

文章编号: 1001-4888(2022)04-0551-10

摩擦桩-砂土接触面剪切特性可视化试验研究^{*}

金佳旭¹, 袁士豪¹, 梁冰¹, 李世旺^{1,2}, 刘家顺¹, 周克林^{1,3}

(1. 辽宁工程技术大学, 辽宁阜新 123000; 2. 中建陆海投资发展公司, 天津 300000;
3. 遵义市黔北公路建设开发投资有限责任公司, 贵州遵义 563000)

摘要: 桩-土界面剪切特性严重影响桩基侧摩阻力发挥, 常造成桩基失稳等工程灾害。为研究砂土地区摩擦作用对桩-土界面剪切特性的影响, 通过自主设计的大型可视化剪切试验, 得到了粗糙度对剪切特性及剪切带颗粒变化规律的影响。试验结果表明: 随着粗糙度的增加, 抗剪强度、摩擦角、剪切刚度和残余强度等参数均显著增加, 剪切模量最大增加幅度达 49.49%; 黏聚力先增加, 当粗糙度超过 0.393mm 时, 便开始减小; 粗糙度和法向应力均是剪切带厚度的影响因素之一; 接触面临界相对粗糙度为 0.393mm。上述研究成果对提升砂土地区摩擦桩设计可靠性及完善桩土相互作用宏观机理具有一定意义。

关键词: 基础工程; 桩土接触面; 剪切特性; 粗糙度; 抗剪强度; 剪切带

中图分类号: TU560

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-21-198

0 引言

桩基础一般用于解决特殊地基土承载力问题^[1,2], 可分为摩擦桩和端承桩, 其中端承桩难以在砂土和软土中找到持力层, 因此, 通常使用摩擦桩来加固地基, 而对于摩擦桩而言, 桩侧表面与地基土的摩擦作用与桩-土界面特性密切相关^[3-5], 已有研究表明^[6,7]: 结构物与土体的接触面包括结构物表面及其上部具有一定厚度的薄土层, 即为剪切带。受剪切作用影响, 剪切带的厚度也会发生变化, 此时接触面既能体现砂土颗粒的挤压、剪胀等特征, 又可以表现出独有的力学性质。

国内外已有不少学者利用大型直剪试验研究桩-土界面问题^[8-13]。方火浪等^[8]基于粒状土与结构接触面建立多重剪切边界模型。张明义等^[9]利用微型硅压阻式传感器测定桩-土界面孔隙水压力和土压力的变化, 定量分析表面粗糙度对界面抗剪强度参数、界面阻力-剪切位移曲线的影响。王永洪等^[10]利用自制的大型恒刚度直剪仪, 完成了一系列不同界面粗糙度、不同试样含水率和不同剪切速率试验条件下的直剪试验, 分析了在不同试验条件下超孔隙水压力变化规律, 进而得到考虑超孔隙水压力的桩土界面抗剪强度及其参数的变化规律。汪优等^[11]基于指数化拟合公式, 利用不同规格砂纸模拟混凝土桩-黏土接触面处表层的粗糙度, 采用 ZJ 型应变控制式直剪仪开展混凝土桩-黏土接触面直剪试验, 定量分析了粗糙度对混凝土桩-黏土界面剪切破坏、变形的影响。蒋劲羽等^[12]认为粗糙度对应力-位移曲线形态的影响不大, 且存在一临界粗糙度, 剪切应力在临界粗糙度时处于峰值。梁越等^[13]利用改进的直剪仪, 研究了不同法向应力条件下钢-土界面的应力-应变关系。徐韩强等^[14]考虑到温度效应对

^{*} 收稿日期: 2021-09-01; 修回日期: 2021-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51974145, No. 51974186); 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学)开放课题(KLE-TJGE-B2001); 城市地下空间工程北京市重点实验室开放基金(中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-BD-19-004A)); 国家重点研发计划(2018YFC0604705); 辽宁工程技术大学学科创新团队项目(LNTU20TD-05, LNTU20TD-17)

通信作者: 金佳旭(1984—), 男, 副教授, 博士。主要从事环境岩土工程研究。Email: jjx_605@163.com

桩土界面特性的影响,进而自主设计研制了考虑温度效应的大型直剪仪。王腾等^[15]开展了恒刚度循环剪切试验,分析了摩擦疲劳及循环后单调剪切特性的变化规律。Fakharian 等^[16]采用单剪试验机探究了砂-钢板界面与循环剪切次数的关系。Mortara 等^[17]改变直剪仪的加载方式,提出了正常横向荷载由重量提供的理论。

对于土体力学性质而言,抗剪刚度和剪切破坏变形是主要研究对象。例如,用于路基填筑的粗粒土都具有高抗剪强度和抗剪刚度的性质,除此之外,粗粒土也用于桩基工程的基础填筑,以提高桩土界面的承载力,因此,要解决桩土界面效应问题,研究粗糙度对土-结构界面的抗剪刚度、破坏变形等参数影响以及剪切带的变形规律至关重要。本文利用自行设计的大型可视化剪切试验装置对桩-砂界面的力学性能进行研究,探讨了粗糙度对桩-砂界面抗剪强度、黏聚力、摩擦角、抗剪刚度、剪切破坏位移和残余强度的影响,并分析了剪切带的变形规律。研究桩土界面在荷载作用下的受剪特性和变形规律,对完善桩土相互作用的宏观和微观机理具有重要意义。

1 接触面可视化剪切试验

1.1 试验装置

接触面可视化剪切试验装置主要由框架式反力结构、桩体模拟盒、砂土试验箱、加载装置以及可视化系统组成。本文对现有应变式剪切试验装置存在的缺点和不足加以改进和完善,使装置具有良好的准确性、经济性、操作性,试验装置如图 1 所示。



图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

桩土界面发生剪切时,产生的剪切带厚度一般小于 50mm,为了对剪切过程中接触面附近砂颗粒的运动状态进行细观研究,在砂土试验箱的正面钢板底部 50mm 高的净空安装厚度为 10mm 的 PC 耐力板作为可视化窗口。

在距离砂土试验箱底部 20mm 处的砂层内,每隔 50mm 间距布置一颗经过染色处理且粒径较大的砂土颗粒,共布置 9 个染色砂粒标记点。

1.2 试验材料

土样选用最小粒径 0.075mm、最大粒径 5mm 的普通河砂,级配均匀,颗粒级配如图 2

所示,基本物理参数见表 1。

表 1 基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters

比重 ρ	平均粒径/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	最大孔隙比 $e_{\max}$	最小孔隙比 $e_{\min}$	孔隙比 e
2.66	0.75	2.37	1.16	0.69	0.45	0.52

本文所采用的大型直剪试验系统需制备混凝土块体^[18-20],因此,试验前预制了 5 块 C50 素混凝土试块,其尺寸为 600mm×370mm×180mm(长×宽×高)。试块预制规则的半圆形凹槽,以模拟结构表面的粗糙度^[21-23]。不同凹槽数量的混凝土试块如图 3 所示。

本文采用灌砂法^[24,25]对混凝土试块表面粗糙度进行定量评价,粗糙度 R 的计算公式可表示为

$$R = n \times \frac{V_i}{S} \quad (1)$$

式中: n 为试块表面凹槽数量; S 为平滑混凝土表面积。 V_i 为单个凹槽的灌砂体积:

$$V_i = \frac{1}{8} \pi d^2 l \quad (2)$$

式中: d 为半圆型凹槽直径, $d=10\text{mm}$; l 为凹槽长度, $l=370\text{mm}$ 。根据式(1)、式(2)计算得到的各工况

粗糙度见表 2。

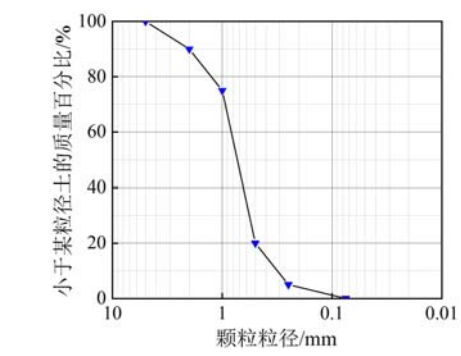


图 2 颗粒级配曲线
Fig. 2 Particle size distribution curve

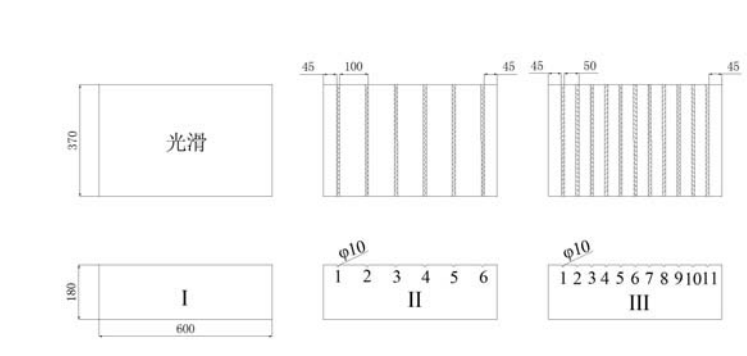


图 3 养护成型后的混凝土试块(单位:mm)
Fig. 3 Concrete test blocks after curing and molding(unit: mm)

表 2 各工况粗糙度情况
Tab. 2 Roughness of each working condition

试块编号	评价参数		
	$n/\text{个}$	V_i/mm^3	R/mm
I	0	14530.0	0
II	3	14530.0	0.196
III	6	14530.0	0.393
IV	9	14530.0	0.589
V	11	14530.0	0.720

1.3 试验方案

试验中剪切速率为 2mm/min,剪切位移要求达到 20mm;试验中对竖向千斤顶加压,直到压力值达到试验设计值后停止加压,静置 30min,此过程中需不断补压使压力值稳定在试验设计值。试验工况见表 3。

表 3 直剪试验工况
Tab. 3 Working conditions of direct shear test

工况	粗糙度 R/mm	法向应力 σ/kPa	工况	粗糙度 R/mm	法向应力 σ/kPa
1	0	50	9	0.393	100
2	0	75	10	0.589	50
3	0	100	11	0.589	75
4	0.196	50	12	0.589	100
5	0.196	75	13	0.720	50
6	0.196	100	14	0.720	75
7	0.393	50	15	0.720	100
8	0.393	75			

2 试验结果与分析

2.1 剪切应力-位移曲线

图 4 为摩擦桩-砂土接触面剪切应力-位移关系曲线。图 4 表明,剪切过程中,桩土界面剪切应力 τ 与切向位移 u 关系曲线出现轻微软化现象。初始阶段的砂土孔隙被压缩,剪切力与剪切位移呈线性递增趋势;其后,界面附近砂颗粒逐渐参与到剪切过程中,土样内部结构开始发生破坏,其抗剪力学特性开

始劣化, τ 与 u 开始呈非线性关系; 当内部结构破坏到一定程度时, 剪切应力达到最大值, 称为抗剪强度; 随后界面颗粒物理交联点重组并形成定向排列, 逐渐恢复, τ 与 u 近似呈水平线关系。

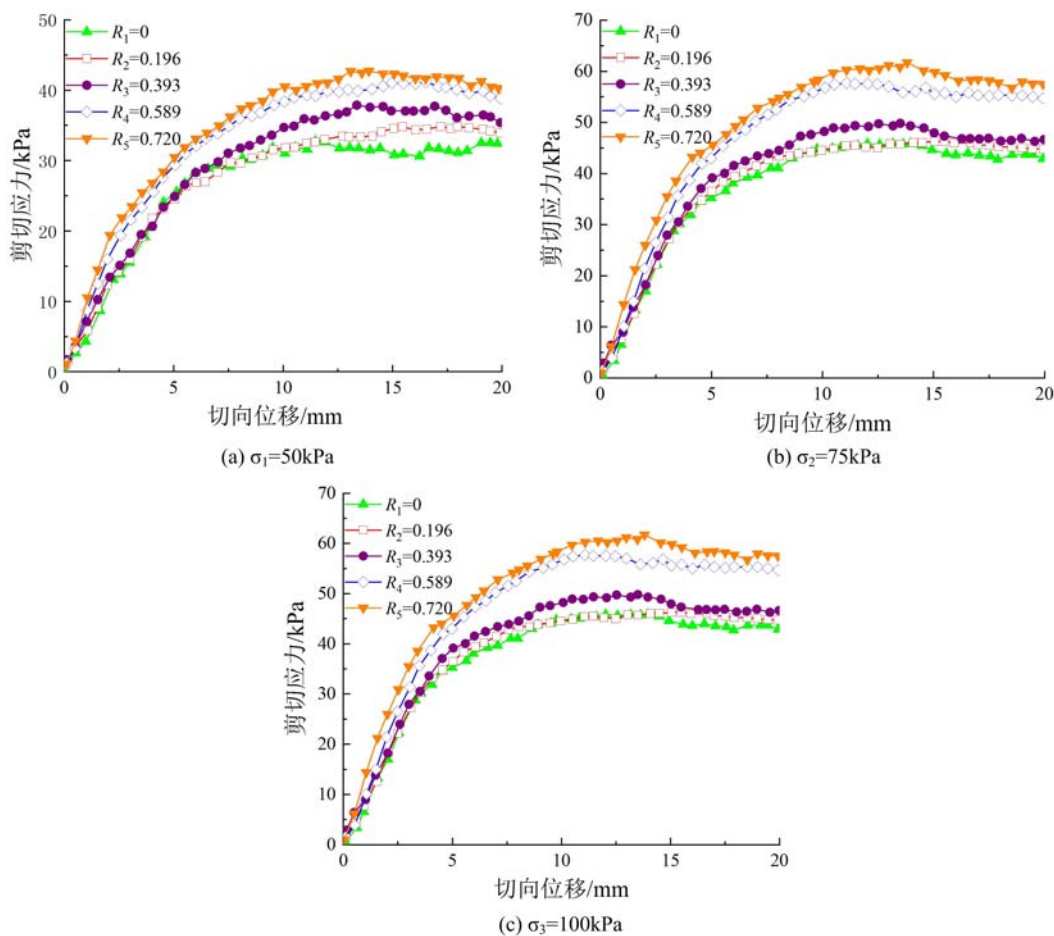


图 4 摩擦桩-砂土接触面剪切应力-位移曲线

Fig. 4 Shear stress-displacement curve of friction pile-sand interface

不同粗糙度条件下, 砂土 τ - u 曲线具有相同的变化趋势。即呈现线弹性、弹塑性、屈服和残余变形 4 个阶段。当法向应力 σ 为 50 kPa、75 kPa 和 100 kPa 时, 粗糙度为 0.393 时的峰值强度分别为 35.0 kPa、49.9 kPa 和 65.1 kPa, 粗糙度为 0.589 的峰值强度分别为 41.02 kPa、57.85 kPa 和 74.44 kPa, 可见, 粗糙度的大小直接关系着峰值强度, 进而影响剪切应力与位移关系; 粗糙度为 0.393 时的剪切位移分别为 13.3 mm、13.5 mm 和 14.3 mm, 最大相差 0.8 mm; 粗糙度为 0.393 时的残余强度则分别为 37.6 kPa、46.8 kPa 和 64.2 kPa, 最大相差 17.4 kPa。抗剪强度、破坏时剪切位移以及残余应力都是剪切应力-位移曲线的重要特征参数, 因此, 研究剪切应力-位移曲线特征参数受粗糙度影响的情况至关重要。

2.2 粗糙度对剪切参数的影响

2.2.1 界面极限剪应力

图 5 为砂土-混凝土接触面极限剪应力随粗糙度和法向应力变化的关系曲线。

如图 5 所示, 法向应力一定时, 极限剪应力与粗糙度成正相关关系。当法向应力 $\sigma = 75$ kPa 时, 当粗糙度从 0 增加到 0.720 时, 抗剪强度 τ 从 45.8 kPa 增加到 61.7 kPa, 增长幅度为 34.7%, 这表明粗糙度对砂-混凝土界面抗剪强度有显著的优化作用; 当粗糙度从 0.393 增加至 0.720 时, 增长幅度从 15.9% 减小到 6.7%, 这表明粗糙度增长到一定数值时, 粗糙度对极限剪切应力的影响程度达到极限后趋于下降。

从图 5 可以看出, 法向应力相同时, 粗糙度小于 0.393 的抗剪强度增长幅度均明显不及粗糙度大于 0.393 的增长幅度。胡黎明等^[26]指出, 土-结构物界面粗糙度具有一个临界值, 粗糙度处于非该临界值

时,其变形机制和力学性能都会产生本质差异。本文测定的临界粗糙度 R_c 为 0.393mm。

2.2.2 界面摩擦角和黏聚力

由 2.2.1 节可知,砂-混凝土界面抗剪性能受粗糙度影响较大,界面抗剪强度主要由黏聚力和滑动摩擦阻力组成,摩擦阻力与摩擦角成正比。

界面抗剪强度与法向应力关系如图 6 所示,由图可知,极限剪应力和法向应力在一定粗糙度下大致呈线性关系,符合摩尔-库仑破坏规律:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (3)$$

式中: c 为接触面黏着力; φ 为接触面摩擦角; σ 为法向应力。

图 6 中拟合的相关系数区间为 0.9947~0.9999,拟合效果良好,根据式(3)所得到的界面黏着力 c 和摩擦角 φ 如图 7 所示。

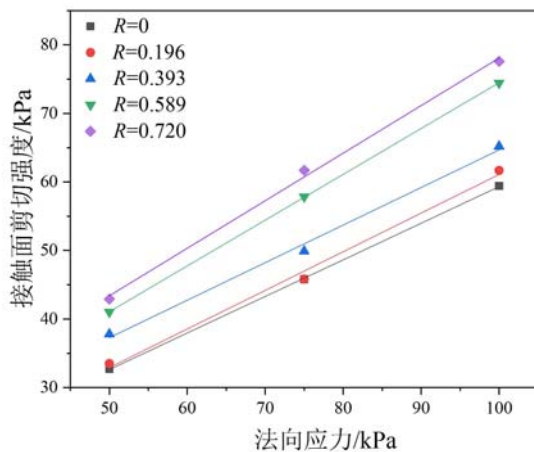


图6 极限剪应力与法向应力拟合关系

Fig. 6 Fitting relationship between ultimate shear stress and normal stress

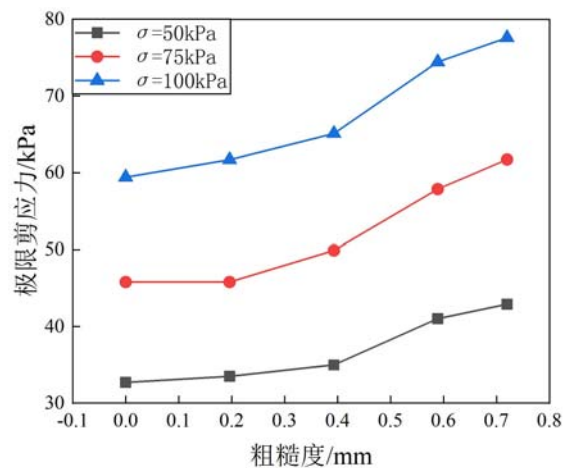


图5 极限剪应力变化规律

Fig. 5 The changing law of ultimate shear stress

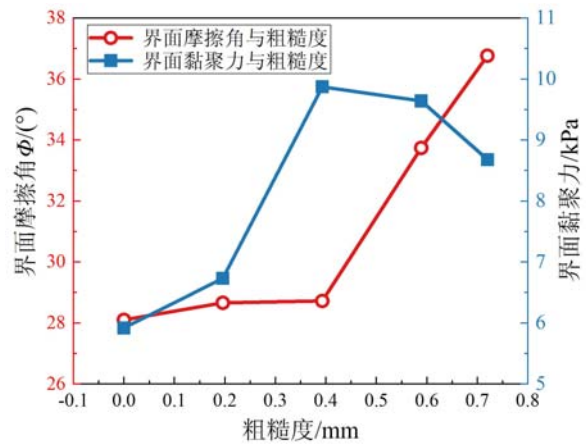


图7 界面抗剪特征与粗糙度之间的关系

Fig. 7 Relationship between interface shear characteristics and roughness

由图 7 可知,当粗糙度从 0mm 增加到 0.393mm 时,黏着力涨幅为 66.7%;当粗糙度从 0.393mm 增加到 0.720mm 时,黏着力略微降低。这是由于凹槽数量的增多,促使桩土接触面积增大,而结构表面凹槽直径远大于砂颗粒的平均直径,颗粒嵌入其中,极大地提高了接触面与颗粒的咬合能力,从而导致接触面黏着力增大。当粗糙度增加到某一特殊范围时,黏着力更多是由土颗粒之间的摩擦提供,因此,接触面黏着力随粗糙度增加先增大后趋于稳定;而界面摩擦角先从 28.10° 增加到 28.66°,再到 28.72°,然后从 28.72° 增加到 33.74°,再到 36.76°,增加幅度从 2.21% 增加到 27.99%。可见,粗糙度达到 0.393 时,界面摩擦角增长速率明显提升。

本文砂土属于无黏性土类,只有颗粒间的摩擦力,没有黏聚力。此处的接触面黏着力为一种表观黏聚力,是摩擦强度的表现,具体指接触面与颗粒或者颗粒间咬合能力的大小。如图 6、图 7 所示,不同粗糙度条件下,界面抗剪强度为 32.7~77.6kPa,而界面黏聚力为 5.92~9.87kPa,可见摩擦角对抗剪强度影响较大。

黏聚力是土颗粒间胶结、咬合等作用的宏观体现,粗糙度增大会导致接触面附近土体大颗粒崩解成小颗粒,土体细颗粒数量适当增加,咬合作用随之增加,促使黏聚力增大;当达到临界粗糙度时,彼此咬

合作用迅速减小,黏聚力则随之减小。

界面摩擦阻力主要由土颗粒间的咬合摩擦以及桩土接触面滑动摩擦构成。粗糙度和摩擦角成正相关关系,随着粗糙度达到临界值,摩擦角开始急剧上升,界面抗剪特征与粗糙度之间的关系如图 7 所示。当 $R < R_c$ 时,主要为理想塑性破坏模式,其主要表现为界面附近颗粒切向变形与剪胀效果相对较小,抗剪强度由滑动构件提供。当 $R > R_c$ 时,界面附近颗粒局部形成剪切带,其内部土体切向位移相对较大,应变软化与剪胀现象较为明显,此时,滑动分量和剪胀分量提供抗剪强度。

综上所述,与黏结效应相比,摩擦效应是主要影响因素,因此,随着界面摩擦阻力增大,其剪切变形更加复杂,土颗粒的剪胀性和挤出性越明显,即随着粗糙度增加,砂土-混凝土界面稳定性随之优化,而剪切带内砂土颗粒受剪胀和挤压的影响,所产生的位移现象更明显。

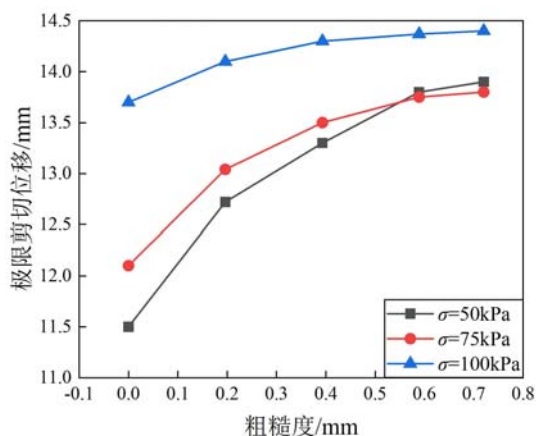


图 8 极限剪切位移变化规律

Fig. 8 Variation law of ultimate shear displacement

位移曲线在初始阶段呈线性递增趋势,选取图 4 曲线坡度作为摩擦桩-砂土接触面等效剪切模量,公式如下:

$$G_{eq} = \tau_e / u_e \quad (4)$$

式中: G_{eq} 为砂土-混凝土界面等效剪切模量, kPa/mm ; τ_e 为界面比例界限剪应力, kPa ; u_e 为界面比例界限剪位移, mm 。

砂土-混凝土界面等效剪切模量 G_{eq} 与粗糙度之间的关系如图 9 所示。

由图 9 可知,法向应力相同情况下,界面等效剪切模量与粗糙度成正相关关系。当 $\sigma = 75 \text{ kPa}$ 时,随着粗糙度从 0 增加至 0.720,剪切模量从 31.66 增加到 47.33,增加幅度达到 49.49%,增加效果显著,说明粗糙度对砂土-混凝土界面等效剪切模量具有显著提升作用。

2.5 粗糙度对界面残余强度的影响

由图 4 可知,界面剪应力达到峰值后,会逐渐变小并趋于稳定,趋于稳定的剪应力被定义为残余抗剪强度,设其为 τ_c ,不同粗糙度条件下砂土-混凝土界面残余抗剪强度如图 10 所示。

由图 10 可知,法向应力一定时,残余抗剪强度与粗糙度成正比。当 $\sigma = 75 \text{ kPa}$ 时,随着粗糙度从 0 增加至 0.720,残余抗剪强度 τ_c 从 43.4 kPa 增加到 58.3 kPa ,增长幅度为 34.3%,超过 30%,表明粗糙度对砂土-混凝土界面残余抗剪强度有着显著优化作用。

2.3 界面剪切破坏位移

图 8 为摩擦桩-砂土接触面极限剪切位移随粗糙度和法向应力变化关系曲线。由图 8 可知,法向应力相同时,剪切破坏位移与粗糙度成正相关关系。当 $\sigma = 75 \text{ kPa}$ 时,随着粗糙度从 0 增加至 0.720,剪切破坏位移 u_e 则从 12.1 mm 增加至 13.8 mm ,增长幅度为 14.1%,说明粗糙度对界面剪切破坏位移具有明显优化作用。同时,以粗糙度 0.393 mm 为界限,前后剪切破坏位移增长幅度变化较大。

2.4 界面剪切刚度

界面剪切刚度通常用剪切模量表示,而试验中无法直接获取该参数。由图 4 可知,剪切应力-位移曲线在初始阶段呈线性递增趋势,选取图 4 曲线坡度作为摩擦桩-砂土接触面等效剪切模量,公式如下:

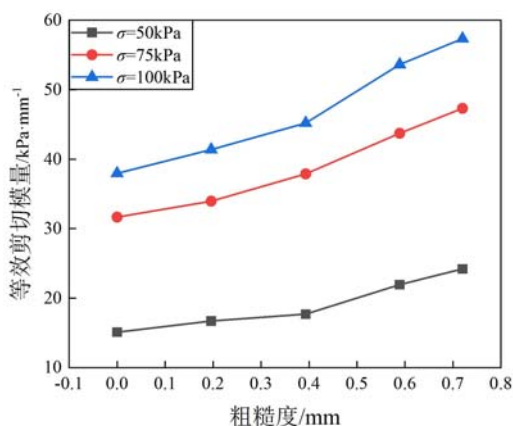


图 9 等效剪切模量变化规律

Fig. 9 Variation law of equivalent shear modulus

3 剪切带砂土颗粒变化规律分析

试验共布置 9 个染色砂粒标记点,从左至右每隔一个染色砂粒对其进行编号,分别为 1~5 号,试验箱标记水平和法向位移基线,法向位移基线向上为正,水平位移基线向左为正,详见图 11 所示。

剪切带内砂颗粒运动形式如图 12 所示。由图 12 可知,剪切结束后,1#~5# 染色砂颗粒均呈现向左上方运动的趋势,且水平位移增量由 5 号颗粒到 1 号颗粒逐渐减小,法向位移增量由 5 号颗粒到 1 号颗粒逐渐增大。究其原因,接触面附近砂颗粒在剪切过程中均由右下向左上发展,

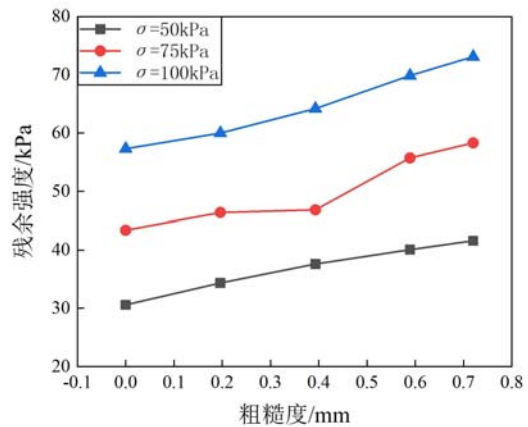


图 10 残余强度变化规律

Fig. 10 Variation law of residual strength



图 11 位移基线和染色颗粒示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the displacement baseline and the staining particles

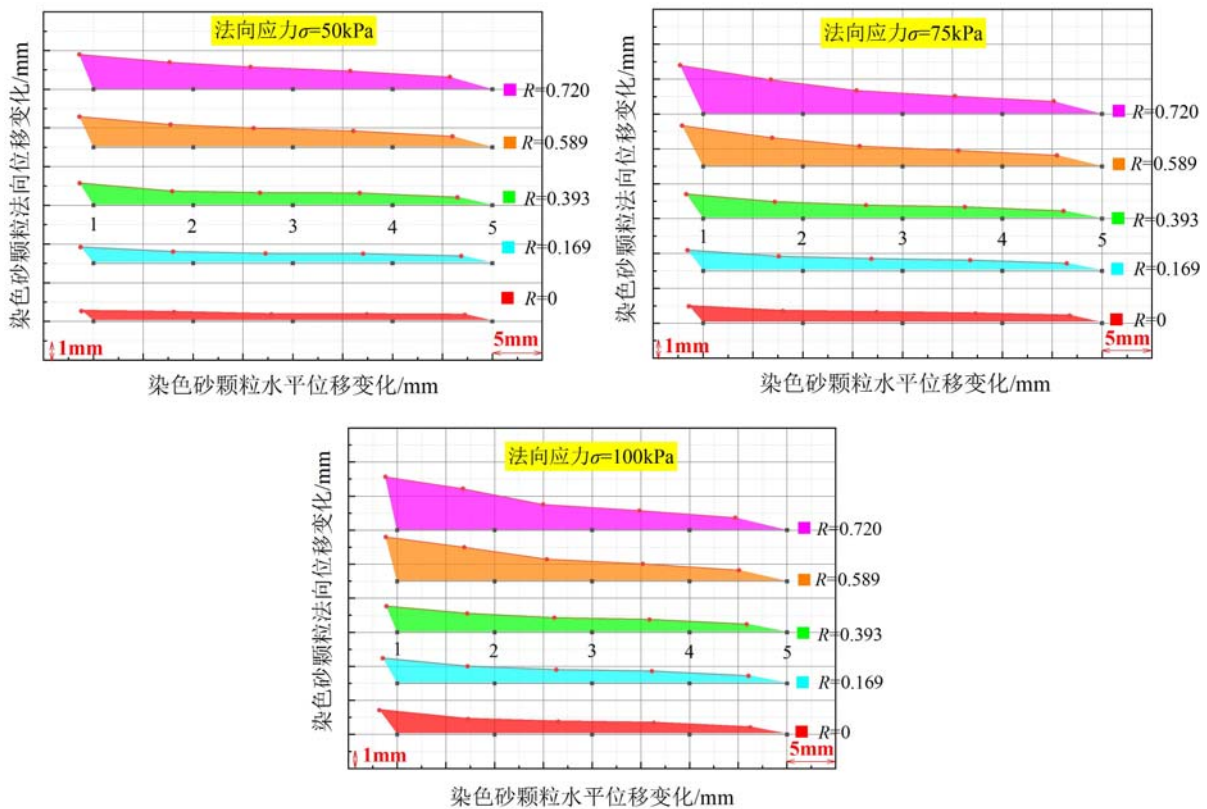


图 12 不同粗糙度条件下染色颗粒位置变化示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the position change of dyed particles under different roughness conditions

受剪切方向和剪胀特性的影响,并考虑到边界效应对砂颗粒运动形式的影响,靠近砂土试验箱左侧钢板

的 1 号颗粒受剪切作用和边界挤压影响最大。以法向应力为 75kPa 剪切过程为例,当剪切位移达到 13mm 时,1 号颗粒水平位移达到最大值 2mm,当剪切结束后,水平位移稳定在 1.7mm 左右。由此可知,靠近边界的砂土在剪切试验后期受到边界挤压,产生右移现象,左侧边界处砂土同时出现向上挤压现象,该区域砂土受剪胀和挤压影响产生较为明显的法向位移。

由图 12 可知,当粗糙度恒定时,剪切带内 1~5 号染色砂颗粒的法向位移均随着法向应力的增大呈递增趋势;而当法向应力恒定时,染色颗粒的法向位移均与接触面粗糙度成正相关关系,因此,法向应力和界面粗糙度均是剪切带厚度的影响因素之一,且法向应力和粗糙度越大,剪切带内砂颗粒运动越明显。同时,观察不同粗糙度下染色颗粒的法向位移变化幅值得出,当粗糙度 $R > 0.393\text{mm}$ 时,砂颗粒位移变化明显比粗糙度 $R \leq 0.393\text{mm}$ 时大,从而证明了接触面临界相对粗糙度 $R_{cr} = 0.393\text{mm}$ 。

4 结 论

利用自主设计的摩擦桩-砂土接触面剪切特性可视化试验,研究了粗糙度对剪切特性及剪切带颗粒变化的影响,主要结论如下:

(1) 极限剪切位移随粗糙度增加而变化明显,从而影响剪切应力和剪切位移之间的关系。法向应力相同时,随着粗糙度增加,抗剪强度和摩擦角均显著增加,其中,摩擦角增长趋势以粗糙度 0.393mm 为界相差明显,增幅由 2.21% 增加到 27.99%;黏聚力则先增加后有所降低,增长幅度为 66.72%。当粗糙度超过临界值 0.393mm 时,则黏聚力开始减小,减大幅度为 12.06%;粗糙度与剪切破坏变形成正比,增长幅度均超过 10%,剪切刚度和残余剪切强度也有明显提升现象,其中,剪切刚度增长幅度超过 40%,残余剪切强度增长幅度超过 30%。

(2) 粗糙度和法向应力均是影响剪切带厚度的关键因素,且法向应力和粗糙度越大,剪切带内砂颗粒运动越明显。

(3) 综合试验分析得出,接触面临界相对粗糙度 $R_{cr} = 0.393\text{mm}$,工程中可利用该粗糙度改善桩-土界接触面剪切特性。

参考文献:

- [1] 邵艳,邢维忠,魏源,等. 合肥滨湖新区静压管桩单桩极限承载力与终压力关系的载荷试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4):523—528 (SHAO Yan, XING Weizhong, WEI Yuan, et al. Load experimental study of relation between ultimate bearing capacity of single pile and terminative jacking force for jacked pipe pile subjected to static loading used in Hefei Lakeside New District[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4):523—528 (in Chinese))
- [2] 李静,吴葆永,姜琳,等. 实验研究刚性桩复合地基承载特性[J]. 实验力学, 2011, 26(4):391—396 (LI Jing, WU Baoyong, JIANG Lin, et al. Experimental study of bearing behavior for rigid pile composite foundation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(4):391—396 (in Chinese))
- [3] 刘源,张可能,刘创,等. 微型 CFG 桩侧阻力提高系数试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1):184—190 (LIU Yuan, ZHANG Keneng, LIU Chuang, et al. Test on enhancement coefficient of lateral resistance about CFG micro pile[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(1):184—190 (in Chinese))
- [4] 刘念武,龚晓南,俞峰,等. 大直径扩底嵌岩桩竖向承载性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(2):541—547 (LIU Nianwu, GONG Xiaonan, YU Feng, et al. Vertical bearing capacity of rock-socketed pile with enlargement at pile end[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(2):541—547 (in Chinese))
- [5] 王杰贤. 地面运动下摩擦桩变形与内力分析[J]. 土木工程学报, 1992, 34(2):53—60 (WANG Jiexian. Analysis of deformation and internal force of friction piles under the action of ground motion[J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 34(2):53—60 (in Chinese))
- [6] 王永洪,张明义,刘俊伟,等. 基于非饱和黏性土桩土界面剪切特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5):1468—1474 (WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, LIU Junwei, et al. Experimental research on shear

- characteristics of pile-soil interface in unsaturated clayey soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5):1468—1474 (in Chinese))
- [7] 叶祖强. 干湿循环作用下桩土界面剪切特性研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2012 (YE Zuqiang. Study on shear characteristics of pile-soil interface under the action of dry-wet cycle[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012 (in Chinese))
- [8] 方火浪, 王文杰, 施可南. 粒状土与结构接触面多重剪切界面模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(11): 80—87 (FANG Huolang, WANG Wenjie, SHI Kenan. A multi-shear bounding surface model for coarse granular soil-structure interfaces[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(11):80—87 (in Chinese))
- [9] 张明义, 白晓宇, 高强, 等. 黏性土中桩-土界面受力机制室内试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8):2167—2174 (ZHANG Mingyi, BAI Xiaoyu, GAO Qiang, et al. Experimental study on interfacial bearing mechanism of piles in cohesive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8):2167—2174 (in Chinese))
- [10] 王永洪, 张明义, 刘俊伟, 等. 超孔隙水压力对低塑性黏性土桩土界面抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(3):831—838, 871 (WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, LIU Junwei, et al. Experimental study on interfacial bearing mechanism of piles in cohesive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3):831—838, 871 (in Chinese))
- [11] 汪优, 李奕金, 谭伟, 等. 考虑结构表层粗糙度的混凝土桩-黏土界面剪切特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10):2502—2509 (WANG You, LI Yijin, TAN Wei, et al. Experimental study on shear properties of concrete pile-clay interface considering surface roughness of structure[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(10):2502—2509 (in Chinese))
- [12] 蒋劲羽, 方琴. 不同桩侧粗糙度对桩-土接触面力学特性的影响研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2016, 33(4):104—107 (JIANG Jinyu, FANG Qin. Study of mechanical properties between pile and soil surface with different roughnesses[J]. Journal of Guizhou University(Natural Sciences), 2016, 33(4):104—107 (in Chinese))
- [13] 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, 35(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, 35(1):28—32 (in Chinese))
- [14] 徐韩强, 戴思宇. 温度效应下桩-土界面剪切试验设备研究进展及新型设备的研制[J]. 科技通报, 2019, 35(9): 139—142 (XU Hanqiang, DAI Siyu. Research progress of pile-soil interface shear test apparatus under temperature effect and manufacture of new apparatus[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(9):139—142 (in Chinese))
- [15] 王腾, 张哲. 粉土界面恒刚度循环剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10):1921—1927 (WANG Teng, ZHANG Zhe. Experimental studies on cyclic shear behavior of steel-silt interface under constant normal stiffness [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10):1921—1927 (in Chinese))
- [16] Fakharian K, Evgin E. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(12):1096—1105.
- [17] Mortara G, Mangiola A, Ghionna V N. Cyclic shear stress degradation and post-cyclic behaviour from sand-steel interface direct shear tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(7):739—752.
- [18] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1):21—25 (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1):21—25 (in Chinese))
- [19] 陈俊桦, 张家生, 李键. 考虑粗糙度的黏性土-结构接触面力学特性试验[J]. 工程科学与技术, 2015, 47(4):22—30 (CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, LI Jian. Experimental research on mechanical characteristics of cohesive soil-structure interface by considering its roughness[J]. Advanced Engineering Sciences, 2015, 47(4):22—30 (in Chinese))
- [20] 陈俊桦, 张家生, 李键. 接触面粗糙度对红黏土-混凝土接触面力学性质的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5):1682—1688 (CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, LI Jian. Influence of interface roughness on mechanical properties of red clay-concrete interface [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(5):1692—1688 (in Chinese))
- [21] 赵亦凡, 刘文白. 粗粒土与结构接触面往返剪切试验的 PFC2D 数值模拟[J]. 上海海事大学学报, 2015, 36(1):

- 81—85 (ZHAO Yifan, LIU Wenbai. Numerical simulation on cyclic shear test of gravel-structure interface by PFC2D[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2015, 36(1):81—85 (in Chinese))
- [22] 成浩, 王晖, 张家生, 等. 考虑粗糙度影响的不同土与混凝土界面大型直剪试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5):117—125 (CHENG Hao, WANG Xuan, ZHANG Jiasheng, et al. Large-scale direct shear tests of interfaces between different soils and concrete considering roughness effect[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5):117—125 (in Chinese))
- [23] 杨砚宗. 砂土与结构接触面粗糙度试验研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(1):55—58 (YANG Yanzong. Experimental study on roughness of sand-concrete structure interface[J]. Building Science, 2013, 29(1):55—58 (in Chinese))
- [24] Farahani K, Mofid M. A solution method for general contact impact[J]. Problems Comput Methods Appl Mechengrg, 2000, 187(5):69—77.
- [25] 陆林娟, 王辉. 正交异性钢桥面板关键构造细节应变测试及有限元分析[J]. 公路工程, 2015, 40(5):220—223 (LU Linjuan, WANG Hui. Strain tests and finite element analysis of key details of orthotropic steel bridge deck [J]. Highway Engineering, 2015, 40(5):220—223 (in Chinese))
- [26] 胡黎明, 濮家骝. 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, 36(4):431—435 (HU Liming, PU Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 36(4):431—435 (in Chinese))

Visualized test study on shear characteristics of friction pile-sand-soil interface

JIN Jiaxu¹, YUAN Shihao¹, LIANG Bing¹, LI Shiwang^{1,2}, LIU Jiashun¹, ZHOU Kelin^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. China Construction Land Sea Investment Development Company, Tianjin 300000, China;

3. Zunyi Qianbei Highway Construction Development Investment Co. Ltd, Zunyi 563000, Guizhou, China)

Abstract: The shear characteristics of the pile-soil interface seriously affect the side friction of the pile foundation, and often cause engineering disasters such as the instability of the pile foundation. In order to study the influence of friction in sandy soil area on the shear characteristics of the pile-soil interface, a self-designed visual experiment on the shear characteristics of the sand-concrete interface under different roughness conditions was carried out. The self-designed visual experiments on the shear characteristics of the sand-concrete interface under different roughness conditions were carried out, and the influence of the roughness on the sand-concrete shear characteristic parameters and the particle change law of the shear zone was studied. The test results show that with the roughness increases, all of the parameters, such as shear strength, friction angle, shear stiffness and residual strength, increase significantly, with the largest increase of 49.49%; cohesion first increases, and when the roughness exceeds 0.393mm, it begins to decrease; roughness and normal stress are one of the factors to affect the thickness of the shear zone; and the critical relative roughness of the contact surface is 0.393mm. The research results have a certain significance for improving the design reliability of friction piles in sandy soil areas and improving the macro and mesoscopic mechanism of pile-soil interaction.

Keywords: foundation engineering; pile-soil contact surface; shear characteristics; roughness; shear strength; shear zone