

软岩地基中新型倒肋式风机基础力学性能有限元分析

海洪,孙鹏金,张延年

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 提出一种新型倒肋式风机基础,解决软岩地基中采用梁板式风机基础带来的挖方量大、模板支设繁琐、施工成本高、周期长等问题。方法 以2.5 MW风机为例,采用ABAQUS有限元分析软件,建立相同尺寸的倒肋式与梁板式风机基础模型,对比两种基础在极端工况下的倾斜率、水平位移、破坏特征等,并结合挖方量、模板工程量对两者的经济性进行分析。结果 倒肋式基础的水平位移为0.444 mm、倾斜率为0.012 1%,均满足规范要求;倒肋式基础的肋梁受力特征与悬臂梁相似,在基底反力作用下肋梁与墩台连接处承受的剪力及弯矩较大,容易开裂破坏,可通过增加肋梁截面高度改善;倒肋式基础相较于梁板式基础土方挖量可节省54%、模板工程量可节省48%。结论 倒肋式基础充分发挥出了倒置肋梁与软岩地基之间齿槽嵌固的优势,相较于梁板式基础不仅具有更优的抗滑移稳定性和受力性能,而且减少了挖方和模板工程量,经济效益显著。

关键词 软岩地基;梁板式风机基础;倒肋式风机基础;有限元分析;倾斜率

中图分类号 TU476

文献标志码 A

引用格式:海洪,孙鹏金,张延年. 软岩地基中新型倒肋式风机基础力学性能有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):267-275. (HAI Hong, SUN Pengjin, ZHANG Yannian. Finite element analysis of mechanical properties of a new type of inverted beam plate fan foundation on soft rock foundation[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(2):267-275.)

Finite Element Analysis of Mechanical Properties of a New Type of Inverted Beam Plate Fan Foundation on Soft Rock Foundation

HAI Hong, SUN Pengjin, ZHANG Yannian

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to solve the problems of large excavation volume, cumbersome formwork

收稿日期:2023-03-15

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2019YFC1907202);辽宁省重大科技专项项目(2020JH1/10300005)

作者简介:海洪(1973—),女,副教授,主要从事工程结构健康检测、建筑防火性能等方面研究。

support, high construction cost, and long cycle caused by using beam slab fan foundation in soft rock foundation. Research on a new type of ribbed fan foundation. Method: Taking a 2.5 MW wind turbine as an example, ABAQUS finite element analysis software was used to establish foundation models of the same size of inverted rib and beam plate wind turbines. The inclination rate, horizontal displacement, and failure characteristics of the two foundations under extreme working conditions were compared, and the economic efficiency of the two was analyzed by combining excavation and formwork quantities. The horizontal displacement of the inverted rib foundation is 0.444 mm, and the inclination rate is 0.012 1%, both of which meet the requirements of the specifications; The force characteristics of the rib beam of the inverted rib foundation are similar to that of the cantilever beam. Under the action of the base reaction, the shear force and bending moment borne by the rib beam at the connection between the pier and abutment are relatively large, which is prone to cracking and damage. This can be improved by increasing the height of the rib beam section; Compared to beam and slab foundations, ribbed foundations can save 54% in earthwork excavation and 48% in formwork engineering. Conclusion: Inverted ribbed foundation fully utilizes the advantages of tooth slot embedding between inverted ribbed beams and soft rock foundation. Compared with beam slab foundation, it not only has better anti slip stability and stress performance, but also reduces excavation and formwork engineering, and has significant economic benefits.

Key words: soft rock foundation; beam plate fan foundation; inverted beam plate fan foundation; finite element analysis; inclination rate

随着全球能源短缺、环境恶化、气候多变等问题,一场以开发利用可再生能源为主题的能源革命在各国兴起^[1-2]。风力发电作为可再生资源,具有发展潜力大等特点,近年来逐渐被各国学者关注^[3-4]。风机基础是风力发电中的重要组成部分,风机基础不仅投资占比大,而且关系到风机运行的安全和稳定,因此一直是国内外风电行业研究和改进的重点对象^[5]。

目前,梁板式风机基础在我国陆上风电场中应用最为普遍,其主要适用于承载力较好的黏土或软岩地基^[6],基础由肋梁、环梁、底板组成,通过在多个临梁间隙中填充覆土,从而增加自重,保证抗倾覆稳定性。虽然相较于传统重力式风机基础减少了钢筋、混凝土等材料用量,但仍需开挖大量土体,而且梁、板之间连接复杂,模板支设繁琐,导致基础施工周期长、难度大、成本高等问题^[7-8]。为此,笔者针对软岩地基,提出一种新型倒肋式风机基础,将梁板式基础倒置呈倒锥形。一方面,无需开挖临梁间隙中的岩体,减少了土方开挖量,并且可以减少模板支设,降低模

板定制、运输、安装等费用;另一方面,使基础底部与地基之间呈齿槽形紧密嵌固,具有更好的受力性能和稳定性,能够填补梁板式风机基础的劣势。笔者通过有限元分析软件分别建立梁板式与倒肋式基础的三维模型,分别模拟两种基础在最大荷载下的变形、位移以及应力分布,对其稳定性和破坏特征进行分析。研究表明,新型倒肋式风机基础的经济性和受力稳定性均优于梁板式风机基础。

1 工程背景

某风电场拟安装单机容量 2.5 MW 风机 30 台,风机叶轮直径为 110 m,轮毂高度为 95 m。根据现场地质条件勘测结果可知,工程场区地基持力层包含两种土层:

第一层:粉质黏土。红棕色,密实,可见孔隙,干强度及韧性中等,可塑,压缩性高,层厚为 1.0~2.6 m。

第二层:弱风化泥灰岩。灰黄色,块状结构,完整性较好,力学指标高,岩石单轴饱和抗压强度标准值为 23.3 MPa,属于较软岩,工程场地内分布较为普遍,最大勘测深度为

9 m。两种土层的具体参数见表1。

表 1 地基物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of foundation

土层	重力密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/ MPa	泊松比	承载力特 征值/ kPa
粉质黏土	17.9	30	0.30	120
弱风化泥灰岩	24.5	5 000	0.25	1 400

场内中风化泥灰岩分布普遍,完整性好,力学指标较高,属于软岩,经现场取样测试其承载力为 1 400 kPa,适合作为持力层。笔者根据厂家提供资料,参考文献[9]进行倒肋

式基础设计,最后与常见的梁板式基础比较,两种基础的主要构建基本相同。其中板厚为700 mm,大于《建筑地基与基础设计规范》(GB50007—2011)(简称“规范”)要求最小值300 mm;肋梁的顶面坡度为1:3,大于规范要求最小值1:4;肋梁的跨高比为1:2.3,大于规范要求最小值1:6。其他参数见图1。此外,两种基础与上部塔筒均采用锚杆笼连接,直径为48 mm的锚杆 2×60 根,外圈的布设直径为4.85 m,内圈的布设直径为3.95 m,锚板的厚度为60 mm。

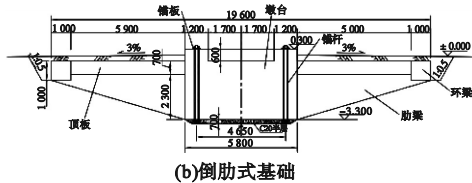
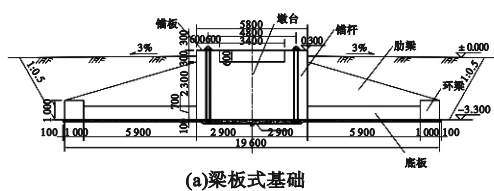


图 1 风机基础剖面图

Fig. 1 The cross-sectional view of foundation

2 有限元模型的建立

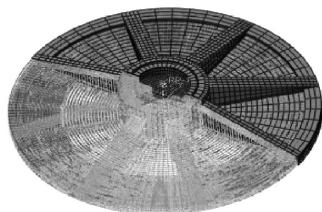
2.1 本构模型及材料参数

模型中采用混凝土塑性损伤本构^[10],其应力-应变本构参数根据文献[11]求得;考虑锚杆、锚板、钢筋的材质均为钢材,采用理想弹塑性本构模型^[12],加载过程中荷载达到材料屈服强度之前,材料的应力应变呈线性增长,超过屈服强度之后,材料的应变继续增加,应力保持不变;地基采用摩尔-库伦本构模型^[13],混凝土强度等级为 C40,钢筋采用

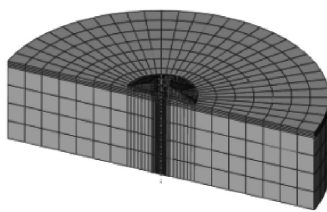
HRB335 级,抗拉强度设计值 $f_y = 300$ MPa。

2.2 模型建立及网格划分

模型中混凝土、锚板、地基均采用 C3D8R 单元,钢筋、锚杆采用 T3D2 单元^[14]。其中混凝土和锚板单元尺寸为 300 mm,钢筋单元长度为 150 mm,为保证计算精度,与基础接触位置处的地基网格加密划分,单元尺寸为 300 mm,其余位置单元尺寸为 5 000 mm。由于模型复杂,采用六面体扫掠划分技术,经多次划分、调整后各部分网格呈环向对齐分布^[15],如图 2 所示。



(a)基础网格划分



(b)整体网格划分

图2 梁板式风机基础有限元模型

Fig. 2 Beam plate foundation model meshing

倒肋式风机基础的有限元网格划分如图3所示。模型中混凝土、锚板、地基等参数与

梁板式风机基础的参数相同,模型网格划分同梁板式风机基础。



图3 倒肋式风机基础有限元模型

Fig. 3 Inverted beam plate foundation model

2.3 边界条件的设置及加载方式

在地基底面和侧面施加三向固定约束,还原地基固结状态^[16]。考虑荷载作用下基础、地基、锚板三者之间可能会出现相对滑动,因此采用通用接触,其中切向采用“罚”摩擦,摩擦系数为0.35,法相采用硬接触^[17]。钢筋、锚杆直接内置到整个模型中^[18],同时将锚杆两端分别与上下锚板绑定^[19],并通过降温法施加预应力。

两种基础的荷载施加方式一致,将上部风机荷载简化为作用于基础顶面的竖向力、水平力以及弯矩,并通过与基础上锚板运动耦合的参考点施加^[20],具体参数由风机厂家提供。加载过程:Step1(0~1 s),施加锚杆预应力和基础自重;Step2(1~2 s),施加竖向力 F_z ;Step3(2~3 s),施加水平力 F_{xy} 和弯矩 M_{xy} 。基础加载方式如图4所示。各工况荷载设计值见表2。

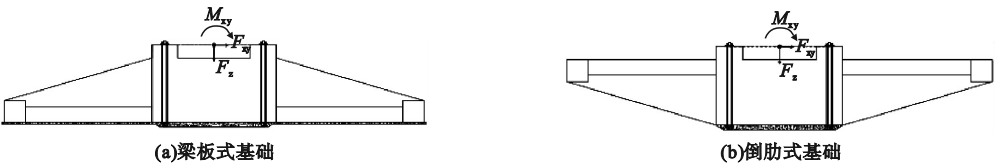


图4 基础加载方式

Fig. 4 Loading method of foundation

表2 基础荷载设计值

Table 2 Load standard values

工况	F_z/kN	$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$	F_{xy}/kN
正常荷载	3 964	47 218	539
极端荷载	3 964	100 912	1 198

3 模拟结果与分析

3.1 稳定性分析

选取基础顶面圆心作为参考点,绘制基础的水平位移变化曲线如图5所示。由风荷载作用方向上基础迎风侧与背风侧最边缘两点的高差与基础直径的比值作为倾斜率,绘制基础的倾斜率变化曲线如图6所示。从图5和图6可以得出,梁板式基础的水平位移为1.293 mm,倾斜率为0.005 2%;倒肋式基础的水平位移为0.444 mm,倾斜率为0.012 1%。两种基础的倾斜率远小于倾斜率允许值0.4%,满足设计规范要求。对比可知,梁

板式基础相较于倒肋式基础的倾斜率更小,水平位移更大,说明其抗倾覆稳定性强于倒肋式基础,抗滑移稳定性低于倒肋式基础。分析原因为倒肋式基础呈倒锥形,基底为肋梁、环梁、墩台组成的井格状结构,与地基岩体之间呈齿槽形紧密嵌固,不仅有更多的接触面积,摩擦阻力更大,而且与岩体之间的横向挤压可以分担一部分水平荷载,因此其抗滑移稳定性更好。

观察两种基础的水平位移、倾斜率变化曲线的增长趋势发现,0.5 F_{\max} (F_{\max} 为极限荷载)之前,两者均呈线性增长;0.5 F_{\max} 之后,两者增长速度逐渐增加,变化趋势呈抛物线形。分析原因为,梁板式基础背风侧底板发生弯曲破坏,倒肋式基础背风侧肋梁底部发生受拉破坏,造成两种基础的倾斜加剧,脱离面积增加,基础的倾斜率和水平位移增长速度逐渐提高。

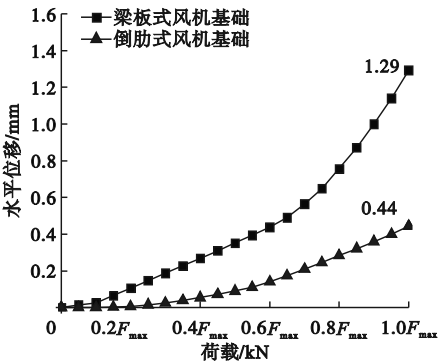


图5 两种基础水平位移变化曲线

Fig. 5 Variation curves of horizontal displacement with loading

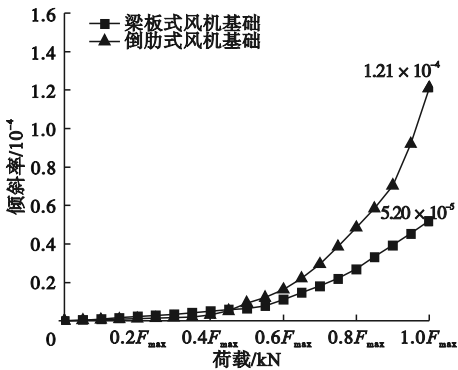


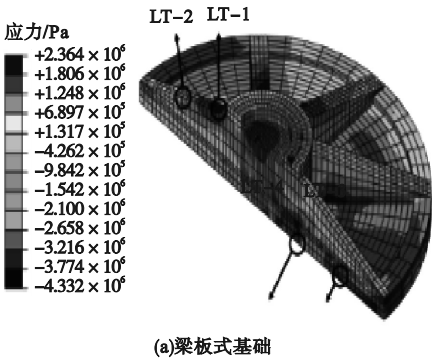
图6 两种基础倾斜率变化曲线

Fig. 6 Change curves of slope rate with load

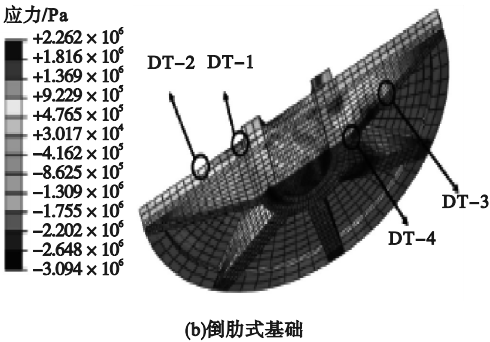
3.2 混凝土受力分析

考虑模型采用塑性损伤混凝土本构模型,无法直接通过应力云图判断混凝土应力是否超过其轴心抗拉强度标准值 2.39 MPa,轴心抗压强度标准值 26.8 MPa,因此在两种基础混凝土拉压应力分布较为集中位置处分

别选取 LT-1 ~ LT-4 和 DT-1 ~ DT-4 拉应力参考点,以及 LC-1 ~ LC-4 和 DC-1 ~ DC-4 压应力参考点,绘制其应力应变的关系曲线,并结合两种基础的混凝土塑性损伤云图,分析两种基础混凝土的受力情况。结果如图 7 ~ 图 10 所示。



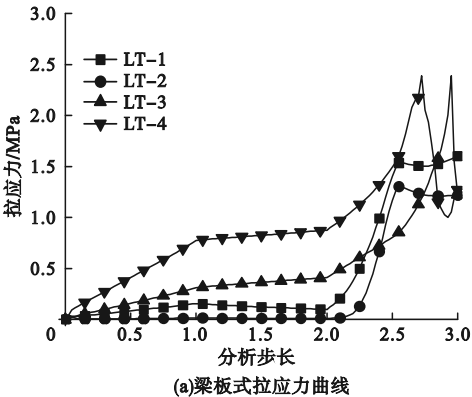
(a)梁板式基础



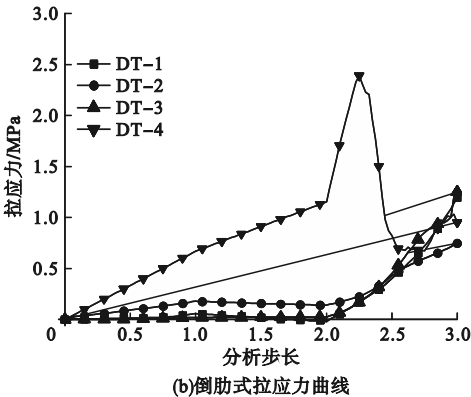
(b)倒肋式基础

图7 混凝土拉力云图

Fig. 7 The tensile stress plots of concrete



(a)梁板式拉应力曲线



(b)倒肋式拉应力曲线

图8 参考点拉应力变化曲线

Fig. 8 Reference point tensile stress change curves

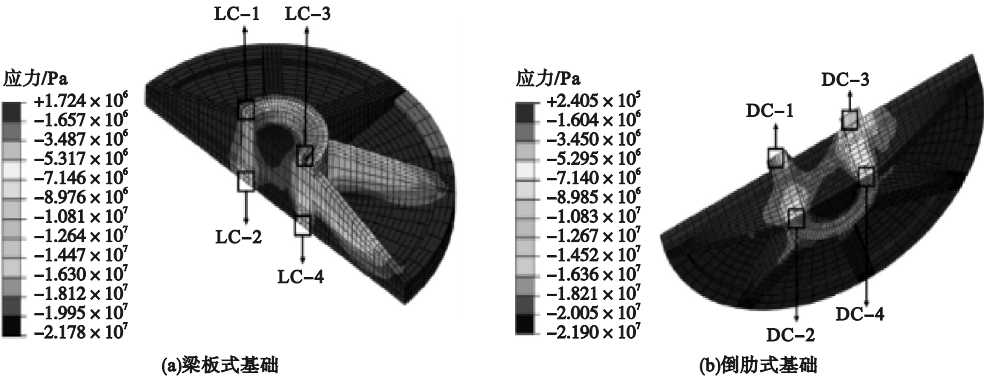


图9 混凝土压应力云图

Fig. 9 The compressive stress plots of concrete

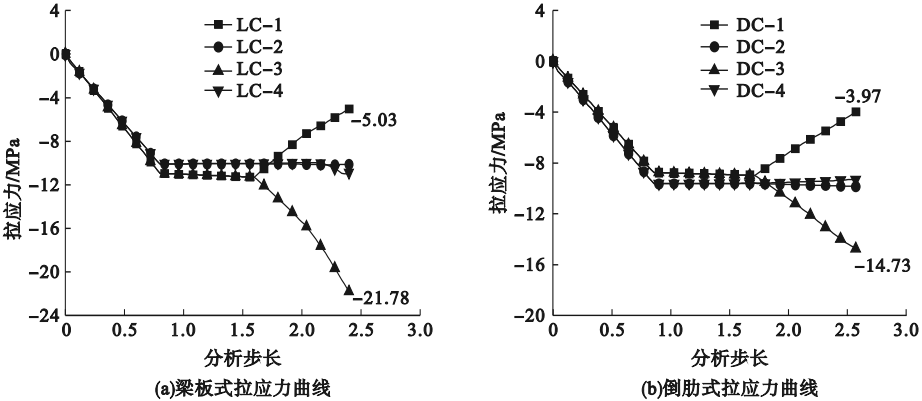


图10 参考点压应力变化曲线

Fig. 10 Reference point compressive stress change curves

由图7和图9可知,两种基础的应力分布情况较为相似,其中拉应力主要分布在基础迎风侧上部以及背风侧下部,压应力主要分布在墩台的上下端。梁板式基础背风侧的底板、肋梁底部以及两者与墩台连接处分布的拉应力最集中;倒肋式基础背风侧的肋梁跨中以及肋梁与墩台连接处分布的拉应力最集中。

由图8可知,梁板式基础的LT-4和LT-3参考点应力先后在2.6s和2.8s时达到最大值2.39MPa,然后急剧下降,说明基础的背风侧底板与墩台连接处混凝土最先开裂,然后底板裂缝沿径向和环向逐渐往外扩展。

由图10可知,两种基础压应力参考点的应力变化趋势较为相似,其中LC-3和DC-3分别为梁板式和倒肋式基础的最大压应力参考点,LC-3应力为21.78MPa,DC-3应力为

14.73MPa,均未达到混凝土轴心抗压强度标准值26.8MPa。

此外,分析两种基础的压应力参考点变化趋势发现,0~1s加载过程中,参考点压应力线性增加并保持一致,说明锚杆成功施加预应力,使墩台上下端处于双向均匀受压状态;1~2s加载过程中,参考点压应力基本保持不变,说明step2中施加的竖向力 F_z 对于基础未产生较大影响;2~3s加载过程中,LC-1和DC-1应力曲线上升以及LC-3和DC-3应力曲线下降,说明step3中施加的水平力 F_{xy} 和弯矩 M_{xy} 使锚板发生倾斜,迎风一侧锚板上升墩台上部压应力减小,而背风一侧锚板下降墩台上部压应力增加,但最终两种基础的四个压应力参考点应力均小于零,说明上下锚板与墩台仍处于紧密贴合状态,

未发生脱开,满足设计规范要求。

3.3 钢筋应力分析

两种基础的钢筋应力分布如图 11 所示。由图可知,两种基础钢筋笼的应力分布情况与混凝土相似。其中梁板式基础的钢筋拉应力由背风侧墩台与底板连接处开始,越靠近基础外缘拉应力越小,并且在基底反力作用下,底板的下层钢筋拉应力较上层钢筋拉应

力更大。说明背风侧底板与墩台连接处在混凝土开裂前,拉应力由混凝土、钢筋两者协同承担,待混凝土开裂后拉应力完全由钢筋承担,导致钢筋拉应力骤增。随着弯矩增加,基底反力变大,底板裂缝进一步沿径向逐渐向外扩展,导致外侧径向钢筋拉应力增加,因此越靠近墩台的底板钢筋拉应力越大,最大拉应力达 216.6 MPa。

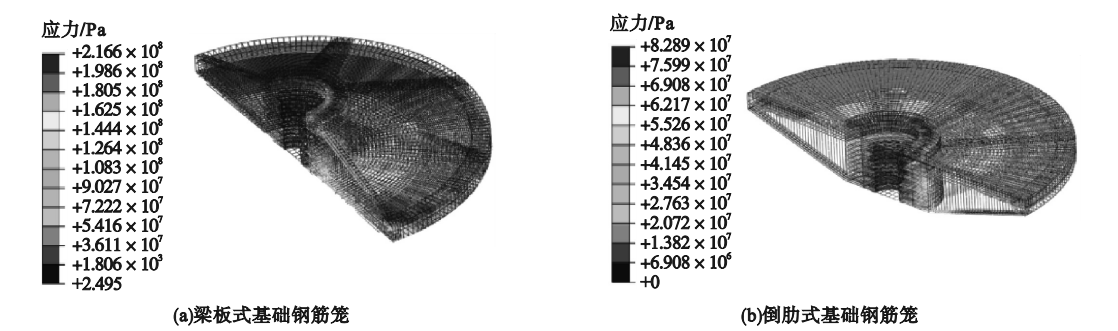


图 11 钢筋应力云图

Fig. 11 The tensile stress plots of reinforcement

3.4 地基压力分析

梁板式风机地基与倒肋式风机地基的压力云图如图 12 所示。从图中可知,梁板式基础的地基压力最大值为 650 kPa,倒肋式基础的地基压力为 927 kPa,均小于地基承载力特征值 1 400 kPa,满足设计规范要求。两种基

础相比,倒肋式基础的地基压力明显大于梁板式基础,分析原因为倒肋式基础底部肋梁凸起,地基呈凹槽形,荷载作用下地基肋梁凹槽中容易产生应力集中现象,因此地基压应力较大。

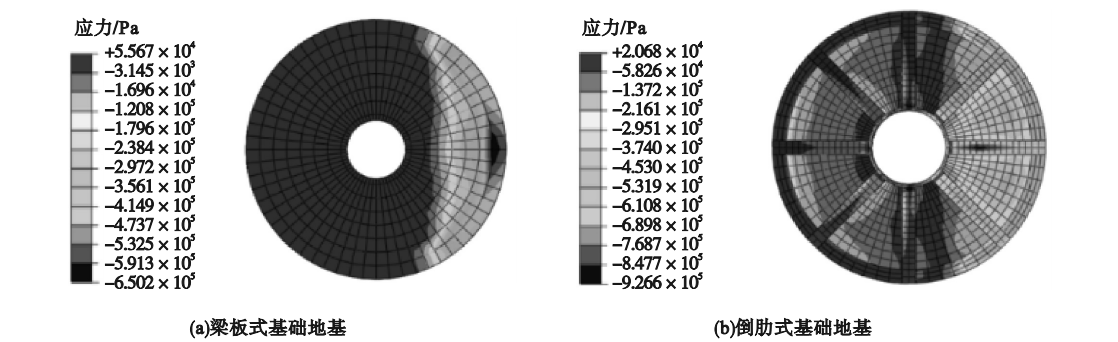


图 12 地基压力云图

Fig. 12 Foundation pressure plots

3.5 锚板应力分析

梁板式风机基础的锚板与倒肋式风机基础的锚板应力云图如图 13 所示。从图中可知,梁板式基础的上下锚板拉应力最大值为 94.16 MPa,压应力最大值为 140.6 MPa;倒

肋式基础的上下锚板的拉应力最大值为 100.2 MPa,压应力最大值为 133.4 MPa。两者应力远小于 Q235 钢材屈服强度 235 MPa,满足要求。

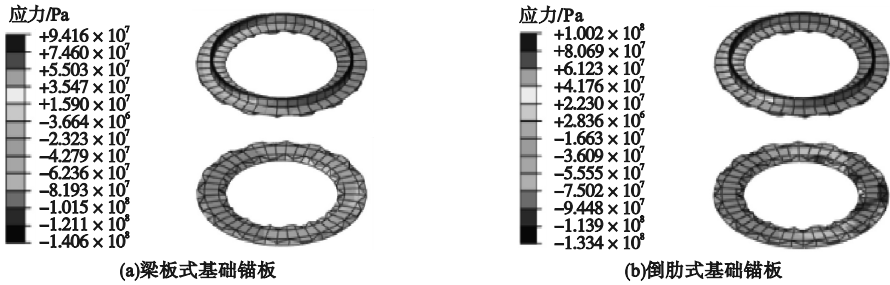


图 13 锚板应力云图

Fig. 13 The stress plots of anchor plate

综合以上分析可知,两种基础在水平荷载和弯矩作用下产生倾斜,基础迎风侧上倾背风侧下沉,背风侧在下沉的过程中受到地基的限制,产生向上弯曲,导致板和肋梁产生底部受拉破坏。墩台与板、肋梁连接处近似为固定端支座,受到的剪力及弯矩最大,最先发生破坏,然后破坏进一步沿径向及环向往墩台外侧扩展。对于悬臂梁和悬臂板结构,位于横截面下部的混凝土承受的拉应力更大,因此在基底反力作用下,梁板式基础的底板破坏较严重,倒肋式基础的肋梁破坏较严重,将两者对比可知,倒肋式基础的开裂破坏情况明显小于梁板式基础,受力性能更好。针对倒肋式基础的肋梁破坏,可通过增加肋梁的截面高度来提高其抗剪和抗弯强度。

4 经济性分析

考虑基础埋深较大,取放坡系数为 1:0.5,工作面半径 300 mm,以 2.5 MW 陆上风机为例,计算两种基础的挖方量,并根据基础混凝土与模板的接触面积计算两种基础的模板工程量,结果见表 3。

表 3 经济性对比

Table 3 Economy comparison table

基础类型	挖方量/m ³	模板工程量/m ²
梁板式	1 130	569
倒肋式	634	355

由表 3 可知,倒肋式基础相较于梁板式基础,挖方量可节省约 54%、模板工程量可

节省约 48%。由此可见,倒肋式基础将整个梁板式基础倒置,在土方开挖时,无需开挖肋梁、环梁、墩台三者之间的多余岩体,只需将地基中环梁、肋梁对应位置处的岩体按照基槽方式开挖即可,不仅大大减少了岩体的开挖量,降低了开挖难度,而且不用支设模板,在基坑内直接布设钢筋笼,浇筑混凝土即可,减少了模板定制、运输、施工等费用,相较于梁板式基础具有显著的经济性优势。

5 结 论

(1)倒肋式基础充分利用了倒置肋梁与软岩地基之间的齿槽形嵌固优势,在极限荷载作用下基础水平位移为 0.444 mm,倾斜率为 0.012 1%,在满足规范要求的同时,具有更好的抗滑移稳定性。

(2)倒肋式基础的肋梁受力特征与悬臂梁相似,在基底反力作用下肋梁与墩台连接处受到的剪力及弯矩最大,容易开裂破坏,但与梁板式基础相比,倒肋式基础的肋梁、顶板的破坏程度及破坏面积更小,安全储备更高,受力性能更好。

(3)采用倒肋式基础相较于梁板式基础节省了土方挖方量和模板工程量,显著降低了基础施工难度和成本,经济效益显著。

参考文献

[1] 李吴璋,刘莘元,王锦鸿,等.我国风电产业的发展现状分析及未来展望[J].机电信息,2020(21):91-94.
(LI Haozhang, LIU Pingyuan, WANG Jinhong, et al. Analysis of the development status quo

- and future prospects of China's wind power industry [J]. Mechanical and electrical information, 2020(21): 91 - 94.)
- [2] ARSHA D M, BRENDAN O. Global status of wind power generation: theory, practice, and challenges [J]. International journal of green energy, 2019, 16(14): 1073 - 1090.
- [3] FENG Y, LIN H, HO S L, et al. Overview of wind power generation in China: status and development [J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2015, 50: 847 - 858.
- [4] 纪志国. 我国风电产业现状与发展趋势探究 [J]. 中国设备工程, 2020(18): 217 - 218.
(JI Zhiguo. Research on the current situation and development trend of my country's wind power industry [J]. China equipment engineering, 2020(18): 217 - 218.)
- [5] 张林杰. 重力式风机基础的受特点和优化设计研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
(ZHANG Linjie. Study on force mechanism and stress distribution characteristics of gravity wind turbine foundation [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.)
- [6] 李硕. 高原型风机新型梁板式预应力锚栓基础应用[J]. 云南水力发电, 2021, 37(11): 120 - 123.
(LI Shuo. Application of new beam-plate prestressed anchor bolt foundation for high altitude fan [J]. Yunnan hydropower, 2021, 37(11): 120 - 123.)
- [7] 王利楠, 郝华庚, 丛欧, 等. 半预制半现浇混凝土风机基础的受力分析[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1719 - 1726.
(WANG Li'nan, HAO Huageng, CONG Ou, et al. Force analysis of a semi prefabricated fan base [J]. Renewable energy, 2017, 35(11): 1719 - 1726.)
- [8] 冯天骏. 一种梁板式风机基础的优化设计方法[J]. 水电站设计, 2018, 34(1): 31 - 35.
(FENG Tianjun. An optimization design method for the foundation of beam-slab fan [J]. Hydropower station design, 2018, 34(1): 31 - 35.)
- [9] 国家能源局. 陆上风电场工程风电机组基础设计规范: NBT10311—2019 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
(National Energy Administration. Code for design of wind turbine foundations for onshore wind power projects: NBT10311—2019 [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2019.)
- [10] CHEN Junling, XU Yiqing, LI Jinwei. Numerical investigation of the strengthening method by circumferential prestressing to improve the fatigue life of embedded-ring concrete foundation for onshore wind turbine tower [J]. Energies, 2020, 13(3): 533.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011.)
- [12] 陆征然, 马梦梦, 郭超. 陆上风机基础混凝土的可靠度分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(6): 1031 - 1039.
(LU Zhengran, MA Mengmeng, GUO Chao. Reliability analysis of wind turbine foundation concrete on land [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(6): 1031 - 1039.)
- [13] PHAM H V, DIAS D, MIRANDA T, et al. 3D numerical modeling of foundation solutions for wind turbines [J]. International journal of geomechanics, 2018, 18(12): 1 - 14.
- [14] 祝卫军, 卢亦焱, 梁鸿骏. 风机分层基础有限元分析与加固方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2889 - 2895.
(ZHU Weijun, LU Yiyan, LIANG Hongjun. Finite element analysis and reinforcement method of wind turbine foundation with stratification [J]. Science technology and engineering, 2021, 21(7): 2889 - 2895.)
- [15] 贾博尧. 风机基础法兰尺寸与埋深的优化研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.
(JIA Boyao. Research on optimization of flange size and buried depth of fan foundation [D]. Shenyang: Shenyang jianzhu University, 2021.)
- [16] AMIN M, BAYAT M, BAHRAM N. Analyzing the effects of soil-structure interactions on the static response of onshore wind turbine foundations using finite element method [J]. Civil engineering infrastructures journal, 2020, 53(1): 189 - 205.
- [17] WAEL M, AUSTRELL P. A comparative study of three onshore wind turbine foundation solutions [J]. Computers and geotechnics, 2018, 94: 46 - 57.
- [18] QIAN J G, MU L L, ZHANG Y J, et al. Behavior of a structured piled beam - slab foundation for a wind turbine under multidirectional loads in sand [J]. International journal of geomechanics, 2021, 21(3): 04020267.
- [19] 刘庆阳, 褚洪民, 张亚林. 风机基础预应力锚栓数值仿真分析[C]//《工业建筑》2018年全国学术年会论文集(下册). 北京: 工业建筑杂志社, 2018.
(LIU Qingyang, CHU Hongmin, ZHANG Yalin. Numerical simulation analysis of fan foundation prestressed anchor bolts [C]// Industrial architecture, 2018, national academic annual conference proceedings. Beijing: Industrial Construction Press, 2018.)
- [20] 曾斌. 复合加载模式下陆上风机扩展基础结构试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
(ZENG Bin. Experimental study on spread foundation structure for onshore wind turbine in composite loading mode [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)