

# 交能融合项目路域光伏支架基础用钢管螺旋桩抗拔极限承载力的计算研究

胡传鹏

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 由于钢管螺旋桩具有极佳的经济性和适用性, 其在许多光伏发电项目中都是光伏支架基础的首选形式, 但国内两项钢管螺旋桩设计标准中关于其抗拔极限承载力的计算公式存在较大差异, 在实际工程中如何选择更合理的标准困扰着工程设计人员。以某交能融合项目路域的光伏场区为例, 通过现场试验得到了单根钢管螺旋桩的抗拔极限承载力数据, 并将现场试验结果与不同标准下得到的计算结果进行了对比, 根据对比结果给出了计算公式应用建议。研究表明: 1) 从现场试验结果来看, 钢管螺旋桩桩径的增加对单桩抗拔承载力有一定的提高作用, 但提高作用有限, 性价比较低。若要提高单桩抗拔极限承载力, 建议还是从增加叶片的道数或叶片直径的方向采取措施。2) 在进行光伏发电项目设计时, 若要估算单桩的抗拔极限承载力, 建议采用 DB41/T 2125—2021 中的倒圆台承载模式的计算公式, 得到的计算结果最保守也最接近现场实际情况。

**关键词:** 交能融合; 光伏支架; 钢管螺旋桩; 抗拔极限承载力; 规范公式

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

## 0 引言

钢管螺旋桩施工技术于 20 世纪 80 年代引入中国, 经过多年的发展, 目前已成为一种技术成熟、操作简便的施工技术。钢管螺旋桩因具有强度性能优良、经济耐用、施工便捷、承载力高等优点, 在光伏发电领域得到了广泛应用, 且取得了良好效果。虽然钢管螺旋桩在许多光伏发电项目中是光伏支架基础的首选形式, 但国内对钢管螺旋桩的研究相对较少, 相关配套规范也较为欠缺。吴继峰等<sup>[1]</sup>通过现场试验, 分析了钢管螺旋桩的叶片个数、直径, 桩径及注浆等因素对钢管螺旋桩抗拔承载力的影响, 并初步提出了钢管螺旋桩的抗拔承载力计算公式。董天文等<sup>[2-3]</sup>通过原型桩抗拔试验, 对钢管螺旋桩的抗拔性能进行了研究, 并提出了软土地基时钢管螺旋桩的抗拔极限承载力计算方法。张新春等<sup>[4]</sup>对钢管螺旋桩

的安装扭矩进行了研究, 分析了安装扭矩与抗拔承载力之间的关联。乔红军等<sup>[5]</sup>采用 FLAC3D 软件对钢管螺旋桩的抗拔承载力进行了数值模拟, 通过对比数值模拟结果与工程试验结果, 针对钢管螺旋桩的抗拔承载力计算提出了一种实用且有效的数值模拟方法。刘宾科<sup>[6]</sup>通过现场试验分析了桩径、叶片直径和个数、桩间距对钢管螺旋桩抗压极限承载力的影响, 并针对这些因素提出了桩型参数的优化建议。马艺琳等<sup>[7]</sup>通过对不同规格的钢管螺旋桩进行现场试验得到了各种钢管螺旋桩的荷载-沉降( $Q-S$ )曲线, 探讨了叶片直径、个数, 桩径及降水等因素对桩基础抗压承载力的影响方式及影响程度, 为建立适用于国内地质条件的钢管螺旋桩抗压承载力计算公式提供了依据。总体而言, 目前的研究成果尚未达到足够的水平, 钢管螺旋桩的抗拔承载力的理论

收稿日期: 2023-10-12

基金项目: 中国能建广东院科技项目“综合交通与能源融合关键技术研究工程示范”(CEEC2021-KJZX-08-2)

通信作者: 胡传鹏(1987—), 男, 硕士、高级工程师, 主要从事电力、市政及工业与民用建筑结构设计方面的工作。huchuanpeng@gedi.com.cn

计算方式尚不能满足工程的实际需求。

在工程设计领域，国内钢管螺旋桩的设计主要依托于两项规范：其中一项是2016年发布的国家标准 GB 51101—2016《太阳能发电站支架基础技术规范》<sup>[8]</sup>，另一项是2021年发布并实施的河南省地方标准 DB41/T 2125—2021《公路钢管螺旋桩设计施工技术规范》<sup>[9]</sup>，但这两项规范对于钢管螺旋桩抗拔极限承载力的计算思路及相应的计算公式差异较大。GB 51101—2016的抗拔极限承载力计算思路基本延用了 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》<sup>[10]</sup>中的计算思路，仍将抗拔承载力简化为桩侧摩阻力来计算，并在桩侧摩阻力的周长中考虑叶片的影响。DB41/T 2125—2021对钢管螺旋桩的抗拔破坏模式进行了分类，分为倒圆台承载模式、叶片式承载模式和圆柱剪切承载模式，并根据不同的抗拔破坏模式提出了相应的抗拔极限承载力计算公式。

鉴于国家标准和地方标准对于钢管螺旋桩抗拔极限承载力的计算公式存在较大差异，给工程设计人员造成很大困扰这一问题，本文以某交能融合项目路域的光伏场区为例，通过现场试验获取单根钢管螺旋桩的抗拔承载力数据，再将根据不同标准得到的计算结果与试验结果进行对比，并根据对比结果给出计算公式应用建议。

## 1 现场试验概况

### 1.1 光伏场区的地质情况

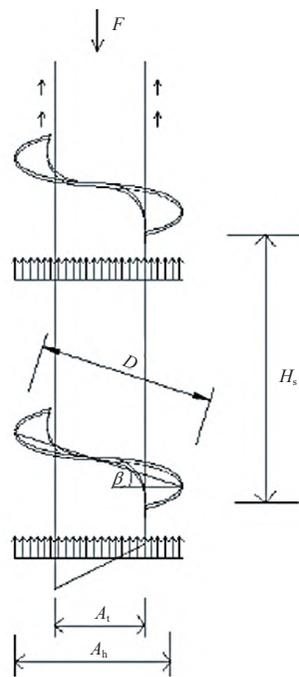
本交能融合项目路域的光伏场区主要位于已建路基的边坡上，光伏支架基础采用钢管螺旋桩。本项目的公路已建成运营，公路路基的基底压实度不低于90%，路堤的压实度不低于93%，路床的压实度不低于96%；路基填土能达到中密以上，且对于软弱土层采用换填和强夯等方法进行处理。光伏支架基础主要位于路基填土层中。

### 1.2 钢管螺旋桩的沉桩与静载试验

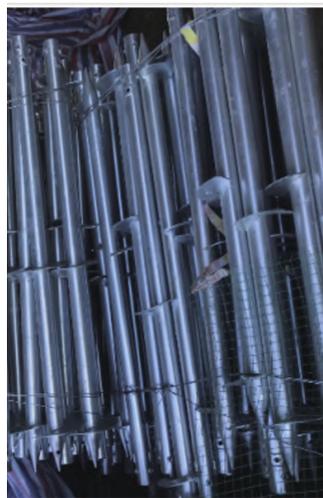
#### 1.2.1 沉桩

本光伏场区采用的钢管螺旋桩的外径  $A_1$  为

76 mm、壁厚为4 mm；设置叶片道数为两道，叶片直径  $D$  为250 mm，叶片倾角  $\beta$  为  $10^\circ$ ，两道叶片的间距  $H_s$  为800 mm；桩长为2.0 m；埋深为1.8 m。该钢管螺旋桩的结构示意图与实物图如图1所示。图中： $A_h$  为叶片的水平投影直径； $F$  为钢管螺旋桩承受的竖向荷载。



a. 结构示意图



b. 实物图

图1 钢管螺旋桩的结构示意图与实物图

Fig. 1 Structural schematic and photo of spiral steel pipe pile

因光伏场区的施工地位于路基边坡上，普通的桩基施工设备不适用，因此，采用由履带式挖掘机改装的螺旋钻机进行钢管螺旋桩的沉桩，施

工照片如图2所示。



图2 钢管螺旋桩的沉桩施工照片

Fig. 2 Construction photo of steel pipe spiral pile sinking

### 1.2.2 实施静载试验

为检测单根钢管螺旋桩(下文简称为“单桩”)的抗拔承载力,对其进行静载试验。静载试验过程中采用油压千斤顶向试验桩施加上拔力,用于表征试验桩的抗拔承载力,荷载大小由并联于油压千斤顶的油压表计量。试验桩桩顶上拔的位移值大小由置于基准梁上的百分表测量。静载试验布置图如图3所示。

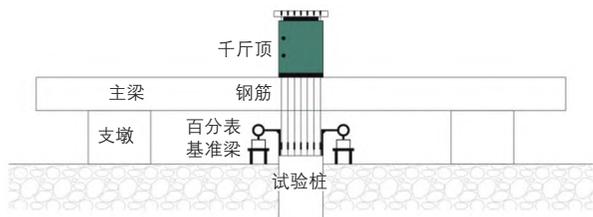


图3 静载试验布置图

Fig. 3 Layout diagram of static load test

静载试验流程为:沉桩→安放油压千斤顶→安装主梁→焊接拉筋→安装仪表→分析单桩加载上拔力后的测试数据→评定测试结果。静载试验的现场照片如图4所示。

### 1.3 静载试验结果

在光伏场区现场选取3种桩径共9根钢管螺旋桩作为试验桩,通过静载试验得到单桩的抗拔承载力最大值,然后取每种桩径下的平均值,最终得到单桩的抗拔承载力静载试验结果,具体如下表1所示。



图4 静载试验的现场照片

Fig. 4 On site photo of static load test

表1 单桩的抗拔承载力静载试验结果

Table 1 Static load test results of tensile bearing capacity of one pile

试验桩编号	桩径/mm	桩长/m	抗拔承载力	
			最大值/kN	平均值/kN
1	76	2	5.8	6.17
2	76	2	6.5	
3	76	2	6.2	
4	89	2	7.0	7.37
5	89	2	7.4	
6	89	2	7.7	
7	114	2	8.2	8.23
8	114	2	8.6	
9	114	2	7.9	

## 2 不同标准下的抗拔承载力计算方式与结果

本文主要针对 GB 51101—2016 和 DB41/T 2125—2021 中关于钢管螺旋桩抗拔极限承载力的计算方式与结果进行研究。

### 2.1 GB 51101—2016 的计算方式及结果

根据 GB 51101—2016 的第 5.3.10 条,单桩的抗拔极限承载力标准值  $T_{uk}$  可根据土的物理力学指标和承载力参数之间的经验关系进行确定,其计算式为:

$$T_{uk} = \sum \lambda_i u_i q_{sik} l_i \quad (1)$$

式中： $\lambda_i$ 为第*i*层土的抗拔系数，岩石可取0.8，砂土可取0.5，黏性土、粉土可取0.7； $u_i$ 为第*i*层土中桩周计算周长，具体取值按该标准中的表5.3.10进行取值； $q_{sik}$ 为桩侧第*i*层土的极限桩侧摩阻力标准值； $l_i$ 为桩周第*i*层土的厚度。

根据GB 51101—2016中单桩的抗拔极限承载力标准值计算式得到的计算结果如表2所示。

表2 根据GB 51101—2016得到的单桩的抗拔极限承载力标准值计算结果

Table 2 Calculation results of standard values of ultimate tensile bearing capacity of one pile obtained according to GB 51101—2016

桩径/mm	桩长/m	$T_{uk}$ 计算结果/kN
76	2	7.87
89	2	8.14
114	2	8.64

## 2.2 DB41/T 2125—2021 的计算方式及结果

根据DB41/T 2125—2021的第5.3条，钢管螺旋桩的抗拔极限承载力标准值的计算模式分为倒圆台承载模式、叶片式承载模式和圆柱剪切承载模式。根据本光伏场区采用的钢管螺旋桩的尺寸及桩基埋深，适用的计算模式有倒圆台承载模式和叶片式承载模式两种。

倒圆台承载模式下单桩的抗拔极限承载力标准值 $Q_{uk}$ 的计算式为：

$$Q_{uk} = \sum_{i=1}^n V_i + f_j + W \quad (2)$$

式中： $n$ 为土层总数； $V_i$ 为倒圆台内第*i*层地基土的体积； $f_j$ 为第*j*层叶片承担的荷载； $W$ 为桩的重量。

倒圆台承载模式下的单桩抗拔极限承载力标

表5 两种标准得到的单桩抗拔极限承载力标准值计算结果与现场试验结果的偏差

Table 5 Deviation between calculation results of standard values of ultimate tensile bearing capacity of one pile obtained from two standards and field test results

桩长/m	桩径/mm	现场试验结果/kN	GB 51101—2016		DB41/T 2125—2021			
			计算结果/kN	偏差%	倒圆台承载模式		叶片式承载模式	
					计算结果/kN	偏差%	计算结果/kN	偏差%
2	76	6.17	7.87	27.55	6.51	5.51	7.47	21.07
2	89	7.37	8.14	10.45	7.54	2.31	8.45	14.70
2	114	8.23	8.64	4.98	7.63	7.23	10.21	24.06

准值的计算结果如表3所示。

表3 倒圆台承载模式下的单桩抗拔极限承载力标准值的计算结果

Table 3 Calculation results of standard values of one pile ultimate tensile bearing capacity in inverted cone bearing mode

桩径/mm	桩长/m	$Q_{uk}$ 计算结果/kN
76	2	6.51
89	2	7.54
114	2	7.63

叶片式承载模式下单桩的抗拔极限承载力标准值 $Q_{uk}$ 的计算式为：

$$Q_{uk} = W + f_1 + \sum_{j=1}^m f_j \quad (3)$$

式中： $f_1$ 为桩土界面摩阻力； $m$ 为叶片总层数。

叶片式承载模式下的单桩抗拔极限承载力标准值的计算结果如表4所示。

表4 叶片式承载模式下的单桩抗拔极限承载力标准值的计算结果

Table 4 Calculation results of standard values for ultimate tensile bearing capacity of one pile in blade bearing mode

桩径/mm	桩长/m	$Q_{uk}$ 计算结果/kN
76	2	7.47
89	2	8.45
114	2	10.21

## 3 结果分析

对依据不同标准得到的单桩抗拔极限承载力标准值计算结果与现场试验结果进行对比，分别得到两种标准下的计算结果与现场试验结果的偏差，如表5所示。

从表5中的数据可以得到以下结论:

1) 从现场试验结果来看, 钢管螺旋桩桩径的增加对单桩抗拔极限承载力有一定的提高作用, 但提高作用有限。桩径从76 mm增加至114 mm, 截面积增加了52.7%, 但单桩抗拔极限承载力仅增加了33.4%。因此, 若要提高单桩抗拔承载力, 建议还是从增加叶片的道数或叶片直径的方向采取措施。

2) 通过对比不同标准下的计算结果可发现, 倒圆台承载模式得到的单桩抗拔极限承载力标准值计算结果比叶片式承载模式及GB 51101—2016得到的计算结果都低, 结果最为保守。

3) 相较于现场试验结果, 倒圆台承载模式得到的单桩抗拔极限承载力标准值计算结果最为接近, 不同桩径下的最大偏差仅为7.23%; GB 51101—2016的计算结果次之; 叶片式承载模式的计算结果偏差较大。

综上所述, 在进行光伏发电项目设计时, 若估算单桩抗拔极限承载力, 建议采用DB41/T 2125—2021中的倒圆台承载模式的计算公式, 得到的计算结果最保守也最接近现场实际情况。

#### 4 结论及建议

本文以某交能融合项目路域的光伏场区为例, 通过现场试验得到了单根钢管螺旋桩的抗拔承载力数据, 再将根据不同标准得到的计算结果与现场试验结果进行了对比, 并根据对比结果给出了计算公式应用建议。得到以下结论:

1) 从现场试验结果来看, 钢管螺旋桩桩径的增加对单桩抗拔极限承载力有一定的提高作用, 但提高作用有限, 性价比较低。若要提高单桩抗拔极限承载力, 建议还是从增加叶片的道数或叶片直径的方向采取措施。

2) 在进行光伏发电项目设计时, 若要估算单桩的抗拔极限承载力, 建议采用DB41/T 2125—2021中的倒圆台承载模式的计算公式, 得到的计算结果最保守也最接近现场实际情况。

需要说明的是, 本项目中光伏场区主要位于回填边坡上, 而边坡的回填时间较短, 尚未完成自然沉降, 边坡土质也较为松散, 且存在压实不均匀等情况, 导致实测的单桩抗拔承载力试验值浮动较大。此外, 在螺旋桩钻进时, 由于施工器械、施工工艺及施工人员的技术水平等因素的影响, 桩基施工过程中对其周围土体的扰动程度也不尽相同, 因此单桩抗拔承载力也会受到不同程度的影响。由于本研究中钢管螺旋桩的样本数量较少, 且固定了桩长、叶片直径、叶片道数、叶片间距等变量, 仅考虑了桩径的变化, 无法全面考察各个变量对单根钢管螺旋桩抗拔承载力的影响程度。针对这些不足, 在后续的研究中可以通过加大样本数量, 选择符合标准的场地, 对施工机械、施工工艺及施工人员的技术水平等外部因素加以控制等方法, 对钢管螺旋桩单桩抗拔承载力的受力机理和计算模式进行更深入的研究。

#### 【参考文献】

- [1] 吴继峰, 吴萍, 王鑫. 叶片式螺旋钢管桩抗拔承载力的试验研究[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 180-185.
- [2] 董天文, 梁力, 黄连壮, 等. 螺旋桩基础抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 186-190.
- [3] 董天文, 李士伟, 张亚军, 等. 软土地基螺旋桩竖向抗拔极限承载力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3057-3062.
- [4] 张新春, 何泽群, 董思捷, 等. 砂土中钢管螺旋桩安装扭矩的研究[J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(5): 391-396.
- [5] 乔红军, 彭丽云, 杨成才, 等. 叶片式螺旋桩静载试验及数值模拟[J]. 北京建筑大学学报, 2017, 33(4): 12-17.
- [6] 刘兵科. 叶片式钢管螺旋桩试验研究及桩型参数优化[J]. 施工技术, 2019, 48(4): 93-97.
- [7] 马艺琳, 王毅娟, 魏新良. 竖向承压螺旋桩承载力影响因素对比分析[J]. 北京建筑大学学报, 2017, 33(4): 22-26.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 太阳能发电站支架基础技术规范: GB 51101—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [9] 河南省市场监督管理局. 公路钢管螺旋桩设计施工技术规范: DB41/T 2125—2021[S]. 河南: [出版者不详], 2021.
- [10] 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.

# CALCULATION AND RESEARCH ON ULTIMATE TENSILE BEARING CAPACITY OF STEEL PIPE SPIRAL PILE FOR PV BRACKET FOUNDATION IN THE ROAD AREA OF TRANSPORTATION AND ENERGY INTEGRATION PROJECT

Hu Chuanpeng

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangdong Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Due to its excellent economy and applicability, steel pipe spiral pile are the preferred form of PV brackets foundation in many PV power generation projects. However, there are significant differences in the calculation formula for the ultimate tensile bearing capacity of steel pipe spiral pile between the two domestic design standards for steel pipe spiral pile. How to choose more reasonable standard in practical engineering is troubling engineering designers. This paper takes the PV field area of a certain transportation energy integration project as an example, and obtains the tensile bearing capacity data of a single steel pipe spiral pile through on-site tests. The on-site test results are compared with the calculation results obtained under different standards, and based on the comparison results, application suggestions for the calculation formula are given. The research results show that: 1) From the on-site test results, it can be seen that increasing the diameter of steel pipe spiral pile has a certain improvement effect on the single pile's ultimate tensile bearing capacity, but the improvement effect is limited, which is a low cost-effectiveness. To improve the tensile bearing capacity of a single pile, it is recommended to taking measures in the direction of increasing the number of blades or blade diameter. 2) When designing PV power generation projects, it is recommended to use the calculation formula for the inverted cone bearing mode in DB41/T 2125—2021 to estimate the ultimate tensile bearing capacity of a single pile. The calculated results are the most conservative and closest to actual situation on-site.

**Keywords:** transportation and energy integration; PV brackets; steel pipe spiral pile; ultimate tensile bearing capacity; canonical formula