

# 潮间带钢管斜桩吊打导向装置与沉桩参数研究

娄学谦<sup>1,2,3</sup>, 桑登峰<sup>1,2,3</sup>, 许伟群<sup>4</sup>

(1.中交四航工程研究院有限公司 广州 510230;2.中交交通基础工程环保与安全重点实验室 广州 510230;  
3.南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海) 珠海 519082;4.中交四航局第三工程有限公司 湛江 524009)

**摘要:**钢管斜桩是潮间带风电的常用基础形式,常采用吊打沉桩的方式。文章针对潮间带吊打沉桩方式的难点开发吊打导向装置,并总结沉桩参数的确定方法。该导向装置包括定位桩、定位架和调向限位架,总体平面布局为六边形,可一次定位并完成整个风电基础的基桩施工,既能可靠保证桩的施工精度,又能极大地提高施工效率和降低安全风险;在应用该施工关键装备时,采用GRLWEAP打桩分析功能确定桩顶动荷载,采用有限元软件建立导向装置有限元模型,对导向装置和沉桩参数进行分析,从而实现斜桩顺利沉桩的目的。该装置和方法已成功应用于越南朔庄一期海上风电场项目,为潮间带风电钢管斜桩吊打施工提供沉桩装备和方法经验。

**关键词:**潮间带;钢管斜桩;吊打;导向装置;沉桩参数

**中图分类号:**TU473;P748

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-9857(2022)10-0104-08

## The Guiding Device for Lifting and Driving of Inclined Steel Pipe Pile and Pile Driving Parameters at Intertidal Zone

LOU Xueqian<sup>1,2,3</sup>, SANG Dengfeng<sup>1,2,3</sup>, XU Weiqun<sup>4</sup>

(1.CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co.,Ltd.,Guangzhou 510230,China;

2.CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230,China;

3.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai),Zhuhai 519082,China;

4.The third Engineering company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co.,Ltd.,Zhanjiang 524009,China)

**Abstract:** Inclined steel pipe pile is the common foundation form of wind power in intertidal area, the method of pile lifting and driving is often adopted. Aiming at the difficulties of pile lifting and driving at intertidal zone, one guiding device for pile lifting and driving has been developed and the determination method of pile driving parameters been summarized. The guiding device includes positioning pile, positioning frame and direction adjustment limit frame. The overall plane layout is six-sided, which can be positioned at one time to complete the construction of the whole wind power foundation pile. It can not only ensure the construction accuracy of the pile, but also greatly improve the construction efficiency and reduce safety risks. When the key con-

收稿日期:2022-02-14;修订日期:2022-10-14

基金项目:广州市珠江科技新星专项项目(201806010164,201906010023)。

作者简介:娄学谦,高级工程师,硕士,研究方向为地下工程和海洋工程的试验和数值分析

struction equipment was applied, the dynamic load of pile top was determined by pile driving analysis function of GRLWEAP, the finite element model of guide device and engineering pile was established by finite element software, and the parameters of guide device and pile driving were analyzed, to achieve the goal of smooth driving of inclined pile. The device and method had been successfully applied to the Soc Trang wind power plant- phase I project, Vietnam, and the analysis of this paper provided the experience of pile driving equipment and method for lifting and driving of inclined steel pipe pile at intertidal zone.

**Keywords:** Inter-tidal zone, Inclined steel pipe pile, Lifting and driving, Guiding device, Driving parameters

## 0 引言

风能作为清洁的可再生能源,越来越受到世界各国的重视。由于发展海上风电不占用陆上土地,且海上风能资源丰富,适宜大规模开发,海上风电已成为未来风电发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。海上风电建设区域由近及远依次为潮间带、潮下带滩涂、近海和远海,其中潮间带是指大潮期最高潮位和大潮期最低潮位之间的海域<sup>[2]</sup>。丹麦、英国和德国等海上风电大国多采用超大直径单桩(刚性单桩)基础、重力式浅基础和吸力式桶形基础等,但这些基础的施工须依靠目前我国所缺乏的大型打桩船舶、海上专用吊运船舶及其他相关关键技术,因此我国仍普遍采用群桩基础<sup>[3]</sup>。潮间带的平均水深较小,造成施工船舶航行困难和可通行时间短,通常无法利用常规船桩架导向沉桩,而仅能通过桩锤吊打。因此,研制适合潮间带风电场施工特点的专用吊打导向装置以及分析吊打沉桩参数特点,对于潮间带风电钢管斜桩施工具有重要指导意义。

本研究设计专门用于潮间带风电钢管斜桩吊打施工的导向装置,采用 GRLWEAP 软件确定沉桩动荷载,采用有限元软件进行有限元分析,指导确定沉桩参数,并成功将该装置和方法应用于越南朔庄一期海上风电项目的大直径钢管桩吊打施工。

## 1 工程和工艺

### 1.1 工程与地质概况

越南薄辽三期和朔庄一期海上风电项目为中

国企业在越南总承包的第一个海上风电项目,工程位于越南东南部海域。

风机基础形式采用高桩混凝土承台,每个风机设置 1 个基础,其中朔庄一期风场共 10 个基础。每个基础设置 6 根直径 1.40 m 的钢管桩,采用 6 : 1 的斜桩,设计桩长 62 ~ 71 m,桩顶设计高程 +7.7 m。6 根桩在承台底面沿以承台中心为圆心、半径为 4.50 m 的圆周均匀布置。钢管桩管材为 Q355B,上段管壁厚 25 mm,下段管壁厚 20 mm,桩端 2 m 壁厚 25 mm。靠船构件距桩顶 9 050 mm、非靠船构件距桩顶 6 000 mm 的桩身内填灌 C45 微膨胀混凝土。

朔庄风场机位原泥面为 -0.87 ~ -2.75 m,水深较浅,有 7 个桩位无法满足桩船吃水要求,拟采用吊打方式进行沉桩施工。为确保施工精度和施工安全可靠,须根据本工程岩土和桩基特点,设计专门的吊打导向装置。根据岩土勘察报告,选取原泥面高程最低的钻孔 ZK10 进行导向装置的受力验算,ZK10 钻孔岩土层的分布和物理力学性质如表 1 所示。

### 1.2 吊打施工工艺

根据施工方案,钢管桩吊打施工的基本流程为:插打定位桩、吊装定位架、安装限位架、吊机驳取桩、立桩、桩自沉、测桩偏位、振动锤初打、压上冲击锤和替打、校核桩位、锤击沉桩、至设计桩底高程停止锤击、测桩偏位、拆除定位架及限位架组合体、拔除定位桩、进行下一机位沉桩。

表 1 ZK10 钻孔土层的分布和物理力学性质

| 土层<br>编号 | 土层描述               | 层顶<br>高程/m | 相对<br>密实度<br>( $D_r$ ) | 有效重度<br>( $\gamma'$ )/<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 黏性土不排水<br>抗剪强度<br>( $S_u$ )/kPa | 内摩擦角<br>( $\varphi'$ )/<br>( $^\circ$ ) | 桩-土内<br>摩擦角<br>( $\delta$ )/<br>( $^\circ$ ) | 预估<br>侧阻/<br>kPa | 预估<br>端阻/<br>kPa | 抗拔<br>承载力<br>系数( $\lambda$ ) |
|----------|--------------------|------------|------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|------------------|------------------|------------------------------|
| 1        | 有机黏土,很软            | -2.75      | —                      | 6.65                                                          | 11                              | —                                       | —                                            | 8                | —                | 0.70                         |
|          |                    | -11.75     | —                      | 5.96                                                          | 15                              | —                                       | —                                            | 15               | —                | 0.70                         |
| 2        | 黏土质砂,松散            | -18.55     | 11                     | 8.41                                                          | —                               | 20                                      | 15                                           | 24               | —                | 0.50                         |
| 3        | 高液限黏土,硬至很硬         | -20.25     | —                      | 9.06                                                          | 80                              | —                                       | —                                            | 53               | —                | 0.75                         |
|          |                    | -25.75     | —                      | 9.51                                                          | 100                             | —                                       | —                                            | 68               | —                | 0.75                         |
| 4-1      | 黏土质砂,中密<br>粉土质砂,中密 | -29.55     | 52                     | 9.03                                                          | —                               | 31                                      | 26                                           | 85               | 5 000            | 0.60                         |
|          |                    | -33.75     | 59                     | 10.27                                                         | —                               | 33                                      | 28                                           | 90               | 7 000            | 0.60                         |
| 5-2      | 低液限黏土,很硬           | -35.85     | —                      | 9.88                                                          | 110                             | —                                       | —                                            | 86               | 990              | 0.75                         |
| 5-3      | 高液限黏土,坚硬           | -38.25     | —                      | 10.04                                                         | 130                             | —                                       | —                                            | 100              | 1 170            | 0.80                         |
|          | 砂质低液限黏土,坚硬         | -43.25     | —                      | 11.35                                                         | 125                             | —                                       | —                                            | 104              | 1 125            | 0.80                         |
|          | 低液限黏土,很硬           | -45.75     | —                      | 9.89                                                          | 105                             | —                                       | —                                            | 101              | 945              | 0.75                         |
| 6-1      | 黏土质砂,中密            | -50.75     | 50                     | 10.08                                                         | —                               | 31                                      | 26                                           | 84               | 6 000            | 0.65                         |
| 7-1      | 含砂低液限黏土,硬至很硬       | -52.75     | —                      | 10.02                                                         | 80                              | —                                       | —                                            | 80               | 720              | 0.75                         |
| 7d       | 粉土质砂,很密实           | -55.95     | 86                     | 10.57                                                         | —                               | 38                                      | 33                                           | 107              | 12 000           | 0.70                         |
| 7-1      | 低液限黏土,很硬           | -57.75     | —                      | 9.16                                                          | 115                             | —                                       | —                                            | 115              | 1 035            | 0.75                         |
|          |                    | -61.75     | —                      | 9.33                                                          | 120                             | —                                       | —                                            | 120              | 1 080            | 0.75                         |

其中,液压振动锤的型号为 ICE44B(表 2),液  
压冲击锤的型号为 YC40(表 3)。

表 2 ICE44B 液压振动锤的性能参数

| 项目     | 数值    |
|--------|-------|
| 频率/Hz  | 15~30 |
| 激振力/kN | 1 833 |
| 拔桩力/kN | 712   |
| 质量/kg  | 5 647 |
| 长度/mm  | 2 146 |
| 宽度/mm  | 2 464 |
| 高度/mm  | 533   |

表 3 YC40 液压冲击锤的性能参数

| 项目                                         | 数值    |
|--------------------------------------------|-------|
| 最大打击能量/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 680   |
| 最大行程时的打击频率/(次 $\cdot \text{min}^{-1}$ )    | 23    |
| 锤重/t                                       | 40    |
| 最大下落高度/m                                   | 1.70  |
| 工作压力/bar                                   | 250   |
| 长度/mm                                      | 1 860 |
| 宽度/mm                                      | 8 495 |
| 高度/mm                                      | 1 674 |

2 导向装置开发

2.1 结构设计

为满足斜桩吊打工艺的实施需求,设计辅助打  
桩的导向装置,主要包括定位桩、定位架和调向限  
位架,各部件按设计图纸在工厂预制,现场采用吊  
机驳船进行安拆,整个辅助导向装置安装定位后可  
同时满足 1 个风机基础共 6 根钢管桩的施工需求。  
导向装置上部的三维示意如图 1 所示。

定位桩包括 6 根直径 1 000 mm、壁厚 10 mm  
的钢管桩,入土深度根据单桩承载力需求计算。  
定位架包括上、下 2 层操作平台,主体采用直径  
426 mm、壁厚 7 mm 的钢管制作,总高度为  
15 m,焊接安装在定位桩上。限位架采用直径  
426 mm、壁厚 7 mm 的钢管加工成型,下平台限  
位架分块加工现场拼接安装,上平台限位架因空  
间小设置成可沿支撑架中心转动的单片架,利用  
电动减速机转动限位架移位;为提高沉桩定位的  
精度和效率,在上、下限位架的内侧设置液压千  
斤顶,根据钢管桩定位需求和沉桩过程监测数据  
调整桩的斜度。



图 1 导向装置上部的三维示意

## 2.2 受力验算

### 2.2.1 荷载工况

沉桩施工过程主要包括:①桩自沉至一定深度;②采用振动锤振沉桩至一定深度;③取下振动锤,换用冲击锤准备冲击沉桩;④锤击沉桩至设计高程。

根据该过程,为验算导向装置在沉桩过程中的受力情况,列出荷载工况来模拟沉桩过程的受力变化。①工况 1:桩刚接触土,静力作用下(桩重和振动锤自重)自沉,为保守起见,假定自沉 0 m;②工况 2:桩刚接触土,静力作用下(桩重、振动锤自重和振动锤激振力)沉桩至入土深度为  $X_1$ ;③工况 3:桩入土深度为  $X_1$  ( $X_1$  需试算,如 20 m),静力作用下(桩重和冲击锤自重)自沉,为保守起见,假定自沉增加 0 m;④工况 4:桩入土深度为  $X_1$  ( $X_1$  需试算,如 20 m),动力作用下(桩重、冲击锤跳高  $a$  ( $a$  需试算,如 0.8 m)自重和冲击力)沉桩至入土深度为  $X_2$ ;⑤工况 5:桩入土深度为  $X_2$  ( $X_2$  需试算,如 30 m),动力作用下(桩重、冲击锤跳高  $b$  ( $b$  需试算,如 1.3 m)自重和冲击力)沉桩至桩端设计高程。桩的入土深度可采用 GRLWEAP 软件计算。

### 2.2.2 受力平衡分析

由于较难准确估计入土深度范围的桩周土作用力,本次分析过程不予考虑,这也是一种保守的

处理方式。在工程斜桩沉桩过程中,静力作用包括桩自身重力  $G_{\text{桩}}$ 、冲击锤重力  $G_{\text{锤}}$ 、风荷载  $F_{\text{风}}$ 、上限位架支持力  $N$  和下限位架拉力  $F$ ,动力作用包括桩自身重力  $G_{\text{桩}}$ 、冲击锤重力  $G_{\text{锤}}$ 、风荷载  $F_{\text{风}}$ 、上限位架支持力  $N$ 、下限位架拉力  $F$  和振动锤/冲击锤动力  $F_{\text{冲}}$ 。

按照《TCVN 2737:1995》<sup>[4]</sup> 的附录 A,同时参考《码头结构设计规范》(JTS 167—2018)<sup>[5]</sup>,对荷载进行组合。永久荷载分项系数为 1.1,可变荷载分项系数为 1.4,碰撞冲击力分项系数为 1.4,其中永久荷载包括  $G_{\text{桩}}$  和  $G_{\text{锤}}$ ,可变荷载为  $F_{\text{风}}$ ,碰撞冲击力为  $F_{\text{冲}}$ 。

对工程斜桩进行受力分析(图 2),其中  $H_0$  表示振动锤或冲击锤的锤心到泥面的距离, $H_1$  表示斜桩中心到泥面的距离, $H_2$  表示上限位架到泥面的距离, $H_3$  表示下限位架到泥面的距离, $H_4$  表示定位桩深入泥面的距离, $H_5$  表示限位架到泥面的竖向距离, $H_6$  表示定位架高度, $e$  表示冲击锤动力在桩上的偏心距离, $\theta$  表示斜桩倾斜度( $1/6$ )。

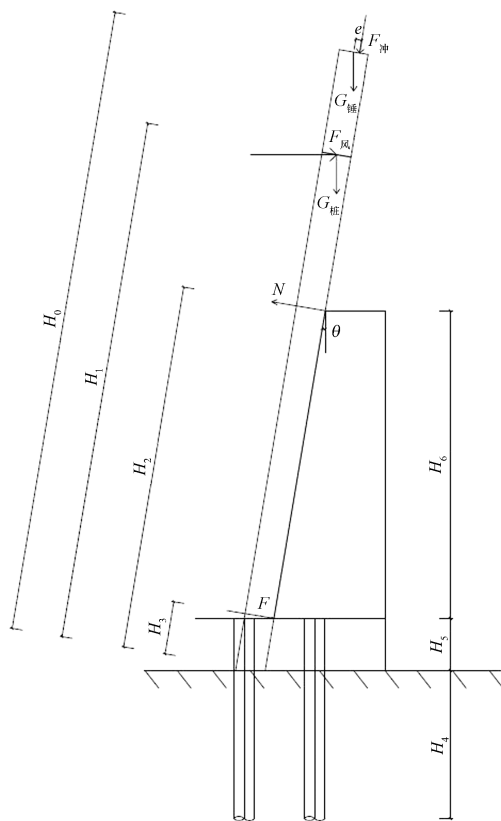


图 2 工程桩的受力分析

以工程桩位为研究对象,以下限位架接触点为原点,列平衡方程:

$$N(H_2 - H_3) - G_{\text{桩}} \sin\theta (H_1 - H_3) - G_{\text{锤}} \sin\theta (H_0 - H_3) - F_{\text{风}} \cos\theta (H_1 - H_3) - F_{\text{冲}} e = 0$$

假定工程桩在垂直桩的方向上没有位移,在该方向上列平衡方程:

$$N - G_{\text{桩}} \sin\theta - G_{\text{锤}} \sin\theta - F_{\text{风}} \cos\theta - F = 0$$

可推导出公式:

$$N = \frac{G_{\text{桩}} \sin\theta (H_1 - H_3) + G_{\text{锤}} \sin\theta (H_0 - H_3) + F_{\text{风}} \cos\theta (H_1 - H_3) + F_{\text{冲}} e}{H_2 - H_3}$$

$$F = N - G_{\text{桩}} \sin\theta - G_{\text{锤}} \sin\theta - F_{\text{风}} \cos\theta$$

考虑荷载分项系数后的公式为:

$$N = \frac{1.1G_{\text{桩}} \sin\theta (H_1 - H_3) + 1.1G_{\text{锤}} \sin\theta (H_0 - H_3) + 1.4F_{\text{风}} \cos\theta (H_1 - H_3) + 1.4F_{\text{冲}} e}{H_2 - H_3}$$

$$F = N - 1.1G_{\text{桩}} \sin\theta - 1.1G_{\text{锤}} \sin\theta - 1.4F_{\text{风}} \cos\theta$$

### 2.2.3 数值分析

依据导向装置的设计图纸,建立导向装置的有限元模型立面图(图3)。

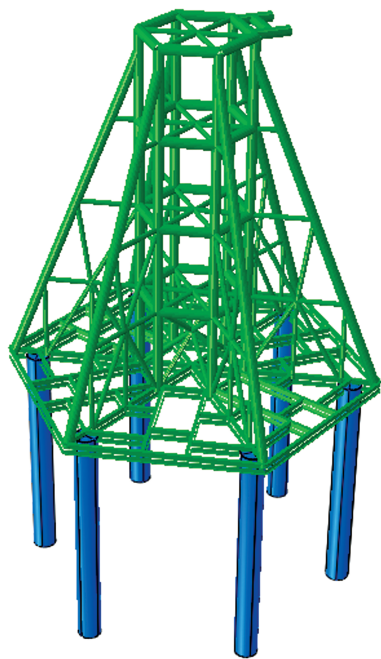


图3 导向装置的有限元模型立面

根据《码头结构设计规范》(JTS 167—2018),承受水平力或力矩作用的单桩,其入土深度宜满足弹性长桩条件,本次分析模型中的定位桩长按弹性长桩考虑。根据《码头结构设计规范》(JTS 167—2018)附录B,计算桩的相对刚度系数  $T=2.94$  m,本次计算预计定位支撑桩入土深度约 25 m 即大于  $4T$ ,符合按弹性长桩设计的要求。

根据《码头结构设计规范》(JTS 167—2018),承受水平力或力矩作用的弹性长桩,其桩身内力和变形的确定应符合:①单桩在水平力作用下的桩身内力和变形可采用 M 法计算,也可采用 NL 法或 P-Y 曲线法计算;②重要工程采用的计算参数应根据水平静载荷试验确定;③考虑波浪等荷载的往复作用时,土抗力的有关参数宜通过试验等方法确定(本次打桩对定位桩而言尚存在往复荷载作用,且难以评估对土抗力参数的影响,因此须加强现场监控);④有经验时也可采用假想嵌固点法计算,假想嵌固点位置的计算公式为  $t=\eta T$ (式中: $t$  表示受弯嵌固点距泥面的深度; $\eta$  表示系数,取值为 1.8~2.2,当桩顶铰接或桩的自由长度较大时取较小值,当桩顶无转动或桩的自由长度较小时取较大值,本工程定位桩的自由长度较小, $\eta$  取 2.2;计算得  $t \approx 7.0$  m);⑤当采用假想嵌固点法计算排架时,桩在泥面以下的内力和变形可根据计算排架时求得的桩顶力矩和水平力,按附录 B 中的 M 法计算。

综上所述,假想嵌固点距泥面深度为 7.0 m,泥面标高为 -2.75 m,桩顶标高为 1.5 m,模型中桩的长度为 11.25 m。根据力的相互作用原理,将计算得出的  $N$  和  $F$  反向作用于导向装置,同时计算导向装置所受风荷载,当施加于有限元模型时,风荷载按照荷载组合可变荷载分项系数为 1.4 对导向装置进行放大作用。

### 2.2.4 导向装置结果

通过迭代计算,最终在  $X_1=20$  m、 $X_2=30$  m、 $a=0.8$  m 和  $b=1.3$  m 的情况下,导向装置可满足强度和变形要求。

#### 2.2.4.1 导向装置强度和变形验算

提取数值计算导向装置各部位的最大应力(表4),导向装置各部位在各工况作用下均满足强度要求。

提取数值计算导向装置各部位的位移(表5),导向装置构件挠度和层间位移角等项目在各工况作用下均满足要求。水平位移存在一定偏差,建议在打桩过程中测量桩的位移时,利用液压千斤顶根据测量数据调整桩的斜度。



表 4 导向装置应力结果

| 部位       | 应力限值/MPa | 最大应力计算值/MPa |       |       |       |       |
|----------|----------|-------------|-------|-------|-------|-------|
|          |          | 工况 1        | 工况 2  | 工况 3  | 工况 4  | 工况 5  |
| 定位架主体    | 345      | 109.3       | 111.4 | 150.3 | 129.1 | 145.1 |
| 定位架支承钢板  | 345      | 131.4       | 135.5 | 139.1 | 160.1 | 132.7 |
| 定位架工字钢底板 | 235      | 109.3       | 111.4 | 150.3 | 126.4 | 145.1 |
| 定位桩      | 235      | 45.4        | 47.2  | 45.7  | 55.4  | 43.7  |

表 5 导向装置变形结果

| 验算项目                  | 限值                   | 验算值   |       |       |       |       |
|-----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       |                      | 工况 1  | 工况 2  | 工况 3  | 工况 4  | 工况 5  |
| 定位架构件挠度/mm            | $L/250=1\ 750/250=7$ | 3.18  | 3.28  | 3.48  | 3.82  | 3.36  |
| 定位架层间位移角/mm           | 18.75                | 3.87  | 5.73  | 6.04  | 6.18  | 5.69  |
| 定位架底层和顶层的最大水平位移差/mm   | —                    | 15.46 | 16.73 | 16.04 | 19.94 | 14.85 |
| 定位架底层和顶层最大位移差/2 500/% | —                    | 0.62  | 0.67  | 0.64  | 0.80  | 0.59  |
| 定位桩顶水平位移/mm           | —                    | 31.75 | 32.17 | 34.30 | 36.47 | 33.22 |

注:①由于在打桩过程中强烈碰撞的发生时间短,层间位移角限值根据《建筑抗震规范》(GB 50011—2010)<sup>[6]</sup>取值为  $H/200=3\ 750/200=18.75(\text{mm})$ ;②斜桩角度为  $1/6\text{ rad}$ ,定位架高度为 15 m,该段水平距离即 2 500 mm,根据底层和顶层的水平位移差,可计算最大位移差/2 500助于分析。

2.2.4.2 支撑架构件长细比验算

根据《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)<sup>[7]</sup>,对支撑架上 2 种钢材型号构件进行长细比验算,计算长度按最大值取值,经验算符合规范要求(表 6)。

表 6 支撑架构件长细比

| 截面形式/<br>mm           | 回转半径           | 计算长度           | 长度因子<br>( $\mu$ ) | 长细比<br>( $\lambda$ ) | 容许<br>长细比 |
|-----------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------------|-----------|
|                       | ( $i$ )/<br>mm | ( $L$ )/<br>mm |                   |                      |           |
| $\varnothing=220,t=6$ | 75.69          | 4 276          | 0.5               | 28.25                | 150       |
| $\varnothing=426,t=7$ | 148.16         | 4 022          | 0.5               | 13.57                | 150       |

注:长细比  $\lambda=uL/i$ 。

2.2.4.3 定位桩轴向承载力验算

通过有限元分析可知,工况 4 为最不利工况,基桩最大上拔荷载和最大受压荷载分别为−891.70 kN 和 965.26 kN。

根据《码头结构设计规范》(JTS 167—2018),凡允许不作静载荷试桩的工程,打入桩的单桩抗拔承载力设计值的计算公式为:

$$T_d = \frac{1}{\gamma_R}(U \sum \xi_i q_{fi} l_i + G \cos \alpha)$$

式中:  $\gamma_R$  表示单桩抗拔承载力分项系数,可取 1.45~1.55,鉴于为临时桩基,取 1.45;  $U$  表示桩身截面周长;  $\xi_i$  表示折减系数,取值于勘察资料;  $q_{fi}$  表示桩周第  $i$  层土的单位面积极限侧阻力标准值,取值于勘察资料;  $l_i$  表示桩身穿过第  $i$  层土的长度;  $G$  表示桩重力,水下部分按浮重力计;  $\alpha$  表示桩轴线与垂线的夹角。

单桩抗压承载力设计值的计算公式为:

$$Q_d = \frac{1}{\gamma_R}(U \sum q_{fi} l_i + \eta q_R A)$$

式中:  $\eta q_R A$  表示桩端承载力标准值,为安全起见,本次计算不予考虑。

根据本项目吊打施工的机位,现有勘察资料只有钻孔 ZK10 可供参考,定位柱为壁厚 10 mm、直径 1 000 mm 的钢管桩,桩浮重 60.0 kN。根据勘察报告,当单桩入土深度为 24 m 时,  $T_d=933.7\text{ kN}$ ,大于打桩过程中的最大上拔荷载(891.70 kN);当单桩入土深度为 24 m 时,  $Q_d=1\ 244.3\text{ kN}$ ,大于打桩过程中的最大桩身压力(965.26 kN)。

### 2.2.5 工程桩结果

同上所述,首先在  $X_1=20$  m、 $X_2=30$  m、 $a=0.8$  m 和  $b=1.3$  m 的情况下,对工程桩沉桩过程中受力情况下的强度和变形进行验算,结果显示无法满足。在反复试算后,按  $X_1=20$  m、 $X_2=48$  m、 $a=0.4$  m 和  $b=1.4$  m 进行验算。

在 5 种工况下对工程桩建立有限元模型。在有限元模型中,工程桩和定位架的接触点设置为弹簧支撑。由于在打桩过程中,工程桩的受力平衡为瞬时状态,假设工程桩和土的接触也为铰支座。提取数值计算工程桩的最大应力和最大挠度(表 7)。

表 7 5 种工况下工程桩的应力和变形验算

| 项目           | 限值  | 工况 1  | 工况 2  | 工况 3    | 工况 4    | 工况 5  |
|--------------|-----|-------|-------|---------|---------|-------|
| 最大应力/<br>MPa | 345 | 129.6 | 158.1 | 223.9   | 337.9   | 335.2 |
| 最大挠度/<br>mm  | —   | 987.0 | 951.5 | 1 558.0 | 1 473.0 | 448.9 |

由表 7 可以看出:尽管满足强度要求,但在个别工况下工程桩的受力存在应力集中的情况即应力值偏大,建议尽量做大工程桩与导向架的接触滚轮面积,并采取多排的方式,在打桩过程中对工程桩施加辅助外力,减小工程桩受到的向下的合力;在各工况下工程桩的桩顶挠度偏大,建议控制好桩的位移,防止入土的工程桩偏位,可在打桩过程中对工程桩施加辅助外力,减小工程桩受到的向下的合力,以减少工程桩的位移。

## 3 沉桩施工

### 3.1 安全控制

在同时满足导向装置和工程桩受力和变形要求的情况下,为保证沉桩过程的安全,主要控制各工况下的桩入土深度和锤击跳高(锤击能量),制定控制参数。①工况 1:桩在自重和振动锤自重作用下下沉,控制参数为吊绳带力;②工况 2:开启振动锤沉桩,控制参数为吊绳带力、桩入土深度不低于  $X_1=20$  m;③工况 3:取下振动锤并换上冲击锤,控制参数为吊绳带力;④工况 4:开启冲击锤沉桩,控制参数为吊绳带力、锤击跳高  $a=0.4$  m、桩入土深

度不低于  $X_2=48$  m;⑤工况 5:冲击锤继续沉桩,控制参数为吊绳带力、锤击跳高  $b=1.4$  m、桩入土深度至设计高程。

### 3.2 施工质量

根据设计要求,钢管桩沉桩后,桩顶平面位置偏差小于  $\pm 150$  mm,桩身倾斜度偏差不超过 1%,高程的允许偏差为 0~50 mm,施工时应避免损坏钢管桩外侧聚氨酯玻璃鳞片漆防腐涂层。

为保证施工质量,主要采取 4 个方面的措施<sup>[8]</sup>。①通过全站仪控制导向装置的安装精度,其中定位柱顶水平位置的允许偏差为  $\pm 150$  mm,定位柱顶高程的允许偏差为  $\pm 20$  mm,定位架水平位置的允许偏差为  $\pm 50$  mm。②控制工程桩沉桩平面位置和倾斜度:在定位架安装完毕后,对定位架上、下层平台每个桩位的桩心坐标进行放样,并计算设计桩外边缘与限位孔 4 个边的距离;在钢管桩进入桩架后,通过桩架上、下限位架导轮微调装置,调整桩边缘至限位孔边缘距离与计算值一致;考虑到定位架移除后倾斜钢管桩会在自重作用下产生一定下挠,对上定位架内侧导轮比设计位置预留一定偏位,根据现场施工验证,预留偏位按向外侧偏移 150 mm 可满足平面位置和倾斜度的要求。③开展定位架和工程桩偏位监测:选择定位架底座六角位置中的 3 个点作为基准点,监测基准点在沉桩过程中是否发生沉降和偏位,当发生较大位移时应立即停止作业并查明原因;工程桩入土深度每增加 5 m,复核其位置和倾斜度偏差,如果偏差超出规范允许要求应及时停止沉桩并纠偏。④工程桩沉桩按照对称顺序进行间隔跳打,以减少定位架在沉桩过程中产生累积偏差。

## 4 结语

采用辅助导向装置的吊打工艺可有效解决打桩船无法在潮间带开展沉桩作业的问题,本研究的导向装置研发过程可为类似项目提供借鉴。沉桩过程中液压振动锤和液压冲击锤的沉桩施工动荷载可通过 GRLWEAP 软件计算沉桩可打性得出,是简单可行的方法;通过分析得出锤击跳高和桩入土深度等沉桩控制参数,对保障施工安全起到极为有利的作用;当桩土深度较浅时,应严格控制沉桩

施工偏差并及时纠偏,避免沉桩偏差过大造成导向装置与工程桩之间产生额外的憋桩力;在斜桩吊打过程初期始终保持钩头具有一定的带力,能够有效避免溜桩和降低桩身挠度,对保障施工精度和安全颇为重要。

参考文献

[1] 刘润,李宝仁,练继建,等.海上风电单桩复合筒型基础桩筒共同承载机制研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(5):429—436.

[2] 文峰.我国海上风电现状及分析[J].新能源进展,2016,4(2):152—158.

[3] 朱斌,姜英伟,陈仁朋,等.海上风电机组群桩基础关键问题的初步研究[J].岩土工程学报,2011,33(S1):91—96.

[4] 越南科学技术院.越南建筑荷载规范:TCVN 2737—1995[S].河内:越南建设出版社,1999.

[5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.码头结构设计规范:JTS 167—2018[S].北京:人民交通出版社,2018.

[6] 住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[7] 建设部.钢结构设计规范:GB 50017—2003[S].北京:中国计划出版社,2003.

[8] 张立辉.潮间带倾斜钢管桩吊打沉桩施工技术及其质量控制[J].工程技术研究,2021(5):68—69.