

砂土场地型钢桩现场载荷试验及其承载特性分析

丁晓勇, 许能权, 邢皓枫

Field load test and bearing characteristics analysis of shaped steel piles in sandy soils

DING Xiaoyong, XU Nengquan, and XING Haofeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析

Analysis of forced deformation of double row support piles considering pile interaction

张玲, 朱幸仁, 欧强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 72-80

抗滑桩应变特征与内力非线性研究

A study of the strain characteristics and internal force nonlinearity of anti-slide pile

任青阳, 赵梦园, 谢忠伟, 吴鑫培, 陈斌 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 114-124

基于能量法的轴横向荷载作用下单桩受力变形分析

Deformation analysis of pile under combined axial and lateral loads by using the energy method

张玲, 陈金海, 欧强 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 81-91

预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

高强度大变形屈服锚索承载特性室内试验研究

Laboratory test on the mechanical behavior of high-strength and large-deformation yield anchor cable

杨栋, 王全成, 姜昭群 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 79-86

桩埋管参数对渗流下能量桩热-力耦合特性的影响

Effects of the pile buried pipe parameters on the thermal-mechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage

杨卫波, 张来军, 汪峰 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 176-185



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303037

丁晓勇, 许能权, 邢皓枫. 砂土场地型钢桩现场载荷试验及其承载特性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 69-79.

DING Xiaoyong, XU Nengquan, XING Haofeng. Field load test and bearing characteristics analysis of shaped steel piles in sandy soils [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 69-79.

砂土场地型钢桩现场载荷试验及其承载特性分析

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: 型钢短桩因承载机理不清而制约其在实际工程中的应用, 但其又因耗材低、强度高、挤土量少、施工容易且运输便捷等优势被广泛应用于沙漠地区光伏发电工程。为了准确揭示沙漠地区型钢桩水平和竖向承载性能, 选取某砂土场地, 开展不同型号型钢桩(包括截面形状、截面面积、入土深度)的抗水平载荷试验以及竖向抗压、抗拔载荷试验, 分析截面形状、截面尺寸以及桩长等参数对型钢桩承载性能的影响规律。研究表明: (1) 管桩和 H 型钢桩的水平承载性能显著优于 C 型钢桩和槽型钢桩, 管桩和 H 型钢桩相较于 C 型钢桩和槽型钢桩呈现出高抗风荷载的优势, 且 H 型钢桩的水平承载性能与截面尺寸以及桩长密切相关; (2) 管桩和 H 型钢桩的竖向承载性能同样显著优于 C 型钢桩与槽型钢桩, 且 H 型钢桩的抗压、抗拔承载性能与截面尺寸和桩长呈正相关关系。当桩长相同时, H 型钢桩竖向承载性能与管桩相近; (3) 在砂土场地中 H 型钢桩的承载性能相较于其他桩型(C 型钢桩、槽型和管桩)更为突出, 且与传统的管桩相比, 用材更少, 能创造更大的经济价值, 是沙漠光伏支架基础的优良桩型选择。该研究成果对实际工程具有借鉴作用。

关键词: 沙漠地区; 光伏发电; 型钢桩; 载荷试验; 承载性能

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)03-0069-11

Field load test and bearing characteristics analysis of shaped steel piles in sandy soils

DING Xiaoyong¹, XU Nengquan¹, XING Haofeng²

(1. Shanghai Electric Engineering Consulting Co. Ltd., Shanghai 201199, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The application of steel short piles in practical engineering is restricted due to its unclear bearing mechanism. However, due to advantages such as low cost, high strength, minimal soil displacement, easy construction, and convenient transportation, these piles are widely used in photovoltaic power projects in desert areas. In order to accurately reveal the horizontal and vertical bearing performance of steel piles in desert regions, horizontal load tests for different types of steel piles (including cross-sectional shape, cross-sectional area, and burial depth) and vertical compression and uplift load tests were conducted in a specific sandy site. The study analyzed the influence of parameters such as cross-sectional shape, cross-sectional size, and pile length on the bearing performance of steel piles. Research findings indicate: (1) The horizontal bearing performance of pipe piles and H-shaped steel piles is significantly better than that of C-shaped steel piles and trough-shaped steel piles. Compared with C-shaped steel piles and trough-shaped steel piles, pipe piles and H-shaped steel piles exhibit

收稿日期: 2023-03-16; 修订日期: 2023-07-13

投稿网址: www.swdzcgdz.com

第一作者: 丁晓勇(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力岩土工程研究。E-mail: dingxy4@shanghai-electric.com

通讯作者: 邢皓枫(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事地基处理和桩基工程等研究。E-mail: hfxing@tongji.edu.cn

advantages in resisting wind loads, with the horizontal bearing performance of H-shaped steel piles closely related to the cross-sectional size and pile length. (2) The vertical bearing capacity of pipe piles and H-shaped steel piles is also significantly better than that of C-shaped steel piles and trough-shaped steel piles. Moreover, the compressive and tensile bearing performance of H-shaped steel piles is positively correlated with cross-sectional size and pile length. When the length of pile is the same, the vertical bearing capacity of H-shaped steel piles is similar to that of pipe piles. (3) The bearing performance of H-shaped steel piles is more prominent compared to other pile types (C-shaped steel piles, trough-shaped, and pipe piles) in sandy soil area. Furthermore, when compared with traditional pipe piles, H-shaped steel piles requires less materials and can create greater economic value, making them an excellent choice for the foundation of desert photovoltaic bracket foundations. The research results in this paper have reference for engineering applications.

Keywords: desert area; photovoltaic support; section-steel pile; loading test; bearing capacity

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的趋势越来越明显,清洁能源开发利用是当前全球可持续发展共同关注的资源环境问题,光伏发电以其“取之不尽,用之不竭”的优点成为当前新能源发展的首选^[1-4]。光伏支架基础是连接固定光伏组件和支架系统的重要部件,在满足光伏组件发电效率和使用寿命的前提下,保证光伏组件和支架系统在整个项目生命周期内的安全可靠。光伏支架基础量多面广、施工周期长,受施工场地建设条件及施工环境影响较大,是光伏电站建设过程中最为关键的内容和环节之一^[5],因此对于光伏支架基础的选择尤为重要。目前,运用最为广泛的光伏支架基础型式有钢桩(型钢桩和螺旋桩)、混凝土管桩、混凝土基础(独立基础和条形基础)和微孔灌注桩等,很多学者对基础选型开展了研究,诸如 Wang 等^[6]开展光伏支架下不同形式螺旋桩的室内试验,以获得冻土地区最优桩型;张海峰等^[7]为实现光伏支架基础形式的优化而开展了常用桩型的分析与总结。但是,在工程施工过程中需要依据光伏支架型式和工程地质条件选取经济实用的基础型式^[8],而型钢桩在相同承载性能条件下具有耗材低、且运输便捷等优势而被广泛应用于沙漠地区的光伏发电工程中^[9]。

众所周知,光伏支架所受荷载主要为自重和不定向的风荷载,并通过支架传递到下部桩基础,故学者们开展了光伏支架桩基础的受力特性研究:马文勇等^[10]开展了光伏支架影响因素分析并对基础形式提出了建议;潘启科等^[11]采用不同设计方法对光伏支架刚性桩基础承载力进行计算,提出光伏支架刚性桩基础设计建议;唐湘等^[12]以 20 MWp 光伏发电项目为依托,分析了冻土条件下预应力高强度混凝土(prestressed high-intensity concrete, PHC)桩基础的抗冻拔稳定

性;明小燕等^[13]和孔洋等^[2]对锚杆灌注桩基础进行拉拔试验,分析其作为光伏支架基础的可行性及作用机理;然而,有关光伏支架型钢短桩研究尚且较少,已有成果主要集中于长管桩和 H 型长桩等桩型在水平或竖向荷载作用下的受力特性与承载机理研究,诸如 Li 等^[14]利用三维有限元分析了钢管桩在水平荷载作用下的受力性状;Lv 等^[15]进行了附加荷载作用下 H 型钢桩的下拽机理;Shi 等^[16]开展了腐蚀效应对 H 型钢桩的受力特性影响研究;Xiao 等^[17]进行了承台作用下的 H 型钢桩的群桩受力特性的研究;Arthur 等^[18], Yang 等^[19]以及杨忠轩等^[20]开展了 H 型钢桩的施工效应分析与研究;叶观宝等^[21]和张玲等^[22]分别研究了竖向和水平向循环荷载作用下桩的受力性状。而针对沙漠区光伏支架型钢短桩(如 H 型桩、C 型桩和槽型桩等)承载特性及影响机理的研究成果甚少,同时,型钢短桩作为沙漠地区光伏支架桩基基础的首选,由于研究成果不够成熟,理论研究远远滞后于工程实践,缺乏合适的理论指导与可行的设计方法,严重制约其在光伏组件中的应用推广^[23]。因此,本文利用现场试验开展多组型钢桩水平和竖向静载荷试验,探索沙漠区光伏支架型钢桩的承载特性和受力机理,为型钢桩设计和施工提供理论指导。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

本次试验场地选在黄淮冲积平原的砂土场区。由于该地区受到干旱区气候影响而致使风沙作用较强,形成了大片沙丘,且砂层较厚,本试验场地就选在沙丘之地,且在 7 m 深度范围内均为非常均匀的松散状细砂,故可较好地模拟沙漠地区的地层条件,且其深度完全满足光伏支架下短型钢桩受力边界条件的

要求。该试验场地细砂层的常规物理力学性质指标及其颗粒级配曲线分别如图 1 和表 1 所示。

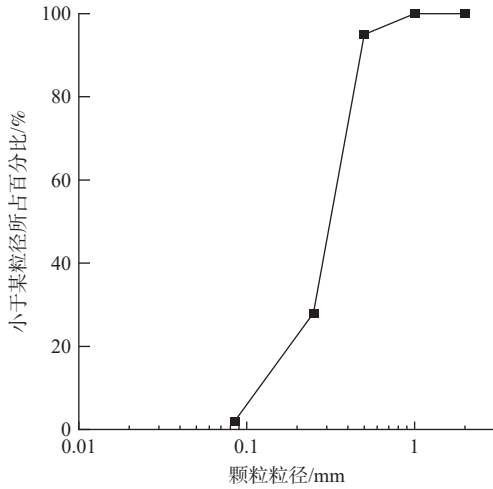


图 1 砂土颗粒级配曲线

Fig. 1 Sand particle grading curve

1.2 桩基参数

为探究砂土地型钢桩水平和竖向承载机理, 本文开展了不同截面形状、截面面积和入土深度条件下的竖向抗压、抗拔载荷试验以及水平载荷试验, 3 种载荷试验各进行了 8 组不同桩型的对照试验, 共 24 组

表 1 试验场区细砂基础物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of fine sandy foundation in the experimental site area

参数	含水率 /%	密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比重	孔隙比	压缩系数 / MPa^{-1}	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)
取值	5.39	1.80	2.50	0.82	0.25	0	28

试验桩。试验场地长 27 m, 宽 12 m, 桩间距 3 m(图 2)。试桩所采用的钢管桩、H 型钢桩、C 型钢桩和槽型钢桩的截面形状如图 3 所示, 其均由 Q355 钢材加工制作而成, 钢材的力学性质参数见表 2, 具体的试桩类型、截面尺寸、桩长及入土深度详见表 3。

1.3 传感器布置及检测仪器

为了获得型钢桩在竖向压力、竖向拉力和水平荷载 3 种条件下的桩身轴力、桩身侧摩阻力、桩端阻力和弯矩等受力特征, 以表 3 中钢管桩的载荷试验为例, 从地面开始沿桩身每间隔 20 cm 布设一个应变测试点, 共进行了 10 个断面的应变测量, 每个测试点对称布设 2 个应变片。应变片采用全桥接法, 每个应变测试点取 2 个应变片平均值作为该点应变值, 试桩桩身应变片布置情况如图 4 所示。本次载荷试验加载装置及其数据采集仪器设备详见表 4。

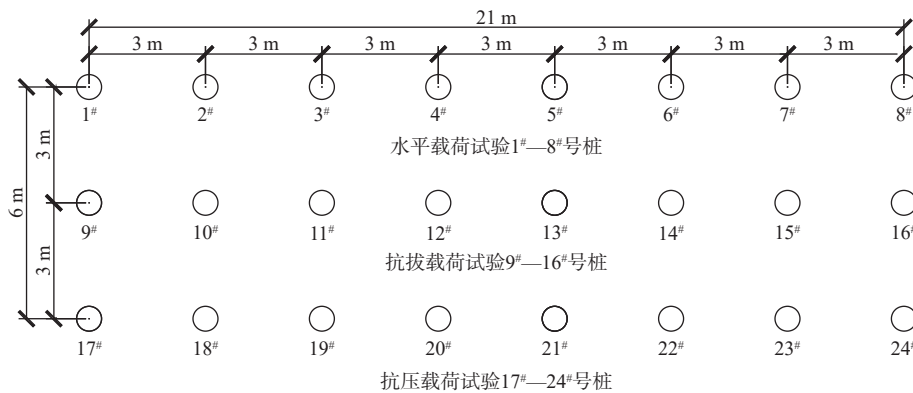


图 2 桩基平面布置图

Fig. 2 Pile foundation layout plan

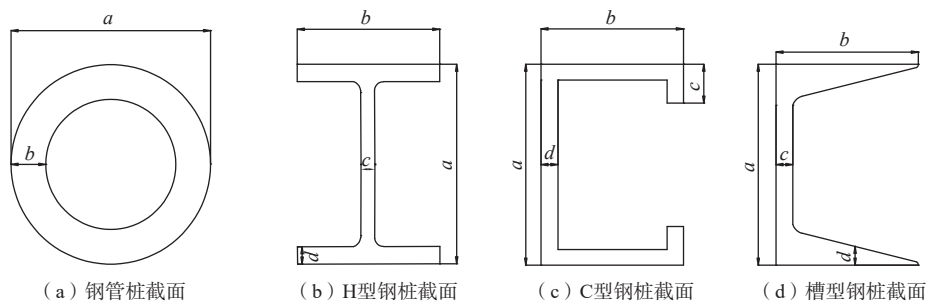


图 3 型钢桩截面形状示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cross-sectional shape of steel piles

表 2 Q355B 钢的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of Q355B steel

参数	弹性模量/MPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
取值	206 000	600	355	16

表 3 桩基参数

Table 3 Pile foundation parameters

水平试桩序号	抗拔试桩序号	抗压试桩序号	试桩桩型	截面尺寸/mm	桩长/m	入土深度/m
1#	9#	17#	钢管桩	ϕ 152×5.5	2.5	1.8
2#	10#	18#	H型桩	150×75×5×7	2.5	1.8
3#	11#	19#	H型桩	125×60×6×8	2.8	2.1
4#	12#	20#	H型桩	125×60×6×8	2.5	1.8
5#	13#	21#	H型桩	125×60×6×8	2.2	1.5
6#	14#	22#	H型桩	100×45×3×3	2.5	1.8
7#	15#	23#	C型桩	100×40×10×3	2.5	1.8
8#	16#	24#	槽型桩	80×43×5×8	2.5	1.8

2 现场试验

本文按照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[23]以及《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[24]中的相关规定开展了型钢桩的竖向抗压、抗拔和水平的静载荷试验,试验过程中加载、数据采集、稳定评判标准和试验终止条件均严格按照规范中的要求执行。为保证荷载传递均匀、连续、无冲击,竖向抗压和抗拔静载荷试验在加载过程中采用慢速维持荷

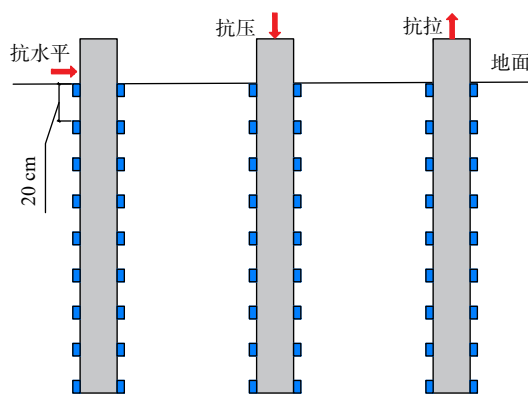


图 4 试桩桩身应变片布置情况图

Fig. 4 Layout of strain gauge of test pile bod

表 4 仪器设备一览表

Table 4 List of instruments and equipment

设备名称	设备主要参数
加载装置	液压式油泵装置2套
反力装置	5 t混凝土梁3根, 钢梁1根
测量装置	位移计4个
应变测量装置	电阻式应变片1 040个, 二相电线400 m
应变采集装置	YE2539型高速静态应变测试仪

载法,水平静载荷试验方法采用单向多循环加载法,以模拟风荷载的作用方式。图 5 展示的是现场的水平静载荷试验、竖向抗压静载荷试验和竖向抗拔静载荷试验实际操作图片。



图 5 型钢桩现场静载荷试验图

Fig. 5 Static load test diagram of steel pile on site

3 试验结果

3.1 单向水平静载试验结果

3.1.1 水平力-时间-位移关系曲线

基于现场水平静载试验结果绘制了不同截面形状下 1#、2#、7#和 8#试桩的水平力-时间-位移(H-T-Y)关系曲线(图 6)。鉴于测试桩为型钢短桩,本次试验以水平位移 30 mm 作为试验的终止条件,表 5 为 1#—8#

试桩在试验终止条件下的水平极限荷载。

结合图 6 和表 5 可知,1#钢管桩的水平极限荷载最大,可达 13 kN,其次是 2#H 型钢桩,再次为 8#槽型桩,7#C 型钢桩水平荷载能力最弱,其水平极限荷载仅 4 kN。对比分析 1#、2#、7#和 8#试桩的 H-T-Y 关系曲线,发现 1#钢管桩与 2#H 型钢桩的水平极限荷载相近,7#C 型钢桩与 8#槽型钢桩的水平极限荷载相近,且前者在数值上远高于后者。

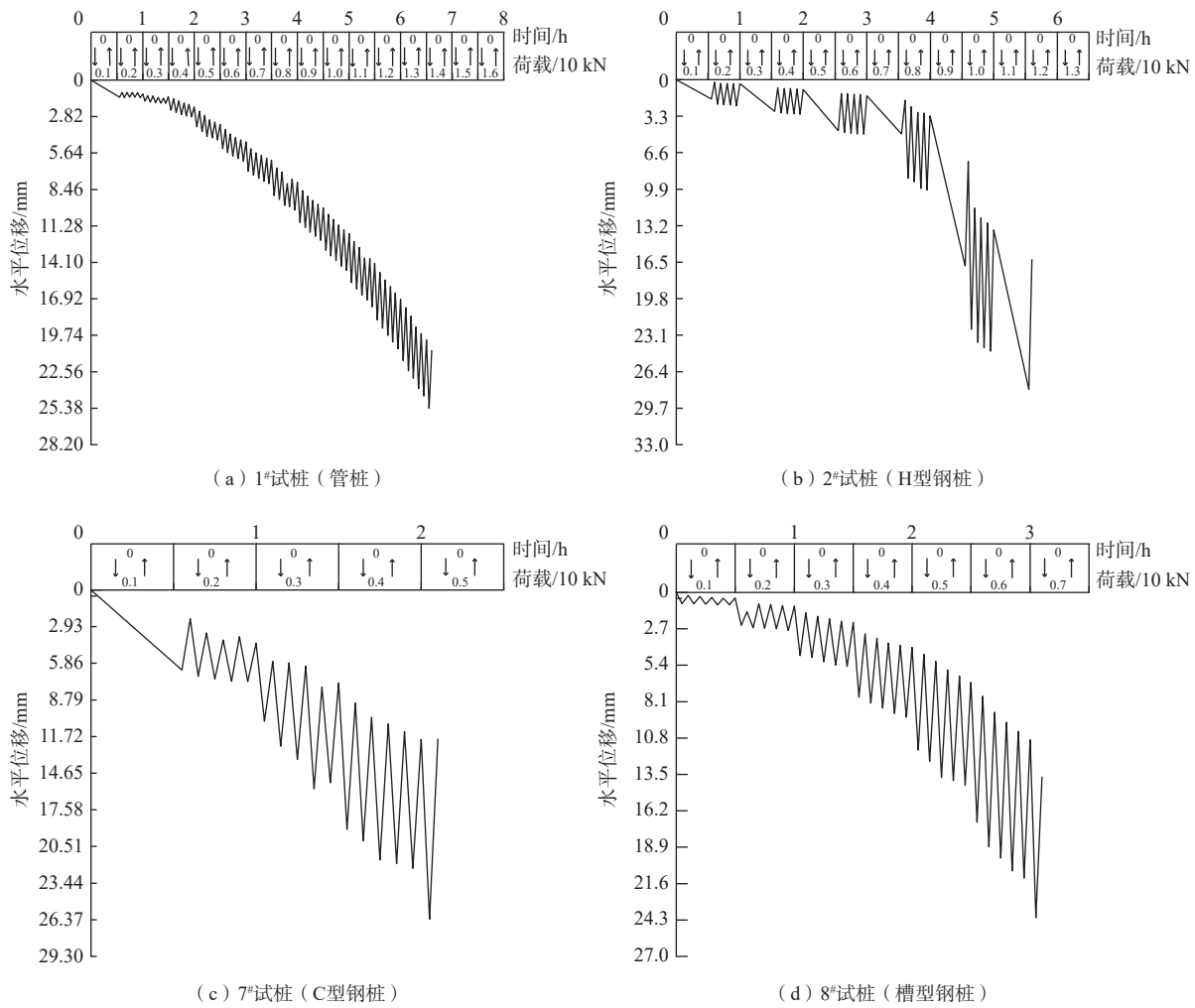


图 6 H-T-Y 关系曲线图

Fig. 6 H-T-Y relationship curve

表 5 1#—8# 试桩水平极限荷载

Table 5 1#—8# Horizontal ultimate load of test pile

试桩编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
水平极限荷载/kN	13	10	12	10	9	9	4	6

由表 5 可得, 不同截面尺寸的 2#、4# 和 6# H 型钢桩的水平极限荷载依次为 10, 10, 9 kN, 其截面尺寸对应为: 150 mm×75 mm×5 mm×7 mm、125 mm×60 mm×6 mm×8 mm 和 100 mm×45 mm×3 mm×3 mm; 3#、4# 和 5# 试桩为不同桩长的 H 型钢桩, 其水平极限荷载分别为 12, 10, 9 kN, 对应的有效桩长(桩入土深度)分别为 2.1, 1.8, 1.5 m。

3.1.2 桩身弯矩、挠度分布曲线

基于现场试验测得的桩身应变值, 结合式(1)求得水平荷载作用下型钢桩桩身弯矩, 并利用式(2)求得桩身挠度, 最后得到了水平极限荷载作用下型钢桩挠度和弯矩随深度变化曲线(图 7)。

$$M = \frac{EI(\varepsilon_i - \varepsilon_j)}{D} \quad (1)$$

$$y = y_0 A_1(\alpha x) + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_1 \alpha x + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 \alpha x + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_1 \alpha x \quad (2)$$

式中: E ——弹性模量/MPa;

I ——截面惯性矩/ m^4 ;

ε_i 、 ε_j ——型钢桩前、后两侧应变;

D ——两侧应变片间距离/m;

y_0 ——地表位移/mm;

α ——桩的水平位移变形系数;

φ_0 ——地表转角/ $^\circ$;

M_0 ——地表弯矩/(kN·m);

Q_0 ——地表剪力/kN;

A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 ——待定系数, 可通过查阅桩基设计规范(JGJ 94—2008)获取。

由图 7(a)可知, 极限水平荷载作用下桩身弯矩分布规律基本一致, 均呈现沿桩深先增加后减小变化的

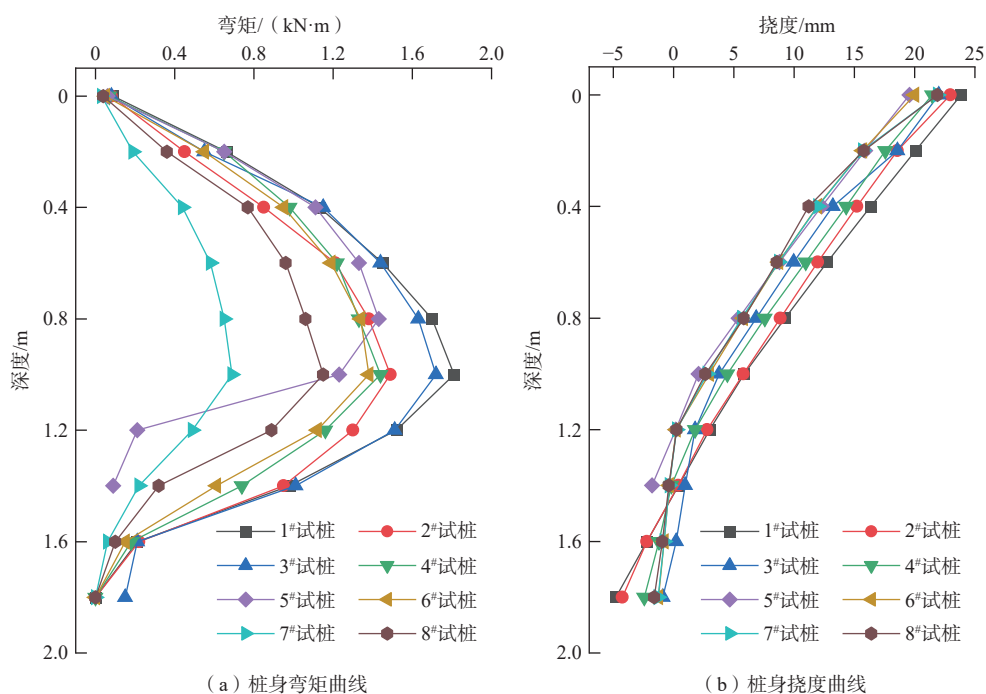


图 7 水平极限荷载作用下型钢桩挠度、弯矩曲线图

Fig. 7 Deflection and bending moment curve of steel pile under ultimate horizontal load

规律。由不同截面形状的 1#、2#、7#和 8#试桩的桩身弯矩曲线,可以发现试桩的弯矩从大到小依次为 1#钢管桩、2#H 型钢桩、7#C 型桩和 8#槽型桩;对比不同截面大小的 2#、4#和 6#H 型桩的弯矩曲线,可得 H 型桩截面尺寸越大,其弯矩越大;分析有效桩长分别为 2.1 m、1.8 m 和 1.5 m 的 3#、4#和 5#H 型试桩的桩身弯矩曲线,发现桩身弯矩与桩长正相关,且弯矩最大值的位置随桩长的增加而向下加深。

由图 7(b)可知,在水平极限荷载作用下不同工况的型钢桩的桩身挠度曲线分布特征近似,即随埋深的增加而呈近线性减小,且挠度变化幅度在桩深 1.2 m 以下开始放缓。由不同截面形状 1#、2#、7#和 8#试桩的

桩身挠度曲线,可知钢管桩和 H 型钢桩、C 型钢桩和槽型钢桩的挠度曲线近似相近。对比分析不同截面大小的 2#、4#和 6#H 型试桩,发现桩身挠度值从大到小依次为 2#、4#、6#桩;由不同桩长 3#、4#、5#试桩的桩身挠度曲线可知,型钢桩桩身挠度大小与桩长呈正相关。

3.2 竖向抗压静载试验结果

3.2.1 抗压静载试验荷载-位移(Q-S)

基于型钢桩竖向抗压静载试验结果绘制不同工况下型钢桩的 Q-S 曲线(图 8),可以发现型钢桩 Q-S 曲线为典型的陡降型,在初始受荷阶段,桩顶位移增长缓慢;随着荷载的增大并达到某一特征值后,桩顶位移迅速增大。

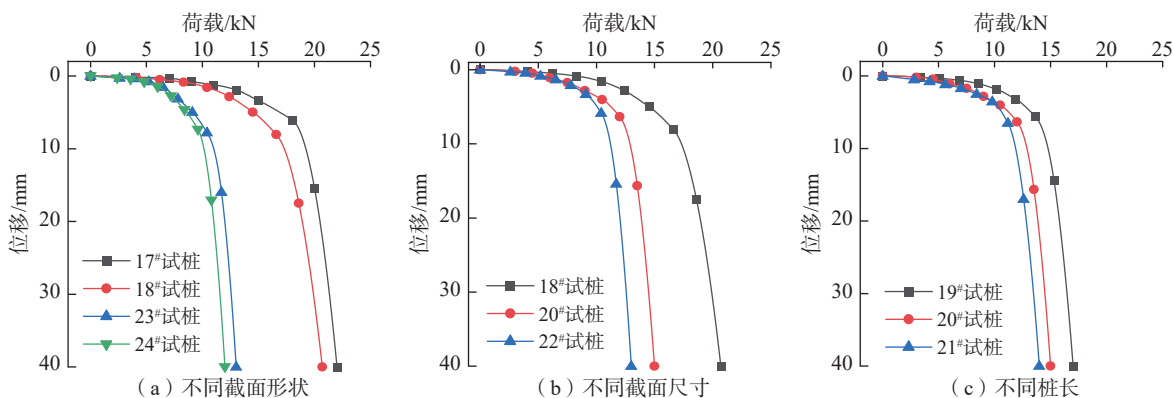


图 8 竖向抗压静载试验型钢桩 Q-S 曲线图

Fig. 8 Q-S curve of vertical compressive static load test steel pile

图 8(a)为不同截面形状的型钢桩 $Q-S$ 关系曲线图,由图可知:17#钢管桩和 18#H 型钢桩、23#C 型钢桩和 24#槽型钢桩的 $Q-S$ 曲线相近,但前者的极限承载力远大于后者。图 8(b)为不同截面大小的 H 型钢桩 $Q-S$ 关系曲线图,18#、20#和 22#H 型钢桩的截面大小分别为 $150\text{ mm}\times 75\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 7\text{ mm}$ 、 $125\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 和 $100\text{ mm}\times 45\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,可以发现型钢桩极限承载力与截面尺寸呈现正相关关系。图 8(c)

为有效桩长分别为 2.1, 1.8, 1.5 m 的 H 型钢桩 $Q-S$ 关系曲线,分析可得型钢桩极限承载力与桩长之间的关系为典型的正相关。

3.2.2 抗压静载试桩身轴力、侧摩阻力

基于现场试验数据,结合应力应变关系求取各级荷载作用下型钢桩各测点位置处的轴力和桩身侧摩阻力,并绘制了极限荷载下的桩身轴力分布曲线(图 9)和桩身侧摩阻力分布曲线(图 10)。

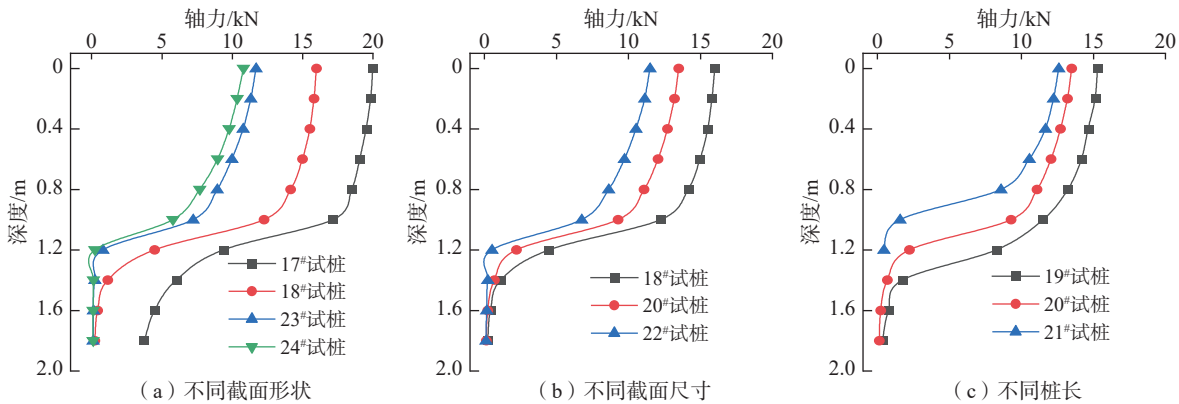


图 9 竖向抗压静载试验型钢桩桩身轴力分布曲线

Fig. 9 Vertical compressive static load test of steel pile shaft axial force distribution curve

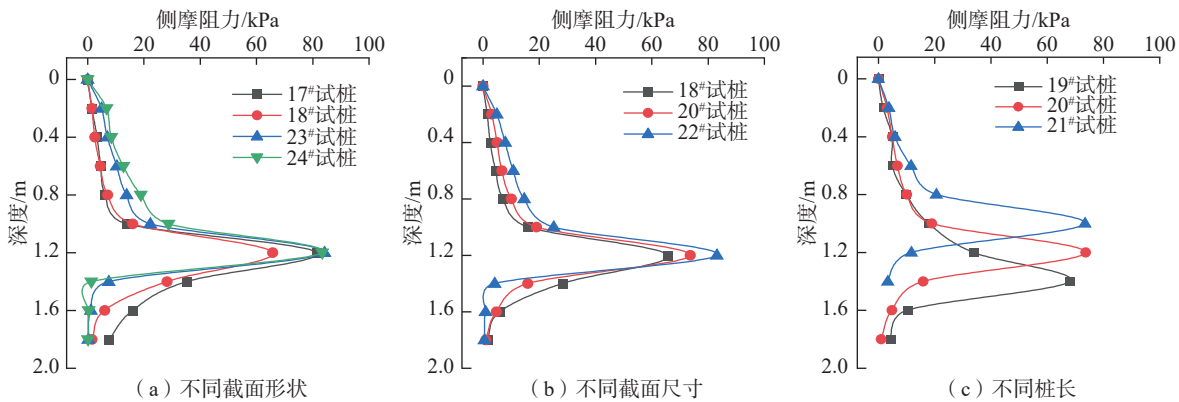


图 10 竖向抗压静载试验型钢桩桩身侧摩阻力分布曲线

Fig. 10 Distribution curve of lateral friction resistance of vertical compressive static load test steel piles

从图 9 可知型钢桩桩身轴力在极限荷载作用下由桩顶至桩底逐渐递减,沿桩深呈“近 S 型”分布,具体表现为“上部桩身轴力衰减较慢、下部衰减较快”的变化规律。

由图 9(a)可知,不同截面形状型钢桩的桩身轴力由大至小分别为 17#管桩、18#H 型钢桩、23#C 型钢桩和 24#槽型钢桩,且 C 型钢桩和槽型钢桩桩身轴力分布曲线近乎重合。对比不同截面尺寸 18#、20#和 22#型钢桩的桩身轴力分布曲线(图 9b),发现型钢桩桩身轴

力随截面尺寸的增大而增加。由不同桩长的 19#、20#和 21#H 型钢桩的轴力分布曲线(图 9c)可知,其最大轴力依次是 15.3, 13.5, 12.6 kN,故型钢桩桩身轴力大小与桩长正相关。

图 10 为极限荷载作用下的型钢桩桩身侧摩阻力分布曲线,可以发现在极限荷载作用下不同工况的型钢桩桩身侧摩阻力分布规律相近,皆呈“两头小、中间大”的变化规律,即随深度的增加,桩身侧摩阻力呈现出先增加后减小,最大的桩侧摩阻力出现在桩身的

中下部位置处。

图 10(a)中 17#、18#、23#和 24#试桩反映不同截面形状的型钢桩的侧摩阻力分布特征, 4 根试桩的侧摩阻力均在埋深 1.0~1.2 m 区间出现急增, 随后在 1.2~1.4 m 区间出现陡降, 侧摩阻力峰值出现在埋深为 1.2 m 处; 桩身侧摩阻力由大至小分别为 23#C 型钢桩、24#槽型钢桩、17#管桩和 18#H 型钢桩。由不同截面尺寸 18#、20#和 22#桩的侧摩阻力分布曲线(图 10b)可知, 型钢桩桩身侧摩阻力随截面尺寸的增加而减小; 由不同桩长的 19#、20#和 21#桩的侧摩阻力分布曲线, 可发现侧摩阻力峰值随桩长的增加而变大, 且峰值位置随桩长的增加而加深。

3.3 竖向抗拔静载试验结果

3.3.1 抗拔静载试验荷载-位移(Q-S)

图 11 为不同工况下型钢桩抗拔的 Q-S 变化曲线,

可以发现其变化规律基本一致, 曲线整体皆呈“缓变-陡降”状。分析不同截面形状的 9#、10#、15#和 16#试桩的 Q-S 曲线(图 11a), 可以发现 9#管桩抗拔荷载值最大, 10#H 型钢桩次之, 15#C 型钢桩和 16#槽型钢桩远低于前两者, 各试桩对应的桩顶位移大小关系则反之。由不同截面大小的 10#、12#和 14#H 型钢桩 Q-S 曲线(图 11b), 可以得到截面尺寸和抗拔承载力之间的关系, 截面尺寸由大到小依次为 10#H 型钢桩(150 mm×75 mm×5 mm×7 mm)、12#H 型钢桩(125 mm×60 mm×6 mm×8 mm)、14#H 型钢桩(100 mm×45 mm×3 mm×3 mm), 抗拔承载力由大到小为 10#H 型钢桩、12#H 型钢桩、14#H 型钢桩。11#、12#和 13#试桩反映桩长变化对抗拔承载力的影响, 其有效桩长分别为 2.1, 1.8, 1.5 m, 极限抗拔承载力分别为 7.2, 7.1, 6.3 kN, 表明型钢桩抗拔承载力与桩长正相关。

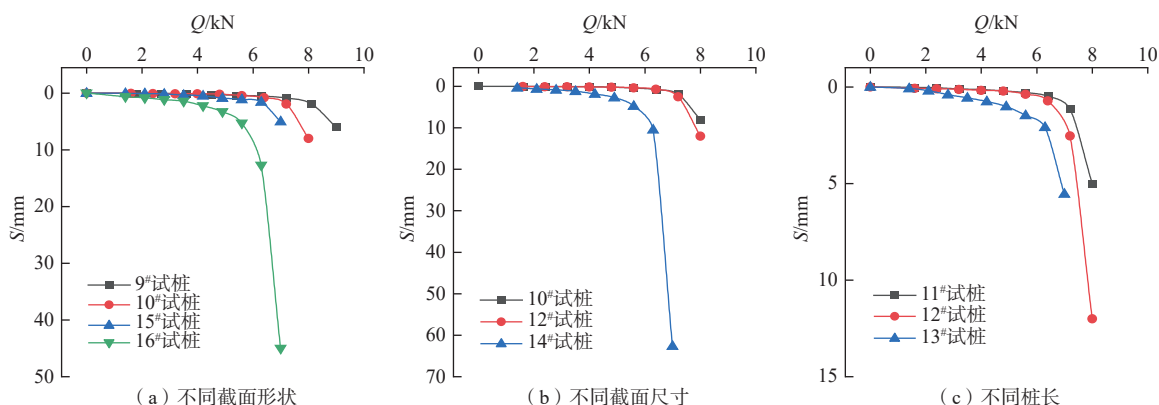


图 11 竖向抗拔静载试验型钢桩 Q-S 曲线

Fig. 11 Q-S curve of vertical uplift static load test steel pile

3.3.2 抗拔静载试桩身轴力、侧摩阻力

图 12 为极限拉拔荷载下不同工况型钢桩的桩身轴力分布曲线, 由图可知型钢桩桩身轴力分布呈近

S 型, 桩身轴力随埋深的增加而减小; 桩体浅部轴力随埋深变化较缓慢, 且随埋深的增加轴力变化幅度逐渐增大, 具体表现为: 在 0~0.8 m 区间, 桩身轴力降幅不

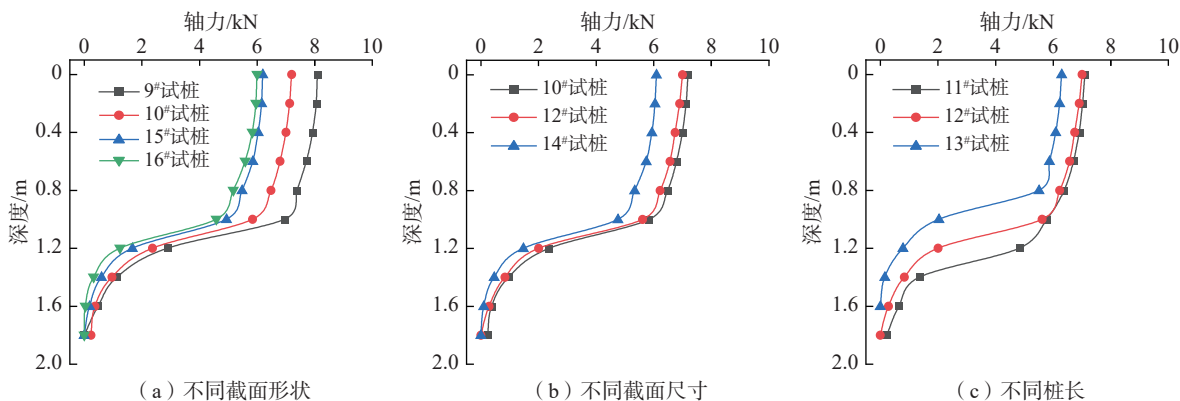


图 12 竖向抗拔静载试验型钢桩桩身轴力分布曲线

Fig. 12 Vertical uplift static load test of steel pile shaft axial force distribution curve

明显,而在 0.8~1.2 m 区间出现陡降,随后趋缓,并逐渐趋于 0。

图 12(a)中 9[#]、10[#]、15[#]和 16[#]分别为管桩、H 型钢桩、C 型钢桩和槽型钢桩,其轴力峰值分别为 8.1, 7.2, 6.2, 6.0 kN,管桩轴力最大,H 型钢桩次之,C 型和槽型钢桩的轴力最小;图 12(b)和图 12(c)分别反映截面大小和桩长变化对桩身轴力的影响,不同截面尺寸的 10[#]、12[#]和 14[#]H 型钢桩的轴力峰值分别为 7.2, 7.0, 6.1 kN,而不同桩长的 11[#]、12[#]和 13[#]H 型钢桩轴力峰值分别为 7.1, 7.0, 6.3 kN,表明型钢桩轴力与截面尺寸、桩长正相关。

图 13 为极限拉拔荷载下不同工况的型钢桩桩身侧摩阻力分布曲线,由图可知不同工况条件下的型钢桩桩身侧摩阻力分布曲线相似,整体上皆呈现桩侧摩

阻力随埋深的增加先增加后减小的趋势,且均在 1.0~1.4 m 区间内出现突变,当型钢桩埋深约 1.0 m 时,桩身侧摩阻力达到峰值。

图 13(a)的 9[#]、10[#]、15[#]和 16[#]试桩反映不同截面形状影响变化,其桩身侧摩阻力由大至小分别为 16[#]槽型钢桩、15[#]C 型钢桩、9[#]管桩和 10[#]H 型钢桩,且 C 型钢桩和管桩的桩身侧摩阻力峰值较为接近;图 13(b)和图 13(c)分别反映截面大小和桩长变化的侧摩阻力对比关系,不同截面尺寸的 10[#]、12[#]和 14[#]H 型钢桩的侧摩阻力峰值分别为 29.41, 37.76, 43.85 kPa,而不同桩长的 11[#]、12[#]和 13[#]钢桩峰值分别为 36.19, 37.76, 36.60 kPa,其对应深度分别为 1.4, 1.2, 1.0 m,表明桩身侧摩阻力随截面尺寸的增加而减小,且峰值位置随之加深。

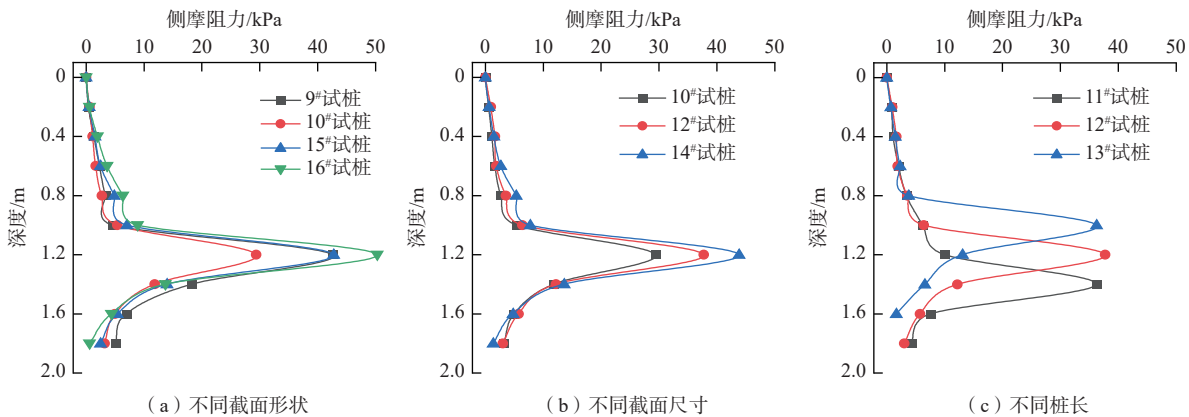


图 13 竖向抗拔静载试验型钢桩桩身侧摩阻力分布曲线

Fig. 13 Vertical uplift static load test type steel pile body side friction resistance distribution curve

4 分析与讨论

基于不同截面形状的单桩水平静载荷试验结果表明 1[#]钢管桩和 2[#]H 型钢桩、7[#]C 型钢桩和 8[#]槽型钢桩的位移曲线和挠度曲线相近,但前者的水平承载能力远高于后者。2[#]H 型钢桩惯性矩为 1[#]钢管桩的 95.3%,但其截面面积仅为 1[#]钢管桩的 68.4%,而 7[#]C 型钢桩和 8[#]槽型钢桩的惯性矩均远小于前者,故 H 型钢桩耗材更少、更为经济。由此可知,H 型钢桩相较于钢管桩、C 型钢桩以及槽型钢更具性价比。综合比较不同截面尺寸和不同桩长工况下的桩身位移、弯矩和挠度曲线,可以发现桩长相较于截面尺寸更具影响力,故在砂土地型的水平受荷型钢桩的设计施工中可优先考虑改变桩长以保证工程质量达标。

依据单桩竖向抗压和抗拔载荷试验结果,竖向受荷型钢桩的轴力由桩顶至桩底逐渐减小,并沿桩身呈

“近 S 型”分布,考虑原因是:当松散砂层作为持力层时,由于强度不足造成桩端阻力较小,竖向荷载大部分由桩侧摩阻力分担,且桩侧摩阻力一般先于桩端阻力发挥作用,桩端阻力发挥具有明显的滞后性。此外,桩身轴力衰减呈现“上部桩身轴力衰减较慢、下部衰减较快”的变化规律,即在型钢桩埋深为 0~0.8 m 区间内,桩身轴力降幅不明显;当型钢桩埋深在 0.8~1.4 m 区间时,桩身轴力降幅显著。这一现象形成原因考虑是在极限荷载作用下,浅部砂土充分发挥作用,而深部砂土并未得到充分发挥;另外,当型钢桩埋深在 0~0.8 m 区间时,桩身侧摩阻力增幅不明显,而在 0.8~1.4 m 区间呈现快速增大至峰值,然后急剧降低随后桩身侧摩阻力呈现缓慢减小,桩底附件桩侧摩阻力近似为 0,也侧面证实了这一判断。

竖向受荷型钢桩的桩身轴力随截面尺寸和桩长

的增加而增加,其主要原因考虑是型钢桩截面尺寸和桩长增加,型钢桩-砂土之间接触面积相对增加,且桩体自重也随之变大,当砂土层相对型钢桩产生相对位移时,砂土会对型钢桩施加摩阻力以阻碍位移持续进行,轴力在从桩顶向下传递的过程中需克服桩身侧摩阻力以及桩体自重,故而桩身轴力随截面尺寸和桩长的增加而增加。

型钢桩桩身侧摩阻力随截面尺寸的增加而减小,造成这一现象的主要原因是型钢桩承载力主要由桩端阻力和桩侧摩阻力共同承担,而桩端阻力则随截面尺寸增加而增加,致使桩身侧摩阻力随截面尺寸的增加而减小。

5 结论

(1)管桩和 H 型钢桩的水平承载性能显著优于 C 型钢桩和槽型钢桩。相较于 C 型钢桩和槽型钢桩,管桩和 H 型钢桩的抗水平力显著提高,呈现出高抗风荷载的优势,且 H 型钢桩的水平承载性能与截面尺寸和桩长密切相关。

(2)管桩和 H 型钢桩的竖向承载性能同样显著优于 C 型钢桩与槽型钢桩,且 H 型钢桩的抗压、抗拔承载性能与截面尺寸和桩长呈正相关关系;同时,当桩长相同时,H 型钢桩竖向承载性能与管桩相近。

(3)管桩与 H 型钢桩的水平及竖向承载性能相近,当保持桩长和惯性矩相同的情况下,H 型钢桩截面更小,材料量更小,更为经济。H 型钢桩的承载能力在砂土地中相较于其他桩型(C 型钢桩和槽型管桩)更为突出,且与传统的管桩相比,用材更少,能创造更大的经济价值,是沙漠光伏支架基础的优选桩型。

参考文献 (References) :

- [1] 文冬光,张二勇,王贵玲,等.干热岩勘查开发进展及展望[J].水文地质工程地质,2023,50(4):1-13. [WEN Dongguang, ZHANG Eryong, WANG Guiling, et al. Progress and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 1 - 13. (in Chinese with English abstract)]
- [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. [KONG Yang, RUAN Huaining, HUANG Xuefeng, et al. Study on mechanism of action of anti-uplift anchoring micropiles for PV support bracket[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(2): 262 - 267. (in

Chinese with English abstract)]

- [3] AL-SOUD M S, HRAYSHAT E S. A 50 MW concentrating solar power plant for Jordan[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(6): 625 - 635.
- [4] 丁晓勇,许能权,邢皓枫.沙漠地区光伏支架基础选型与受力分析[J].低温建筑技术,2022,44(9):121-124. [DING Xiaoyong, XU Nengquan, XING Haofeng. The foundation of photovoltaic support and its mechanics properties in desert area[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2022, 44(9): 121 - 124. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 明杰,刘志璋,王平.无地基状态下光伏支架的稳定性测试[J].太阳能学报,2012,33(12):2068-2073. [MING Jie, LIU Zhizhang, WANG Ping. Exploration of pv bracket without foundation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(12): 2068 - 2073. (in Chinese with English abstract)]
- [6] WANG Tengfei, LIU Jiankun, ZHAO Huagang, et al. Experimental study on the anti-jacking-up performance of a screw pile for photovoltaic stents in a seasonal frozen region[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2016, 17(7): 512 - 524.
- [7] 张海锋,马娜.光伏支架基础形式介绍及基础设计的探讨[J].太阳能,2020(12):66-70. [ZHANG Haifeng, MA Na. Introduction of foundation form of pv bracket and discussion of foundation design[J]. *Solar Energy*, 2020(12): 66 - 70. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 秦坦.光伏支架型钢桩受力特性研究[D].上海:同济大学,2022. [QIN Tan. Research on mechanical characteristics of photovoltaic support steel piles [D]. Shanghai: Tongji University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 卢家骏.光伏支架型钢桩竖向承载特性研究[D].上海:同济大学,2023. [LU Jiajun. The vertical bearing characteristics of profiled steel pile for photovoltaic support[D]. Shanghai: Tongji University, 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 马文勇,柴晓兵,马成成.柔性支撑光伏组件风荷载影响因素试验研究[J].太阳能学报,2021,42(11):10-18. [MA Wenyong, CHAI Xiaobing, MA Chengcheng. Experimental study on wind load influencing factors of flexible support photovoltaic modules[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(11): 10 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 潘启科,李根森,陈春华,等.光伏支架刚性桩基础设

- 计方法分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(增刊 2): 207 - 210. [PAN Qike, LI Gensen, CHEN Chunhua, et al. Analysis on design method of rigid pile foundation of photovoltaic support[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(Sup 2): 207 - 210. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 唐湘, 樊尊龙. 严寒地区季节性冻土影响下光伏支架 PHC 桩基础设计的研究 [J]. 太阳能, 2022(3): 87 - 91. [TANG Xiang, FAN Zunlong. Study on design of PHC pile foundation of PV bracket under influence of seasonal frozen soil in severe cold area[J]. Solar Energy, 2022(3): 87 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 明小燕, 奚泉, 周毅. 锚杆灌注桩基础在山地光伏电站光伏支架基础中的应用研究 [J]. 太阳能, 2021(1): 73 - 77. [MING Xiaoyan, XI Quan, ZHOU Yi. Research on application of anchor rod cast-in-place pile foundation in pv bracket foundation of mountain PV power station[J]. Solar Energy, 2021(1): 73 - 77. (in Chinese with English abstract)]
- [14] LI Wenwen, STUEDLEIN A W, CHEN Yumin, et al. Response of pile groups with X and circular cross-sections subject to lateral spreading: 3D numerical simulations[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 126: 105774.
- [15] LV Yaru, ZHANG Dongdong, RONG Xiaoli, et al. Mechanism of downdrag for floating H-pile subjected to surcharge[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, 54(2): 110 - 116.
- [16] SHI Cheng, KARAGAH H, DAWOOD M, et al. Numerical investigation of H-shaped short steel piles with localized severe corrosion[J]. *Engineering Structures*, 2014, 73: 114 - 124.
- [17] XIAO Y, CHEN L. Behavior of model steel H-pile-to-pile-cap connections[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 80: 153 - 162.
- [18] ARTHUR K O, CHARLES W W, et al. Performance of long-driven H-piles in granitic saprolite[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(2): 246 - 258.
- [19] YANG J, THAM L G, LEE P K, et al. Observed performance of long steel H-piles jacked into sandy soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(1): 24 - 35.
- [20] 杨仲轩, 黄中原, 郭望波, 等. 砂性土打入桩竖向承载力计算方法评价 [J]. 太原理工大学学报, 2022, 53(4): 766 - 771. [YANG Zhongxuan, HUANG Zhongyuan, GUO Wangbo, et al. Database assessment of design methods for axial bearing capacity of driven piles in sand[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(4): 766 - 771. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 叶观宝, 秦粮凯, 张振, 等. 循环荷载下水泥土桩复合体动力参数试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 48 - 56. [YE Guanbao, QIN Liangkai, ZHANG Zhen, et al. An experimental study of dynamic parameters of unit cell of deep mixed column-reinforced soft clay under dynamic loading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 48 - 56. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张玲, 陈金海, 欧强. 基于能量法的轴横向荷载作用下单桩受力变形分析 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 81 - 91. [ZHANG Ling, CHEN Jinhai, OU Qiang. Deformation analysis of pile under combined axial and lateral loads by using the energy method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 81 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《建筑基桩检测技术规范》: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2014. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2014. (in Chinese)]
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《建筑桩基技术规范》: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2008. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2014. (in Chinese)]

编辑: 刘真真