

光伏支架 H 型钢桩现场试验承载特性分析

丁晓勇

(上海电气工程设计有限公司, 上海 201199)

摘要: 光伏发电对实现清洁能源和解决能源危机具有重要意义。在沙漠地区建设发电站, 光伏支架基础形式的选择尤为重要, 光伏支架支撑的光伏组件较轻, 竖向压力和水平推力是支架基础的主要受力形式, H 型钢桩因抗弯刚度大和贯穿能力强而成为首选的基础形式。本文针对光伏支架受力特点, 通过短 H 型钢桩现场竖向抗压抗拔试验, 对比分析了不同桩长、不同截面尺寸型钢桩竖向承载力及其受力特性。分析结果表明, 短 H 型钢桩在抗压抗拔试验中表现趋势相似; 截面尺寸及桩身长度对型钢桩承载力影响显著, 尺寸越大、桩身越长, 则承载力越高; 当桩长不同时, 桩侧摩阻力的发挥是一个随深度变化的过程, 且沿桩身方向从上到下依次开展; H 型钢桩受压和受拉工况下其侧摩阻力峰值均发生在距桩端 1/3 位置处。研究成果可为实际工程提供理论参考。

关键词: 光伏发电; H 型钢桩; 抗压抗拔试验; 桩基承载力; 桩侧摩阻力

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)06-0490-06

Analysis of bearing characteristics of photovoltaic support H-shaped steel pile in field test

DING Xiao-yong

(Shanghai Electrical Engineering Design Co., Ltd., Shanghai 201199, China)

Abstract: Photovoltaic power generation is of great significance to realize clean energy and solve energy crisis. In the construction of power stations in desert areas, the choice of foundation form of photovoltaic bracket is particularly important. The photovoltaic module supported by the photovoltaic bracket is relatively light, and the vertical pressure and horizontal thrust are the main stress forms of the support foundation. H-shaped steel piles have become the preferred foundation form due to its high bending stiffness and strong penetration capacity. In this paper, according to the stress characteristics of photovoltaic supports, the vertical bearing capacity and stress characteristics of steel piles with different pile length and sectional size are compared and analyzed through on-site vertical compressive and pull out tests of short H-shaped steel piles. The analysis results show that the behavior trend of short H-beam steel piles is similar in the compressive and pull out tests. The cross section size and the length of pile body have a significant effect on the bearing capacity of steel piles. The larger the size and the longer the pile, the higher the bearing capacity. When the pile length is different, the development of pile side friction is an asynchronous process, which is carried out from top to bottom along the direction of pile body. The peak value of lateral friction resistance of H-shaped steel piles occurs at the position 1/3 away from the pile end under compression and tension conditions. This research results can provide theoretical reference for practical engineering.

Key words: photovoltaic power generation; H-shaped steel piles; vertical compressive and pull out test; pile bearing capacity; pile side friction resistance

0 引言

面对全球能源结构过度依赖化石燃料的现状, 发展可再生能源势在必行。各种可再生能源中, 太

阳能以其清洁、安全、取之不尽、用之不竭等显著优势, 已成为发展最快的可再生能源^[1-2]。开发利用太阳能光伏发电对实现清洁能源和解决能源危机具有重要意义。我国的沙漠地区晴天天数较多、日

照时间长, 具有丰富的太阳能资源。在沙漠地区建设发电站, 光伏支架及其基础形式的选择就尤为重要, 光伏支架支撑的光伏组件较轻, 组件恒荷载一般约为 0.12 kN/m², 且支架本身通常采用冷弯薄壁型钢, 自重较小。一般约为 0.10 kN/m², 而支架所受风荷载一般都超过 0.3 kN/m², 因此, 光伏支架基础设计时的控制荷载一般为风荷载^[3]。

风荷载存在风压和风吸 2 种不同的工况, 由于工况不同, 支架基础的受力形式也不相同。在风压作用下, 竖向压力和水平推力是支架基础的主要受力形式; 而在风吸作用下, 上拔力和水平推力是支架基础的主要受力形式^[4]。考虑到 H 型钢桩具有重量轻、贯穿能力强以及便于运输和施工等优点, 已经成为沙漠地区光伏支架首选的基础形式^[5-6]。

人们普遍认为对打入桩的研究, 现场试验更能真实的反映桩-土受力特性与规律^[7-8]。目前对于桩基承载力的研究多集中于圆形桩、管桩等规则桩型的研究^[9-10]。对于型钢桩, 试验研究及工程应用主要集中于 H 型钢桩。CHARLES 等^[11]进行 6 根 H 型钢桩的抗压试验, 对 H 型钢桩的抗压承载特征进行了揭示。YANG 等^[12]对 18 根 H 型钢桩开展了现场抗压试验。研究了 H 型钢桩的竖向受力特性, 提出桩侧阻力与土体有效应力、标贯击数之间的关系。NG^[13]等对 15 根 H 型钢桩进行了抗压试验, 对现行的承载力预测方法进行了比较, 并提出了改进建议。关于型钢桩的现场试验, 主要是规律性的定性分析, 缺少定量性的研究。因此, 本文通过适用于光伏支架下短型钢桩现场试验, 揭示短 H 型钢桩不同桩长、不同截面尺寸工况下的承载机理, 为沙漠地区光伏支架基础选型及应用提供参考。

1 H 型钢桩现场试验方案

1.1 H 型钢桩模型制作

通常情况下, H 型钢桩为工业加工的预制桩, 本文借鉴工业上常用的 H 型钢桩型号, 为了反映光伏支架桩基础受力特性, 采用表 1 所示 H 型钢桩进行现场抗压抗拔 2 种受力方式的静载荷试验, 图 1 为 3 号型钢桩 (150 mm×75 mm×5 mm×7 mm) 截面尺寸参数图, 其余型钢桩截面尺寸参数含义与图 1 中 3 号型钢桩相同。

表 1 H 型钢桩试桩截面参数一览表

Table 1	Cross-sectional parameters of H-shaped steel pile		
编号	桩长/m	入土深度/m	截面尺寸/mm
1 号、6 号	1.9	1.8	100×45×3×3
2 号、7 号	1.9	1.8	125×60×6×8
3 号、8 号	1.9	1.8	150×75×5×7
4 号、9 号	1.6	1.5	125×60×6×8
5 号、10 号	2.2	2.1	125×60×6×8

注: 1~5 号为抗压载荷试验桩, 6~10 号为抗拔载荷试验桩。

单位: mm

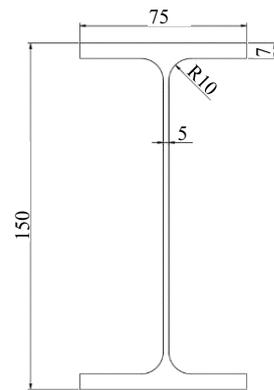


图 1 H 型钢桩 (3 号) 截面图

Fig. 1 Cross-sectional of H-shaped steel pile

为了了解桩身轴力、侧摩阻力的大小及分布情况, 试验从地表开始沿桩身每间隔 0.2 m 布设应变测试点, 每个测试点对称性的布设 2 个应变片, 测点采用全桥接法, 每个截面布置 2 个测点, 以取平均值为截面数据, 具体应变片布置图见图 2。

单位: mm

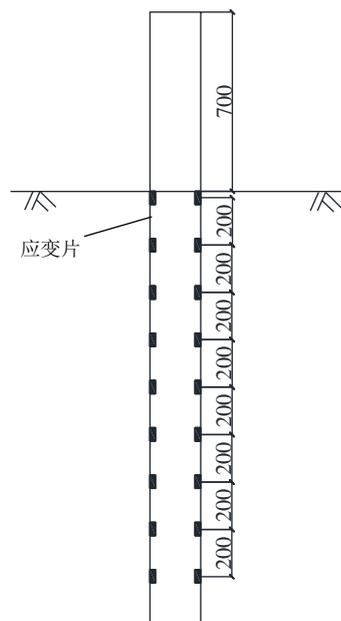


图 2 H 型钢桩应变片位置示意图

Fig. 2 Location of strain gauge of H-shaped steel pile

1.2 试验场地土样

试验场区属于黄淮冲积平原,砂性土地层,厚度较深,深度大于7m。为了开展沙漠地区光伏支架短H型钢桩受力特性研究,本文对试验场区开

展了桩体影响范围内土性的测试,其颗分试验结果为小于2、1、0.5、0.25和0.075mm颗粒级配依次为99.97%、99.77%、94.82%、27.45%和2.69%,判定为细砂土,其余常规物理力学试验参数如表2所示。

表2 试验场区地层物理力学参数一览表

Table 2 List of physical and mechanical parameters of formation in the test site area

含水量/%	密度/(g/cm ³)	比重	孔隙比	压缩系数/MPa ⁻¹	c'/kPa	φ'/(°)
5.39	1.80	2.50	0.82	0.25	0	28

1.3 现场试验方案布置及加载

根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)和考虑到桩间距的相互影响,布置了2排型钢桩,1排是抗拔,1排是抗压,抗拔试验与抗压试验型钢桩间距为3.2m,各个型钢桩间距也为3.2m,现场试验各H型钢桩桩位详见图3所示。10根H型钢桩先后进行静载测试,在H型钢桩加载过程中,荷载传递均匀、连续、无冲击。另外,在现场试验的过程中,天气以晴朗为主,气温5℃~12℃左右,北风2~3级。检测时试桩顶部及平衡梁位置做有效遮盖,现场情况满足试验规程(JGJ 106—2014)的要求。

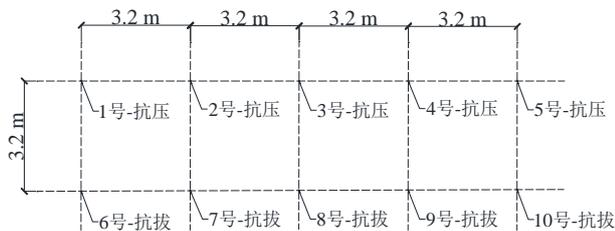


图3 试桩分布位置

Fig. 3 Location of test pile

考虑桩极限荷载不大于30kN,现场试验所选千斤顶加载能力为50kN,采用分级加载方式加载,荷载分级为1.5kN,第一级施加荷载为3kN。试验方式采用慢速维持荷载法模拟桩的受荷过程,用百分表量测桩顶变形,并在每级加(卸)载后的第5、10、15、30、45、60min测量桩顶位移,以后每隔30min测读一次,达到相对稳定后方可加(卸)下一级荷载。现场试验过程中当总位移量不小于40mm时,即便没有达到本级荷载的位移量,大于或等于前一级荷载位移量的5倍也认为试验达到破坏状态而终止现场加载试验,并取该变形下的荷载作为单桩荷载试验的极限荷载。

2 H型钢桩静压试验结果分析

2.1 单桩竖向承载力

根据现场静压荷载试验结果,进行单因素分

析,绘制不同桩长、截面尺寸的短H型钢桩荷载-位移(Q-s)关系曲线,如图4~5所示。

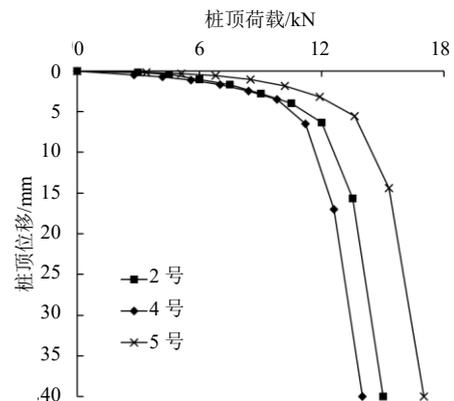


图4 不同桩长短H型钢桩Q-s曲线

Fig. 4 Q-s curves of H-shaped steel pile with different pile length

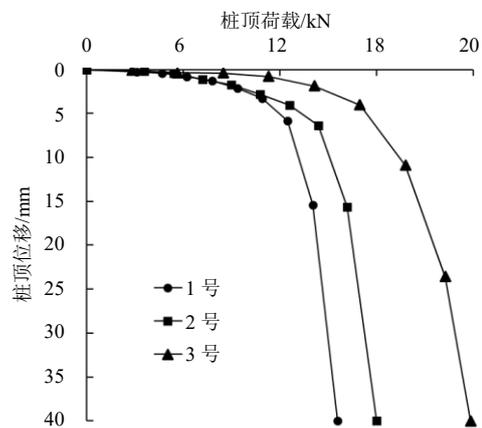


图5 不同截面尺寸短H型钢桩Q-s曲线

Fig. 5 Q-s curves of H-shaped steel pile with different section size

由图4~5关系曲线可知,5种不同尺寸和桩长的型钢桩,当施加5kN左右受压荷载时,桩顶的位移比较小,继续逐级加载,这时1~5号型钢桩位移开始明显增大,当进一步施加荷载时,此时1~5号型钢桩位移相继产生陡变,荷载也不能维持,此时桩体破坏,具体数值见表3。

选取2号、4号、5号型钢桩进行分析,根据图4可知,随着桩长度的增加,桩身部分与桩周土体接

触面积增加,从而能够产生更多的侧摩阻力,因此单桩承载力也逐渐增大。选取 1~3 号 H 型钢桩进行对比分析,由图 5 可见,随着 H 型钢桩尺寸增大,单桩承载力也明显更高,这是由于尺寸增大也提高了桩-土接触面积,使得侧摩阻力增大,从而提高型钢桩的承载力。整体看来,无论是截面尺寸增大还是桩身加长,都会使得 H 型钢桩单桩承载力增大。

需要说明一点,由于现场试验条件原因,3 号并未达到极限承载力,本文取位移为 40 mm 时 1~5 号的承载力作为极限承载力。

表 3 桩体极限承载力一览表
Table 3 Ultimate bearing capacity of pile

桩号	上级荷载/位移/mm	本级荷载/位移/mm	累积位移/mm	极限承载力/kN
1 号	9.55	24.61	40.00	13.37
2 号	9.30	24.36	40.00	15.21
3 号	8.64	16.42	40.00	19.90
4 号	10.50	23.02	40.00	14.75
5 号	8.91	25.56	40.00	17.23

2.2 桩身轴力

试验准备阶段通过在型钢桩桩身不同位置处贴放应变片,型钢桩在各级荷载下桩身的应变可由应变片测得,通过应变片计算得到各种尺寸型钢桩在极限荷载下的轴力分布,具体如图 6 所示。

图 6 表明,不同尺寸的 H 型钢桩在极限荷载条件下的变化趋势是相似的。在埋置部分, H 型钢桩的轴力缓慢减小,当到达近 1/2 桩深处时,桩身轴力迅速减小,由此可见,土体性质对轴力影响较为显著。

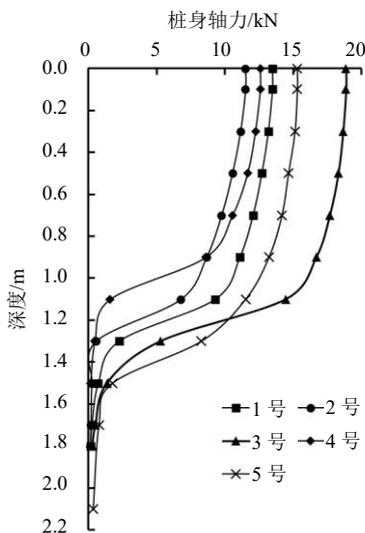


图 6 H 型钢桩轴力分布

Fig. 6 Axial force distribution of H-shaped steel piles

2.3 桩侧摩阻力

由于试验过程中存在开挖后再填埋,所以会导致土体性质发生较大改变,由于桩侧摩阻力与桩周是密切相关的,因此土体的性质将会直接影响桩侧摩阻力的分布。在极限荷载条件下不同尺寸型钢桩的侧摩阻力如图 7 所示。

从图 7 可知,无论是桩长还是 H 型钢桩截面尺寸的不同,都没有改变侧摩阻力的变化趋势。由于现场试验的条件约束,打桩时可能会对土体有扰动现象,因此本文将土层分为扰动土段及原状土阶段。在扰动土阶段,桩的侧摩阻力数值很小且变化不明显;当达到原状土段,桩的侧摩阻力迅速增大,且 H 型钢桩受压和受拉工况下其侧摩阻力峰值均发生在距桩端 1/3 位置处,随后急剧减小。在这里,不同桩长的侧摩阻力对应的最大深度不同,桩长为 2.2 m 的型钢桩侧摩阻力在达到峰值强度之前变化速率最小,当达到峰值强度之后,下降的速率最快。

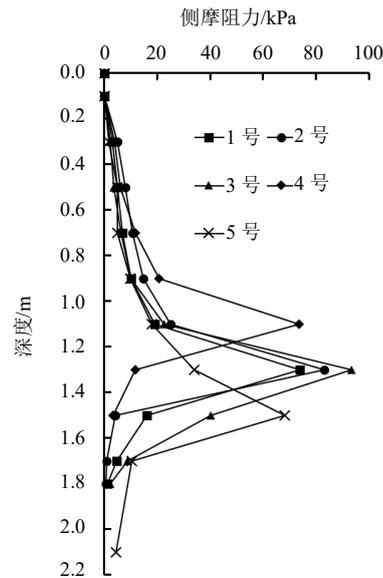


图 7 H 型钢桩侧摩阻力分布

Fig. 7 Distribution of lateral frictional resistance of H-shaped steel piles

3 抗拔静力载荷试验结果分析

3.1 桩顶 Q-s 曲线分析

图 8 为现场抗拔试验测得的不同截面尺寸、桩长 H 型钢桩在各级荷载下的 Q-s 曲线。当桩顶位移小于 2.0 mm 时, 1~5 号型钢桩的 Q-s 曲线非常相近。限于现场试验条件,试桩在试验加载范围内均未达到极限荷载,但当桩顶荷载达到 6 kN 时, 1 号、

4号这2种型钢桩桩顶位移显著增大,抗拔承载力趋于极限值;而另外3种型钢桩 $Q-s$ 曲线桩顶没有减小趋势,桩底位移较小,据此可以推断,截面尺寸、桩长对于型钢桩承载力影响显著,尺寸越大、桩身越长,则承载力越高。这与抗压试验所得到的结论是吻合的。

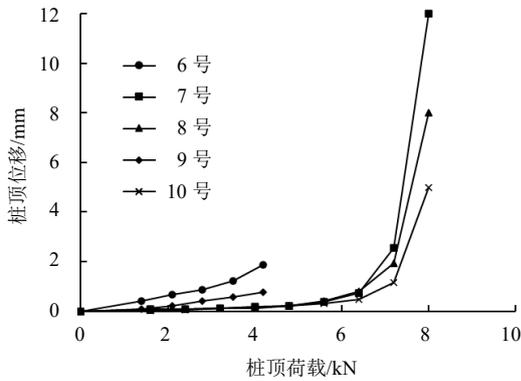


图8 不同截面尺寸、桩长H型钢桩 $Q-s$ 曲线
Fig. 8 $Q-s$ curves of H-shaped steel piles with different section size and pile length

3.2 桩身轴力及侧摩阻力分析

图9~10为现场抗拔试验测得的不同截面尺寸、桩长H型钢桩在极限荷载条件下的轴力、侧摩阻力分布曲线。

从图中可以得出,在截面尺寸相同的条件下,3种不同桩长的H型钢桩轴力随着桩身长度增加而逐渐增大,但轴力降低的深度却不同,这是由于现场试验自身的条件造成的。抗拔试验中桩的承载力主要由侧摩阻力承担,由图中可知,桩尺寸的提高能显著提高承载力。当桩长不同时,桩侧摩阻力的发挥是一个随深度变化的过程,当桩身(1.6m)较短的桩已经发挥时,桩身(2.2m)较长的型钢桩才刚刚发挥,沿桩身方向从上到下依次开展。

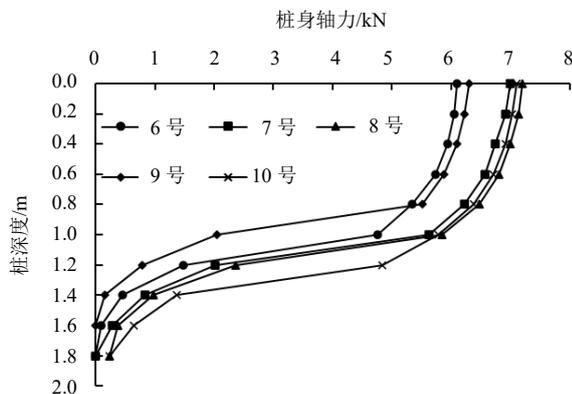


图9 H型钢桩轴力分布图
Fig. 9 Axial force distribution of H-shaped steel piles

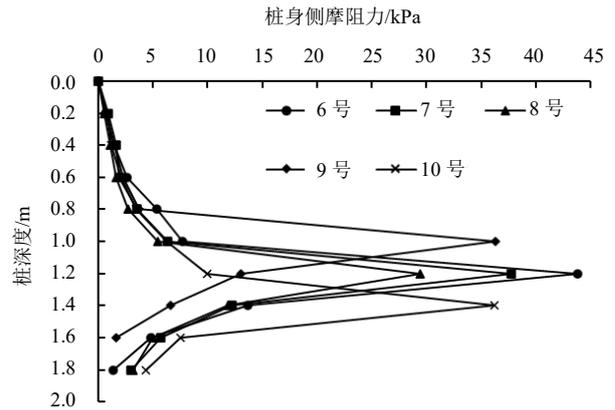


图10 H型钢桩侧摩阻力分布图
Fig. 10 Distribution of lateral frictional resistance of H-shaped steel piles

4 结论

本文通过开展H型钢桩现场抗压抗拔试验,详细研究了不同桩长、不同截面尺寸的竖向承载力及其受力特性。试验研究表明:

- (1) 通过现场抗压抗拔试验得出不同截面尺寸、桩长的H型钢桩承载力。增大截面尺寸、提高桩长都能够提高桩土接触面积,从而提高型钢桩竖向承载力。
- (2) 在实际工程中,需要考虑桩侧摩阻力的发挥程度。当位移较小时,桩侧摩阻力较低,几乎不发挥,随着桩土位移逐渐增大,桩侧摩阻力逐渐发挥,且H型钢桩受压和受拉工况下其侧摩阻力峰值均发生在距桩端1/3位置处。
- (3) 当桩长不同时,桩侧摩阻力的发挥是一个随深度变化的过程。当桩身(1.6m)较短的桩已经发挥时,桩身(2.2m)较长的型钢桩才刚刚发挥,沿桩身方向从上到下依次开展。
- (4) 不同截面尺寸、桩长对桩体承载能力的影响显著。本文以型钢桩现场试验为依托,具有一定的现实意义,也可为类似的桩基施工提供参考,并丰富了桩基理论。

参考文献

[1] 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 Huai-ning, HUANG Xue-feng, et al. Study on the mechanism of micro-pile with pull-out anchorage for photovoltaic support[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(2): 262-267.

- [2] 杨文, 田富银. 泰国某光伏发电示范工程支架基础选型设计探讨[J]. 低碳世界, 2014(22): 105-106.
YANG Wen, TIAN Fu-yin. Discussion on the selection and design of the foundation of a photovoltaic power generation demonstration project in Thailand[J]. Low Carbon World, 2014(22): 105-106.
- [3] 买发军. 某大型光伏电站支架分层风荷载分析研究[J]. 太阳能, 2017(9): 29-31.
MAI Fa-jun. Analysis and research on layered wind load of support in a large photovoltaic power station[J]. Solar Energy, 2017(9): 29-31.
- [4] 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 Hai-feng, MA Na. Introduction of foundation form of photovoltaic support and discussion on foundation design[J]. Solar Energy, 2020(12): 66-70.
- [5] 王进怀, 王卫东, 章磊. H 型钢桩作灾区地基承载桩具抗震减震性能的优势分析[J]. 国际地震动态, 2010, 374(2): 27-30.
WANG Jin-huai, WANG Wei-dong, ZHANG Lei. Aseismic performance analysis of H-type steel pile as a foundation load-bearing pile in earthquake prone areas[J]. Recent Developments in World Seismology, 2010, 374(2): 27-30.
- [6] 王艳华. H 型钢桩静载与动载承载力试验分析[J]. 公路, 2014, 59(11): 110-113.
WANG Yan-hua. Analysis on the bearing capacity of static load and moving load for H-shaped steel pile[J]. Highway, 2014, 59(11): 110-113.
- [7] HOYOUNG S, IREM ZEYNEP Y, MONICA P. Assessment of the axial load response of an H pile driven in multilayered soil[J]. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1789-1804.
- [8] ARTHUR K O S, CHARLES W W N. Performance of long-driven H-piles in granitic saprolite[J]. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(2): 246-258.
- [9] 郑江, 俞琴云, 高钰, 等. 预应力管桩处理傍山路段软基分析[J]. 地基处理, 2021, 3(1): 13-20.
ZHENG Jiang, YU Qin-yun, GAO Yu, et al. Analysis of prestressed pipe pile treatment of soft foundation near mountain section[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(1): 13-20.
- [10] 冯周飞, 韦兴标, 汤立文. 微型桩在人工挖孔嵌岩灌注桩施工中的应用[J]. 地基处理, 2020, 2(6): 522-526.
FENG Zhou-fei, WEI Xing-biao, TANG Li-wei. Application of micro pile in the construction of manual hole digging rock socketed cast-in-place pile[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(6): 522-526.
- [11] CHARLES I M, ALFRED H H. Pile tests-arkansas river project[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1545-1582.
- [12] YANG J, THAM L G, LEE P K 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.
- [13] NG K, SULLIVAN T. Challenges and recommendations for steel H-piles driven in soft rock[J]. Geotechnical Engineering, 2017, 48(3): 1-11.