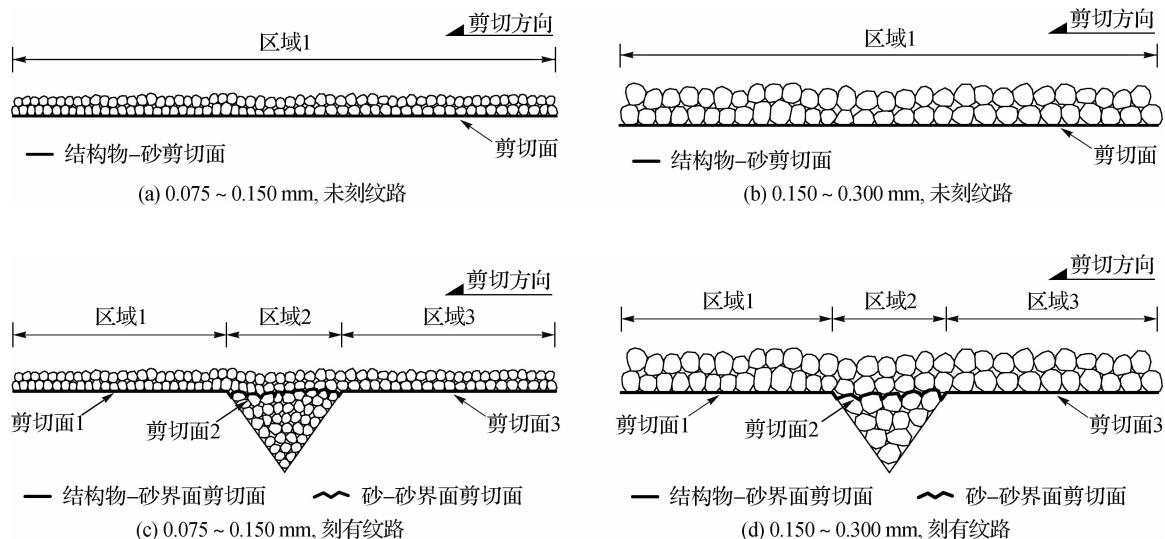


图 6 结构物-砂剪切面形成示意图

Fig. 6 Illustration of shear surface formation of interface between construction materials and sand

从图 6~7 可以看出:①对于未刻纹路的结构物-砂界面剪切:界面剪切的初始状态如图 7(a)所示,区域 D 表示结构物-砂的接触区,即图中的□部分,随着下剪切盒的向右移动,结构物-砂的接触区域向左移动,如图 7(b)所示,界面的剪切面因发生在结构物的表面,上剪切盒中的砂通过滑动或滚动的方式相对结构物运动,故对于未刻纹路的结构物-砂界面,其实际剪切面为一移动的水平面,如图 6 中区域 1 所示的粗实线,对于粒组 I 和粒组 II 来说,实际剪切面的性状是类似的。②对于刻有纹路的结构物-砂界面剪切:界面剪切的初始状态如图 7(c)所示,区域 E 表示进入纹路中的砂与上剪切盒中砂的接触区域,即图中的■部分。随着下剪切盒的向右移动,初始剪切区域相对下盒向左移动,移动到某一状态时,形成了新的剪切区域(实线圆),把实心圆与虚线圆(初始剪切区域)相交的部分定义为区域 B,把实心圆中剩余的部分定义为区域 A,

把虚线圆中剩余的部分定义为区域C,如图7(d)所示,这样上盒中的部分砂就进入到区域A的纹路中,留在区域C纹路中的砂将不参与界面剪切,如图7(d)中 $\square$ 部分。对于刻有纹路的结构物-砂界面剪切来说,抗剪强度由区域D、区域E及区域D与区域E交界处的棱角等三部分提供,区域D剪切面因受到结构物表面的限制,为一水平面,如图6所示区域1和区域3中的剪切面1和剪切面3;对于区域E,由于纹路为倒置三角形,宽度为1.0~1.2 mm,深度为0.8~1.1 mm,对于粒径在0.075~0.150 mm和0.150~0.300 mm的砂,会有部分砂颗粒进入到纹路中,如图6所示的区域2,进入到区域2中的砂颗粒因在剪切过程中受到上部法向力作用被嵌锁在纹路中,与上部剪切盒中的砂发生界面剪切,这样剪切面就不再是区域D形成的水平面,而是形状一直在变化的曲形剪切面,这是因为上盒中的砂相对下盒一直向左移动,在纹路中运动时,就与纹路中的砂产生相互的错动、滚动现象,在纹路处的剪切类似于砂的直剪;对于区域D与区域E交界处的棱角,当砂从区域D进入到区域E或从区域E进入到区域D时会受到两个交界处棱角提供的阻力,导致砂产生翻转或滚动进入到区域E或区域D,在两个区域交界处产生的抗剪强度可以认为是结构物表面粗糙度引起的,故对于刻有纹路的界面剪切强度可认为由结构物-砂界面剪切强度、砂-砂界面剪切强度及粗糙度引起的抗剪强度等三部分组成。

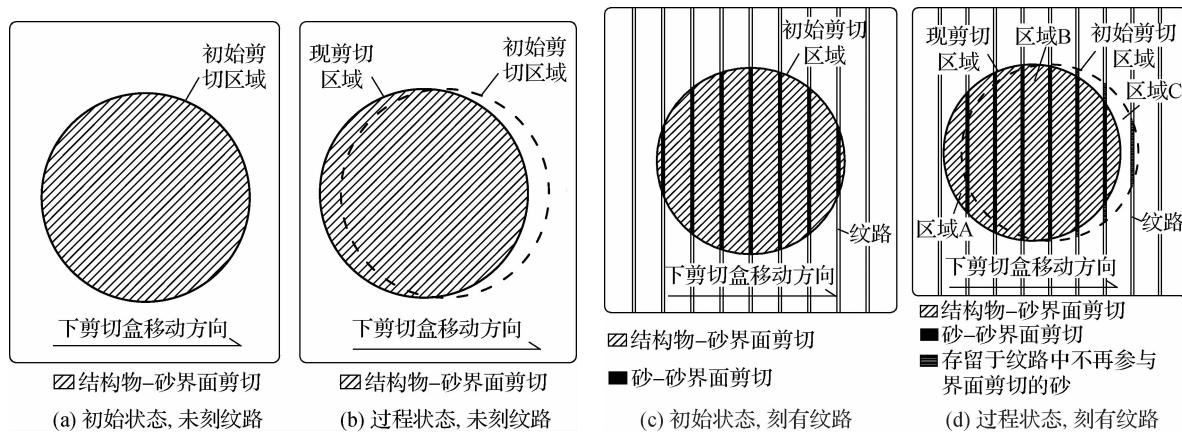


图7 结构物-砂界面剪切面构成示意图

Fig. 7 Illustration of shear surface formation of interface between construction materials and sand

因刻有相同数量纹路的钢块和混凝土的平均灌砂深度并不相同,部分不同数量纹路的钢板和混凝土板的平均灌砂深度又比较接近,故对不同材料试块峰值剪切应力与平均灌砂深度的关系进行研究,并将两者的关系绘于图8中。

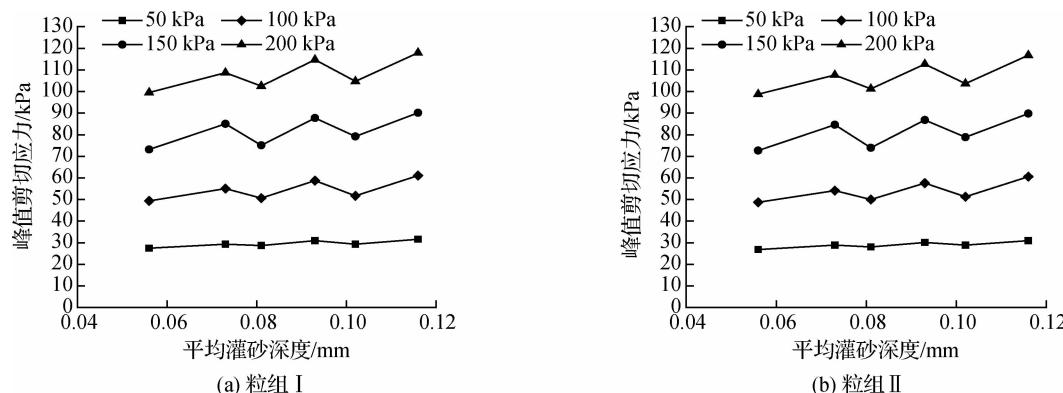


图8 结构物-砂界面峰值剪切应力与平均灌砂深度关系

Fig. 8 Relationships of peak shear strength and average sand filling depth of interface between construction materials and sand

从图8可以看出:①粒组I和粒组II在同一法向应力同一灌砂深度条件下的峰值剪切应力比较接近,故两个图的规律完全一致。②在同一法向应力条件下,相同试块的峰值剪切应力随着灌砂深度的增加而增加,但不同试块的峰值剪切应力并未随灌砂深度的增加一直增加,出现交替增加和减小的现象,在50 kPa时这种现象不太明显,但随法向应力的增加这种现象愈发明显,如平均灌砂深度为0.083 mm和0.102 mm钢板的峰值剪切应力均小于平均灌砂深度为0.073 mm混凝土板的峰值剪切应力,可见界面抗剪强度与粗糙度和材料本身属性有很大关系。

## 2.2 界面抗剪强度指标变化规律

采用Mohr-Coulomb抗剪强度破坏公式,对峰值剪切应力和法向应力关系进行线性拟合,求得界面摩擦角,如图9和10。

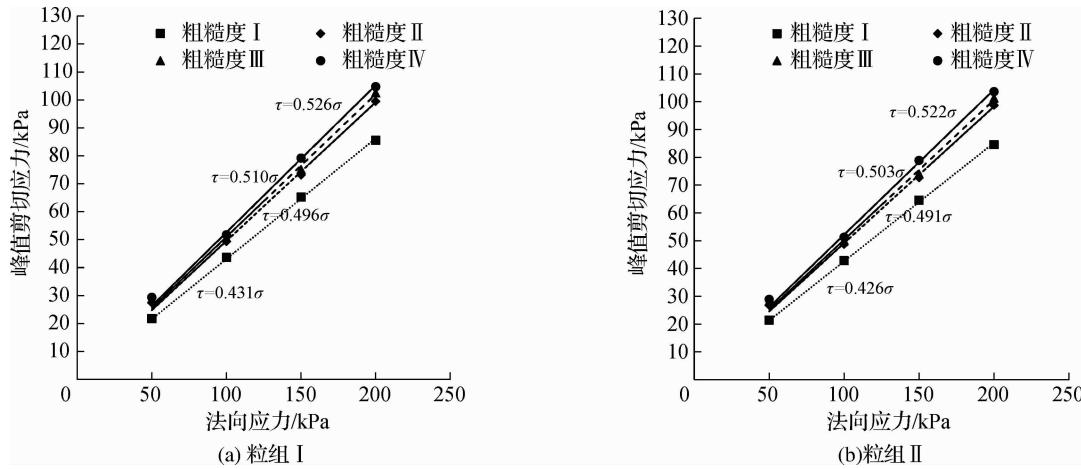


图9 钢-砂界面峰值剪切应力与法向应力关系

Fig. 9 Relationships of peak shear strength and normal stress of interface between steel and sand

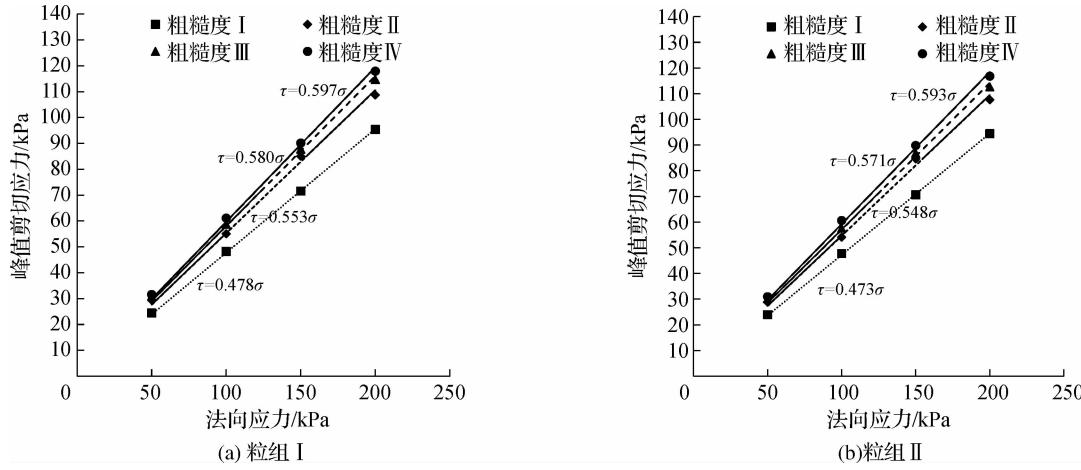


图10 混凝土-砂界面峰值剪切应力与法向应力关系

Fig. 10 Relationships of peak shear strength and normal stress of interface between concrete and sand

从图9和10可以看出:①在同一粒组条件下,界面摩擦角随粗糙度增大而增加,且界面摩擦角从粗糙度I到粗糙度II的增加值最大,从粗糙度II到粗糙度IV增加较小,这与峰值剪切应力随粗糙度的变化规律一致,可见界面粗糙程度显著提高了结构物-砂界面的界面摩擦角。②在同一粗糙度条件下,粒组I和粒组II界面摩擦角比较接近,但是粒组I要较粒组II略大,这和峰值剪切应力在不同粒组下变化规律一致,其原

因如前所述。③ 钢和混凝土两种材料的属性不同,导致两种界面的界面摩擦角有所不同,混凝土-砂界面摩擦角要大于钢-砂界面摩擦角,其中钢-砂界面摩擦角集中在 $23^\circ \sim 28^\circ$ ,而混凝土-砂界面摩擦角集中在 $25^\circ \sim 31^\circ$ 。

基于图 6~7 的分析,刻有纹路的界面剪切强度由结构物-砂界面剪切强度、砂-砂界面剪切强度及结构物表面粗糙度引起的抗剪强度等三部分组成,那么界面摩擦角就被分成了三部分:区域 D 的摩擦角  $\Phi_1 = \text{未刻纹路界面摩擦角} \times \text{区域 D 占总剪切面积的比例 } c$ ;区域 E 的摩擦角  $\Phi_2 = \text{砂内剪的摩擦角} \times \text{区域 E 占总剪切面积的比例 } d$ ;结构物表面刻纹路产生的摩擦角  $\Phi_3 = \Phi - \Phi_1 - \Phi_2$ 。为对上述分析进行验证,分别计算刻有纹路的三部分摩擦角,如表 5 所示,其中未刻纹路结构物-砂界面摩擦角为  $\Phi_c$ ,砂-砂界面摩擦角为  $\Phi_d$ 。可以看出:(1) 钢-砂界面的  $\Phi_1$  集中在 $20^\circ \sim 23^\circ$ ,混凝土-砂界面的  $\Phi_1$  集中在 $22^\circ \sim 24^\circ$ , $\Phi_1$  随着粗糙度的增大而减小,因为随着粗糙度的增加,区域 D 的面积随之减小;粒组 I 的  $\Phi_1$  较粒组 II 的略大;混凝土-砂界面的  $\Phi_1$  大于钢-砂界面。(2) 钢-砂界面的  $\Phi_2$  集中在 $1^\circ \sim 4^\circ$ ,混凝土-砂界面的  $\Phi_2$  集中在 $2^\circ \sim 4^\circ$ , $\Phi_2$  随着粗糙度的增大而增加,因为区域 E 的面积随粗糙度增加不断增大;粒组 I 的  $\Phi_2$  较粒组 II 的略小;在同一粒组同一粗糙度条件下,混凝土-砂界面的  $\Phi_2$  略大于钢-砂界面,因为混凝土所刻纹路的宽度略大,导致区域 E 略大。(3) 钢-砂界面的  $\Phi_3$  集中在 $2^\circ \sim 4^\circ$ ,混凝土-砂界面的  $\Phi_3$  集中在 $2^\circ \sim 5^\circ$ , $\Phi_3$  随粗糙度的增大而增加,因为结构物表面的纹路数量随着粗糙度增加;粒组 I 的  $\Phi_3$  与粒组 II 差别不大;钢-砂界面的  $\Phi_3$  小于混凝土-砂界面。

表 5 界面摩擦角组成

Tab. 5 Composition of the interfacial friction angle

结构物	粒组/mm	粗糙度	$\Phi/^\circ$	$\Phi_c/^\circ$	$\Phi_d/^\circ$	c/%	d/%	$\Phi_1/^\circ$	$\Phi_2/^\circ$	$\Phi_3/^\circ$
钢	0.075~0.150	II	26.37	23.33	33.6	94.6	5.4	22.07	1.81	2.49
		III	27.03	23.33	33.6	91.5	8.5	21.35	2.86	2.83
		IV	27.75	23.33	33.6	89.3	10.7	20.83	3.60	3.32
	0.150~0.300	II	26.17	23.08	33.9	94.6	5.4	21.83	1.83	2.51
		III	26.72	23.08	33.9	91.5	8.5	21.12	2.88	2.72
		IV	27.55	23.08	33.9	89.3	10.7	20.61	3.63	3.31
混凝土	0.075~0.150	II	28.94	25.55	33.6	93.7	6.3	23.94	2.12	2.88
		III	30.13	25.55	33.6	90.9	9.1	23.22	3.06	3.85
		IV	30.85	25.55	33.6	88.5	11.5	22.61	3.86	4.37
	0.150~0.300	II	28.70	25.3	33.9	93.7	6.3	23.71	2.14	2.86
		III	29.73	25.3	33.9	90.9	9.1	23.00	3.08	3.65
		IV	30.65	25.3	33.9	88.5	11.5	22.39	3.90	4.36

### 3 结语

(1) 峰值剪切应力随粗糙度增大而增加,且峰值剪应力的增幅在粗糙度 I 到粗糙度 II 区间最大;粒组 I 的峰值剪应力略大于粒组 II,因为粒组 I 与粒组 II 比较,其与结构物接触面积较大;混凝土-砂界面峰值剪切应力要大于钢-砂界面的对应值。

(2) 结构物-砂界面剪切应力-剪切位移关系可用双曲线模型进行描述,试验峰值剪切应力和模型峰值剪切应力的比值为 $0.85 \sim 0.95$ 。

(3) 对于未刻纹路的结构物-砂界面剪切面为一移动的水平面;对于刻有纹路的结构物-砂界面剪切面由间断的水平剪切面和动态曲形剪切面构成。

(4) 界面摩擦角随粗糙度增大而增加,且在粗糙度 I 到粗糙度 II 区间增幅最大;粒组 I 的界面摩擦角较粒组 II 略大,钢-砂界面摩擦角集中在 $23^\circ \sim 28^\circ$ ,混凝土-砂界面摩擦角集中在 $25^\circ \sim 31^\circ$ 。

(5) 刻有纹路的结构物-砂界面摩擦角由未刻纹路区域的摩擦角  $\Phi_1$ 、刻有纹路区域的摩擦角  $\Phi_2$  及两个区域交界处产生的摩擦角  $\Phi_3$  三部分组成。

## 参 考 文 献:

- [1] 夏红春, 周国庆. 土-结构接触面剪切力学特性及其影响因素试验[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 831-836.  
(XIA Hongchun, ZHOU Guoqing. Experimental study of the shear mechanical characteristics at a soil-structure interface and the factors affecting them[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(6): 831-836. (in Chinese))
- [2] MORTARA G, FERRARA D, FOTIA G. Simple model for the cyclic behavior of smooth sand-steel interface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 1004-1009.
- [3] 田建勃, 韩晓雷, 刘江元. 砂土与混凝土接触面力学特性大型单剪试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(7): 110-114.  
(TIAN Jianbo, HAN Xiaolei, LIU Jiangyuan. Large-scale simple shear test on mechanical properties of interface between sandy soil and concrete face[J]. Industrial Construction, 2012, 42(7): 110-114. (in Chinese))
- [4] 陆勇, 周国庆, 夏红春, 等. 接触面力学特性中相对尺度效应的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(2): 169-176.  
(LU Yong, ZHOU Guoqing, XIA Chunhong, et al. Effect of relative scale to mechanical characteristics of interface[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(2): 169-176. (in Chinese))
- [5] 徐超, 陈洪帅, 石志龙, 等. 筋-土界面力学特性的水平循环剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1553-1559.  
(XU Chao, CHEN Hongshuai, SHI Zhilong, et al. Research on the mechanical behavior of soil-reinforcement interface by horizontal cyclic shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1553-1559. (in Chinese))
- [6] 王军, 林旭, 刘飞禹, 等. 砂土与格栅界面相互作用的直剪试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊1): 113-120.  
(WANG Jun, LIN Xu, LIU Feiyu, et al. Research on interaction of geogrid and sand interface by direct shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Suppl1): 113-120. (in Chinese))
- [7] 梁越, 储昊, 卢孝志, 等. 钢-土界面剪切规律时效性室内试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(1): 28-32.  
(LIANG Yue, CHU Hao, LU Xiaozhi, et al. Experimental studies on time effect of shearing characteristics of steel-soil interface[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1): 28-32. (in Chinese))
- [8] LIU F Y, WANG P, GENG X, et al. Cyclic and post-cyclic behaviour from sand-geogrid interface large-scale direct shear tests [J]. Geosynthetics International, 2015, 23(2): 1-11.
- [9] 赵联桢, 陈生水, 杨东全, 等. 冻砂土-结构接触面恒温循环剪切性能研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(1): 93-99.  
(ZHAO Lianzhen, CHEN Shengshui, YANG Dongquan, et al. Cyclic shear property studies on frozen silt-structure interface under constant temperature[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 93-99. (in Chinese))
- [10] 肖杰, 屈文俊, 朱鹏, 等. 砂土与硫酸腐蚀混凝土接触面剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2613-2620.  
(XIAO Jie, QU Wenjun, ZHU Peng, et al. Experimental study of interface shear behaviors between sand and concrete corroded by sulfuric acid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2613-2620. (in Chinese))
- [11] 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.
- [12] GU X, CHEN Y, HUANG M. Critical state shear behavior of the soil-structure interface determined by discrete element modeling[J]. Particuology, 2017, 35: 68-77.
- [13] 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))
- [14] 赵志方, 赵国藩. 采用高压水射法处理新老混凝土粘结面的试验研究[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(4): 558-561.  
(ZHAO Zhifang, ZHAO Guofan. Experimental research on treating interface of young on old concrete with high-pressure water-jet method[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, 39(4): 558-561. (in Chinese))
- [15] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(12): 1657-1673.

## Effects of roughness on shear properties of structure-sands interface

GUO Jukun<sup>1,2</sup>, LEI Shengyou<sup>1</sup>, WEI Daokai<sup>2</sup>, KOU Hailei<sup>3</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Highway and Architecture, Shandong Transport Vocational College, Weifang 261206, China; 3. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The shear properties of the interface between the underlying foundation and soil are very important for the safe construction of the entire structure. Sandy soil layers are common in the upper soil layer of the foundation, and the particle size of sand and surface roughness of the foundation will affect the mechanical properties of the pile foundation. It is very important to study the shaft resistance of the sand strata. In order to investigate the interface shear strength, interface shear strength index with different particle sizes of sands, different roughnesses and different normal stresses, the interface shear tests on sands having particle sizes of 0.075 ~ 0.150 mm and 0.150 ~ 0.300 mm with rough steel plate and concrete plate are performed by using an improved direct shear apparatus. The testing results indicate that the interface shear stress-displacement relationships can be described by a hyperbolic model. The ratio between the peak shear stress of the test and the peak shear stress of the model ranges from 0.85 to 0.95. The peak value of the measured shear stress increases with normal stress and roughness. The peak shear stress of the particle size I is slightly larger than that of the particle size II. The peak shear stress of the interface between concrete and sands is larger than that of the steel-sands interface. The shear surface for the sand-structure interface without engraved lines is a moving horizontal plane, while the shear surface for the sand-structure interface with engraved lines is composed of discontinuous horizontal shear planes and dynamic curved shear surfaces. The interface friction angle increases with roughness. The shear strength index of the particle size I is slightly larger than that of the particle size II. The friction angle for the sand-steel interface ranges from 23° to 28°, and the friction angle for the concrete-steel interface ranges from 25° to 31°. The research and analysis results can provide an experimental reference for shaft resistance estimation and numerical simulation of the sand strata.

**Key words:** sand; roughness; particle size; shear surface; interface friction angle