

引用格式:丁晓勇,许能权,邢皓枫.光伏支架型钢桩宏观细观受力特性试验研究[J].工业建筑,2025,55(4):154-161. DING Xiaoyong, XU Nengquan, XING Haofeng. Experimental Research on Macro and Micro Mechanical Characteristics of Photovoltaic Support Steel Piles[J]. Industrial Construction, 2025, 55(4): 154-161 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG23010203

光伏支架型钢桩宏观细观受力特性试验研究

丁晓勇¹ 许能权¹ 邢皓枫²

(1. 上海电气工程设计有限公司, 上海 201199; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘 要 太阳能光伏发电是清洁能源主要的发展方向之一, 因此对于光伏支架基础的选择尤为重要。型钢桩因其贯穿能力强、质量轻、便于运输等优势而被广泛用于沙漠地区的光伏发电工程。为揭示光伏支架型钢桩的受力特性, 通过界面剪切试验从宏、细观的角度揭示不同密实度和围压下桩-土界面摩擦特性。同时, 基于界面剪切试验结果开展型钢桩拉拔试验, 从宏观角度分析不同围压条件下型钢桩承载特性及桩身内力分布规律。结果表明: 型钢桩与砂土接触面剪切过程呈现出软化特性, 型钢桩与桩周土体接触面摩擦角大于桩周土体自身内摩擦角, 且与砂土密实度呈正相关; 型钢桩侧摩阻力发挥程度与桩周土体间相对位移具有显著的相关性, 当相对位移为 8~11 mm 时达到峰值强度; 型钢桩截面形状对其承载特性有明显影响, H 型钢桩承载力大于 C 型和槽型, 且 H 型钢桩腹板内侧摩阻力大于翼缘外部。

关键词 光伏支架; 型钢桩; 承载特性; 界面剪切试验; 拉拔试验

Experimental Research on Macro and Micro Mechanical Characteristics of Photovoltaic Support Steel Piles

DING Xiaoyong¹ XU Nengquan¹ XING Haofeng²

(1. Shanghai Electrical Engineering Design Co., Ltd., Shanghai 201199, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Solar photovoltaic power generation is one of the main development directions of clean energy, so the selection of photovoltaic support foundation is particularly important. Sectional steel piles have been widely used in photovoltaic power generation projects in desert areas because of their strong penetration capacity, light weight and convenient transportation. Considering the stress characteristics of photovoltaic supports, the frictional characteristics of pile-soil interface under different compactness and confining pressures were revealed through large-scale direct shear tests. Based on the results of large-scale direct shear tests, the pull-out tests of sectional steel piles were carried out to explore the bearing characteristics and internal force distribution of piles under different pile types and confining pressures. The research results showed that the shear process of the contact surface between the steel pile and sandy soil presented softening characteristics, and the friction angle between the steel pile and its surrounding soil was greater than the soil's internal friction angle, and became more obvious with the increase of the compactness of the soil; there was a good correlation between the ultimate lateral friction of sectional steel piles and the relative displacement of soil around the piles, and the peak strength occurred at 8 to 11 mm relative displacement in sandy soil. The results of pull-out tests presented that the section shape of sectional steel piles had significant influence on its bearing characteristics, the bearing capacity of H-

第一作者: 丁晓勇, 硕士, 高级工程师, 主要从事地基处理和基础研究工作, dingxy4@shanghai-electric.com。

通信作者: 邢皓枫, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理、桩基工程和测试技术的教学与科研工作, hfxing@tongji.edu.cn。

收稿日期: 2023-01-02

shaped piles was higher than those of C-shaped piles and channel shaped piles, and the friction resistance at the inside web of H-shaped piles was greater than the outside flange.

Keywords: photovoltaic support; sectional steel pile; bearing characteristics; large-scale shear test; pull-out test

0 引言

随着全球能源形势的发展,清洁能源逐渐取代传统化学能源,太阳能光伏发电已成为清洁能源的主要发展方向之一。据相关数据显示:2020—2025 年全球光伏市场新增装机容量预计可达 266 GW,且在之后十余年里全球光伏新增装机容量预计保持稳健增长^[1]。全球范围内光伏发电容量占能源供应比例进一步增大,并将成为世界能源供应的主体,给能源发展带来革命性的变化^[2]。

沙漠地区是修建光伏电站的理想环境,但由于交通不便致使光伏支架基础的选型受到极大限制,传统的预制钢筋混凝土存在运输和施工的困难,钻孔灌注桩又因缺水而无法施工。鉴于型钢桩具有质轻、贯穿能力强、抗水平力高以及运输和施工便利等优点,能较好地适应沙漠干燥环境,被视为沙漠地区光伏支架首选的基础形式^[3-4]。目前,关于型钢桩的研究主要集中于 H 型钢桩承载特性的原位试验分析上。如,Seo 等^[5]通过 H 型钢桩静载荷试验获取桩体变形,并对静力荷载作用下 H 型钢桩的桩侧摩阻力和桩端阻力进行计算。So 等^[6]对花岗岩残积土中的 H 型钢桩加载试验展开研究,发现 H 型钢桩较长时桩身会发生屈曲破坏,且在极限荷载下其蠕变沉降与桩长呈正相关。王艳华^[7]对香港将军澳地区的 H 型钢桩开展静动力载荷试验,发现 H 型钢桩侧摩阻力占比为 50%~60%,侧摩阻力产生于桩下 1/3 范围内,且端阻力占比与荷载呈正相关。郭朋鑫^[8]对 H 型钢桩的强轴、弱轴分别进行了水平单调加载试验和水平循环加载试验。现有研究成果主要针对 H 型钢桩开展一系列现场试验,然而由于现场试验成本较高、离散性大、受力状态较难控制且可复性难,为获取型钢桩-土受力作用机理,室内模型试验则是较理想的手段和方法^[9-12]。

因此,将利用大型多功能剪切仪进行型钢桩-土界面剪切试验,分析不同密实度砂土在 4 种围压下接触面剪应力的分布规律,探索型钢桩-土细观受力机理。同时,基于剪切试验结果,开展型钢桩拉拔试验,研究不同截面型钢桩的桩身荷载-位移

曲线特性与桩侧摩阻力的分布规律,进一步探究 H 型钢桩不同截面位置的侧摩阻力分布,从宏观上揭示光伏支架型钢桩受力特性,以期为类似的桩基设计提供理论依据。

1 型钢桩受力特性试验

1.1 试验设备

试验选用 SJW-200 型多功能界面剪切仪,其长×宽×高为 600 mm×400 mm×200 mm,剪切试验设备如图 1 所示。该设备具有操作简单、试验可重复性强,且其尺寸较大,一定程度上可以减少尺寸效应对试验结果的影响。

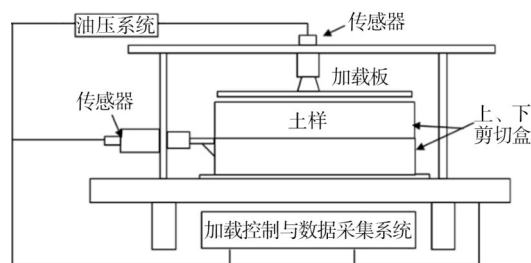


图 1 剪切试验设备示意

Fig. 1 A schematic diagram of set-up for shear tests

在实际工程中,光伏支架受风荷载作用而经常使其下部的型钢桩承受拉拔荷载作用,为研究不同截面形状的型钢桩的拉拔特性与桩周土体的细观变形特征,针对剪切设备进行改进,以实现型钢桩的拉拔试验,改进后的下剪切盒试验设备如图 2 所示。

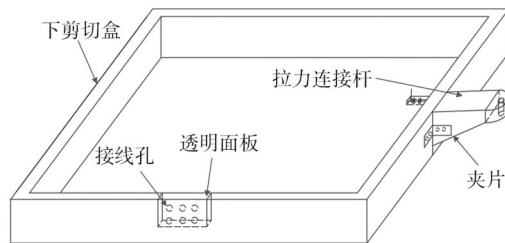


图 2 改进后的下剪切盒试验设备

Fig. 2 The improved lower shear set-up

1.2 试验砂土配制和型钢桩制作

基于沙漠地区光伏支架型钢桩工程,土样选取

细砂土,由室内土工试验测得砂土样最大孔隙比 $e_{\max}$ 为0.902、最小孔隙比 $e_{\min}$ 为0.617、相对密度 d_s 为2.67,颗粒级配曲线如图3所示。

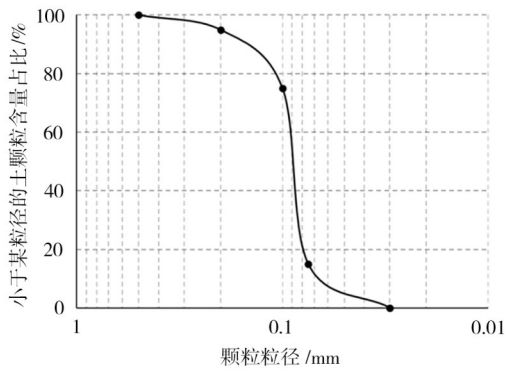


图3 试验土样颗粒级配曲线
Fig. 3 The granular grading curve of soil samples

型钢桩采用厚度4 mm的Q355B型钢板加工制作而成,其弹性模量为206 GPa,根据剪切盒大小确定用于剪切试验的型钢桩尺寸为长×宽×高=600 mm×400 mm×50 mm。为进行不同类型型钢桩受力特性对比分析,制作的H型、C型和槽型(图4)截面面积均为928 mm²,桩长根据剪切盒的大小取0.5 m。

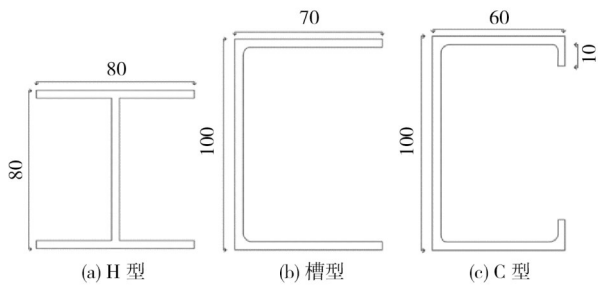


图4 型钢桩截面尺寸示意 mm
Fig. 4 Schematic diagrams of dimensions for sectional steel piles

1.3 试验方案及步骤

1.3.1 试验方案

为模拟沙漠地区光伏支架型钢桩不同深度和不同密实度下桩土接触面摩擦特性,型钢桩-砂土界面剪切特性试验设计了3组密实度和4种法向压力,见表1。同时,鉴于下剪切盒净尺寸为600 mm×400 mm×100 mm,制作的型钢桩尺寸为600 mm×400 mm×50 mm,故在安装型钢桩前在其下部先充填厚度为50 mm的实木板,然后再放入型钢桩。试验剪切界面如图5所示。

为探索沙漠地区光伏支架型钢桩拉拔特性以及桩周砂土体的受力特征,试验沿型钢桩每间隔

表1 试验方案
Table 1 Test schemes

试验组别	相对密实度 D_r	围压 σ/kPa
1	0.30	100、200、300、400
2	0.50	100、200、300、400
3	0.70	100、200、300、400

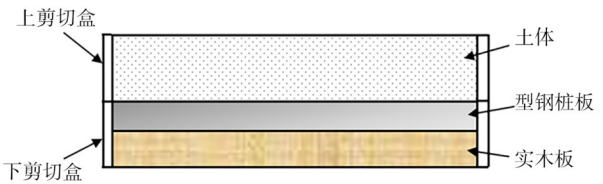


图5 型钢桩界面示意
Fig. 5 A schematic diagram of the interface of sectional steel piles

50 mm在其翼缘两侧对称性地布设BX120-3AA型电阻式应变片,以获得型钢桩轴向应变,并在型钢桩腹板和翼缘内部沿桩身间隔100 mm布设一个微型土压力计,如图6(a)所示。应变片采用半桥接法,如图6(b)所示,其栅丝尺寸为2 mm×1 mm,基底尺寸为4.5 mm×2.4 mm,电阻为120 Ω ,灵敏系数为2.08%;而微型土压力计厚度为2 mm、外径8 mm,如图6(c)所示,其量程600 kPa。值得注意的是,为了消除应变片及土压力盒导线的影响,已在采集软件上进行相关线阻设置。

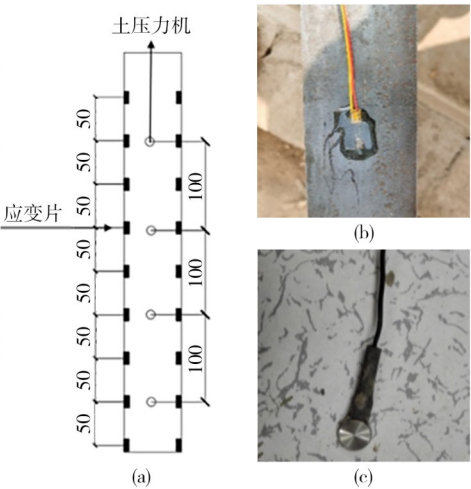


图6 监测原件布设示意 mm
Fig. 6 A schematic diagram of arrangements of monitoring apparatus

型钢桩为异形截面桩,其桩土作用机理决定了其侧摩阻力发挥及其承载力计算方法,如H型钢桩因视作“全土塞效应”而将其截面简化为方形进行侧摩阻力计算^[5],但是针对型钢短桩是否合理,将通过彩色砂条(图7)变形形态来获取土体变化规律,

并测量彩色砂条变形位移、变形高度等细观参数以便从量化角度探索型钢桩的土塞效应。

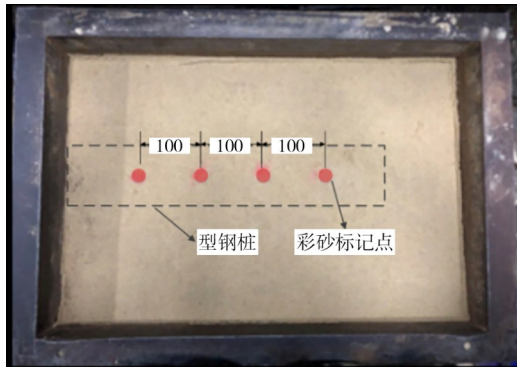


图7 示踪彩砂布置 mm

Fig. 7 Arrangements for color sand to display sand deformation

1.3.2 试验步骤

型钢桩与砂土接触面剪切试验过程中采用2.0 mm/min的剪切速率进行加载剪切,并由自动数据采集仪记录剪切过程中桩侧土层摩阻力与桩土相对位移关系;此外,考虑到剪切盒壁厚,剪切过程中随着剪切位移的增大,剪切面积减小、试验土体被推出下剪切盒边缘以及上、下剪切盒的分离都会对试验结果造成一定影响,因此剪切位移控制在25 mm以内。

型钢桩拉拔试验中待上、下剪切盒准备完成后,计算填满剪切盒所需相对密实度为0.70的砂土质量。同时,确保每次试验所填满的砂土质量一致,以减少土体因素所产生的试验误差。确保上、下剪切盒对齐,防止因为箱体错位而产生误差。在图6(a)所示位置处理设土压力计,并将仪器推入水

平和竖向加载系统中,调整竖向荷载大小,达到试验方案所设定的数值后保持不变;拉拔试验同样采用位移控制法来施加拉拔荷载,以此来模拟实际工况下型钢桩上拔过程。试验过程中拉拔速率仍为2 mm/min,记录应变片、土压力传感器、拉拔荷载、桩身位移的数值。

2 试验结果及分析

2.1 型钢桩剪切应力-位移特征

图8为不同密实度条件下型钢桩-砂土界面剪切应力-水平位移曲线,可知:不同密实度条件下型钢桩-砂土界面剪切应力-水平位移曲线变化趋势基本一致,但不同密实度条件下剪切峰值强度存在显著差异,且剪切峰值强度与砂土密实度以及围压呈正相关。当砂土密实度为0.70时,围压由100 kPa增大到400 kPa对应的剪应力峰值分别为67.47、135.23、197.73、267.67 kPa,相较于密实度为0.50和0.30砂土,剪应力峰值有明显提升。整体来看,剪切应力随剪切位移增大呈典型的非线性增长趋势。当达到极限剪切应力后,随着剪切位移的增大,剪切应力经软化后达到稳定的残余值,且软化特性随围压的增大而逐渐减弱。此外,各级围压作用下达到剪切峰值强度对应的水平位移存在差异,且剪切位移随围压的增大而增大。这主要是由于随围压的逐级增大,砂土趋于“最优密实状态”,土颗粒间咬合作用更强,土体强度增大,从而导致土体达到剪切破坏状态时变形更大。

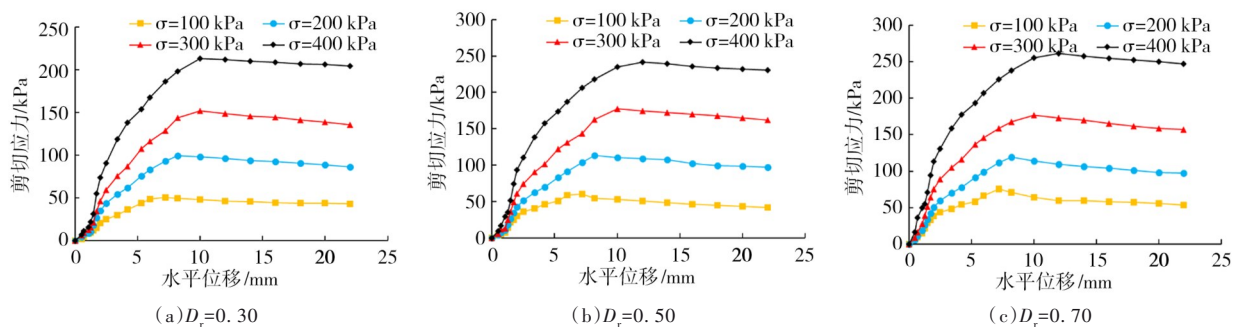


图8 不同密实度条件下型钢桩-砂土界面剪切应力-水平位移曲线

Fig. 8 Curves of shear stress vs. displacement at the interface between sectional steel piles and sandy soil in different degrees of compactness

2.2 最大剪切应力及界面摩擦角

表2为不同密实度条件下峰值剪切应力和桩土界面摩擦角。可知:砂土密实度对桩-土界面摩擦角具有显著影响,整体表现出砂土密实度越大,内摩擦角越大,桩-土界面摩擦角越大。这主要是随

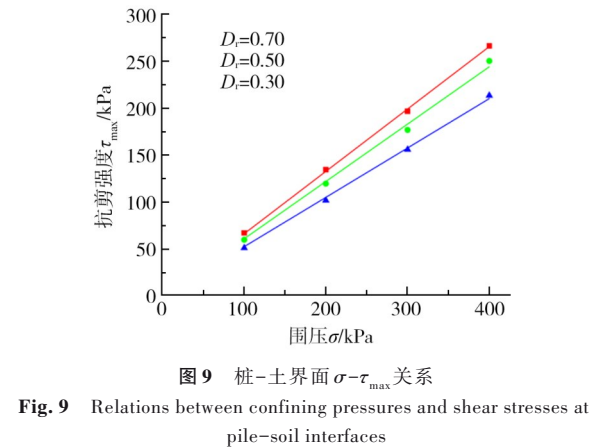
砂土密实度的增大,颗粒间的咬合作用随之增强,从而导致型钢桩-砂土界面摩擦角更大,且高于砂土自身的内摩擦角。根据表2中峰值强度,绘制 σ - $\tau_{\max}$ 关系曲线(图9),得到0.70、0.50和0.30三种相对密实度下的桩-土界面统一的摩擦角,分别为

33.7°、31.5°和27.8°。可见,实际工程应用中若按砂土自身内摩擦角分析桩-土界面的摩擦特性会偏于保守。

表2 峰值剪切应力和桩-砂土界面摩擦角

Table 2 Peak shear stresses and frictional angles at the interface between piles and sandy soil

相对密实度 D_r	内摩擦角 $\varphi/ (^{\circ})$	围压 σ/ kPa	最大剪应力 $\tau_{\max}/ \text{kPa}$	界面摩擦角 $\varphi/ (^{\circ})$
0.70	30~33	100	67.47	34.0
		200	135.23	34.1
		300	197.73	33.7
		400	267.67	33.8
0.50	27~30	100	60.23	31.1
		200	120.27	31.0
		300	177.76	30.6
		400	251.48	32.2
0.30	25~27	100	51.45	27.2
		200	102.28	27.1
		300	156.74	27.6
		400	214.61	28.2



2.3 型钢桩受力细观特性

图10、11分别为彩砂示踪结果和土体变形对比结果。可见,型钢桩与桩周土体变形并不同步,且桩前土体至桩后端土体的变形高度有逐渐减小的趋势。这是因为:处于型钢桩腹板位置的土体受到向左的摩擦力带动发生剪切变形并逐渐在剪切盒左侧累积产生加密区,该区域土体层间剪切传递较为明显,即土体呈现“半土塞效应”,表现为剪切深度小但土体运动性更强,此时变形高度更大;相反,处于剪切后方区域的土体脱离剪切盒右侧约束形成疏松区,造成土体内部层间剪切传递减弱,因而土体运动性相对较弱,此时土体变形高度较小。



图10 彩砂示踪结果
Fig. 10 Displayed deformational results with color sand

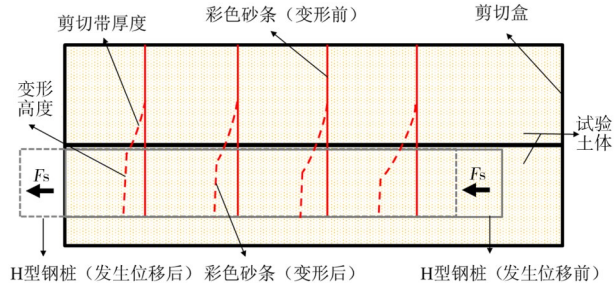


图11 土体变形试验结果
Fig. 11 Test results for deformations of soil

2.4 型钢桩拉拔荷载

图12为不同围压条件下型钢桩荷载-位移曲线。可知:其变化趋势基本一致且呈现出典型的非线性关系;荷载-位移曲线可大致划分3个阶段:其中,第一阶段拉拔荷载随着型钢桩位移的增大呈快速增大趋势;第二阶段拉拔荷载达到峰值强度,并开始出现软化现象;第三阶段拉拔荷载随着桩身位移的增大有所减小,并趋于稳定,达到残余强度。此外,H型钢桩的拉拔荷载增长率、拉拔峰值强度以及最大拉拔荷载所对应的位移均与围压呈正相关。当围压为100、200、300、400 kPa时,对应的H型钢桩位移分别为8.51、9.07、9.66、10.59 mm,围压对型钢桩承载特性有较大影响,且不同围压下H型钢桩拉拔荷载变化速率相差不大。这主要归因于砂土体密实度随围压增大而增大,不同的围压可表征不同深度位置处的土体,致使H型钢桩荷载-位移关系曲线在数值上存在较大差距;与此同时,型钢桩与砂土的接触面会随着围压的增大而形成良好的摩擦效果,从而使得接触面的摩擦系数提高,继而提高型钢桩的拉拔荷载。

同时,对于三类不同桩型(H型钢桩、C型钢桩和槽型钢桩),当截面积相同时,H型钢桩承载性能最佳、C型钢桩次之、槽型钢桩最差;当围压相同时,H型钢桩抗拔能力最优、C型钢桩次之、槽型钢桩最

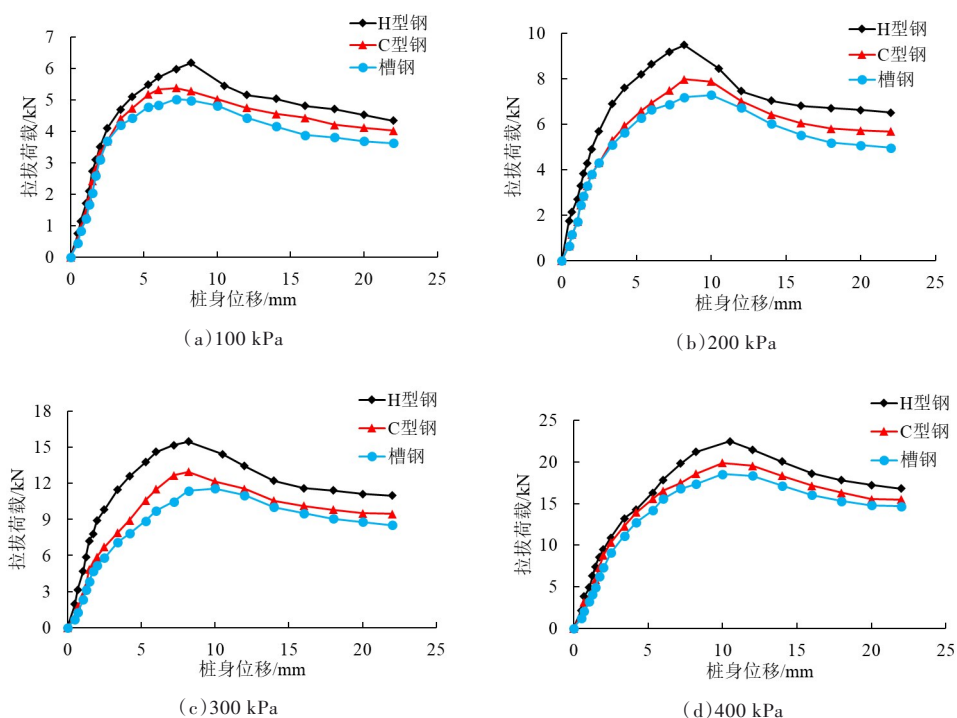


图 12 不同围压条件下型钢桩荷载-位移关系曲线

Fig. 12 Relations between pull-out loads and displacement of sectional steel piles under different levels of confining pressures

差。相较 C 型钢和槽型钢, H 型钢桩身表面积更大, 与土体接触更多, 使其侧摩阻力更大, 从而承载能力更强。

2.5 型钢桩桩身轴力、桩侧摩阻力

图 13 为不同围压下桩身轴力曲线。可见: 不同围压下型钢桩桩身轴力分布模式基本一致, 整体呈现出随埋深的增大而逐渐减小, 桩顶轴力达到最大值, 桩底轴力趋近于零, 同时, 随着围压的增大, 桩身轴力呈逐级增大的趋势; 不同围压下桩身轴力差距较大, 围压对型钢桩的承载性能影响较显著; 对于不同类别的型钢桩, 在同一围压作用下, H 型钢桩轴力最大, C 型钢桩轴力次之, 槽型钢桩轴力最小, 且随围压的逐级增大, 三类型钢桩间轴力差异逐渐增大, 说明 H 型钢桩的承载性能最优, C 型钢桩的承载性能次之, 槽型钢桩的承载性能最差。

图 14 为不同围压下桩身侧摩阻力分布曲线。可知: 不同围压下桩侧摩阻力沿着埋深变化趋势基本一致, 整体上表现出随型钢桩埋深的增大, 桩身侧摩阻力呈先增大后减小趋势, 当埋深为 0.3 m (即 2/3 桩长处) 时, 三类型钢桩侧摩阻力均达到峰值; 同时, 随着型钢桩埋深的增大, 三类型钢桩桩侧摩阻力分布曲线相差逐渐增大, 即三类型钢桩桩侧摩阻

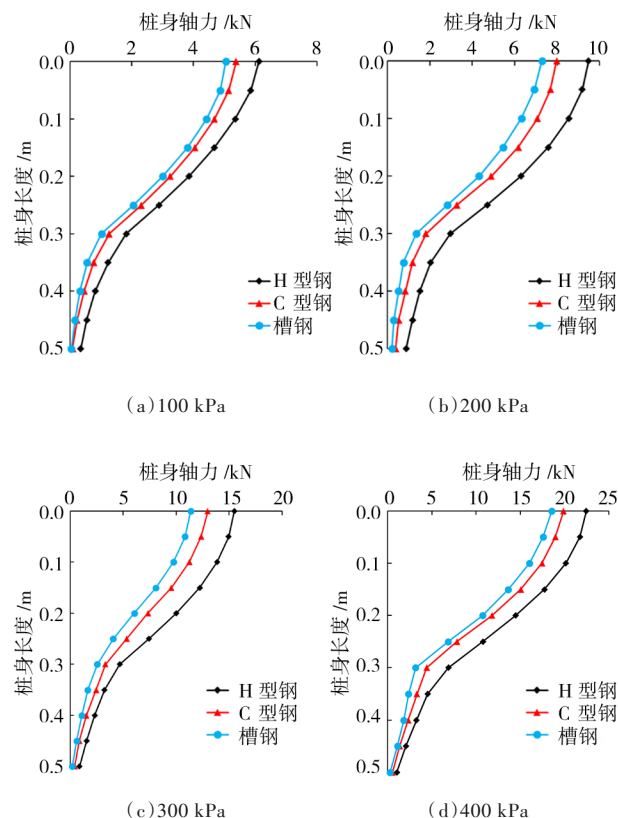


图 13 不同围压下桩身轴力曲线

Fig. 13 Axial force curves along pile shafts under different levels of confining pressures

力差值逐渐增大,其中,H型钢桩桩侧摩阻力最大,C型钢桩桩侧摩阻力次之,槽型钢桩桩侧摩阻力最小。以100 kPa围压为例,H型钢桩、C型钢桩以及槽型钢桩桩侧摩阻力峰值分别为9.6、8.5、7.7 kPa,H型钢桩相较于C型钢桩以及槽型钢桩桩侧摩阻力峰值分别提高了11.67%和20.03%。这主要归咎于H型钢桩截面相较于C型钢桩和槽型钢桩更为复杂,故型钢桩-砂土接触面积更大,从而致使H型钢桩桩侧摩阻力最大。由上述分析可知,H型钢桩承载性能相较于常见的C型钢桩和槽型钢桩更优,可优选为桩基基础。

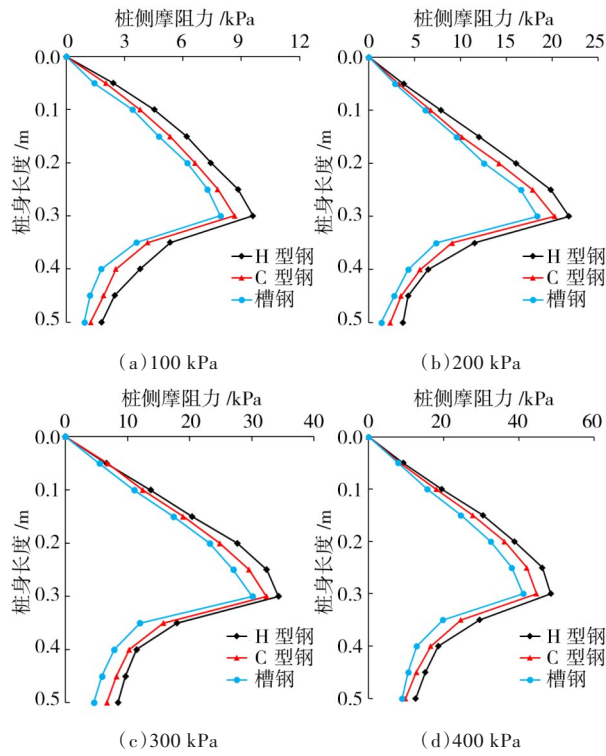


图14 不同围压下桩身侧摩阻力分布曲线
Fig. 14 Curves of lateral friction resistance of pile shafts under different levels of confining pressures

2.6 型钢桩截面侧摩阻力分布特征

以H型钢桩为例,通过在型钢桩桩身不同截面处布设土压力传感器(其中每个侧面布设4个传感器),来探索型钢桩翼缘外表面与腹板内表面摩擦力分布规律。土压传感器布设位置如图15所示。基于室内试验获取的桩侧土压力,利用式(1)计算各截面位置处的摩擦力,进而量化H型钢不同截面的受力特性,为实际工程提供参考。

$$f = u\sigma' \quad (1)$$

式中: f 为型钢桩截面的摩擦强度; μ 为型钢桩-土界面摩擦系数,其值为桩土截面摩擦角 φ 的正切; σ' 为

型钢桩截面所受到的正压力。

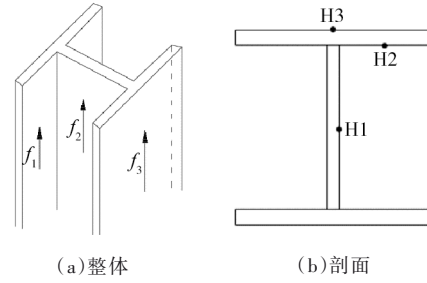


图15 土压传感器布设位置
Fig. 15 Layout position of the soil pressure sensor

图16为不同围压条件下H型钢桩不同截面位置处的侧摩阻力分布。可知:其变化趋势基本一致,呈“V”字形;然而,不同截面位置处的侧摩阻力数值上存在显著差异,H1和H2截面处的侧摩阻力显著高于H3截面,造成这一现象的主要原因是H1截面与H2截面之间存在“半土塞效应”,致使H2截面处的土体相较于H3截面处的土体更加密实,侧面反映了H型钢桩腹板内部与翼缘外侧的桩-土剪切机制存在明显区别。在本次试验当中,H1、H2截

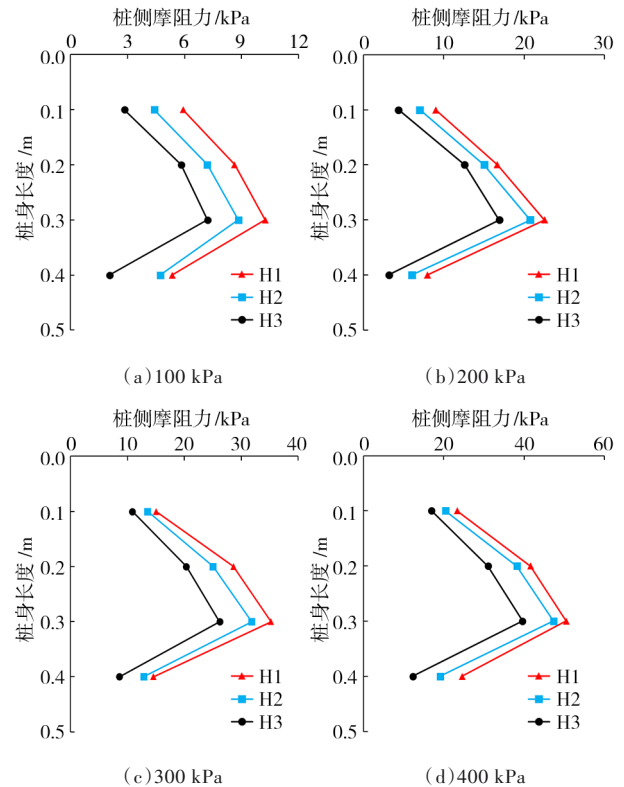


图16 不同围压下H型钢桩不同截面位置侧摩阻力分布曲线
Fig. 16 Curves of lateral friction resistance at different cross sections of H-shaped steel piles under different levels of confining pressures

面的侧摩阻力强度约为H3截面的1.4倍,说明H型钢桩腹板内部的承载空间相较于翼缘外侧更大。值得注意的是,在峰值强度作用下,H型钢桩不同截面的侧摩阻力峰值分布是相似的,整体上表现出桩身侧摩阻力随埋深的增加先增加后减小,并在埋深为0.3 m处H型钢桩侧摩阻力达到峰值。这与前文利用轴力求取峰值强度作用下H型钢桩侧摩阻力峰值分布规律是相同的,侧向证明式(1)求取桩侧摩阻力是合理的。

3 结束语

为揭示光伏支架型钢桩宏、细观受力特性,开展了不同围压、不同砂土密实度以及不同型钢桩类型条件下界面剪切试验和拉拔试验,主要得出以下几点结论:

1)型钢桩-细砂界面剪切过程呈现出软化特性,同时,型钢桩-砂土界面摩擦系数与砂土密实度和围压呈正相关;型钢桩-砂土接触面摩擦角较桩周土体自身内摩擦角高 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$,且与砂土密实度呈正相关。

2)对于三类不同桩型(H型钢桩、C型钢桩和槽型钢桩),当截面积相同时,H型钢桩承载性能最佳、C型钢桩次之、槽型钢桩最差;当围压相同时,H型钢桩抗拔能力最优、C型钢桩次之、槽型钢桩最差。

3)型钢桩截面形状对拉拔试验具有显著影响,H型钢桩发挥效率高于C型和槽型钢,且H型钢桩腹板内侧摩阻力显著高于翼缘外部;型钢短桩在

拉拔过程中呈现“半土塞效应”,其桩侧摩阻力计算时不能按方形进行简化。

参 考 文 献

- [1] 中商产业研究院. 2021年中国光伏产业市场前景及投资研究报告[J]. 电器工业, 2021(4):12-23.
- [2] 孔洋, 阮怀宁, 黄雪峰, 等. 光伏支架抗拔锚固微型桩作用机理研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2):262-267.
- [3] 陈艳, 曹晓宁, 兰云鹏. 大型光伏电站中不同支架方案比较分析[J]. 电气技术, 2013(8): 16-19, 23.
- [4] 闫健, 刘健全. 大型光伏电站扰动区支架基础选型的探讨[J]. 太阳能, 2013(23): 36-39.
- [5] SEO H Y, YILDIRIM Z I, PREZZI M. Assessment of the axial load response of an H pile driven in multilayered soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1789-1804.
- [6] SO A K, NG C W. Performance of long-driven H-piles in granitic saprolite[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(2): 246-258.
- [7] 王艳华. H型钢桩静载与动载承载力试验分析[J]. 公路, 2014(11):110-113.
- [8] 郭朋鑫. 桥梁H型钢桩抗震性能研究[D]. 长沙:湖南大学, 2015.
- [9] 钱建固, 陈宏伟, 贾鹏, 等. 注浆成型螺纹桩接触面特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9):1744-1749.
- [10] 李永辉, 王卫东, 黄茂松, 等. 超长灌注桩桩-土界面剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1981-1988.
- [11] 龚辉, 赵春风, 陶帼雄, 等. 应力历史对黏土-混凝土界面剪切特性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1712-1719.
- [12] 刘丰铭. 砂土中考虑土体径向卸荷效应的桩端后注浆抗压桩竖向承载机制[D]. 上海:同济大学, 2017.