

考虑粗糙度和相对密实度下砂土-混凝土 桩接触面力学特性试验研究

陈琛¹, 冷伍明^{1,2}, 杨奇^{1,2†}, 徐方^{1,3}, 魏丽敏^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙, 410075;

2. 中南大学重载铁路工程结构教育部重点实验室, 湖南 长沙, 410075;

3. 湖南铁院土木工程检测有限公司, 湖南 长沙, 410075)

摘要:为探究粗糙度和土体相对密实度对砂土-混凝土桩接触面力学特性的影响规律, 利用大型直剪仪开展了不同粗糙度、相对密实度下的砂土-混凝土接触面直剪试验, 分析了粗糙度、相对密实度对砂土-混凝土接触面的剪切应力-切向位移、峰值剪切强度、割线摩擦角、归一化摩擦系数的影响. 研究表明: 密砂的剪切应力-切向位移曲线在光滑接触面下呈轻微软化型, 随粗糙度增加, 软化越明显; 松砂的剪切应力-切向位移曲线始终呈硬化型. 界面峰值剪切强度随法向应力增加呈非线性增长, 土体相对密实度越大, 非线性越明显. 接触面割线摩擦角随法向应力增加呈指数衰减, 而由于剪切强度增量较小, 导致接触面峰值摩擦系数随法向应力增加呈幂函数衰减. 存在临界粗糙度 I_{cr} , 当 $I > I_{cr}$ 时, 接触面峰值摩擦系数和归一化割线摩擦角不再随粗糙度增大而增加, 而是呈减小趋势.

关键词: 砂土-混凝土接触面; 大型直剪试验; 粗糙度; 相对密实度; 峰值剪切强度; 割线摩擦角

中图分类号: TU 411

文献标志码: A

Experimental Study on Mechanical Properties of Sand-concrete Pile Interface Considering Roughness and Soil Relative Densities

CHEN Chen¹, LENG Wuming^{1,2}, YANG Qi^{1,2†}, XU Fang^{1,3}, WEI Liming^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. MOE Key Laboratory of Engineering Structures of Heavy Haul Railway, Central South University, Changsha 410075, China;

3. Hunan Tieduan Civil Engineering Testing Co., Ltd, Changsha 410075, China)

Abstract: To investigate the effect law of surface roughness and soil relative density on the mechanical properties of sand-concrete pile interface, a series of sand-concrete interface tests with various surface roughness and soil relative densities were conducted by the large-scale direct shear apparatus. This study investigated the influence of

* 收稿日期: 2022-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978672; 51878671), National Natural Science Foundation of China(51978672; 51878671); 中南大学研究生创新项目(2017zzts159), Graduate Innovation Program of Central South University(2017zzts159); 杭枢指合(2021)92号, Hangshu Zhihe(2021)92; 湖南铁院土木工程检测有限公司开发课题, The Open Research Project of the Hunan Tieduan Civil Engineering Testing Co., Ltd.

作者简介: 陈琛(1989—), 男, 湖南长沙人, 中南大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail: qiyang123@csu.edu.cn

roughness and soil relative density on shear stress–horizontal displacement, peak shear strength, secant friction angle, and normalized friction coefficient. The results showed that in the case of the smooth interface, the shear stress–horizontal displacement curves of the dense sand sample illustrated a slight softening response, and softening response became remarkable as the roughness increased. The curves of the loose sand sample showed a hardening response. Moreover, the peak shear strength of the interface increased nonlinearly with the increase of normal stress. And the greater the soil relative density, the more obvious the nonlinearity. The secant friction angle of the interface decayed exponentially with increasing normal stress. However, the peak friction coefficient decreased as a power function with the increasing normal stress due to the smaller shear strength increment. Additionally, there existed a critical value of roughness I_{cr} , such that the peak friction coefficient and normalized secant friction angle no longer increased as the roughness increased and turned to decrease when I exceeded I_{cr} .

Key words: sand–concrete interface; large-scale direct shear test; roughness; relative density; peak shear strength; secant friction angle

土体–结构物接触面相互作用问题广泛存在于实际工程中,如边坡挡墙支护、土钉、土工格栅–土体、桩土接触等^[1–4].土体–结构物的相互作用在很大程度上是通过接触面的荷载传递来实现的.一直以来,关于土体–结构物接触面力学特性的研究被认为是解决土体–结构物二者相互作用问题的基础.其中涉及的非线性、大变形和局部不连续等力学问题,也是岩土工程中的难点和热点问题.因此,开展对土体–结构物接触面力学特性的研究既有理论意义又有工程应用价值.

国内外学者利用直剪、环剪等试验手段和DEM等数值仿真计算,就粗糙度、材料硬度、相对密实度、颗粒集配、磨圆度、含水率和法向应力等因素对土–结构物接触面力学特性的影响开展了诸多研究^[5–10].在诸多影响因素中,接触面粗糙度一直被认为是影响界面剪切强度的重要因素之一,并得到广泛的关注.界面粗糙度被定义为“随机型”和“结构型”两类.对于“随机型”粗糙度,Uesugi等^[11]开展了砂土–混凝土接触面的直剪、单剪试验,研究发现接触面相对粗糙度存在临界值,接触面摩擦系数并非随相对粗糙度一直呈线性递增关系,当粗糙度大于该临界值时,摩擦因素将趋于砂土自身摩擦系数.Frost和Han^[12]通过直剪仪和改良的界面剪切设备,开展了砂土–纤维聚合物界面剪切特性的研究,研究发现结构物表面粗糙度、法向应力、初始密实度和颗粒形态对剪切强度有较大影响,而剪切速率和试样厚度则影响较小.Dove和Frost^[13]开展了渥太华砂、玻璃珠–聚乙烯土工膜界面剪切试验,基于接触力学和摩擦理论探究了颗粒形态、材料硬度对剪切机制的影响,结果表

明材料表面的粗糙度与材料硬度存在相互耦合,共同影响接触面力学特性,在高法向应力下的软质表面,不可忽视颗粒形态所产生的“犁滑作用”对剪切强度的贡献.Han等^[14]利用界面直剪实验开展了接触面粗糙度、颗粒几何形态和集配对砂土–不同锈蚀程度钢板接触面摩擦角的影响研究.对于“结构型”粗糙度,Hryciw和Irsyam^[15]开展了砂土–带肋钢板接触面的直剪试验,研究发现存在最优的肋间距,既可避免剪切中颗粒堵塞凹槽,又可以充分调动土体参与变形协调而形成“被动阻力”.Chen等^[16]基于规则型粗糙度的形态特征提出了改进的灌砂法来量定界面粗糙度,利用大型直剪仪开展了红黏土–混凝土接触面界面剪切试验,试验结果表明粗糙度对界面剪切强度有显著影响,接触面峰值强度随粗糙度增加而增大.

现场试验表明土体的相对密实度对土体–结构物的摩擦阻力产生较大的影响,对于灌注桩和连续墙等结构尤其如此^[17–20].目前,有关相对密实度对土体–结构物接触面力学特性影响的研究如下:Fakharian等^[21]通过直剪仪开展了不同密实度下砂土–粗糙钢板力学特性研究,研究发现初始密实度、法向应力和恒定的法向刚度对接触面摩阻力和破坏时剪切位移有较大影响,并就不同密实度下滑动摩擦、剪切破坏发生阶段与剪切应力–切向位移曲线对应关系进行了定量划分;O’rourke等^[22]利用大型直剪仪,研究了土体密实度对砂土–聚合物界面特性的影响;王军等^[23]通过大型单调直剪、循环直剪试验研究不同密实度下的砂土–格栅界面剪切特性,发现密砂–格栅

界面发生剪切软化现象,密实度增加会提高筋土界面抗剪强度,剪胀增强.综上所述,尽管有不少学者开展了界面粗糙度对土体-结构物接触面剪切特性影响的研究,但试验中所设计的结构物凹凸深度较小(0.001~10 mm),且与实际工程中结构物粗糙度缺乏关联,难以表征和模拟如灌注桩、地下连续墙等结构物表面粗糙度.此外,对于相对密实度的研究,现有文献缺乏系统和清晰的认知.“规则型”混凝土表面粗糙度与相对密实度对砂土-混凝土接触面力学特性的影响研究鲜有报道.

鉴于此,本文利用现场钻孔灌注桩的粗糙度分布概率,基于灌砂法基本原理,构建了表面光滑和规则型粗糙混凝土板来模拟实际桩侧表面粗糙度.开展了不同密实度下砂土-混凝土接触面的大型直剪试验,研究了粗糙度、相对密实度对砂土-混凝土接触面剪切应力-切向位移关系、峰值剪切强度、割线摩擦角、峰值界面摩擦系数等影响规律.试验成果对深入了解土体-混凝土接触面力学特性、构建土体-结构物接触面本构模型具有重要意义.

1 试验方案

1.1 试验设备

试验采用位于高速铁路建造技术国家研究中心实验室内的大型直剪仪.仪器主要由4个部分组成,分别是液压伺服单元、测控单元、加载单元、制作单元,如图1所示.该设备采用全数字环闭控制系统,可实现自动化采集数据.上、下剪切盒尺寸长×宽×高为:500 mm×500 mm×150 mm.在进行界面直剪试验时,以结构物替换下剪切盒,安置在由钢板、螺杆和螺母组成的结构物升降板上,通过调节高度使结构物与上剪切盒贴合,如图2所示.

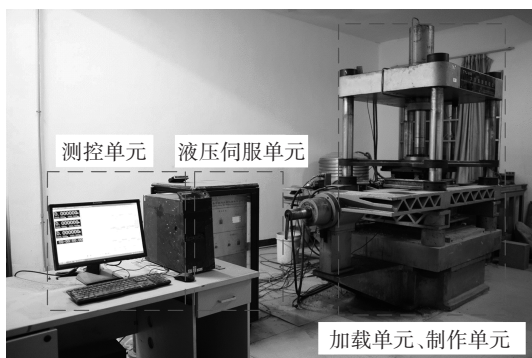


图1 大型界面直剪仪器主要单元

Fig. 1 Main element of large-scale shear apparatus

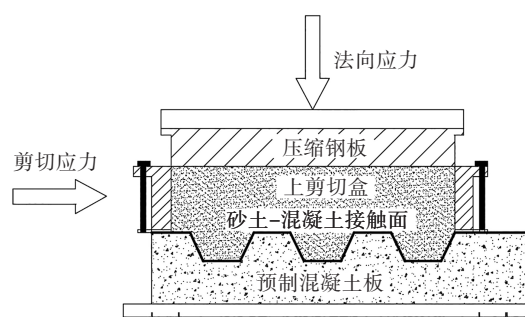


图2 砂土-混凝土接触面示意图

Fig. 2 Schematic view of cross section of sand-concrete interface

1.2 试验材料制备

1.2.1 砂土

试验用土为湖南湘江河砂,级配曲线如图3所示.依据颗粒分析试验和美国规范 ASTM D2487-17e1^[24] 确定为粗砂,平均粒径 $D_{50}=0.75$,最大孔隙比 $e_{\max}=0.73$,最小孔隙比 $e_{\min}=0.43$,相对密度 $G_s=2.55$,砂土试样含水率 w 为 12%.详细基础物理参数如表1所示.

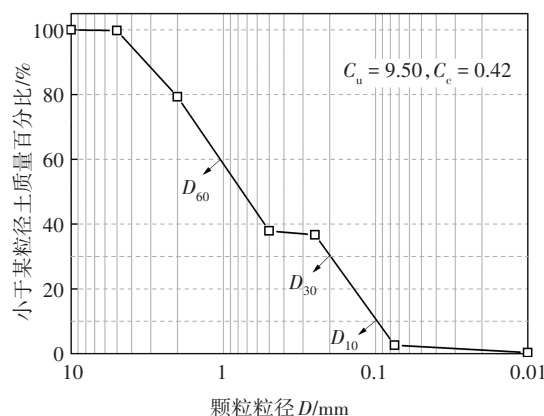


图3 湘江河砂级配曲线

Fig. 3 Particle size distribution of Xiangjiang River sand

表1 湘江河砂基础物理力学参数

Tab. 1 Basic physical and mechanical properties of Xiangjiang River sand

物理参数	数值	物理参数	数值
D_{10}/mm	0.11	曲率系数 C_c	0.42
D_{30}/mm	0.198	最大孔隙比 e_{\max}	0.73
D_{50}/mm	0.75	最小孔隙比 e_{\min}	0.43
D_{60}/mm	1.24	相对密度 G_s	2.55
不均匀系数 C_u	9.50	含水率 $w/\%$	12

为探究密实度对砂土-混凝土接触面力学特性的影响,设置相对密实度 D_r 为 73%、47% 和 23% 分别

对应密实、中密和松砂 3 种状态. 为保证试验中砂土试样的相对密实度, 推导出填筑砂样质量 m_s 与相对密实度 D_r 、试样体积 v 的关系式, 可表示为:

$$m_s = 2.55v / (1.73 - 0.3D_r) \tag{1}$$

预设试样初始相对密实度为 73%、47% 和 23%, 对应孔隙率为 0.51、0.59、0.66, 根据混凝土板凹槽尺寸和上剪切盒体积计算得到试样填装质量.

1.2.2 混凝土板

根据文献[5]中的方法, 基于现场钻孔灌注桩孔径检测结果, 统计得到桩径与径向凸出尺寸的总体分布概率, 利用灌砂法来建立桩侧粗糙度 I 与径向凸出尺寸的关系, 计算后选取分布概率较大的粗糙度表征值 10 mm、20 mm、30 mm 作为试验混凝土板的粗糙度值. 为模拟混凝土预制桩表面粗糙度, 制作了一块表面无凹槽的光滑混凝土板; 为模拟灌注桩桩侧表面的粗糙度, 在混凝土板表面设置了梯形凹槽结构, 如图 4 所示. 利用混凝土板槽深 h 与桩侧粗糙度 I 的关系^[5], 得到相应混凝土梯形凹槽对应高度 h 分别为 20 mm、40 mm、60 mm. 采用 C50 混凝土制作长×宽×高为 570 mm×570 mm×100 mm 的混凝土板, 如图 5 所示.

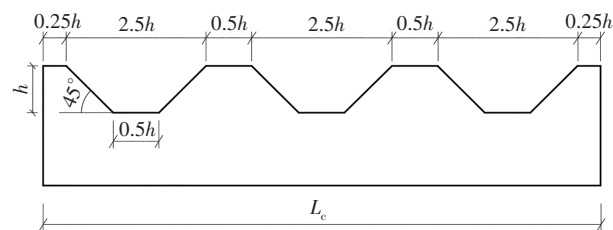


图 4 混凝土板截面尺寸
Fig. 4 Section size of concrete block

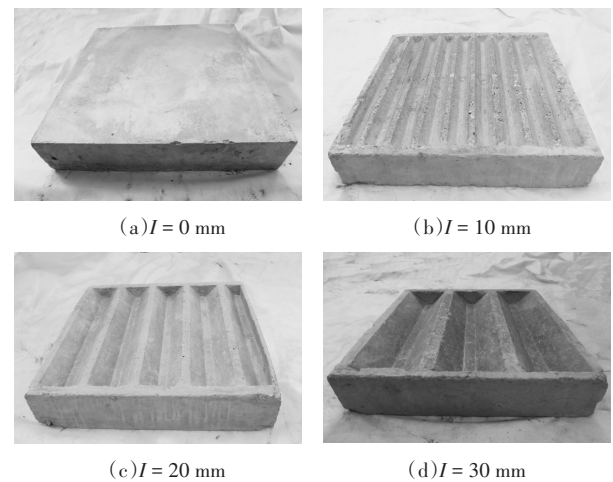


图 5 预制混凝土板试样
Fig. 5 Concrete blocks with different roughness

1.3 试验过程及加载方案

将混凝土板安放在大型直剪仪升降台上, 然后安装上剪切盒, 调节升降台高度使混凝土板上沿与上剪切盒下沿紧挨. 根据公式(1)按照试样的预设相对密实度、混凝土板凹槽尺寸和上剪切盒体积计算得到试样填装质量, 将试样砂土分三层填筑, 依据填筑高度计算得到每次填筑砂土的质量, 利用夯锤逐层压实至指定高度, 以确保均匀和密实, 最终达到设定相对密实度. 一般灌注桩的设计长度小于 60 m, 为贴近实际工程情况, 试验加载的法向应力确定为 50 kPa、150 kPa、250 kPa 和 350 kPa. 剪切过程中, 剪切速率设置为 1.0 mm/min^[25]. 当剪切位移 u 达到 50 mm 时, 终止试验. 具体试验方案见表 2.

表 2 砂土-混凝土接触面直剪试验方案

Tab.2 Testing programs for sand-concrete interface					
试验 编号	槽深/ mm	粗糙度 I /mm	相对密实度 D_r /%	法向应力 σ_n /kPa	试验 组数
I	0	0	73, 47, 23	50, 150, 250, 350	12
II	20	10	73, 47, 23	50, 150, 250, 350	12
III	40	20	73, 47, 23	50, 150, 250, 350	12
IV	60	30	73, 47, 23	50, 150, 250, 350	12
V	—	砂土	73, 47, 23	50, 150, 250, 350	12

2 试验结果及分析

2.1 剪切应力-切向位移

2.1.1 砂土自剪结果

通过大型直剪试验获得不同相对密实度砂土自剪试验结果, 选取密砂、松砂试样的剪切应力-切向位移关系曲线进行对比, 如图 6 所示.

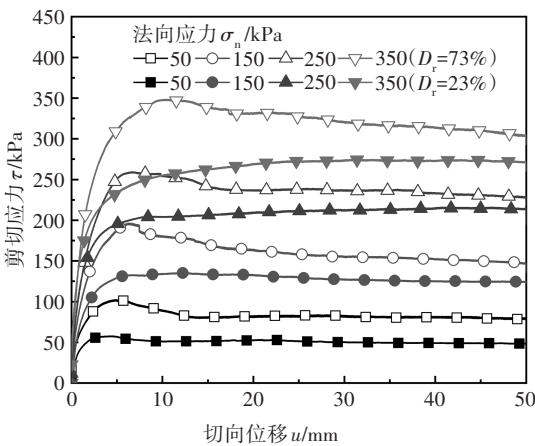


图 6 不同密实度下砂土剪切应力-切向位移变化曲线
Fig. 6 Curves of shear stress - horizontal displacement of sand sample with different densities

由图 6 可知,不同法向应力下密砂的剪切应力-切向位移关系曲线总体呈软化型.剪切应力随切向位移的增加而增大,达到峰值后逐渐衰减,并趋于稳定的残余剪切状态.法向应力越大,峰值强度越大,其对应的切向位移也越大.相反,松砂的剪切应力-切向位移关系曲线表现为硬化型.剪切应力随着切向位移增加在初期增长较快,而后增长速率减缓至 0,剪切应力也随之保持稳定.由此可见,相对密实度对砂土剪切应力-切向位移关系曲线发展形式和剪切强度大小有较大影响.

2.1.2 砂土-混凝土接触面直剪试验结果

通过砂土-混凝土接触面直剪试验,获得密砂、松砂接触面直剪试验的剪切应力-切向位移关系曲线,如图 7 所示.

由图 7 (a)可知,对于光滑接触面,密砂的剪切应力在初期随切向位移增大而近似线性增长,达到峰值后出现轻微衰减,而后保持稳定.剪切应力-切向位移曲线表现为轻微软化型.由图 7(b)~(d)可知,随着粗糙度增加,密砂的剪切应力-切向位移曲

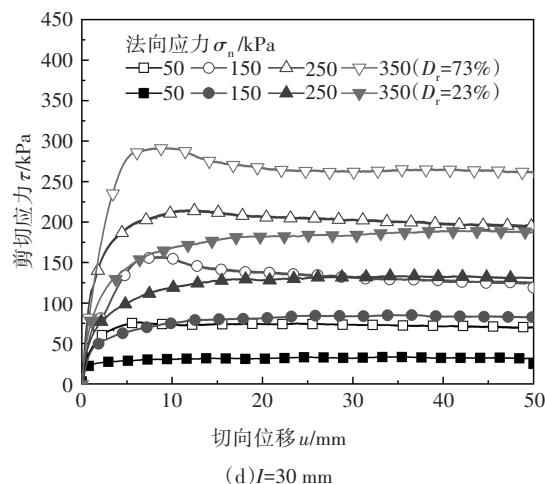
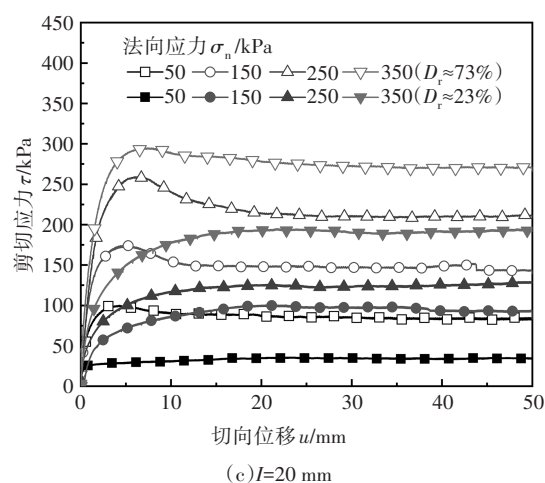
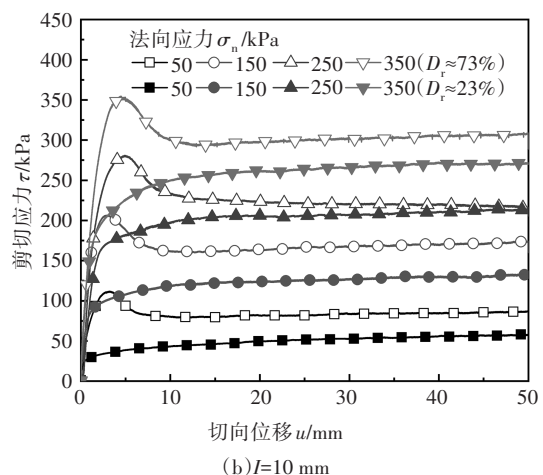
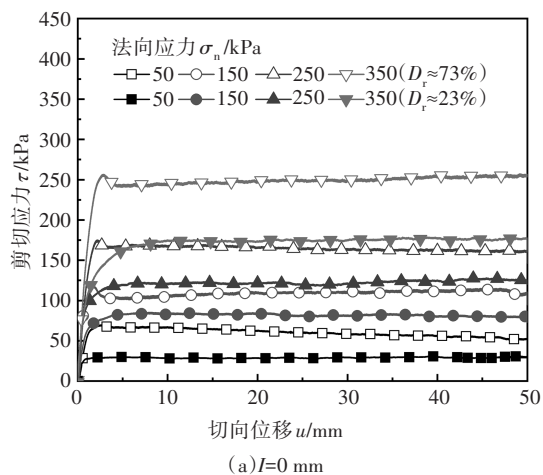


图 7 不同相对密实度下 ($D_r \approx 73\%$, 23%) 砂土-混凝土接触面剪切应力-切向位移变化关系曲线

Fig. 7 Curves of shear stress - horizontal displacement of sand-concrete interface with different relative densities ($D_r \approx 73\%$, 23%)

线转变为明显的软化型.剪切应力达到峰值后,出现明显的峰后衰减,最终趋于稳定状态.此外,粗糙度的增加同时导致剪切应力峰后衰减幅度的降低,即接触面的软化特征随粗糙度增加而减弱.例如当粗糙度 $I = 30$ mm 时,法向应力 50 kPa、150 kPa、250 kPa、350 kPa 对应峰值强度分别为 76.44 kPa、157.24 kPa、214.92 kPa、264.52 kPa,至残余强度的衰减率分别为 8.79%、11.77%、9.32%、3.51%.这与文献[26]所得结论相一致.这说明对密砂而言,接触面粗糙度对剪切应力-切向位移曲线的发展程度影响较大.

相同粗糙度下,密砂达到峰值强度所需切向位移随法向应力的增大而增加.相同法向应力下,密砂达到峰值强度所需切向位移随粗糙度增加而增大.

这是由于粗糙度的增加,导致土体颗粒与结构面接触面积增大,参与剪切过程中变形协调的土体范围也增加,从而达到破坏状态所需要的切向位移亦随之增加.对于松砂,随着粗糙度增加,其剪切应力-切向位移曲线表现出硬化型特征.

综上所述,粗糙度对砂土-混凝土接触面的剪切应力-切向位移曲线的发展形式影响较小,而相对密实度则对该曲线发展形式起主导作用.

2.2 接触面强度指标参数分析

2.2.1 接触面峰值剪切强度

为分析粗糙度和相对密实度对砂土-混凝土接触面剪切强度的影响,对于不同相对密实度下砂土-混凝土接触面的切向位移-剪切应力关系曲线,分别取软化型曲线的峰值强度和硬化型曲线的剪切应力最大值作为接触面的峰值剪切强度,如表3所示.根据表3得到不同相对密实度下接触面峰值剪切强度-法向应力关系曲线,如图8所示.

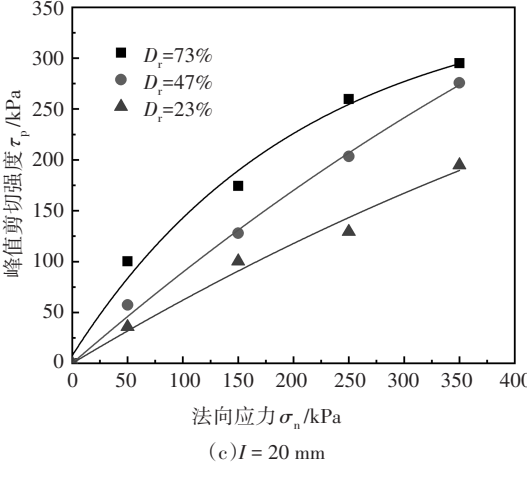
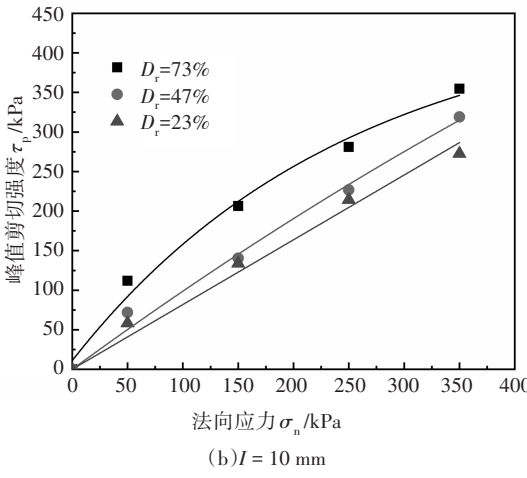
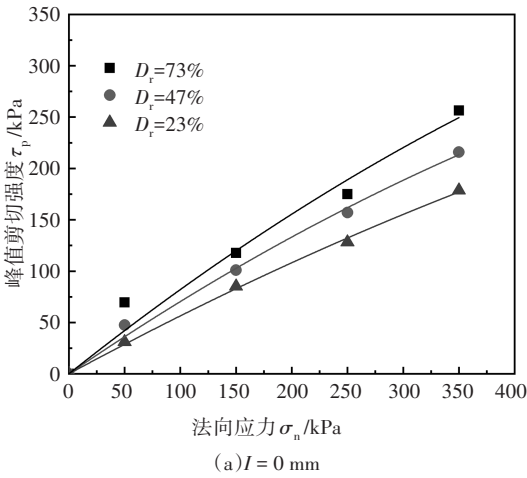
表3 砂土-混凝土接触面峰值剪切强度

Tab. 3 Peak shear strength of sand- concrete interface

粗糙度 <i>I</i> /mm	相对密实度 <i>D_r</i> /%	不同法向应力(kPa)对应的峰值剪切强度/kPa			
		50	150	250	350
0	73	69.6	117.76	175	256.48
	43	47.52	100.96	157.12	215.84
	23	31.12	85.2	128.2	178.68
10	73	111.8	206.36	280.96	354.6
	43	71.8	140.52	226.68	318.88
	23	58.32	133.76	214.24	272.52
20	73	100.36	174.44	259.8	295.12
	43	57.4	128	203.48	275.68
	23	35.84	100.32	129.4	194.84
30	73	76.44	157.24	214.92	264.52
	43	52.6	111.44	180.2	236.24
	23	33.52	85.44	133.56	190.04

由图8可知,在相同粗糙度下,砂土-混凝土接触面峰值剪切强度随法向应力增加近似非线性增长.相对密实度越大,峰值剪切强度非线性增长越明显.Frost和Han^[12]在砂土-纤维聚合物界面直剪试验中也发现类似结论.周国庆等^[27]和Hosseini等^[28]将

这种现象归结于界面土体的剪胀变化.相对密实度较大的土体,剪切过程中颗粒间容易出现破碎,随着法向应力增加,剪胀性减小,颗粒间翻滚、嵌入与摩擦程度降低,导致峰值剪切强度的变化增量减小.此外,同一相对密实度下,接触面峰值剪切强度随法向应力增加所产生的变化增量逐渐降低.例如相对密实度 $D_r=73\%$ 下,法向应力由 50 kPa 增至 350 kPa,粗糙度 $I=10\text{ mm}$ 的峰值剪切强度变化增量分别为 84.57%、36.15%、26.21%.



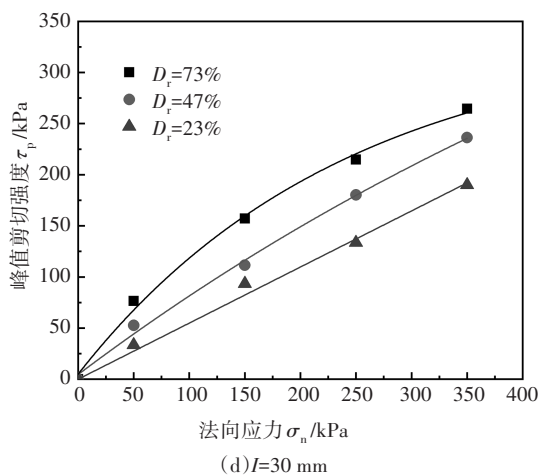


图 8 不同相对密度下接触面峰值剪切强度-法向应力的变化曲线

Fig. 8 Curves of interface peak shear stress-normal stress with different relative densities

相对密度在一定程度上影响砂土-混凝土接触面的剪切强度关系,在理论计算和数值仿真中应根据实际受力情况及土体密实程度、结构物粗糙度等情况构建本构方程^[28].

2.2.2 接触面割线摩擦角

由于不同相对密度下砂土-混凝土接触面峰值剪切强度-法向应力的变化曲线存在一定的非线性,通常采用割线摩擦角 φ_{sec} 来表征接触面的强度指标^[29].由图 8 获得不同相对密度下砂土-混凝土接触面割线摩擦角,通过数据拟合得到接触面割线摩擦角-法向应力的关系曲线,如图 9 所示.拟合曲线相关系数 $R^2 > 0.903\ 1$,相关性较好,割线摩擦角与法向应力的拟合方程可以表示为:

$$\varphi_{\text{sec}} = Ae^{-\sigma_n/B} + C \quad (2)$$

式中: φ_{sec} 为接触面割线摩擦角; σ_n 为法向应力; A 、 B 、 C 为拟合参数,可通过数据回归分析获得.

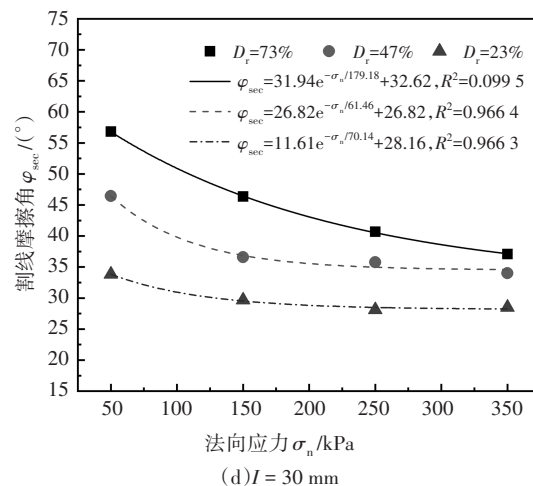
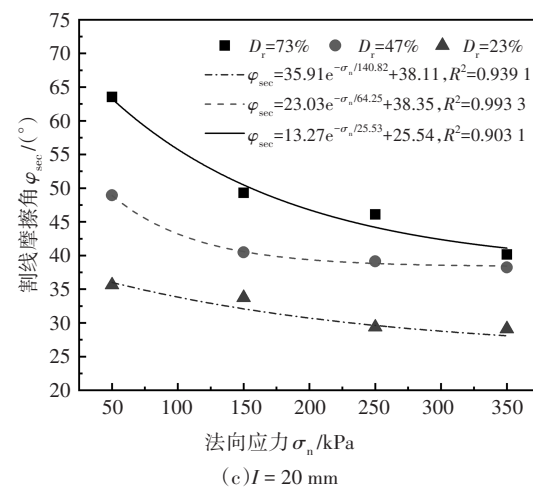
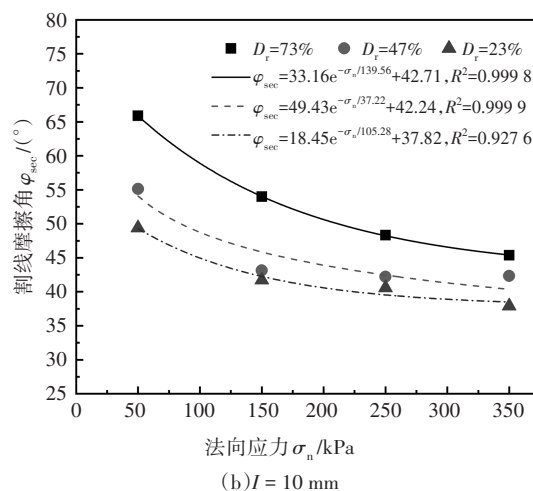
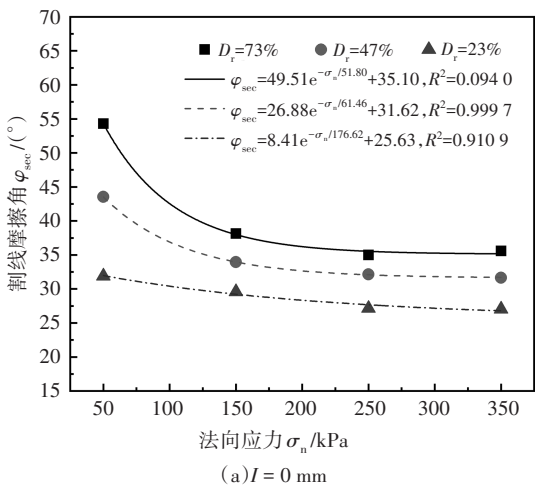


图 9 不同相对密度下割线摩擦角-法向应力的变化曲线

Fig. 9 Curves of secant friction angle - normal stress with different relative densities

分析图 9 可知,在相同粗糙度下,接触面割线摩擦角随法向应力增加近似呈指数衰减,割线摩擦角的衰减速率先增大后变小.例如,当 $I=0$ mm 时,法向应力由 50 kPa 增至 350 kPa, $D_r=73\%$ 试样的割线摩擦角对应的衰减率分别为 22.05%、5.27%、1.52%. 在

相同法向应力下,相对密实度越大,接触面割线摩擦角越大,法向应力增加导致割线摩擦角随相对密实度变化的衰减速率越小。 $I=20\text{ mm}$,法向应力在50 kPa和350 kPa时, $D_r=73\%$ 、 47% 、 23% 对应割线摩擦角衰减速率分别为22.37%、17.28%、5.30%和12.93%、2.32%、0.82%。说明相对密实度降低会减小接触面割线摩擦角对法向应力影响的敏感性。

2.2.3 接触面峰值界面摩擦系数

桩-土接触面力学特性除了可以用峰值剪切强度 τ_p 和接触面割线摩擦角 φ_{sec} 表征外,还可以由界面摩擦系数 μ_p 来反映。为了直观反映法向应力和粗糙度对接触面摩擦系数的影响,本文采用峰值界面摩擦系数 $\mu_p^{[30]}$ 表征砂土-混凝土接触面抗剪强度特性。峰值界面摩擦系数 μ_p 可定义为峰值剪切强度 τ_p 与所施加法向应力 σ_n 的比值,表达式如下:

$$\mu_p = \frac{\tau_p}{\sigma_n} \tag{3}$$

根据表3和公式(3)计算得到不同相对密实度下砂土-混凝土接触面及砂土自剪峰值界面摩擦系数,如表4所示。基于表4结果,采用最小二乘法拟合获得砂土-混凝土接触面及砂土自剪峰值界面摩擦系数与法向应力的变化曲线,如图10所示。拟合相关系数 $R^2 > 0.89$,相关性较好,峰值界面摩擦系数与法向应力的拟合方程可表示为:

$$\mu_p = A\sigma_n^B \tag{4}$$

式中: μ_p 为峰值界面摩擦系数; σ_n 为法向应力; A 、 B 为拟合系数,表征峰值界面摩擦系数 μ_p 随法向应力的增大而衰减的程度。

表4 砂土-混凝土接触面峰值界面摩擦系数

Tab. 4 Peak friction coefficient of sand-concrete interface					
粗糙度	相对密实度	峰值界面摩擦系数 μ_p			
I/mm	$D_r/\%$	50 kPa	150 kPa	250 kPa	350 kPa
0	73	1.39	0.78	0.70	0.73
	47	0.95	0.67	0.62	0.61
	23	0.62	0.57	0.51	0.51
10	73	2.23	1.37	1.12	1.01
	47	1.43	0.93	0.90	0.91
	23	1.17	0.89	0.85	0.78
20	73	2.01	1.16	1.03	0.84
	47	1.14	0.85	0.81	0.78
	23	0.72	0.67	0.52	0.56
30	73	1.53	1.04	0.86	0.75
	47	1.05	0.74	0.72	0.67
	23	0.67	0.57	0.53	0.54
砂土	73	2.04	1.31	1.04	0.99
	47	1.56	0.96	0.93	0.90
	23	1.15	0.90	0.86	0.81

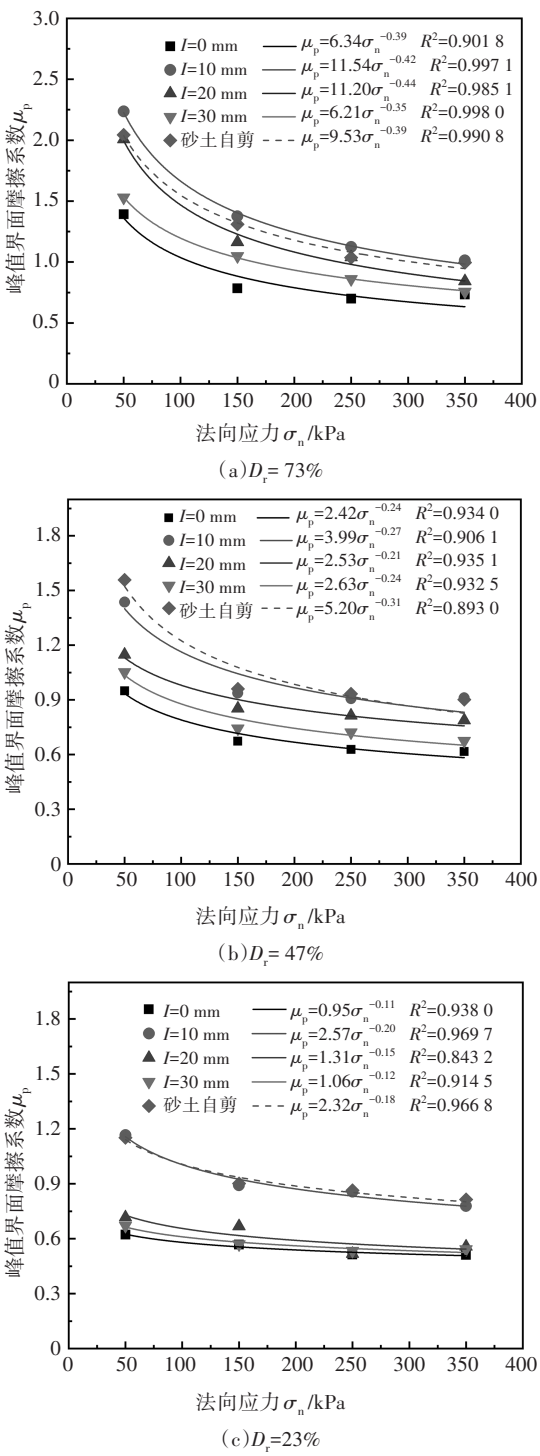


图10 接触面峰值界面摩擦系数-法向应力变化
Fig. 10 Curves of peak friction coefficient-normal stress of the interface

由表4、图10可知,不同相对密实度下峰值界面摩擦系数随法向应力增加近似呈幂函数衰减,法向应力越大,峰值界面摩擦系数衰减速率越小。例如粗糙度 $I=20\text{ mm}$ 时, σ_n 由50 kPa增加至150 kPa, $D_r=73\%$ 的试样对应的 μ_p 由2.01减小为1.16,衰减率为42.29%;而 σ_n

由 150 kPa 增加至 350 kPa 时, μ_p 衰减率为 27.5%.

尽管峰值界面摩擦系数随法向应力增加而衰减,但并不说明接触面剪切强度的降低.由 2.1 节分析可知,相同粗糙度下,法向应力越大,接触面抗剪强度越高.其规律可以解释为:随法向应力 σ_n 的增加,峰值剪切强度 τ_p 的增量变化较小,导致 τ_p/σ_n 的比值减小,即使得峰值界面摩擦系数 μ_p 在高法应力下作用逐渐趋于平稳.此时法向应力增量引起的峰值剪切强度 τ_p 增量变大,导致峰值界面摩擦系数不会持续减小.这一规律与张玲等^[31]、王协群等^[32]的研究中所得结论相一致.

此外,粗糙度对峰值界面摩擦系数影响较大.不同相对密实度下,峰值界面摩擦系数满足 $\mu_p^{I=10\text{ mm}} > \mu_p^{I=20\text{ mm}} > \mu_p^{I=30\text{ mm}} > \mu_p^{I=0\text{ mm}}$ 的关系,其中 $\mu_p^{I=x}$ 表示粗糙度为 x 的峰值界面摩擦系数.由此可知,存在临界粗糙度 $I_{cr}=10\text{ mm}$,当粗糙度 $I < I_{cr}$ 时,峰值界面摩擦系数随粗糙度增大而增加;当粗糙度 $I \geq I_{cr}$ 时,则随粗糙度增大而减小.光滑接触面的峰值界面摩擦系数始终是砂土-混凝土接触面峰值界面摩擦系数的下限值,但砂土自剪的摩擦系数却并非始终是其上限值.对于密砂而言,临界粗糙度的峰值界面摩擦系数 $\mu_p^{I=10\text{ mm}}$ 要大于砂土自剪的峰值界面摩擦系数 μ_p^s ,对于中密、松砂而言,砂土自剪的摩擦系数仍为上限值.这一规律其实反映砂土-混凝土接触面剪切强度的变化过程.对于“规则型”结构接触面,当砂土较为密实时,粗糙度 I 增加到某一定值时,更容易产生“被动阻力”^[15,33],剪切滑移过程中只能通过充分调动接触面的抗剪强度,来克服土体颗粒间、土体颗粒与接触面的摩擦阻力和“被动阻力”,导致其大于砂土本身的抗剪强度.而当粗糙度 $I \geq I_{cr}$ 时,砂土颗粒与接触面凹槽尺寸差异较大,这种尺寸效应使得颗粒彻底被约束至凹槽中,无论如何平移、翻滚或转动均无法从凹槽内翻出,接触面对颗粒运动的约束作用引起剪胀量减小,峰值剪切强度降低.

2.3 粗糙度对接触面力学特性的影响

为了分析粗糙度对接触面力学特性的影响,并判断剪切过程中接触面的剪切破坏位置,采用归一化割线摩擦角 φ_{sec}/φ_s 来表征砂土-混凝土接触面抗剪强度.其中, φ_{sec} 为接触面割线摩擦角; φ_s 为相同密实度下砂土割线摩擦角,具体参数见表 5.

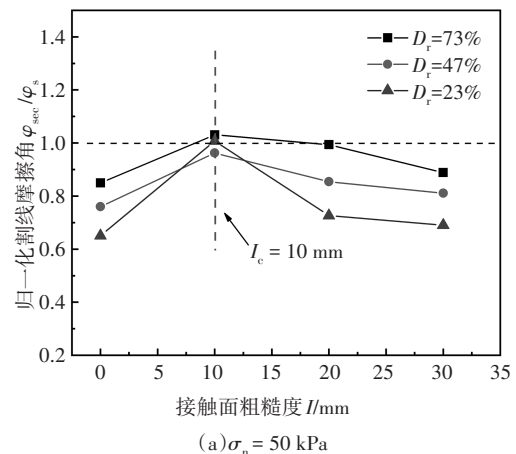
图 11 为不同法向应力下砂土-混凝土接触面归一化割线摩擦角-粗糙度关系曲线.由图 11 可知,不同密实度下,归一化割线摩擦角随着粗糙度增加(0 mm→10 mm)而增大,后随粗糙度增加(10 mm→30

mm)而减小.归一化割线摩擦角随粗糙度的变化规律同样证明了临界粗糙度 I_{cr} 的存在.即当 $I < I_{cr}$ 时, φ_{sec}/φ_s 随粗糙度增加而增大;当 $I \geq I_{cr}$ 时, φ_{sec}/φ_s 随粗糙度增加而减小.当接触面粗糙度为临界粗糙度 I_{cr} 时,归一化割线摩擦角 φ_{sec}/φ_s 达到峰值,充分调动了土体颗粒强度,此时接触面抗剪强度最大,接触面上部土体参与变形协调范围也最广.钱建固等^[34]在注浆螺旋桩的抗拔承载力机制研究中也得到类似的结论.在最优螺纹间距(类似临界粗糙度)时,桩周土体塑形区域贯通,抗拔承载力达到最大值.不同密实度下,归一化割线摩擦角 φ_{sec}/φ_s 始终满足关系: $\varphi_{sec}^{I=10\text{ mm}}/\varphi_s > \varphi_{sec}^{I=20\text{ mm}}/\varphi_s > \varphi_{sec}^{I=30\text{ mm}}/\varphi_s > \varphi_{sec}^{I=0\text{ mm}}/\varphi_s$.说明尽管相对密实度的变化对接触面强度产生较大影响,但并不改变接触面临界粗糙度的大小.

表 5 砂土-混凝土接触面割线摩擦角

Tab. 5 Secant friction angle of sand-concrete interface

粗糙度 I/mm	相对密实度 $D_r/\%$	割线摩擦角 $\varphi_{sec}/(^\circ)$			
		50 kPa	150 kPa	250 kPa	350 kPa
0	73%	54.3	38.13	34.99	35.59
	47%	43.54	33.94	32.15	31.66
	23%	31.89	29.59	27.15	27.04
10	73%	65.9	53.98	48.33	45.37
	47%	55.14	43.13	42.2	42.33
	23%	49.39	41.72	40.59	37.9
20	73%	63.52	49.31	46.1	40.14
	47%	48.94	40.48	39.14	38.23
	23%	35.63	33.74	27.37	29.1
30	73%	56.81	46.35	40.68	37.08
	47%	46.45	36.61	35.78	34.02
	23%	33.84	29.67	28.11	28.5
砂土	73%	63.93	52.62	46.04	44.87
	47%	57.29	43.83	43.03	42.03
	23%	49.04	42.05	40.83	38.12



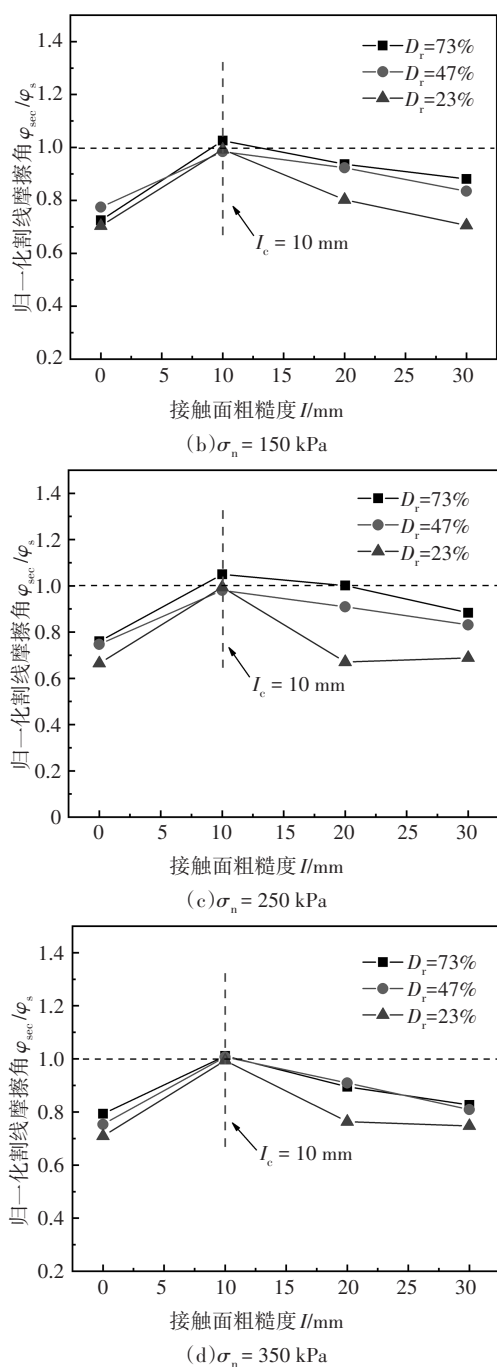


图 11 接触面归一化割线摩擦角-粗糙度变化曲线

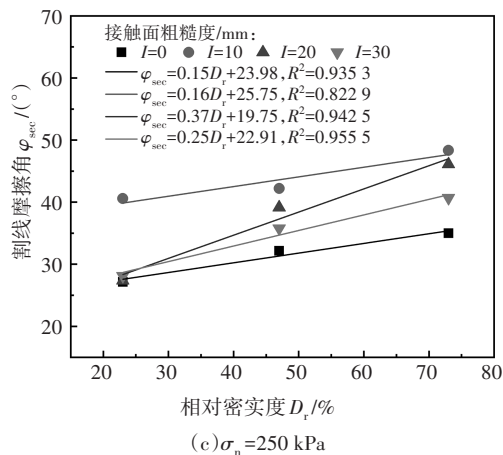
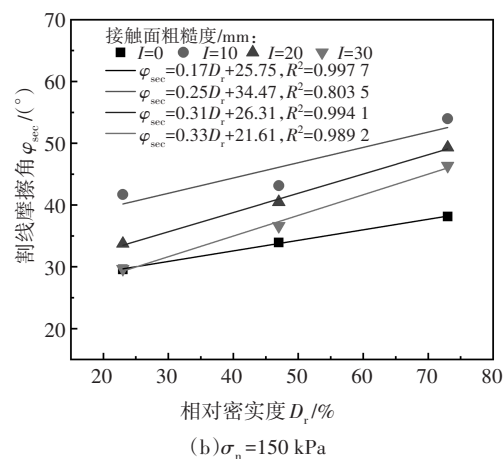
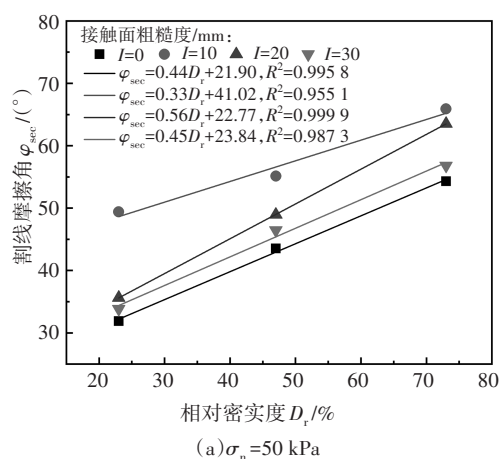
Fig. 11 Curves of normalized secant angle-roughness of the interface

砂土-混凝土接触面剪切破坏位置常通过接触面剪切强度与砂土自剪强度的大小来判断,剪切破坏面常发生在抗剪强度相对较小的位置.对于中密、松砂而言,归一化割线摩擦角 $\varphi_{\text{sec}}/\varphi_s$ 始终小于 1.0,即说明接触面抗剪强度要小于砂土自剪强度,此时剪切破坏面可能发生在接触面上.而对于密砂而言,归一化割线摩擦角 $\varphi_{\text{sec}}/\varphi_s$ 更接近 1.0;当达到临界粗糙度 I_{cr} 时, $\varphi_{\text{sec}}/\varphi_s$ 超过 1.0.这说明接触面抗剪强度要大于砂

土自剪强度,此时剪切破坏面可能发生在土体中.

3.4 相对密实度对接触面力学特性的影响

由表 5 绘制得到不同法向应力下砂土-混凝土接触面割线摩擦角-相对密实度的变化曲线,如图 12 所示.由图 12 可知,相同法向应力下,接触面割线摩擦角随相对密实度的增大而增加.例如法向应力 $\sigma_n = 50 \text{ kPa}$ 时,粗糙度 $I = 10 \text{ mm}$ 的试样相对密实度为 23%、47%、73%,对应的接触面割线摩擦角为 49.39° 、 55.14° 、 65.9° .通过数据拟合得到割线摩擦角与相对密实度的变化曲线,发现二者存在良好的线性关系,相关系数 $R^2 > 0.8035$.其拟合方程为:



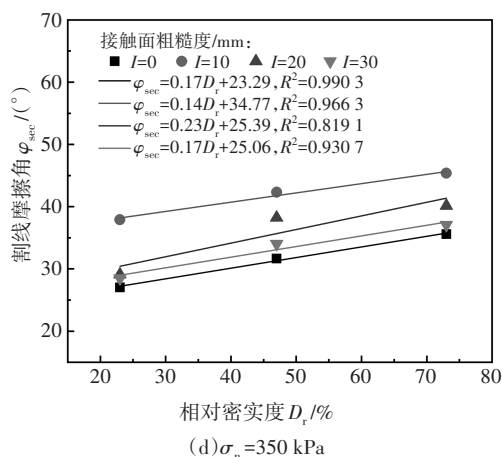


图 12 接触面割线摩擦角-相对密实度变化曲线

Fig. 12 Curves of secant friction angle–relative density of the interface

$$\varphi_{\text{sec}} = AD_r + B \quad (5)$$

式中: A 、 B 均为拟合参数, 分别表征接触面割线摩擦角 φ_{sec} 随相对密实度增大而增加的程度以及除相对密实度外的其他因素对割线摩擦角 φ_{sec} 的影响。

相同粗糙度下, 接触面割线摩擦角 φ_{sec} 的增长速率随法向应力增加逐渐减小。例如在粗糙度 $I=10$ mm 下, 法向应力 50~350 kPa 对应的接触面割线摩擦角 φ_{sec} 的增长速率分为 33.43%、29.38%、19.70%、19.06%。相同法向应力下, 无论相对密实度如何变化, 光滑接触面的割线摩擦角始终是下限值, 而临界粗糙度 $I_{\text{cr}}=10$ mm 的接触面割线摩擦角始终是上限值。

3 结 论

本文利用现场实测桩径曲线所获的桩侧粗糙度分布频率, 构建了可模拟实际桩侧粗糙度的混凝土接触面。采用大型直剪仪开展了砂土-混凝土接触面直剪试验, 探究了不同粗糙度和相对密实度对砂土-混凝土接触面力学特性的影响规律。主要研究结论如下:

1) 密砂在光滑接触面下, 剪切应力-切向位移曲线呈轻微软化, 随着粗糙度增加, 曲线软化趋势越明显。密砂达到峰值强度所需切向位移随法向应力、粗糙度增加而增大。松砂的剪切应力-切向位移曲线始终呈硬化趋势。密实度对剪切应力-切向位移曲线发展形式起主导作用, 而粗糙度对曲线的发展程度影响较大。

2) 界面峰值剪切强度随法向应力增加近似非线性增长, 相对密实度越大, 非线性增长越明显。接触面割线摩擦角随法向应力增加呈指数衰减, 但随粗

对密实度增加呈线性增长。相同粗糙度下, 相对密实度越大, 接触面割线摩擦角越大。

3) 不同相对密实度下接触面峰值界面摩擦系数则随法向应力增加呈幂函数衰减, 衰减速率逐渐减小, 这并不代表剪切强度的减小, 而是剪切强度的增量变化较小所导致。光滑接触面的峰值界面摩擦系数始终是砂土-混凝土接触面的下限值, 砂土自剪的峰值界面摩擦系数却不总是其上限值。对密砂而言, 当粗糙度达到临界值时, 容易产生“被动阻力”, 使得砂土-混凝土接触面峰值界面摩擦系数超过砂土自剪的峰值界面摩擦系数; 对中密砂、松砂而言, 砂土自剪的峰值界面摩擦系数仍然是其上限值。

4) 存在临界粗糙度 I_{cr} , 当 $I < I_{\text{cr}}$ 时, 接触面峰值摩擦系数和归一化割线摩擦角均随粗糙度增加而增大, 当 $I \geq I_{\text{cr}}$ 时, 则随粗糙度增大而减小。当粗糙度达到 I_{cr} , 密砂接触面归一化割线摩擦角 $\varphi_{\text{sec}}/\varphi_s$ 要超过 1.0, 此时剪切破坏面更容易发生在土体中。

参考文献

- [1] 李国维, 赫新荣, 李铭, 等. 引江济淮工程膨胀土下伏崩解岩边坡处治试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 51-74.
LI G W, HE X R, LI M, *et al.* Experimental study on treatment of disintegrating rock under expansive soil slope at Yangtze-to-Huaihe water diversion project[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 51-74. (In Chinese)
- [2] 冷伍明, 陈琛, 徐方, 等. 深厚软土区超长桩基压缩变形测试及分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 87-96.
LENG W M, CHEN C, XU F, *et al.* Measurement and analysis of compression deformation of a super-long pile foundation in deep soft deposit[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 87-96. (In Chinese)
- [3] YE X Y, WANG Q, WANG S Y, *et al.* Performance of a compaction-grouted soil nail in laboratory tests[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(4): 1049-1063.
- [4] 赵明华, 郑玥, 刘猛, 等. 考虑纵横耦合变形的土工格室加筋体变形分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(9): 89-99.
ZHAO M H, ZHENG Y, LIU M, *et al.* Deformation analysis of geocell-reinforcement considering vertical-horizontal coupling distortion[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(9): 89-99. (In Chinese)
- [5] 陈琛, 冷伍明, 杨奇, 等. 混凝土桩-泥皮-砂土接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2461-2472.
CHEN C, LENG W M, YANG Q, *et al.* Experimental study of mechanical properties of concrete pile-slurry-sand interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2461-2472. (In Chinese)
- [6] ABU-FARSAKH M, CORONEL J, TAO M J. Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large direct shear tests[J]. Journal of Materials in Civil

- Engineering, 2007, 19(7): 540–549.
- [7] DEJONG J T, WESTGATE Z J. Role of initial state, material properties, and confinement condition on local and global soil-structure interface behavior [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(11): 1646–1660.
 - [8] MARTINEZ A, FROST J D. The influence of surface roughness form on the strength of sand - structure interfaces [J]. Geotechnique Letters, 2017, 7: 104–111.
 - [9] JING X Y, ZHOU W H, ZHU H X, *et al.* Analysis of soil-structural interface behavior using three-dimensional DEM simulations [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2018, 42(2): 339–357.
 - [10] 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.
 - [11] UESUGI M, KISHIDA H, UCHIKAWA Y. Friction between dry sand and concrete under monotonic and repeated loading [J]. Soils and Foundations, 1990, 30(1): 115–128.
 - [12] FROST J D, HAN J. Behavior of interfaces between fiber-reinforced polymers and sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(8): 633–640.
 - [13] DOVE J E, FROST J D. Peak friction behavior of smooth geomembrane-particle interfaces [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(7): 544–555.
 - [14] 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.
 - [15] HRYCIW R D, IRSYAM M. Behavior of sand particles around rigid ribbed inclusions during shear [J]. Soils and Foundations, 1993, 33(3): 1–13.
 - [16] CHEN X B, ZHANG J S, XIAO Y J, *et al.* Effect of roughness on shear behavior of red clay - concrete interface in large-scale direct shear tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(8): 1122–1135.
 - [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] PUECH A. Advances in axial cyclic pile design: contribution of the SOLCYP project [C]//In Proceedings of the ISSMGE Conference, TC 209 Workshop, Design for Cyclic Loading: Piles and Other Foundations. Paris: ISSMGE Technical Committee, 2013: 45–57.
 - [19] KOU H L, GUO W, ZHANG M Y, *et al.* Axial resistance of long rock-socketed bored piles in stratified soils [J]. Ocean Engineering, 2016, 114: 58–65.
 - [20] HAN F, GANJU E S, SALGADO R, *et al.* Comparison of the load response of closed-ended and open-ended pipe piles driven in gravelly sand [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(6): 1785–1803.
 - [21] FAKHARIAN K, VAFAEI N. Effect of density on skin friction response of piles embedded in sand by simple shear interface tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58(5): 619–636.
 - [22] O'ROURKE T D, DRUSCHEL S J, NETRAVALI A N. Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(3): 451–469.
 - [23] 王军, 王攀, 刘飞禹, 等. 密实度不同时格栅-砂土界面循环剪切及其直剪特性 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 342–349.
 - WANG J, WANG P, LIU F Y, *et al.* Cyclic and post-cyclic direct shear behaviors of geogrid-sand interface with different soil densities [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 342–349. (In Chinese)
 - [24] Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system): ASTM D2487-17e1 [S]. West Conshohocken: US-ASTM International, 2017.
 - [25] Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method: ASTM D5321 [S]. West Conshohocken: US-ASTM International, 2021.
 - [26] DOVE J E, JARRETT J B. Behavior of dilative sand interfaces in a geotribology framework [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1): 25–37.
 - [27] 周国庆, 夏红春, 赵光思. 深部土-结构接触面与界面力学特性的直接剪切试验 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1157–1162.
 - ZHOU G Q, XIA H C, ZHAO G S. Direct shear experiment of deep soil-structure interface and interface layer mechanical characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1157–1162. (In Chinese)
 - [28] HOSSEINI S M R, JESMANI M. Effect of normal stress and relative compaction on secant friction angle of sands [J]. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2014, 38: 382–391.
 - [29] 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.
 - [30] 王家全, 周健, 黄柳云, 等. 土工合成材料大型直剪界面作用宏观研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 908–915.
 - WANG J Q, ZHOU J, HUANG L Y, *et al.* Macroscopic and mesoscopic studies of interface interaction on geosynthetics by use of large direct shear tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 908–915. (In Chinese)
 - [31] 张玲, 徐泽宇, 姚攀, 等. 筋箍碎石桩桩-土界面摩擦特性试验研究及离散元模拟 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 72–81.
 - ZHANG L, XU Z Y, YAO P, *et al.* Experimental study and discrete element simulation on interface friction of geo-encased stone columns [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 72–81. (In Chinese)
 - [32] 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): 133–141.
 - WANG X Q, ZHANG J F, ZOU W L, *et al.* A shear strength model of geogrid-soil interface and its influence factors [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(4): 133–141 (In Chinese)
 - [33] 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 Z H, YANG Q, CHEN C, *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)
 - [34] 钱建固, 王斌, 陈宏伟, 等. 注浆螺纹抗拔桩室内模型试验与承载机理分析 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 146–152.
 - QIAN J G, WANG B, CHEN H W, *et al.* Model test and bearing mechanism study on grouting-screw uplift pile [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 146–152. (In Chinese)