



超大直径钢管桩风机基础优化研究

李武, 郜卫东

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对近海风机基础中的超大直径独立桩基础的力学问题, 结合实际工程, 采用数值软件对其进行模拟计算, 得到桩长、桩壁厚与位移和应力变化曲线, 以及局部改变桩壁厚和增加翼缘对桩位移和应力的影响。通过计算分析认为: 桩长和桩壁厚都在一定范围内对桩位移和应力有影响, 桩壁厚局部变化对位移影响不明显, 但对应力有显著变化; 在泥面下一定范围内增加翼缘能有效减小侧向位移, 并给出翼缘的最优入土长度和厚度, 为实际工程提供设计依据。

关键词: 风机基础; 桩基础; 数值模拟; 力学问题

中图分类号: U 641.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)10-0234-05

Optimization of ultra-large-diameter pipe piled wind generator foundation

LI Wu, GAO Wei-dong

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: According to the mechanics problem of ultra-large-diameter single-pile in offshore wind generator foundation, this paper simulates the mechanical characteristics of the single-pile by number software based on the practical engineering. Variation curves of pile length, pile wall thickness and displacement, stress, and data tables which displacement and stress are changed with the variation of pile wall thickness and increasing the flange are gained by computing results. The conclusions are obtained that the variation of pile length, pile wall thickness in certain range can affect pile displacement and stress, the local variation of pile wall thickness changes indistinctively displacement, but stress is changed observably, and the lateral displacement can be reduced effectively by increasing the flange in certain range under mud surface. The best underground length and thickness of the flange are given in order to provide the design basis for the practical engineering.

Key words: wind generator foundation; pile foundation; number simulation; mechanics problem

随着我国经济的快速发展, 能源消耗量日益增长, 传统的不可再生能源出现了供不应求的局面^[1-2]。因此, 风能资源作为清洁的可再生能源被快速发展, 特别是近海风力发电被国家作为重点工程来建设^[3-4]。近海风电机组基础多采用高桩混凝土承台结构和大直径单桩结构, 风机-塔架-基础组成高耸动力结构。这种结构面对随机变化的风力及波浪力的作用, 将形成基础的永久侧向变形, 当整体结构转角超过 0.5° 时, 使机头位置产生

过大水平位移, 造成风力发电机无法正常运作^[5]。因此, 国内外学者对风力发电基础的侧向变形进行了研究。桩基顶部最大位移和振动速度, 以及桩基对风机动力特性的影响等^[6-8]。由于动力荷载作用会使结构位移和应力产生复杂变化, 因此有限元方法被引入研究桩基础水平承载力与位移、转角关系, 稳定性与桩直径、埋深的关系以及大直径桩与土之间的相互作用等力学性质^[9, 11]。同时, 通过有限元方法的研究成果修正了经典 p - y 曲

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 李武(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事港口工程、岩土工程、地下工程等领域的设计与科研工作。

线计算方法对大直径桩的侧向位移的影响^[12]。基于前人研究成果和实际工程问题, 本文对大直径钢管桩的力学性质进行系统研究, 并设计出泥面以下钢管桩局部的截面形式, 讨论其力学性质, 进一步说明本文成果在实际工程设计中的应用性。

1 工程概况

某发电场址呈“L”型, 东西向长约15 km, 南北向长约13.5 km, 其西侧边线离海岸线直线最短距离约28 km, 规划海域面积127 km²。风电场区域总体地形平坦, 局部海沟较深, 风电场范围内原始地面高程大多为-1.0~1.3 m (85高程), 局部海沟处可深达-8 m。该工程拟安装100台单机容量2 MW 的风力发电机组, 总装机容量200 MW。风力发电机组转轮直径93 m, 轮毂高度80 m。风

电场配套设置1座220 kV 海上升压站及1座陆上集控中心, 海上升压站位于西侧海域。升压站规模按200 MW设计, 并以一回220 kV 海缆送出, 陆上集控中心设置在海缆登入点附近, 海上升压站距登陆点直线距离约30 km。风机基础采用大直径钢管桩基础(4~5 m)和高桩承台基础, 该基础承受巨大的风机倾覆力矩和波浪、水流荷载, 而且风机设备对基础变形有很高的要求。

根据钻孔揭露的地层结构、岩性特征、埋藏条件及物理力学性质, 结合区域地质资料, 勘探深度内均为第四系沉积物, 上部①~③层为第四系全新统(Q_4)冲海相粉土、粉砂, 下部为上更新统(Q_3)陆相、滨海相沉积物。根据土性及物理力学性质细分为8个亚层, 如表1所示。

表1 地质条件

土层编号	层号	地基土承载力特征值 f_{sk}/kPa	钢管桩侧阻力 q_{sk}/kPa	地基土水平抗力比例系数 $m/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-4})$
①	粉砂	100		1.0
②	粉土	120	40	3.5
③ ₁	粉土	160	60	4.2
③ ₂	粉砂	200	64	5.0
④	粉质黏土	160	56	4.8
⑤	粉质黏土	130	40	3.4
⑥ ₁	粉砂	200	64	5.5
⑥ ₂	粉质黏土	100	38	2.4
⑥ ₃	粉砂	220	70	5.6

2 数值模型

本文研究超大直径钢管桩风机基础, 桩内不添加混凝土, 直接由桩锤打入海床, 入土设计深度36 m, 直径4 300 mm, 壁厚60 mm, 几何模型见图1。采用大型商业有限元程序ROBOT对风机桩基础建模分析, 钢桩部分采用壳单元, 弹性模量取206 GPa, 泊松比取0.30, 密度7 800 kg/m³, 桩内土采用杆单元模拟, 主要考虑它对桩的刚度贡献, 不对其进行力学分析, 采用平均密度935 kg/m³, 弹性模量取为6.21 MPa, 泊松比0.30。荷载按设计单位给定的范围取值(为基础环面的荷载设计值)。上部传导下的集中力荷载在模型计算中转换为线荷载加于有限元模型的基础环上, 将弯矩等效加于有限元模型的基础环上。钢桩靠摩擦力

提供承载力, 所以初步估算采用m法模拟土对桩的侧向约束, 采用弹性地基模拟桩端约束, 构建的有限元模型见图2。

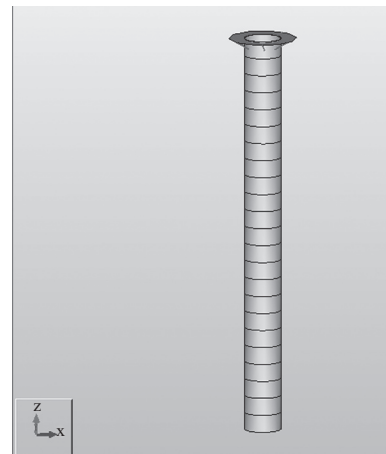


图1 桩基几何模型

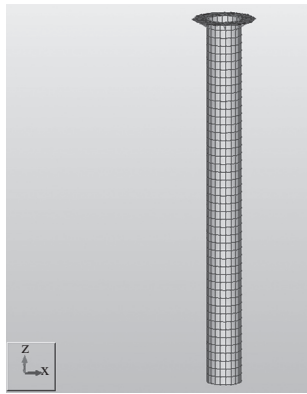


图2 桩基有限元模型

3 计算结果及分析

通过数值软件模拟，得到桩长与位移应力关系、桩壁厚与位移应力关系以及局部加厚或加肋与位移应力关系，计算结果如图3~7，表2~3所示，加翼缘结构见图8。

由图3可知：3个方向位移随着桩入土深度增加而减小，特别是水平方向x、y位移更为明显，但是在给定荷载下，桩入土深度到特定值以后，再增加埋深也不会减小水平向位移。在本工程中，当入土深度超过16 m后，再增加入土深度对水平位移基本上没有影响。由图4可以看出，桩入土深度与第一主应力关系不大，当入土深度到2倍直径以上时，应力基本上不发生变化，这说明应力不受桩长控制，只要桩端能被约束，在相同截面下，应力就不会有大的变化。从图5中可以看出，桩侧摩阻力受桩长影响较大，随桩长增加平均侧摩阻力减小。在本工程中，入土深度超过14 m后，即满足平均侧摩阻力（31 kPa）小于已知给定的最小侧摩阻力（38 kPa），再增加桩长不会减小竖向位移，这与图3反映的情况一致，即在一定桩长后，竖向位移不受桩长影响。由图6可知，随着桩壁增厚桩的侧向位移减小，但当壁厚超过一定值时，增加壁厚侧向位移减小不明显。由图7可知，应力随桩壁变厚而减小，特别是在开始阶段减小幅度很大，从曲线走势看，当桩壁厚达到一定值时，应力也趋向稳定。同时，当桩壁厚小于3 cm时，桩壁上应力接近钢材极限应力，因此桩壁厚不宜小于3 cm。

图3~7反映了桩长和桩壁厚对桩身应力和桩

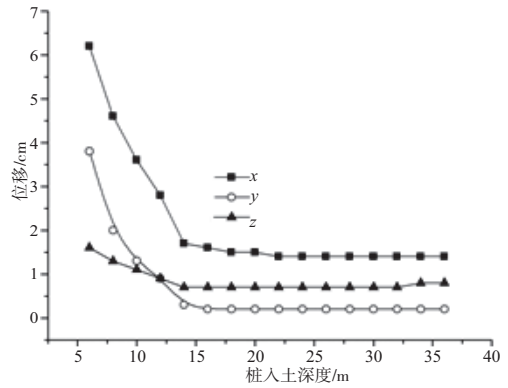


图3 不同桩长的钢管桩位移

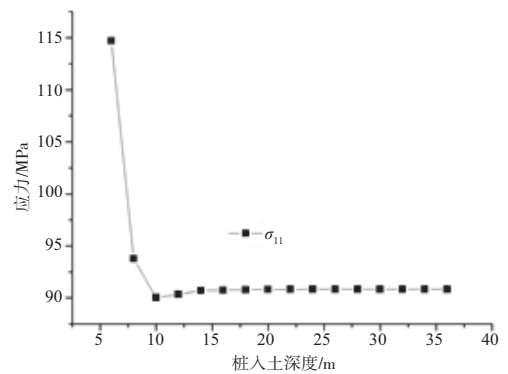


图4 不同桩长的钢管桩应力

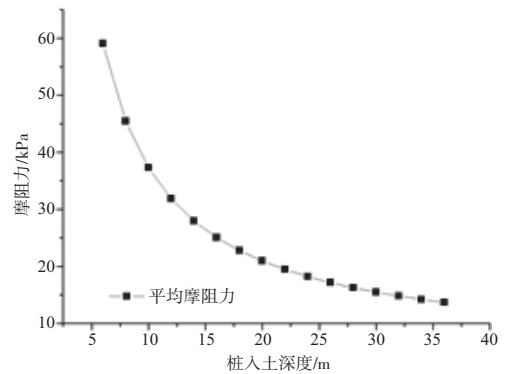


图5 不同桩长的钢管桩侧摩阻力

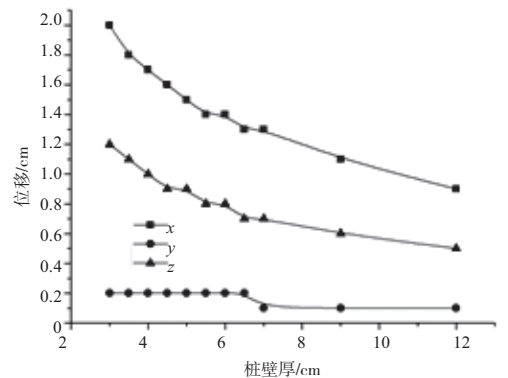


图6 不同壁厚的钢管桩位移

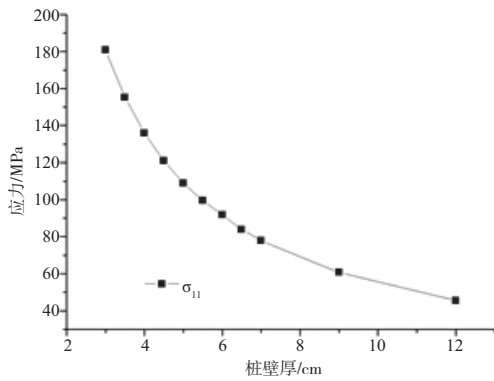


图7 不同壁厚的钢管桩应力

表2 钢管桩局部厚变化的位移与应力

壁厚/cm	x	y	z	σ_{11}
6&5	1.4	0.2	0.8	108.31
6&4	1.5	0.2	0.9	134.55
6&55	1.5	0.2	0.8	108.49
6&44	1.6	0.2	0.9	135.03
6&3	1.7	0.2	1.0	177.98

表3 钢管桩加肋后局部厚变化的位移与应力

壁厚/cm	x	y	z	σ_{11}	翼缘/cm	埋深/cm
3	1.5	0.3	1.0	188.7	4	36
4	1.3	0.2	0.8	138.5	4	36
5	1.1	0.1	0.7	108.9	4	36
6&3&1	1.4	0.2	0.9	143.4	4	36
6&3&2	1.4	0.2	0.9	102.8	4	36
6&3&3	1.3	0.2	0.8	94.1	4	36
6&3&1	1.4	0.1	0.9	142.3	3	36
6&3&2	1.4	0.1	0.9	101.4	3	36
6&3&3	1.3	0.2	0.8	92.5	3	36
6&3&1	1.6	0.2	1.0	153.8	3	6
6&3&2	1.5	0.2	0.9	133.7	3	6
6&3&3	1.4	0.1	0.9	129.9	3	6
6&3&1	1.4	0.2	1.0	145.8	3	12
6&3&2	1.4	0.2	0.9	97.5	3	12
6&3&3	1.3	0.1	0.8	91.6	3	12

顶位移变化的影响,但不能反映局部加厚桩壁的情况。因此增加表2,3说明局部加厚的情况。在表2,3中,6&5表示从泥面开始2 m一节将不同壁厚的钢管间隔焊接起来,例如泥面开始0~2 m是6 cm壁厚,2~4 m是5 cm壁厚,4~6 m是6 cm等,直到36 m埋深;6&55表示0~2是6 cm壁厚,2~4 m是5 cm壁厚,4~6 m是5 cm,6~8 m是6 cm等,直到36 m埋深;6&3&1表示泥面下0~2 m是6 cm壁厚,其余的都是3 cm壁厚;6&3&2表示泥面下0~4 m是6 cm壁厚,其

余的都是3 cm壁厚;6&3&3表示0~6 m是6 cm壁厚,其余的都是3 cm壁厚。由表2可以看出,当桩壁间隔削弱截面,侧向位移增长,但是增长幅度不明显,然而应力出现显著变化,特别是当壁厚减小到原壁厚一半时,应力接近钢材极限应力。在削弱方式中6&55与6&5没有明显变化,特别是在应力方面,这可能是接近泥面处截面没有削弱,根据圣维南原理扩散到下面,所以没有出现应力显著变化。

为了控制水平位移,在该模型中加入1 m宽的翼缘如图8,计算结果见表3。从表3可以看出,加翼缘可以减小水平位移,但是应力相对未加翼缘的结构没有发生明显变化。为了改善应力情况,加厚泥面附近的桩壁厚度,通过计算可以看出,应力随着加厚长度增加而减小,特别是在泥面下4 m范围内,但是位移相对变化不明显。在表3中,翼缘本身的厚度和加入长度都对侧向位移应力有影响,但相对长度而言,厚度对整体结构侧移和应力的影响较小;当长度超过12 m后,对侧向位移和应力影响都减小,由于翼缘本身重力作用还会稍有增加结构应力,因此翼缘最佳厚度和长度分别为4 cm和12 m。

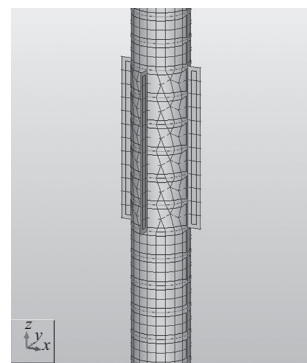


图8 局部加翼缘结构

4 结语

1) 对于大直径钢管桩,入土深度不宜过长,一般入土深度为直径5~7倍为宜,而且超过最佳入土深度的部分对位移和应力均无贡献,只是增加本身自重引起轴力。

2) 对于大直径钢管桩,要选择合适的桩壁厚度,过厚的桩壁对减小桩端的侧向位移没有大的贡献,只能减小应力。特别是在泥面0~2 m处局

部加厚可以减小桩壁的应力，使其区域均匀，避免应力集中出现。

3) 控制钢管桩侧向位移的最佳办法是在入土面以下加一定长度的翼缘，使它在局部增加水平刚度，减小水平位移，相对统一截面还可以节省材料。

参考文献:

[1] 周凌云. 世界能源危机与我国的能源安全[J].中国能源, 2001(1): 12-13.

[2] 龚民焯. 风力发电的全球展望[J].上海节能, 2008(3): 28-31.

[3] 聂春雷, 孙钰. “十一五”能源发展的绿色走向[J].环境保护, 2006(2A): 39-40.

[4] 薛清梅. 大型海上风力发电的开发[J]. 发电设备, 2007(2): 161-163.

[5] 郭玉樹, 亚克慕斯·马丁, 阿布达雷赫曼·哈里. 用循环三轴试验分析海上风力发电机单桩基础侧向位移[J].岩土工程学报, 2009, 31(11): 1 729-1 734.

[6] Pablo C, Matthias B, Werner R. Ratcheting convective cells of sand grains around offshore piles under cyclic lateral loads[J]. Granular Matter, 2009, 11(6):379-390.

[7] Zaaiker M B. Foundation modelling to assess dynamic

behaviour of offshore wind turbines[J]. Applied Ocean Research, 2006,28(1):45-57.

[8] Kellezi L, Hansen P B. Static and dynamic analysis of an offshore mono-pile windmill foundation[C]//BGA International Conference on Foundations, Innovations, Observations, Design and Practice, 2003:401-410.

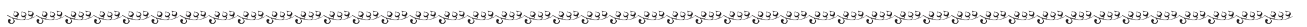
[9] Achmus Martin1, Kuo Yu-Shu1, Abdel-Rahman Khalid. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(5):725-735.

[10] Wu K, Chen R, Li S C. Finite element modeling of horizontally loaded monopile foundation of large scale offshore wind turbine in non-homogeneity clay[C]//WRI World Congress on Software Engineering, 2009(2):329-333.

[11] Achmus M, Abdel-Rahman K, Kuo Y S. Numerical modelling of large diameter steel piles under monotonic and cyclic horizontal loading[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, 2007:453-459.

[12] Lesny K, Wiemann J. Finite-element-modelling of large diameter monopiles for offshore wind energy converters[C]// Geotechnical Engineering in the Information Technology Age, 2006: 212.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第233页)

3 结语

编制好岩土工程勘察纲要对水运工程项目勘察成败至关重要，这就对岩土工程师提出了较高的要求：岩土工程师不但要有坚实的专业知识，而且要对设计意图有深入的了解，根据工程性质，基础形式、荷载大小，合理布置勘探孔、确定孔深、孔性，合理安排试验项目。当然勘察纲要是事先制定的，不可能和实际勘察情况完全吻合，所以只有岩土工程师在编制勘察纲要时工作做得越细，考虑问题越全面，搜集资料越准确，越善于运用岩土方面的知识加以思考，编制纲要就越能更好的指导勘察工作；同时应注意现场的

地质条件和预期的出入较大时，应对勘察纲要及时加以修正和调整，以满足指导后续工作需要。

参考文献:

[1] 徐威, 乌孟庄. 两种水域十字板剪切试验的对比研究[J].工程勘察, 2009(S2): 107-112.

[2] JTS 133-1—2010 港口岩土工程勘察规范[S].

[3] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].

[4] 董教社. 双管单动活门式取芯取土器[J].工程勘察, 2010(S1): 175-186.

(本文编辑 郭雪珍)