

海上风电深水螺旋桩导管架基础承载分析

张浦阳, 陈 志

(天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 文章拟设计一种海上风电深水螺旋桩导管架基础结构, 并利用有限元分析模拟风、浪、流、风电机组等荷载以及淤泥、粉砂土质条件下基础结构的承载能力和稳定性, 同时为螺旋桩结构的桩土相互作用的有限元模型设计提供一种可行的参考。文章通过横向对比的方式, 设计无螺旋叶片结构的普通桩对照基础模型, 探究单层螺旋绞龙叶片对基础结构承载能力和稳定性等方面的影响。结果表明, 增加单层螺旋绞龙叶片结构可以显著提升海上风电桩基础结构的承载能力和稳定性, 而且对基础结构约束状态下的自振频率影响较小, 相关数据可为实际工程中螺旋桩基础的设计提供建议和参考。

关键词: 海上风电; 螺旋桩基础; 导管架基础; 数值模拟; 模态分析

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)02-0200-08

0 引言

随着风电开发力度与规模的扩大, 海上风电机组容量大型化、深远海化是下一步的发展趋势^[1]。对于水深 40 m 以上的深水海域, 通常面临着较大的风、浪、流荷载, 安装施工条件也极为不利, 普通的单一结构基础很难达到深水环境的设计要求。而选取导管架与桩基础结合的方案, 两种基础对于深水环境均具有一定的适应性, 两种结构在水下、土下环境均有其各自的优势。本文设计的上部与水面接触的基础部分选取导管架结构, 导管架结构强度高、重量轻、波浪力作用小, 能够适应较深的水深条件, 刚度较大的导管架结构作为基础子结构在受力传递上具有重要意义, 特别是对于承受大弯矩荷载的大功率发电机组具有重要作用。下部嵌固入土体部分选取三桩布局的螺旋桩结构, 螺旋桩由钢管桩和外围的单层螺旋绞龙叶片组成, 螺旋桩结构能适应深度较大的水深条件, 相较于普通的桩基础, 螺旋绞龙叶片具有更好的轴向承载性能^[2]。

螺旋桩基础是在传统桩基础的结构之上, 在桩柱的外侧焊接数圈螺旋状的绞龙叶片。螺旋桩基础承载特性的研究一直备受关注^[3], 得益于螺旋桩基础的结构特点, 其施工占地面积小、噪音小、施工速度快, 多用于陆上一些临时基础结构的搭建。目前, 在远距离输电、光伏发电等领域应用

较广^[4], 在世界范围内, 还少有将螺旋桩基础应用到海上风电领域的工程实例, 国内相关的研究也比较欠缺。文献[5]对砂土中竖向和横向荷载组合作用下的海上螺旋桩基础进行了三维有限元分析研究。文献[6]使用三维离散单元方法研究了海上螺旋桩基础的几何形状、轴径和螺距对基础承载性能的影响, 并优化了螺旋桩的几何形状, 降低了垂直安装力(高达 61%)和安装扭矩(高达 39%)的要求。文献[7]比较了单螺旋和双螺旋的设计, 指出现有的轴向承载力设计方法在大型螺旋桩上表现不佳, 高估了抗压和抗拉承载力, 并根据离心机测试结果提出了安装和轴向容量估算的方法。

本文基于 ABAQUS 有限元分析软件, 模拟海上风电螺旋桩导管架基础在不同环境和运行工况下的结构-土体相互作用, 探究螺旋桩的单层螺旋绞龙叶片对基础结构承载能力和稳定性的影响。

1 有限元模型设计

ABAQUS 通用有限元分析软件在求解复杂非线性问题方面具有显著优势, 目前已广泛应用于岩土工程相关领域, 该分析软件能够很好地模拟岩土与基础结构相互作用的力学性能。

1.1 环境参数

基础拟定布置在福建省福州市某深水海域, 水深条件为 45 m, 同时考虑极端水位、潮流流速、极端波高、极端风速、海洋生物附着等要素。土质

收稿日期: 2023-02-23。

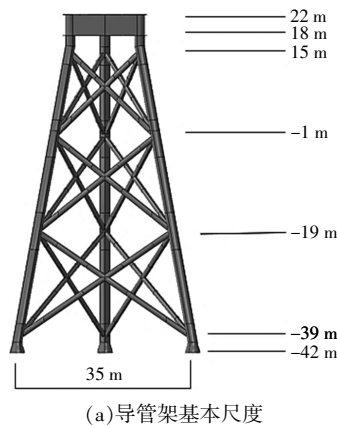
基金项目: 国家自然科学基金(52171274)。

作者简介: 张浦阳(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为海上风电结构。E-mail: Zpy_td@163.com

条件主要以淤泥、粉砂和砂土为主,相应的土质参数如表 1 所示。

表 1 土质参数
Table 1 Soil parameters

深度 m	土质	天然容重 kN/m ³	内摩擦角 (°)	不排水 剪强度 kPa	压缩模量 MPa
6.7	淤泥	14.6	0	7.4	2
12	粉砂	16.3	23	6.2	10
20	粉质粘土	17.5	12	20.0	8
32	砂土	18.0	26	4.7	18
51	砂土	20.0	29	5.0	19
70	砂土	20.0	32	5.2	22



1.2 结构设计

依据 GB712-2011^[8]选用 Q355 热轧钢来组建该螺旋桩和导管架结构。工程中常用的导管架有三腿和四腿结构,此基础选定三腿的导管架结构,并采用 X 型斜撑连接方案,考虑 50 a 重现期潮位和波浪的影响^[9],基础平台顶高程即导管架法兰结构底高程取 18 m,设计下部螺旋桩结构桩顶露出泥面 3 m,结合海域水深 45 m,得到整体导管架的高度为 60 m。同时导管架中所有连接节点均须要考虑强度问题并做加厚处理,避免节点处产生应力集中现象造成连接节点失效。导管架结构设计如图 1 所示,主杆、撑杆分段设计方案见表 2。

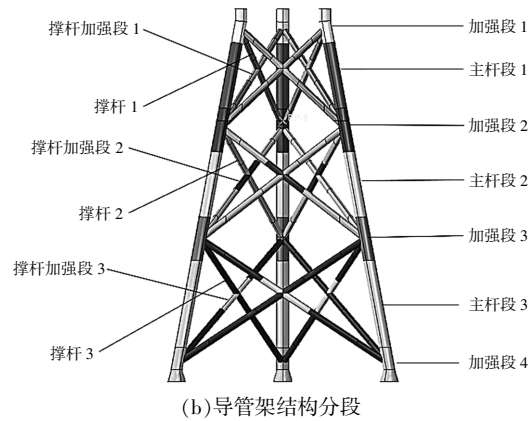


图 1 导管架模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of jacket model

表 2 主杆、撑杆分段设计方案

Table 2 The segmented design scheme of main rod and support rod

杆段	直径/m	厚度/mm	总长度/m
主杆段 1	2.0	55	10.77
主杆段 2	2.0	60	10.77
主杆段 3	2.0	65	14.36
加强段 1	2.0	70	5.48
加强段 2	2.0	60	7.18
加强段 3	2.0	65	7.18
加强段 4	2.0	70	5.65
撑杆 1	1.0	35	20.41
撑杆 2	1.0	40	26.92
撑杆 3	1.0	45	34.11
撑杆加强段 1	1.0	45	2.51
撑杆加强段 2	1.0	50	3.30
撑杆加强段 3	1.0	55	4.18

下部螺旋桩匹配上部导管架也采用 3 桩布局,桩距取 35 m,桩的高度设计为 53 m,直径为 3 m,厚度为 50 mm。在桩的下端布置绕壁的单层螺

旋绞龙叶片,叶片外径为 3 m,单层绞龙叶片高为 2 m,厚为 60 mm。螺旋桩模型设计如图 2 所示。

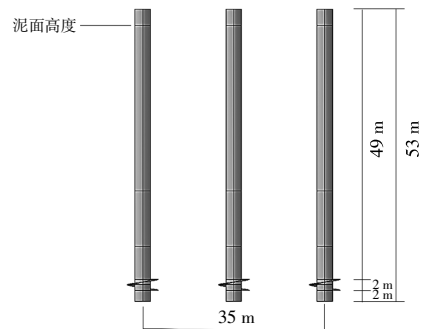


图 2 螺旋桩模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of screw pile model

考虑到常规的打桩技术可能对螺旋绞龙叶片造成破坏,所以有关大型螺旋桩的施工方法还有待进一步地研究。

1.3 有限元模型

用于有限元计算的模型由螺旋桩导管架基础与泥面以下土体组成,其中基础结构又分为最上

部用于连接风机与导管架的法兰承台、导管架和下部的螺旋桩 3 个部分。土体部分相对复杂,整体取 100 m×100 m×100 m 的正方体,可以降低边界

效应对基础和地基受力情况的影响^[9],再根据不同深度土质参数分层划分土层,土体遵循 Mohr-Coulomb 破坏准则。整体有限元模型设计见图 3。

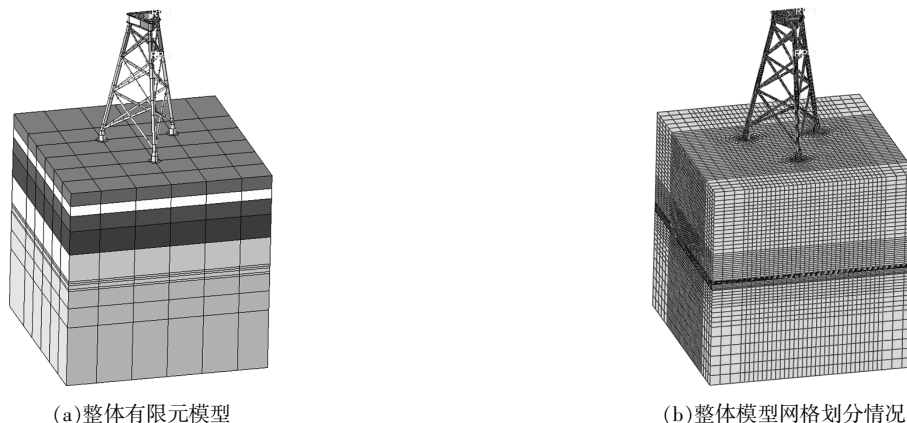


图 3 整体模型示意图

Fig.3 Schematic of the overall model

1.4 荷载组合

基础不考虑冰荷载和地震的影响,结合设计规范主要考虑风、浪、流荷载以及上部 10 MW 风电机组的荷载作用^[9]。本文选取整体基础结构在承载能力极限状态和正常使用极限状态下的运行情况进行验证,同时分别计算以风电机组荷载为主导和以风、浪、流环境荷载为主导的运行工况。考虑到本基础结构的 3 桩布局设计,须要考虑到不同荷载施加方向的差异,利用海工软件 SACS 模拟结构在各向风、浪、流荷载、海洋生物附着、上部风电机组荷载等情况下的最不利荷载组合。计算结果分别如表 3,4 所示。承载能力极限状态和正

常使用极限状态下最危险工况均是以风、浪、流荷载为主导,由风、浪、流荷载 JG05(极端高水位,加载角度 60°)和风电机组荷载 FJ05(加载角度 60°)组成的荷载组合。

1.5 桩土相互作用网格划分

网格划分方面,对于复杂模型,网格划分忽略拖慢计算速度,甚至造成无法收敛,导致无法计算的情况。螺旋桩基础结构的桩土相互作用情况相对复杂,土体模型分为 3 部分:桩内土体、包裹螺旋绞龙叶片的土体和外部土体。桩内土体的网格划分较为简单,与螺旋桩的网格布局大致相同。包裹绞龙叶片土体的网格划分难点在于与螺旋绞龙叶片的网格节点要保持对齐,此外还须要与外部土体以及螺旋桩的管桩接触部分的网格对齐,螺旋叶片处桩土网格划分如图 4 所示。对于该基础结构的模型尺度,单层螺旋绞龙叶片高度方向设置 8 层网格的密度,可以在实现计算收敛的同时保证 C3D8R 网格单元的规则性。

表 3 承载能力极限状态下最危险工况的荷载组合

Table 3 Load combination of the most dangerous conditions under the ultimate bearing capacity state

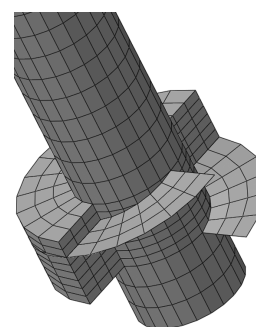
工况	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN	$M_x/kN \cdot m$	$M_y/kN \cdot m$	$M_z/kN \cdot m$
JG05	4 048	7 014	267.5	235 305	135 776	15.4
FJ05	940	1 628	9 952	79 000	136 832	11 228
组合	7 097	12 296	11 892	258 183	359 668	12 991

注: F_x 为沿 X 轴方向的外力荷载; F_y 为沿 Y 轴方向的外力荷载; F_z 为沿 Z 轴方向的外力荷载; M_x 为绕 X 轴方向的弯矩荷载; M_y 为绕 Y 轴方向的弯矩荷载; M_z 为绕 Z 轴方向的弯矩荷载。

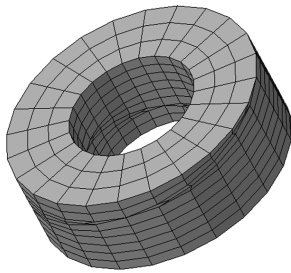
表 4 正常使用极限状态下最危险工况的荷载组合

Table 4 Load combination of the most dangerous operating conditions under the limit state of normal service

工况	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN	$M_x/kN \cdot m$	$M_y/kN \cdot m$	$M_z/kN \cdot m$
JG05	4 048	7 014	267.5	235 305	135 776	15.4
FJ05	940	1 628	9 952	79 000	136 832	11 228
组合	4 706	8 153	7 234	180 005	231 558	7 875



(a)螺旋绞龙叶片



(b)包裹蛟龙叶片的土体

图4 螺旋蛟龙叶片及周围土体网格划分示意图

Fig.4 Schematic diagram of the grid division of the blade and surrounding soil

由于土体模型的尺度相对较大,而在桩土相互作用的区域须要布置较为精细的网格单元以保证计算结果的准确性,所以须要对土体有限元模型整体的网格布置进行局部的加密以及过渡设计。图5为有限元模型设计所尝试的桩土间网格过渡布局方法。

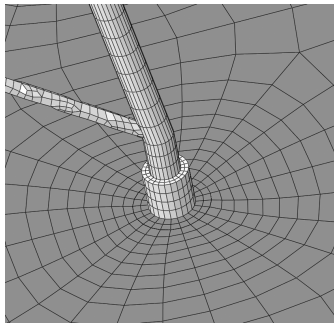


图5 桩土间过渡网格的布局示意图

Fig.5 The layout of transition grid between piles and soils

桩土过渡区域的布种方式均采用渐变布种,相比于非渐变布种方式,渐变布种方式在三维模型下能大量减少网格单元数量,在保证计算精度的同时提升有限元分析的运算效率。

对桩土相互作用的整体有限元模型进行收敛性分析,结果如图6所示。

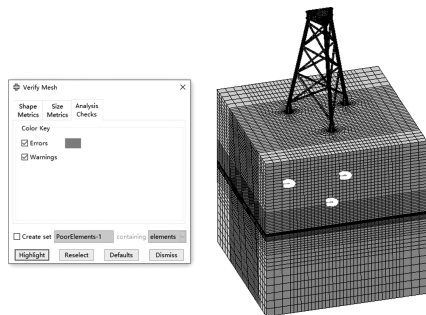


图6 有限元模型网格质量检查结果

Fig.6 The result of checking the mesh quality of finite element model

网格质量检查的结果:出现 Analysis errors (分析错误)的单元数量为 0(0%),出现 Analysis warnings(分析警告)的单元数量为 72 (0.172 7%),在许可范围内,且网格划分情况较为合理。

2 计算结果与分析

2.1 结构承载能力与变形分析

根据设计规范确定基础结构应力和倾斜度的限值^[9],同时考虑该基础结构 3 桩布局的特点,考虑单桩抗压、单桩抗拔两种危险加载方式,分别校核承载能力极限状态下导管架结构和螺旋桩基础的强度以及正常使用极限状态下整体结构的位移变形情况,汇总结果如表 5 所示。

表5 校核结果汇总

Table 5 Summary of verification results

校核内容	极限状态	受力情况	计算值	规范值
导管架强度	承载能力	单桩抗压	283.6	301.8
		MPa	极限	单桩抗拔
结构变形	正常使用	单桩抗压	0.247	0.25
		基础顶	单桩抗拔	0.159
	极限	单桩抗压	0.493	0.50
		泥面处	单桩抗拔	0.455
螺旋桩强度	承载能力	单桩抗压	292.4	301.8
		MPa	极限	单桩抗拔

由表 5 可知:相较于单桩抗拔情况,最危险的单桩抗压情况的基础结构的应力更大,其中螺旋桩结构的最大应力相差 76%;相较于单桩抗压情况,在单桩抗拔情况下,整个基础结构的应力分布更加均匀合理。因此,在实际工程中,应当尽量避免最危险的单桩抗压情况的出现,基础结构安装前须要结合所属海域的环境条件,布置成较为安全的单桩抗拔情况,以此来优化正常使用状态和极限承载状态下基础结构的应力分布和位移变形分布,提高风电机组运行的稳定性。

2.2 结构模态分析

在正常运行状态下,海上风电机组主要的共振频率为风机叶片转动频率的 1 倍和 3 倍,即风机的 1P 和 3P 频率^[11],同时,考虑所处海域长浪向波浪的作用频率,为了避免风机基础结构共振现象的发生,结构自振频率和激励频率的差值与激励频率的比值应大于 0.1^[12]。根据风机厂家提供的 10 MW 风电机组的运行参数,正常运行状态下风机叶片转频的 1 倍和 3 倍分别为 0.20 Hz 和 0.60 Hz,场址海域长浪向的波浪作用频率为

0.37 Hz。

考虑到桩土相互作用下的结构约束模态和自由模态无论在振型还是在固有频率上均存在较大差异^[13],该基础结构的约束模态因为考虑到了螺旋桩桩内、外土体对于基础结构的约束作用,对实际工程的参考意义更大。

图 7 为根据风电机组设计参数增加风机塔筒的螺旋桩导管架基础结构。

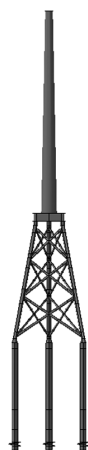
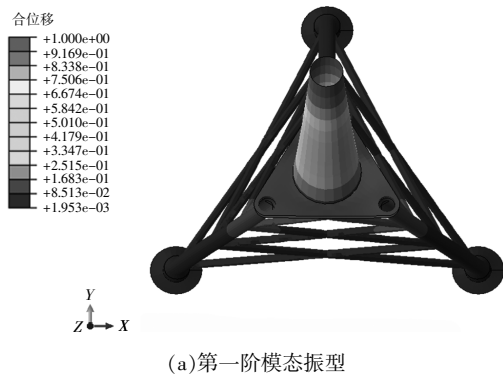


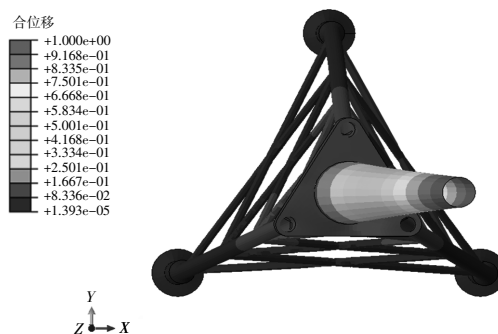
图 7 增加风机塔筒的螺旋桩导管架基础
Fig.7 Screw pile jacket foundation with fan tower

风电机组上部还应包括风轮、机舱等重力结构,但机组结构重力对支撑结构固有频率的影响很小^[14],因此在工程计算中可以不考虑机组重力对支撑结构固有频率的影响。对基础结构进行约束模态分析,可得到基础结构前三阶模态振型(图 8)。

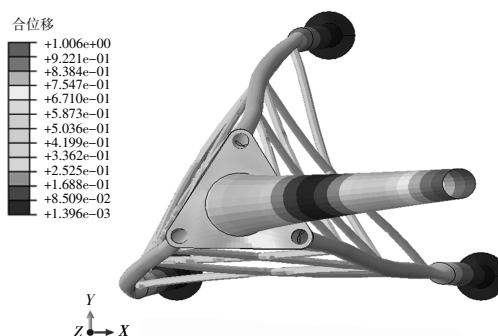
由图 8 可知,基础结构的前三阶自振频率分别为 0.430 17, 0.430 27 Hz 和 1.372 7 Hz。其中第一阶和第二阶自振频率处于风机 1P 和 3P 频率之间,与长浪向波浪作用频率的相对差值大于 10%,结构的第三阶自振频率远大于风机的 3P 频率,因此该基础结构设计符合振动约束要求。



(a)第一阶模态振型



(b)第二阶模态振型



(c)第三阶模态振型

图 8 基础结构的模态振型

Fig.8 Modal pattern diagram of the infrastructure

3 螺旋桩中螺旋叶片结构的作用

传统陆上螺旋桩基础具有施工效率高、施工震动小、环境影响小、承载能力高等特点,在国内外输电、光伏发电等工程领域中有着广泛的应用^[15]。相比于海上风电基础中常见的圆形钢管桩结构,螺旋桩中的横向螺旋蛟龙叶片对基础结构在轴向承载能力上会有所提升,考虑到基础的 3 桩结构,轴向承载能力的提升主要体现在整体结构竖向位移的减小和受到横向荷载作用时整体结构横向位移和倾斜度的减小。本文设计了一组无螺旋蛟龙叶片圆管桩的对照基础模型,对照结构中控制其他环境条件和加载情况不变,仅去除螺旋桩基础中的单层螺旋蛟龙叶片,模拟单桩抗拔情况下基础结构的受力、变形以及运行稳定性等情况。

3.1 横向位移、倾斜度对比

图 9 为两种基础模型放大 50 倍效果的基础结构位移变形情况。

由图 9 可知:增加单层螺旋蛟龙叶片对于基础结构横向位移以及倾斜变形的控制有显著效果;选取钢管桩泥面高度处的管壁进行位移分析,无蛟龙对照组泥面高度处结构的横向位移为 154.89 mm,而螺旋桩导管架结构在同一高度处的

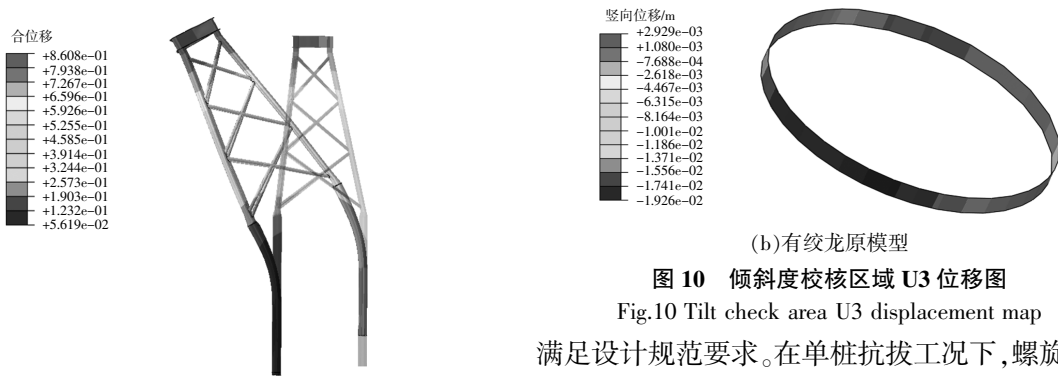


图 10 倾斜度校核区域 U3 位移图

Fig.10 Tilt check area U3 displacement map

满足设计规范要求。在单桩抗拔工况下,螺旋桩导管架基础结构顶部倾斜度为 0.159° ,小于 0.25° 的设计限值。

3.2 竖向抗压、抗拔对比

以单桩抗拔情况为例,受压侧的两个主腿承受较大的压应力,对应桩相应竖向沉降也应该较大。图 11 为两模型 3 桩各部分竖向位移的分布图。

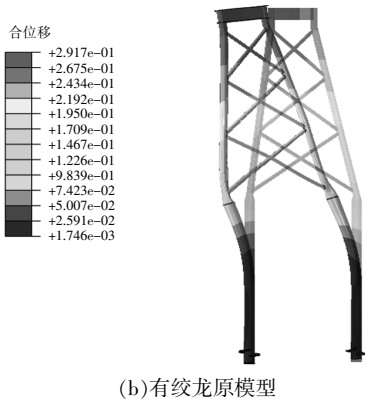


图 9 位移效果(50 倍)云图

Fig.9 Displacement effect(50 times)cloud map

横向位移为 113.66 mm,即无绞龙基础结构泥面处的横向位移约为有绞龙结构的 1.4 倍;再对比基础顶部法兰结构(用于连接风机塔筒和基础)的横向位移,螺旋桩导管架模型为 283.36 mm,无绞龙对照结构对应位置的横向位移为 850.92 mm,是有绞龙螺旋桩导管架结构位移的 3 倍左右。

对基础顶部连接上部风机位置的倾斜度进行对比,输出基础顶部倾斜度校核区域的 U3 位移云图(图 10)。根据设计规范要求^[9],基础顶部位置正常运行下的倾角不能超过 0.50° ,考虑到预留的 0.25° 施工误差,则基础顶部位置倾斜度不能超过 0.25° 。根据图 10(a)计算出对照结构基础顶部倾斜度为 0.684° ,超过了 0.25° 的设计要求,且超出一倍多,即无绞龙结构基础顶部位置倾斜度无法

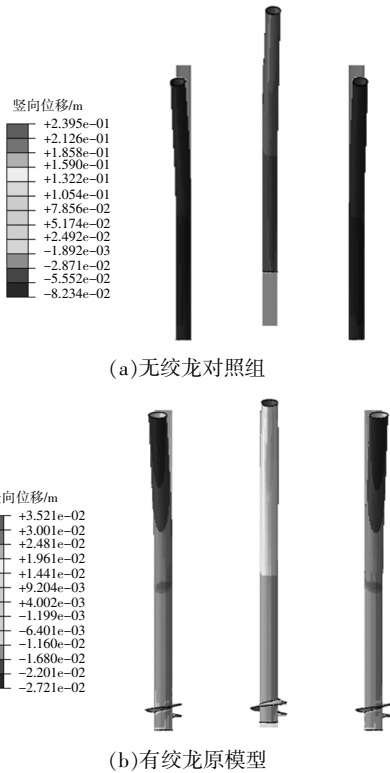
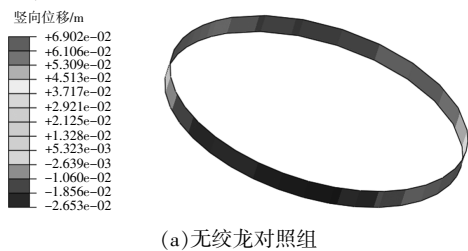


图 11 钢管桩 U3 位移图

Fig.11 U3 displacement diagram of steel pipe pile

由图 11 可知,无绞龙基础结构的最大沉降值为 82.34 mm,最大上拔位移为 239.5 mm,而螺旋桩基础的最大沉降值为 27.21 mm,最大上拔位移为 35.2 mm。增加单层螺旋绞龙叶片后,由于横向绞龙结构对基础竖向位移的约束,基础结构的竖



(a)无绞龙对照组

向沉降得到了很好的控制,也大大提升了桩基础的抗拔性能。

3.3 应力分布情况对比

图 12 为无绞龙对照基础和螺旋桩基础结构的应力分布图。

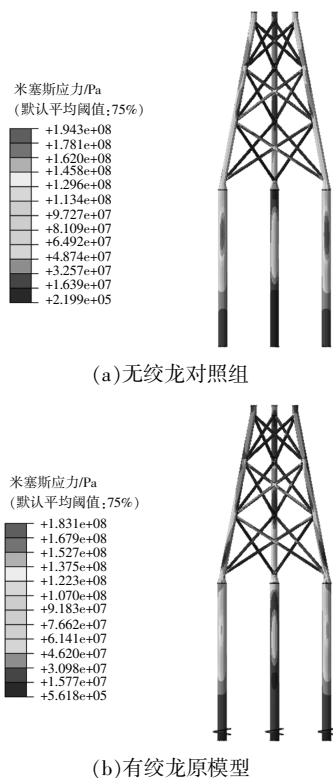


图 12 Mises 应力分布

Fig.12 Mises stress distribution diagram

由图 12 可知:螺旋桩导管架结构的应力分布更加均匀,基础结构的受力情况更加合理;无绞龙对照基础中管桩中上部分出现了较为明显的应力集中现象,容易造成危险,同时大部分钢材的性能得不到充分利用。

3.4 结构频率对比

表 6 为增加风机塔筒结构后的无绞龙对照基

表 6 前五阶约束自振频率对比

Table 6 Comparison of the first five constrained natural vibration frequencies

结构频率	自振频率/Hz		相对差值/%
	圆桩导管架	螺旋桩导管架	
一阶	0.427	0.430	0.70
二阶	0.428	0.430	0.47
三阶	1.361	1.373	0.88
四阶	1.365	1.377	0.88
五阶	2.763	2.748	-0.54

础和螺旋桩导管架基础的前五阶约束自振频率。

由表 6 可知,基础结构的前五阶自振频率相对差值均小于 1%。表明在海上风电桩基础上增设单层螺旋绞龙叶片对于基础结构约束自振频率影响较小。

4 结论

本文通过建立结构-土体相互作用的有限元分析模型,对海上风电深水螺旋桩导管架基础进行了结构设计和计算校核,并探究了单层螺旋绞龙叶片对基础结构承载能力和稳定性的影响,得到以下结论。

①增加单层螺旋绞龙叶片对运行状态下基础结构的横向位移、倾斜度以及竖向沉降的控制均有显著提升,同时大大提高了桩基础的抗拔性能,对海上风电桩基础结构的承载能力和稳定性均有十分显著的提高。

②增加单层螺旋绞龙叶片使海上风电基础结构整体的应力分布情况更加合理,同时对结构约束状态下的自振频率影响较小。

参考文献:

- [1] 姚钢,杨浩猛,周荔丹,等.大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J].电力系统自动化,2021,45(21): 33-47.
- [2] 韩春雨.钢管螺旋桩的承载特性及桩-土相互作用分析[D].保定:华北电力大学,2018.
- [3] 杨晓丽,马宏伟,袁松,等.螺旋桩抗拔承载力及影响因素的研究现状分析[J].山西建筑,2022,48(2):96-98.
- [4] 张焱,黄华,何银涛.光伏电站螺旋桩的应用及计算[J].太阳能,2014(9):18-20,23.
- [5] Al-Baghdadi T A, Brown M J, Knappett J A, et al. Effects of vertical loading on lateral screw pile performance [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2017, 170 (3): 259-272.
- [6] Sharif Y U, Brown M J, Ciantia M O, et al. Assessing single-helix screw pile geometry on offshore installation and axial capacity [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2021, 174 (5): 512-529.
- [7] Davidson C, Brown M J, Cerfontaine B, et al. Physical modelling to demonstrate the feasibility of screw piles for offshore jacket-supported wind energy structures[J].

- Géotechnique, 2022, 72(2): 108–126.
- [8] GB 712–2011, 船舶及海洋工程用结构钢[S].
- [9] NB/T 10105–2018, 海上风电场工程风电机组基础设计规范[S].
- [10] Kim S R, Hung L C, Oh M. Group effect on bearing capacities of tripod bucket foundations in undrained clay[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 79: 1–9.
- [11] 初文婷. 海上工程导管架支撑结构模态分析与参数敏感性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [12] 余洪晨. 海上风电新型桩筒组合基础受力特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [13] 马宏旺, 陈龙珠, 刘桦, 等. 海上风电单桩支撑结构第一自振频率分析研究[J]. *特种结构*, 2014, 31(1): 109–113.
- [14] 陈前. 海上风力发电机组支撑结构环境载荷及响应预报[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [15] 林祥军, 张魁, 赵成昆, 等. 套管螺旋桩抗压承载性能模型试验研究[J]. *江苏建筑*, 2021(6): 95–97, 109.

Bearing capacity analysis of offshore wind power deepwater screw pile jacket foundation

Zhang Puyang, Chen Tan

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper intends to design a deep water spiral pile jacket foundation structure for offshore wind power, and use finite element analysis to simulate the load of wind, wave, current, wind turbine, and the bearing capacity and stability of the foundation structure under the conditions of silt and silty soil, and provide a feasible reference for the design of the finite element model of pile–soil interaction of spiral pile structure. This paper also designs a common pile control foundation model without helical blade structure by means of lateral comparison, and explores the influence of single helical blade on the bearing capacity and stability of the foundation structure. The research shows that the addition of single–layer helical twist blade structure can significantly improve the bearing capacity and stability of offshore wind power pile foundation structure, and has little influence on the natural vibration frequency under the constraint state of the foundation structure. The relevant data can provide suggestions and references for the design of helical pile foundation in practical engineering.

Keywords: offshore wind; screw pile foundation; jacket foundation; numerical simulation; modal analysis