

桩土界面直剪试验装置设计与模拟应用

黄思源, 周林聪*, 刘怡威, 王彬, 李宗昊

(吉林大学建设工程学院, 吉林长春 130026)

摘要:为研究桩土界面力学特性,针对目前直剪试验较少考虑桩体弧形表面和实际粗糙度的问题,本文设计了一种可模拟实际工程桩弧形表面形态及粗糙度特征的直剪试验装置。该装置采用双剪切盒嵌套结构,通过上剪切盒螺栓加载系统与下剪切盒液压推进装置的协同作用,实现法向应力与切向位移的独立控制。试验基于现场实测数据,运用空间模型扫描技术和3D打印技术制作弧形表面混凝土桩模型,针对粉质黏土开展直剪试验,系统分析含水率、弧形界面粗糙度及法向应力对桩土界面力学特性的影响。试验结果表明,土体界面承载力随含水率增加呈先增后减的趋势,随界面粗糙度增大而显著提升,且与法向应力呈正相关,与实际情况相符,验证了装置设计的适用性与科学性,具有较强的工程应用价值。

关键词:桩土界面;直剪试验;测试装置;力学特性;粗糙度

中图分类号:TU413;P634 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2025)06-0104-07

Design and experimental application of a direct shear test apparatus for the pile-soil interface

HUANG Siyuan, ZHOU Lincong*, LIU Yiwei, WANG Bin, LI Zonghao

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: To investigate the mechanical properties of the pile-soil interface, this study addresses the limitations of conventional direct shear tests in inadequately accounting for the curved surface morphology and actual roughness of pile bodies by designing a novel direct shear test apparatus capable of simulating the curved surface morphology and roughness characteristics of engineering piles. The apparatus features a nested dual-shear box configuration, wherein independent control of normal stress and tangential displacement is achieved through the synergistic operation of a bolt loading system in the upper shear box and a hydraulic actuation unit in the lower shear box. Using field-measured data, curved-surface concrete pile models were fabricated using spatial model scanning technology and 3D printing techniques, and direct shear tests were conducted on silty clay to systematically analyze the effects of moisture content, interface roughness of the curved surface, and normal stress on the mechanical properties of the pile-soil interface. Experimental results demonstrate that the interfacial bearing capacity exhibits a biphasic trend (initially increasing and subsequently decreasing) with rising moisture content, significantly increases with interface roughness, and shows a positive correlation with normal stress, all of which align with practical engineering conditions. These findings validate the applicability and scientific rigor of the apparatus design, demonstrating its practical engineering significance.

Key words: pile-soil interface; direct shear test; testing apparatus; mechanical properties; surface roughness

0 引言

桩土界面力学特性研究对明确桩基础承载机

制、优化桩基础设计、保障工程稳定性至关重要,近

年来诸多学者在该研究中作出了重要贡献。臧诗

收稿日期:2025-04-11;修回日期:2025-06-23 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.06.013

第一作者:黄思源,女,汉族,2000年生,硕士研究生,土木工程专业,研究方向为桩基工程,吉林省长春市西民主大街938号,huangsyy24@jlu.edu.cn。

通信作者:周林聪,男,汉族,1976年生,副教授,土木工程专业,博士,从事基坑工程相关研究与教学工作,吉林省长春市西民主大街938号,lczhou@jlu.edu.cn。

引用格式:黄思源,周林聪,刘怡威,等.桩土界面直剪试验装置设计与模拟应用[J].钻探工程,2025,52(6):104-110.

HUANG Siyuan, ZHOU Lincong, LIU Yiwei, et al. Design and experimental application of a direct shear test apparatus for the pile-soil interface[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 104-110.

齐等^[1]通过试验和数值模拟,研究不同注浆材料对后压浆桩桩土界面力学特性的影响;刘卡伟等^[2]基于桩土界面摩擦特性与桩周土体应力状态,开展理论与试验研究,建立基桩极限侧阻力计算模型;叶帅华等^[3]通过分析桩土界面剪切特性建立计算模型,结合实例和数据验证,探讨单桩沉降和承载变化规律;刘俊伟等^[4]针对恒刚度桩土界面在循环荷载下的力学特性,研究其循环弱化机制,分析循环次数、荷载幅值等因素对界面强度和刚度退化的影响。

为确保剪切面应力均匀分布,单剪试验装置是研究土与混凝土结构面力学特性的首选。王永洪等^[5]通过自制大型直剪试验仪,研究近海黏性土中粉质黏土-混凝土桩土界面,分析粗糙度和含水率对其剪切特性的影响;张玲等^[6]通过室内直剪试验研究了法向应力、桩身材料、土体性质等因素对筋箍碎石桩桩土界面摩擦特性的影响;陈志雄等^[7]通过改造传统直剪仪进行室内土工直剪试验,研究温度对能量桩土接触面剪切特性的影响;王晓强等^[8]研究了桩土界面在非等温、不排水条件下的力学特性,通过温度变化分析界面剪切强度、孔隙水压力及应力-应变关系的影响;张致远等^[9]对非饱和膨胀土-桩界面开展大型剪切试验,分析含水率、基质吸力对界面剪切强度与变形特性的影响。

除直剪试验外,研究人员针对不同岩土特性和测试需求发展出多种剪切试验方法。为了测试原位岩土体的抗剪强度参数,张祥恒等^[10]详细介绍了原位剪切试验原理与方法;周葆春等^[11]通过对不同膨胀潜势等级的膨胀土进行环剪试验,分析其残余强度特性及含水率、孔隙比、法向应力等影响因素;舒龙勇等^[12]针对松软破碎煤体取制样及力学参数测试难题,研制了集低扰动取制样与高精度环剪试验于一体的集成化系统。

然而传统直剪试验多采用平面剪切面,未考虑实际桩体的弧形表面及粗糙度的影响,且桩模型与施工工况脱节,未体现材料多样性和施工过程的影响。本文旨在设计一种基于桩的实际弧形表面和粗糙度的桩土界面直剪试验装置,利用该装置模拟实际工况,开展桩土界面大型剪切试验,探究含水率、粗糙度、法向应力等因素的影响,通过分析试验数据,判断仪器的适用性。本文设计的装置可为桩土界面力学特性测试提供参考,为桩土界面力学特性研究提供借鉴。

1 新型桩土界面直剪试验装置设计

1.1 设计原理

在土力学研究中,土的剪切试验是获取土体抗剪强度特性的核心途径。土体抗剪强度由土颗粒间黏聚力,以及与法向应力相关的摩擦力构成。试验时,对土体施加不同法向应力与剪力,测定其剪切变形和抗剪强度,从而确定抗剪强度指标。

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ —抗剪强度; c —黏聚力; σ —法向应力; φ —内摩擦角。

对粗糙度的评价方法区别于传统直剪试验,由于传统直剪试验剪切面水平,并不符合实际工程,因此针对弧形表面选用灌砂法,即利用凹槽处可填砂的体积与表面积的比值作为量化标准。该量化标准可以很好地评价复杂表面的粗糙程度。

$$h = V/S \quad (2)$$

式中: h —平均灌砂深度; V —灌砂体积; S —桩弧形表面积。

1.2 基本结构

该桩土界面直剪试验装置功能明确,包含容器系统和加载系统两部分。

1.2.1 容器系统

容器系统由上剪切盒和下剪切盒2部分组成。上剪切盒如图1所示,整体为长方体,包括外仓与内仓,外仓顶部布置传力螺栓,对传力螺栓施加作用力模拟土侧向受力。下剪切盒如图2所示,外侧设置加载垫片,以便对桩土试样施加法向应力,侧表面开有半径55 mm的半圆孔,用于封闭容器端部,为桩土界面直剪试验提供合适的边界条件,确保试验的准确性和可靠性。

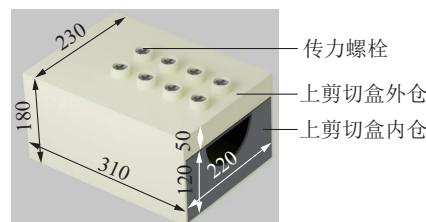


图1 上剪切盒示意

Fig.1 Schematic diagram of the upper shear box

下剪切盒能够为土样提供稳定的约束环境,从而模拟实际工程中土体的边界条件。由于土体体积较大,为了保证土体容器的强度,容器主体采用

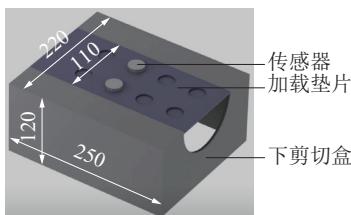


图 2 下剪切盒示意

Fig.2 Schematic diagram of the lower shear box

PVC 材质，并在内部添加支撑来保证整体刚度。容器内部设计尺寸可确保土样在受力过程中能够充分反映桩土界面的力学特性。

1.2.2 加载系统

加载系统是进行直剪试验的核心部分，可以模拟桩土界面的法向和切向受力。切向加载采用 DDL300 型万能试验仪，如图 3 所示，利用仪器下部压缩装置，推动桩体在剪切盒中竖向移动，通过万能试验仪控制加载方式，并利用桩体位移和加载力采集桩土界面的剪力-剪切位移关系。法向应力则由固定在上剪切盒外仓上的螺栓提供，螺栓下与加载垫片间添加纽扣式压力传感器，配合示数器以精准控制桩侧法向力。如图 4 所示，为保证加载力尽可能均匀地向桩体表面传递，加载螺栓位于模具中间两横排放置，其下纽扣式压力传感器采用相同型号，并连接于同一示数器上。

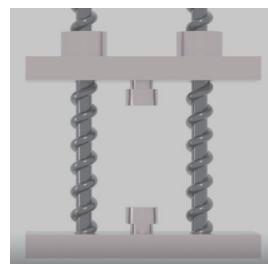


图 3 切向加载装置示意

Fig.3 Schematic diagram of the tangential loading device

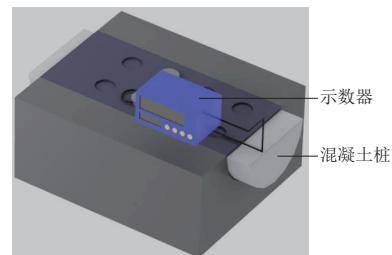


图 4 示数器示意

Fig.4 Schematic diagram of the indicator

2 室内直剪试验

2.1 试验材料

2.1.1 桩周土体材料

试验用土取自长春市内，为开展不同含水率的黏土-混凝土桩界面剪切试验，根据标准^[13]配制重塑试验样土。为测量土样的最优含水率以及饱和含水率，参照标准进行击实试验，试验结果见表 1。

表 1 试验制备土物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of the soil prepared for the test

孔隙率	最优含水率/%	饱和含水率/%	湿密度/(g·cm ⁻³)	最大干密度/(g·cm ⁻³)	土粒密度/(g·cm ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa
0.35	15.8	21.8	1.9	1.6	2.71	15.4	13	0.41	4.5

对原状土进行烘干、粉碎和过筛(5 mm)3道工序后密封保存，后续试验每次取出5 kg土样，按照预设含水率，用喷壶向土样中多次喷入纯净水并搅拌，直至达到目标含水率。预配好后静置1~2 d，保证土样内部水分均匀。

装入模具时，将所有土样分5次夯实，控制每次夯实后的深度基本一致。因面积差异，包裹桩体的部分击实锤每层击实200次，覆盖桩体的部分每层击实300次。每层之间进行刮毛处理，最外层与剪切盒齐平，保证组合后能与上剪切盒紧密贴合。

2.1.2 不同粗糙度的桩模型制作

试验中采用空间模型扫描技术和3D打印技术制作现浇混凝土桩的表面复刻桩模型，如图5所示。使用空间模型扫描软件MAGIC3D对实际工程桩体进行扫描，获得其表面信息，软件计算并生成成品效果图，扫描数据以STL格式导出，并截取其信息完整的中间部分导入3D打印机，选用树脂材料打印缩尺桩体模型，将树脂模型置入装有石膏的模具中倒模，利用倒模模型作为模板进行粗糙表面现浇桩的复刻工作。

试验中为了模拟实际工程，考虑桩体的表面粗

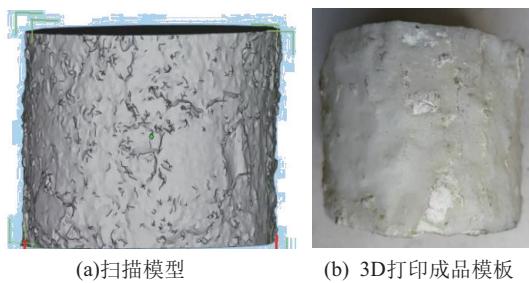


图 5 桩体 3D 打印模型
Fig.5 3D-printed pile models

糙度以及混凝土材料本身的摩擦能力,采用水:砂:水泥为 0.4:1:1.2 的净砂浆按照 3D 打印的倒模模型制作混凝土桩。人工搅拌完成后,置入模具中捣实,并置于振捣台上振捣均匀,静置于模具中 1 d 后拆模,再于水浴环境中养护 7 d,待其表面水分完全蒸发即可使用。

本试验基于此方法共设置 3 个试验桩模型,如图 6 所示。按照粗糙度由小到大排序依次为 Z 桩(扫描模型桩 1)、F 桩(扫描模型桩 2)、S 桩(大粗糙表面桩)。其中 Z 桩和 F 桩取自不同粗糙度的桩体扫描模型,S 桩则是在此基础上利用随机生成的具有更大不平滑度的倒模模板制作而成。



图 6 不同粗糙度的桩模型

Fig.6 Pile models with different roughness levels

2.2 试验工况

为了验证本文研制的新型桩土界面直剪试验装置的可靠性和实用性,并以此研究桩土界面的力学特性,针对含水率、粗糙度、法向应力等试验参数进行 80 组直剪试验。试验装置如图 7 所示。

试验以 0.05 mm/s 的剪切速率加载,当峰值应力稳定或明显下降时停止。为保证每组试验的含水率保持稳定,同一含水率组别的试验一次做完。

本试验法向应力 σ 分别为 4.5、7、9 kPa,混凝土桩粗糙度则分别用 Z、F、S 代表粗糙表面 1、2、3。传

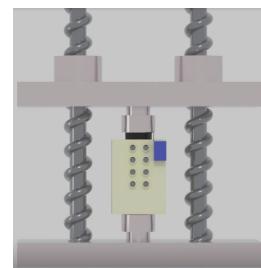


图 7 直剪试验装置
Fig.7 Direct shear test device

统的试验方法较难适用于圆柱形混凝土桩模型的弧形表面,因此本试验对传统方法进行如下改进:(1)用皮尺测量桩体最大外轮廓周长,以此计算弧形桩外体积 V_1 ,并以此周长按照半圆形计算接触面积 S ;(2)将充分浸润的桩模型放入装满水的容器中,测量其排水体积,以此设定为内体积 V_2 ;(3)计算 V_1 与 V_2 之差,即为灌砂体积 V ;(4)代入式(2),记录结果。详细数据见表 2。含水率作为试验的基本变量,共设置 5 个组别,含水率从低到高分别用 R1、R2、R3、R4、R5 表示,详细数据见表 3。

表 2 各模型桩的粗糙度

Table 2 The roughness of each model pile

粗糙度标号	接触表面积/ cm ²	灌砂体积/ cm ³	平均灌砂深度/ cm
Z	395.8	83.1	0.21
F	405.3	113.5	0.28
S	424.1	173.9	0.41

表 3 土样含水率

Table 3 The actual water content of the soil samples

组别称号	目标含水率/%	实际含水率/%
R1	10	11.6
R2	12.5	13.4
R3	15	15.0
R4	17.5	17.8
R5	20	21.3

3 试验结果分析

3.1 恒定法向应力加载下不同含水率土体的直剪试验

根据试验数据,绘制 Z 桩在恒定法向应力、不同含水率下的桩土界面剪力-剪切位移($F-s$)关系曲线,如图 8 所示。纵向对比 $F-s$ 曲线可以看出,所有

曲线均存在先单调递增后递减的典型特征,曲线斜率的变化受含水率影响显著,随着剪切位移的增加

加,曲线达到峰值后的下降速度随着含水率的增大而增大,表明界面应力软化随含水率升高而增强。

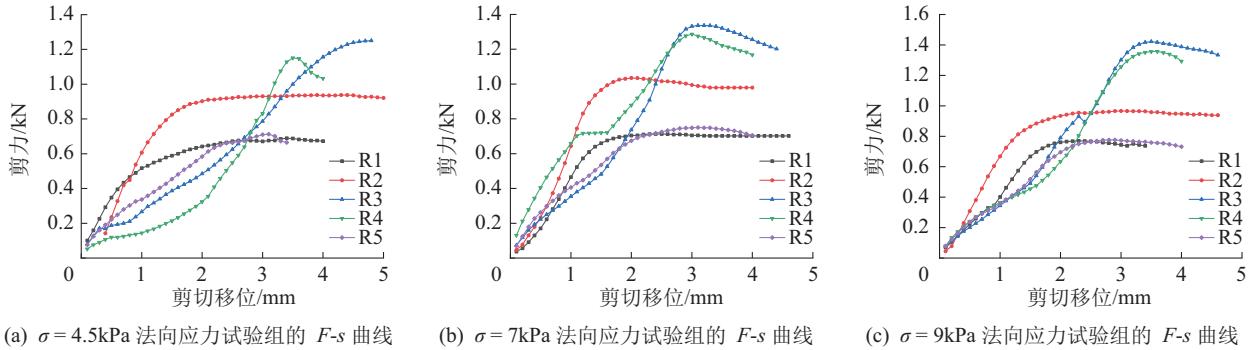


Fig.8 The results of the interface direct shear test under different water contents

分析其原因,低含水率时,干燥土颗粒紧密咬合,摩擦作用强,抗剪能力较强;随着含水率增加,颗粒间形成润滑层,摩擦系数降低,同时土体吸水膨胀导致结构松散,抗剪能力下降;接近饱和时,孔隙水压力增大,有效应力进一步降低。综合作用下,峰值承载力随含水率升高先增后减,两端呈“S”型分布。具体机制为:低含水率时基质吸力主导强度;中高含水率时,润滑效应、膨胀软化和孔隙水压力共同作用;饱和后强度主要由排水条件决定。

3.2 恒定法向应力加载下不同粗糙度模型桩的直

剪试验

根据试验数据,绘制了法向应力为 $\sigma=4.5\text{ kPa}$ 加载条件下,恒定含水率、不同粗糙度条件下桩土界面 $F-s$ 关系曲线,如图 9 所示。由图 9 可知,桩土界面力学性能受粗糙度与含水率耦合影响。同一法向应力下, $F-s$ 曲线均呈现先增后减趋势,粗糙度的增大会增强界面承载力,峰值最高点出现在 R3 含水率组 S 桩。观察破坏面可知,粗糙度增加会使桩体凹陷处产生撕裂剥落,接触面积和机械咬合力的增大导致应力传递路径复杂化,引发土体内部应力分布不均。

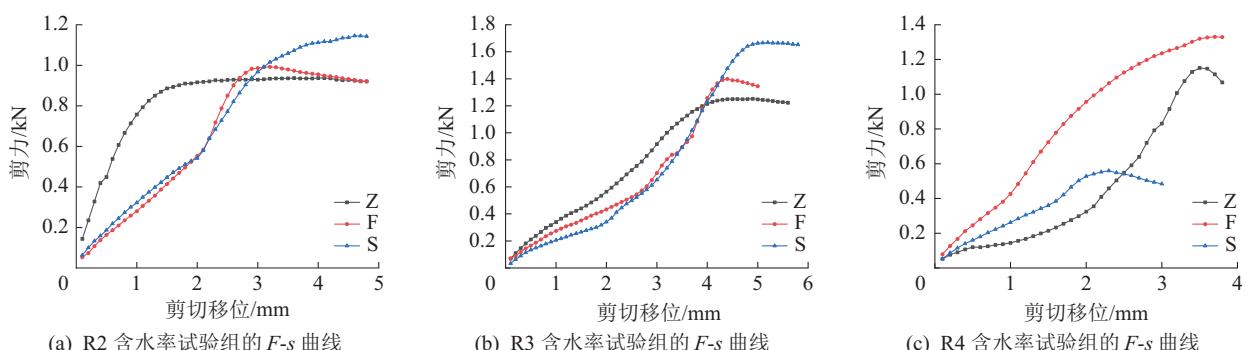


图 9 不同粗糙度下界面直剪试验结果

Fig.9 The results of the interface direct shear test under different roughness conditions

横向对比图 9(a)~(c)发现,含水率越高,桩土界面峰值承载力后的软化速率越快,且会增强粗糙度对界面剪力的影响。横向对比不同含水率组的试验结果可见含水率越大,同组别下各粗糙度组别峰值承载力的差异越大。这意味着含水率和粗糙

度两个参数对桩土界面力学性能存在耦合作用。

3.3 恒定含水率土体的不同法向应力直剪试验

根据试验数据,绘制 Z 桩在恒定含水率、不同法向应力条件下桩土界面 $F-s$ 关系曲线,如图 10 所示。

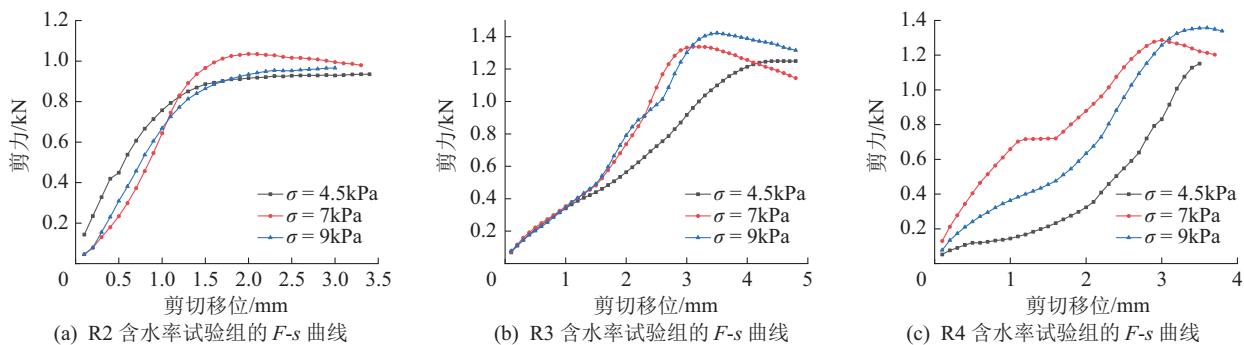


图 10 不同法向应力下界面直剪试验结果

Fig.10 The results of the interface direct shear test under different normal stresses

通过对比可知,桩土界面 $F-s$ 曲线均呈现先增后减趋势,法向应力提高使承载力小幅上升,其中 R3 含水率试验组 $\sigma=9\text{ kPa}$ 时的剪力峰值最大。含水率显著影响曲线形态。横向对比图 10(a)~(c)发现,高含水率加速峰值后软化速率,这是由于水分削弱了土体黏结作用,同时法向应力增大虽增强机械嵌锁效应,但黏性土的黏聚力限制了承载力提升幅度,因此界面承载力变化相对平稳。

4 装置的工程应用价值

4.1 准确性

该装置在模拟实际工程桩土界面的直剪试验方面拥有较高的准确性。通过 3D 打印等技术复刻实际工程桩的弧形表面,改变传统直剪装置的平面剪切模式,使其更接近实际工程桩体的弧形表面。同时,比传统直剪试验更大的容积结构设计,增大剪切接触面积的同时,能更好地体现粗糙表面特征,使试验结果的代表性更强,有效反映实际工程中桩体表面凹凸结构的力学影响。试验过程中装填土时采用夯实工艺,模拟水泥灌注过程中混凝土与土体的机械咬合作用,相较于传统直剪试验设备将混凝土和土体放在一起试验,夯实能使桩土界面达到嵌锁状态,更贴近工程实际工况。由于该装置采用了模块化设计,上下剪切盒通过定位销快速连接,土样容器装卸简便,组装时间短,可拆解运输至现场进行原状土试验。因此该试验更贴合工程中桩土界面的实际情况,试验数据更加准确。

4.2 高效性

该装置还拥有效率高的优点。基于现场实测数据,采用空间模型扫描与 3D 打印技术快速复刻的实际工程桩的弧形表面模型,较传统模具制作工

艺大幅缩短模型制备周期,从数据采集到模型完成的全流程耗时很短,高效实现工程桩表面形态与粗糙度特征的精准复刻。

4.3 经济性

该装置具备显著的经济优势,采用模块化可拆卸设计,核心部件如剪切盒选用 PVC 材料,易获取且成本低。3D 打印的桩模型模具可重复多次使用,较传统浇筑工艺降低大量耗材成本。灌砂法粗糙度量化系统设备投入少,且维护简便。装置整体结构耐用性强,关键部件寿命长,为桩土界面研究提供低成本的经济型试验装置。

5 结论

本研究通过设计一种可模拟实际工程桩弧形表面形态和粗糙度特征的直剪试验装置,并开展多组不同含水率、粗糙度及法向应力条件下的桩周土-混凝土桩接触面直剪试验,对桩土界面剪切特性展开了系统试验研究,取得了以下成果:

(1)本文设计的新型桩土界面直剪装置采用双剪切盒嵌套结构,综合螺栓加载与液压推进系统,实现法向应力与切向位移的独立精确控制。装置通过 3D 打印技术复刻工程弧形表面混凝土桩,模拟桩土界面的力学特性。装置容器系统包含上剪切盒传力螺栓系统、下剪切盒液压推进装置及 PVC 土样容器,确保应力均匀传递与土体稳定约束。

(2)系统开展不同含水率、粗糙度及法向应力条件下的直剪试验,结果表明:土体界面承载力随含水率呈现先增后减的典型特征,在最优含水率区间达到最大值,随着剪切位移的增加,曲线达到峰值后的下降速度随着含水率的增大而增大;界面粗糙度的增大显著提升承载力,法向应力与剪力呈正

相关。试验结果与实际情况高度吻合,验证了装置设计的适用性与科学性,具有可靠的工程应用价值。

(3)该装置具有优秀的准确性、高效性和经济性。通过3D打印技术精准复刻实际工程桩的弧形表面,以大容积结构设计扩大剪切接触面积,配合分层夯实工艺模拟水泥灌桩时的机械咬合,有效还原实际工程中桩土界面的接触特征,确保试验条件与工程实际高度吻合。基于现场实测数据的空间模型扫描与3D打印技术耗时远低于传统模具制作,从而实现桩体模型的快速制备与粗糙度特征的精准复现,大幅提升试验效率。装置采用模块化可拆卸设计,核心部件选用PVC材料,易获取且成本低,3D打印模具可重复使用,结合灌砂法低成本粗糙度量化系统,为桩土界面直剪试验研究提供了经济的试验装置。

参考文献(References):

- [1] 贤诗齐,戴国亮,钱晓楠.不同注浆材料作用下后压浆桩-土界面力学特性分析[J].东南大学学报(自然科学版),2023,53(3):496-503.
ZANG Shiqi, DAI Guoliang, QIAN Xiaonan. Analysis on mechanical properties of post-grouting pile-soil interface with different grouting materials[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2023, 53(3): 496-503.
- [2] 刘卡伟,邓少华.基于桩土界面摩擦特性和桩周土体应力状态的基桩极限侧阻力分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(3):68-74.
LIU Kawei, DENG Shaohua. Analysis of ultimate shaft resistance of foundation pile based on friction characteristic of pile-soil interface and stress state of soil around pile[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46 (3): 68-74.
- [3] 叶帅华,辛亮亮.基于桩-土界面剪切特性的单桩沉降和承载问题研究[J].岩土力学,2024,45(5):1457-1471.
YE Shuaihua, XIN Liangliang. Settlement and bearing capacity of single pile based on shear characteristics of pile-soil interface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5): 1457-1471.
- [4] 刘俊伟,朱娜,凌贤长,等.恒刚度桩-土界面循环弱化机制[J].振动、测试与诊断,2022,42(6):1163-1169.
LIU Junwei, ZHU Na, LING Xianchang, et al. Cyclic weakening mechanism of constant stiffness pile-soil interface [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42 (6) : 1163-1169.
- [5] 王永洪,王鑫,张明义,等.近海黏性土中桩土界面剪切特性与含水率效应[J].地下空间与工程学报,2024,20(4):1236-1246.
WANG Yonghong, WANG Xin, ZHANG Mingyi, et al. Effects of water contentand shear properties on pile-soil interface of offshore cohesive soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(4): 1236-1246.
- [6] 张玲,徐泽宇,姚攀,等.钢筋碎石桩-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):72-81,10003.
ZHANG Ling, XU Zeyu, YAO Pan, et al. Experimental study and discrete element simulation on interface friction of geo-en-cased stone columns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 72-81, I0003.
- [7] 陈志雄,甘丰嘉,王成龙,等.温度影响下能量桩-土接触面剪切特性试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(3):16-23.
CHEN Zhixiong, GAN Fengjia, WANG Chenglong, et al. Experimental study on shear behavior of energy pile-soil interface affected by temperature [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3): 16-23.
- [8] 王晓强,张志超,王炼堯.桩-土界面的非等温不排水剪切行为分析[J].深圳大学学报(理工版),2022,39(1):13-19.
WANG Xiaoqiang, ZHANG Zhichao, WANG Shuoyao. Analysis of undrained non-isothermal shear behavior of pile-soil interface [J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2022, 39(1): 13-19.
- [9] 张致远,钱建固,王成.非饱和膨胀土-桩界面大型剪切试验与本构模拟[J].岩土工程学报,2022,44(增刊2):207-210.
ZHANG Zhiyuan, QIAN Jiangu, WANG Cheng. Large-scale shear tests and constitutive modeling of unsaturated expansive soil-pile interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S2): 207-210.
- [10] 张祥恒,王振,曹凡,等.原位剪切试验在工程滑坡勘察中的应用[J].钻探工程,2024,51(1):139-146.
ZHANG Xiangheng, WANG Zhen, CAO Fan, et al. Application of in-situ shear test in engineering landslide investigation [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 139-146.
- [11] 周葆春,王江伟,单丽霞,等.不同膨胀潜势等级的膨胀土残余强度环剪试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(6):1325-1331.
ZHOU Baochun, WANG Jiangwei, SHAN Lixia, et al. Torsional ring shear tests on residual strength of expansive soils with different swelling potentials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(6): 1325-1331.
- [12] 舒龙勇,饶文铭,范喜生,等.松软破碎煤体取制样与剪切试验系统研制及应用[J].煤炭科学技术,2024,52(2):126-134.
SHU Longyong, RAO Wenming, FAN Xisheng, et al. Development and application of sample preparation and shear test system for soft crushed coal [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 126-134.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.

(编辑 王跃伟)