

锚杆关键参数对锚杆重力式海上风机基础承载特性的影响

王尔贝¹, 陈锐², 霍宏斌³

(1. 中国石油集团东北炼化工程有限公司吉林设计院土建室, 吉林吉林 132000; 2. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 深圳市城市与土木工程防灾减灾重点实验室, 广东深圳 518055; 3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 470000)

[摘要] 针对最近提出的锚杆重力式海上风机基础, 采用有限元分析软件 ABAQUS 研究了锚杆的关键参数对此新型基础承载特性的影响。结果表明: 增加锚杆数量可以提高基础的承载力并减小单根锚杆的轴力。但是当锚杆数量增加到一定程度时, 会使其间距过小, 引起地基中应力的叠加, 降低锚杆群的承载效率, 因此锚杆数量存在上限。基础承载力几乎随锚杆直径的增加呈线性提高, 锚杆直径越大对基础稳定越有利, 因此在可行的情况下, 应尽可能地选用大直径锚杆。锚杆环直径的增大相当于增大了基础抗倾覆力矩的力臂, 因此对弯矩承载力是有利的, 但由于锚杆群对地基等效刚度的改变, 竖向承载力会随着锚杆环直径的增大而先增后减。设计时要综合考虑各个承载力因素, 选用合适的锚杆环直径。

[关键词] 海上风机; 重力式基础; 锚杆; 三维有限元分析

[中图分类号] P75 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)08-0069-05

1 前言

海上风电机组的基础所处的工作环境特殊, 遭受的荷载复杂。世界范围内现有的几种基础类型多数均存在成本高、施工难等问题。因此急需研究和开发成本低廉、施工简便的海上风机基础形式。针对上述问题, 霍宏斌等提出了一种新型基础——锚杆重力式海上风机基础^[1]: 将预应力锚杆应用于传统的重力式基础中, 借助锚杆的预应力, 对重力基础施加预压力, 进而增加基础的稳定性, 同时也可以相应地减小基础的尺寸和重量, 从而减小了施工和运输的难度。相关三维数值模拟结果表明, 锚杆的存在显著地提高了地基极限承载力并改变了地基破坏形式。这说明了锚杆重力式海上风机基础具有良好的应用前景。

锚杆对新型的锚杆重力式基础承载特性起至

关重要的作用, 因此需要进一步研究锚杆关键参数对基础承载特性的影响规律和作用机理, 从而为锚杆重力式海上风机基础的应用提供参考依据。

2 算例方案

文献[1]中介绍了锚杆重力式基础在竖向荷载、水平荷载和弯矩荷载单独作用下的承载特性。其中, 基础形式如图 1 所示。文中以常见重力式基础尺寸为例, 针对 3 MW 风机容量的基础进行了数值模拟。承台的上、下底面直径分别为 7 m 和 10 m, 承台高度为 10 m。

锚杆为钢材, 采用线弹性本构模型, 弹性模量与泊松比分别为: $E=2.0 \times 10^5$ MPa, $\nu=0.3$ 。重力承台外围采用普通混凝土, 弹性模量 $E=3.0 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\nu=0.2$; 内侧采用高强混凝土, 弹性模量 $E=3.4 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\nu=0.2$ 。根据预应力锚杆的工程特

[收稿日期] 2012-09-17

[基金项目] 国家自然科学基金青年基金项目(50909030); 深圳市龙岗区软科学研究项目(深龙科[2011]3); 中国水利水电科学研究院科研专项(岩集 1238)

[作者简介] 王尔贝, 1987 年出生, 男, 黑龙江齐齐哈尔市人, 助理工程师, 主要从事海上风电基础研究工作; E-mail: wangerbei@gmail.com

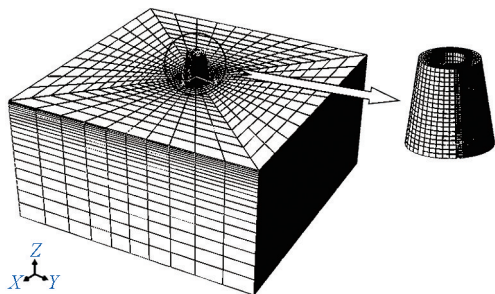


图1 模型示意图^[1]

Fig.1 FEM model^[1]

性,锚杆重力式风机基础的适用对象初定为砂土。对土体采用有效应力进行稳态分析,即假设孔压很快消散。土体的应力、应变关系选用Mohr-Coulomb弹塑性本构模型,因为其参数容易从工程报告中获得,且地基的极限承载力是主要关心的对象。土的有效容重 $\gamma'=9.5\text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E=30\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.3$;粘聚力和摩擦角分别为 $c=5\text{ kPa}$, $\varphi=30^\circ$ 。假定计算域内无基岩且仅为一层土。一般情况下近海基岩埋深较浅,这对于基础的稳定是有利的。在有限元中采用三维梁单元模拟锚杆,并应用埋入单元的方式模拟锚杆与土体的接触关系。采用三维实体单元模拟混凝土和土体。

以文献[1]中的锚杆参数作为基准:锚杆采用对称分布,内外环各设置16根锚杆,锚杆直径为55 mm。其中,内环锚杆竖直,外环锚杆向外倾斜,内外环直径分别取4.7 m和5.6 m。锚固段长度取15 m,锚杆全长取25 m。改变锚杆的上述特征参数,会对基础的承载特性产生影响。为了统一分析不同的荷载分量,以文献[1]中的各方向承载力(V_0 、 M_0 、 H_0)为基准,将各承载力分量进行归一化处理。

在锚杆的众多参数中,重点关注如下参数:锚杆数量(指单锚杆环,下同)、锚杆直径、锚杆环直径。各参数取值见表1。其中,锚杆数量相对 x 轴和 y 轴,呈轴对称方式增加;锚杆直径根据工程上较常用的直径范围,呈等差递增取值;由于基础承台上底面的外径限制,锚杆环直径在原来的基础上依次增减适当的值,但内外径差值始终不变。

表1 锚杆关键参数

Table 1 Key parameters of anchors

参数	参数取值				
锚杆数量	12	16	20	24	28
锚杆直径/mm	50	55	60	65	70
锚杆环直径/m	4.4/5.3	4.7/5.6	5.0/5.9	5.3/6.2	5.6/6.5

3 锚杆参数变化对新型基础的影响

3.1 锚杆数量的影响

研究表明^[2],锚杆群中各锚杆荷载分布并不均匀,锚杆群的承载效率总是低于单根锚杆的承载效率,若各锚杆间的间距过小,必然会引起地层中的应力叠加。

从图2中可以看到,随着锚杆数量的增加,基础在各荷载分量的方向上承载力均有提高,而且提高的程度不同。其中,弯矩承载力依次提高12.4%、12.7%、5.8%、5.9%,水平承载力依次提高10.5%、6.7%、6.8%、4.1%;而对于竖向承载力,锚杆从16根增加到20根时,竖向承载力提高幅度最大,达19%,在此前后,锚杆竖向承载力提高7%、1.5%、3.6%。

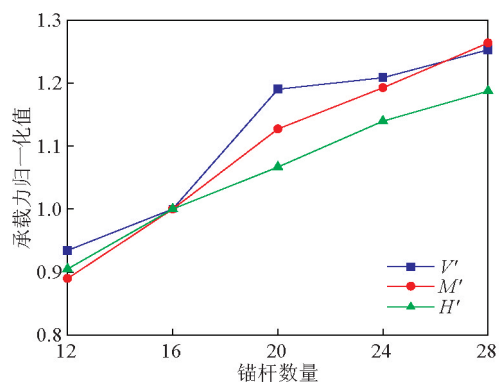


图2 不同锚杆数量对承载力的影响

Fig.2 The effects of different numbers of anchors on bearing capacity

锚杆数量的增加,意味着基础中承受拉力的构件增多,基础受到的向下的预压力增大,基础与地基的接触压力也会增大(见图3)。因此对于承受弯矩荷载来说,锚杆的数量是比较重要的参数。而竖向荷载对基础的作用主要是向下的压力,锚杆或锚固体只能通过增加土体的等效刚度来减小沉降。但是在地基中,锚杆所处的空间是有限的,被限制在锚杆环的直径范围内。因此当锚杆数量增加到一定程度时,对较大范围内地基刚度的影响不再明显。在弯矩作用下,锚杆数量对自身也存在影响。当弯矩荷载为正常工况水平时,以位于内外锚杆环最外侧受拉锚杆的自由段轴力为例,将其表示为图4中的曲线形式,并以文献[1]中相同位置的锚杆自

由段轴力为基准,进行归一化处理。

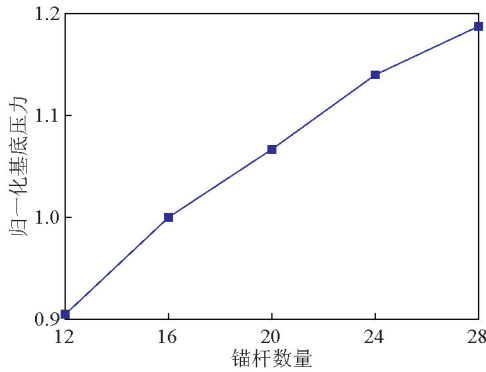


图3 基底压力随锚杆数量变化

Fig. 3 The effects of different numbers of anchors on base pressure

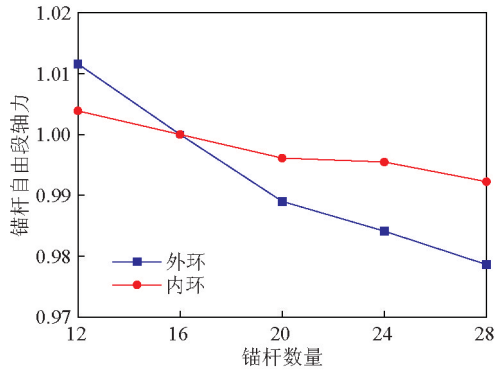


图4 风机正常运行时最外侧锚杆轴力随数量变化

Fig. 4 The effects of different numbers of anchors on axial force of outer anchors when loads reached normal loading condition

在弯矩荷载的作用下,锚杆群的受力过程可以描述如下:最外侧的一根锚杆首先承受弯矩引起的拉力,随着荷载增大,位于两侧的锚杆才开始受力。如果增加锚杆的数量,而保持锚杆环的直径不变,那么相邻两根锚杆的距离便会缩短,在最外侧锚杆受到拉力之后,它两侧的锚杆会更早地帮助其分担拉力。因此,如图4所示,随着锚杆数量的增加,单根锚杆的轴力在逐渐减小。当锚杆由16根增加到20根时,内外环的最外侧锚杆减小幅度最大,分别为1.1%和0.4%。由于外环锚杆所承受的拉力更大,所以其变化幅度也更大。

3.2 锚杆直径的影响

对于相同材料的锚杆,直径越大,抗拉能力越强,因此增加锚杆直径可以减小基础的变形,提高

承载力。图5为不同锚杆直径的承载力归一化数值,可见随着锚杆直径的增大,各方向的承载力均会增加,竖向承载力最多增加3.6%,水平承载力最多增加5.5%,而弯矩承载力几乎呈线性增加,最高达7.9%。

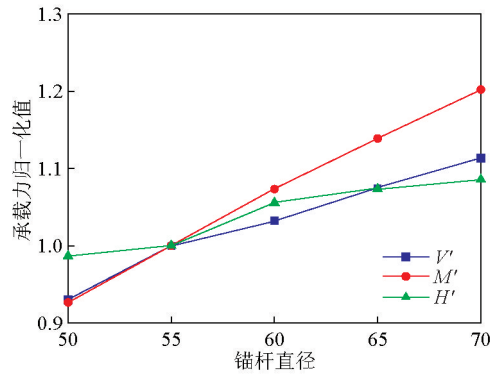


图5 不同锚杆直径对承载力的影响(单位:mm)

Fig. 5 The effects of different diameters of anchors on bearing capacity (unit:mm)

对于竖向荷载来说,荷载作用在基础上时,会使基础沉降,导致锚杆发生弹性回缩,损失预应力。当不同锚杆直径的基础达到同一沉降值时,即锚杆发生弹性回缩的长度一致时,直径越大,损失的预应力越大。而由于基础沉降一致,损失的这部分预应力的作用效果便会转移到外荷载上,最终需要更大的竖向荷载来使基础达到这一沉降水平。因此,锚杆直径越大,基础的竖向承载力越高。

对于弯矩荷载来说,荷载作用于基础上,会在—侧转化成对基础的拉力、另一侧为压力。锚杆基础中,受拉—侧的荷载由锚杆承担,受压—侧则由重力承台来承担,其中,锚杆的拉力是基础抵抗弯矩的关键。荷载一定时,锚杆直径越大,轴向变形越小,约束了基础的进一步变形,增大了承载力。

对于水平荷载来说,由于对锚杆施加的预拉力是一致的,所以无论锚杆直径如何变化,基础所受到的预压力是不变的,基底压力也是不变的。但是锚杆直径的增加会提高其自身的抗剪能力,因此基础的水平承载力也略有增加。

锚杆直径的选择应同时考虑锚固效果和经济性两方面因素。在其他条件相同的情况下,锚杆锚固强度的大小总与杆体直径成正比,即锚杆直径越大,锚固强度和锚固系统的刚度也会越大,锚固效果越好。同时,锚杆直径对其材料成本的影响并不

是特别大^[3]。

3.3 锚杆环直径的影响

锚杆环直径也是影响基础受力的一个重要参数,它的大小会影响到基础整体的受力情况,这与垂直预应力锚杆式挡土墙^[4]中,锚杆位置对墙体受力的影响相似。下面通过基础承载力的变化分析锚杆环直径的影响(见图6,其中,4.7/5.6表示锚杆内环直径为4.7 m,外环直径为5.6 m)。可见,对于抵抗弯矩荷载,增大锚杆环直径是有利的。因为弯矩在基础底部一侧产生的拉力是锚杆最主要的荷载,拉力的作用线到基础受压一侧的垂直距离可以看成基础抗倾覆力矩的力臂,增大锚杆环即增大了力臂,进而增大了基础的抗倾覆力矩,减弱了基础倾斜或旋转的趋势。

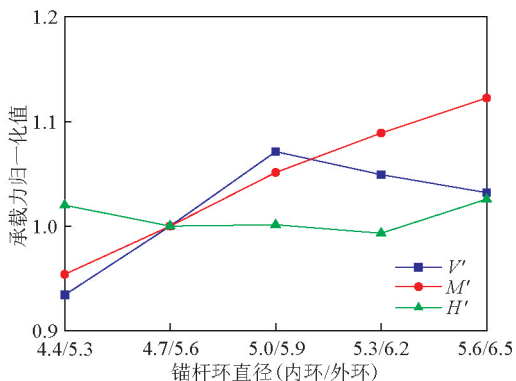


图6 不同锚杆环直径对承载力的影响(单位:m)

Fig. 6 The effects of different diameters of anchor rings on bearing capacity(unit:m)

前文曾提到,锚杆或锚固体可通过提高地基的等效刚度来减小沉降,进而增大竖向承载力。图6中,增大锚杆环直径使基础竖向承载力先增后减。原因在于,锚杆环的直径影响了地基中等效刚度增大区域的分布情况。如果锚杆环直径很小,锚杆群相对集中,那么仅在该集中区域内,土体的等效刚度才有显著增加;随着锚杆环直径增大,锚杆分布的范围也在扩大,该范围内,土体的等效刚度均有提高,竖向承载力也会随之增加;如果锚杆环直径继续增大,地基中等效刚度增大的区域将呈环形分布,锚杆环中轴线周围大范围土体刚度恢复如初,因此地基承载力会减小。

而对于水平荷载,增加锚杆环直径无明显影响且无固定规律,因为改变此参数并不能改变基底压

力,而对锚杆本身的抗剪能力亦无贡献。

结合图6中所示的3条曲线分析说明,锚杆环内外径为5.0 m、5.9 m的位置正是接近使地基竖向承载力达到最大的位置,此处锚杆环内外径的平均值约为基础底面直径的0.55倍。同理,对于不同形状和尺寸的基础,存在着最优化的锚杆环直径,锚杆环内外径的平均值约为基础底面直径的0.55倍。

4 结语

为了分析锚杆数量、锚杆直径和锚杆环直径的改变对基础承载特性的影响,将有限元模型中的上述参数分别按等差规律缩放,以文献[1]中的模型为基础,改变某一参数时,其他参数保持不变,得出以下结论。

1) 增加锚杆数量能够提高基础的承载力,减小单根锚杆的轴力,但是当锚杆超过一定数量时,基础各个方向的承载力以及单根锚杆的轴力变化率均会减小,因此,对于不同尺寸的基础,综合考虑承载力及经济因素后,可以判定锚杆的数量存在着上限。

2) 增大锚杆直径后,基础各方向承载力均有所提高,竖向承载力最多增加3.6%,水平承载力最多增加5.5%,而弯矩承载力几乎随锚杆直径的增大呈线性增加,达7.9%。锚杆直径越大对基础稳定越有利,并且锚杆直径对材料成本的影响并不是特别大,因此,在可行的情况下,应尽可能地选用大直径锚杆。

3) 增大锚杆环直径相当于增大了基础抗倾覆力矩的力臂,每次递增最多可使弯矩承载力增加约5%。但由于锚杆群对地基等效刚度的改变,竖向承载力会随着锚杆环直径的增大而先增后减。因此,设计时要综合考虑各方向承载力因素,选用合适的锚杆环直径。

参考文献

- [1] 霍宏斌,王尔贝,陈锐,等.一种新型重力式海上风机基础承载特性分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(S1):1554-1558.
- [2] 李锋科.土层锚杆受力机理分析及应用研究[D].西安:西安科技大学,2007.
- [3] 刘鹏飞,田取珍.大断面穿层巷道锚杆支护数值模拟研究[J].山西煤炭,2011(5):48-50.
- [4] 黄翀.垂直预应力锚杆式挡土墙试验研究[J].四川建筑科学研究,2010,36(4):139-141.

Effects of key parameters of anchor on bearing behavior of gravity foundation with anchors for offshore wind turbines

Wang Erbei¹, Chen Rui², Huo Hongbin³

(1. PetroChina Northeast Refining & Petrochemical Engineering Co. Ltd. Jilin Design Institute, Jilin, Jilin 132000, China; 2. Shenzhen Key Laboratory of Urban and Civil Engineering for Disaster Prevention and Mitigation, Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangzhou 518055, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 470000, hina)

[Abstract] A novel type of offshore wind turbine foundation, which is named gravity foundation with anchors, has been proposed recently. The effects of key parameters of anchor on bearing behavior of this type of foundation were investigated in this study by carrying out the finite element analysis. It was found that increasing the number of anchors not only improves the bearing capacity of foundation but also reduces the axial force of each anchor. However, when the number of anchors is increased to certain extent, the spacing between two anchors becomes too small and then causing the superposition of stress and reducing the bearing efficiency of anchors. Therefore, the number of anchors should be optimized. Regarding the effect of diameter of anchors, the analysis showed that the bearing capacity of foundation increases almost linearly with the diameter of anchors. In other words, the larger the diameter of anchors is, the greater contribution for the stability of foundation provided by the anchors. Therefore, the diameter of anchors should be as large as possible. It was also found that the increase in the diameter of anchor rings is equivalent to the increase in the arm of anti-moment provided by the anchors. However, since the anchors can change equivalent stiffness of the subsoil, the bearing capacity under vertical loading increases firstly but decreases subsequently as the diameter of anchor ring increases. Consequently, it is essential to evaluate bearing capacity from various aspects and determine appropriate diameter of anchor rings for design.

[Key words] offshore wind turbine; gravity foundation; anchor; three-dimensional finite element analysis