

# 新型锚索倒肋式风机基础力学性能研究

海 洪,高宇飞,张延年

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 提出一种新型锚索倒肋式风机基础,已解决现有陆上风机基础尺寸大、材料用量多、挖方量大等缺点。方法 以 2.5 MW 风机为研究对象,采用 ABAQUS 有限元分析软件,建立锚索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、局部破坏等情况,并结合材料用量、挖方量对两种基础的经济性进行评价。结果 锚索倒肋式基础的水平位移为 4.56 mm、脱开率为 19%、倾斜率为 0.287%、沉降量为 18.29 mm,均满足规范要求;锚索倒肋式基础背风侧肋梁与墩台连接处及肋梁跨中底部发生轻微开裂,可通过增加肋梁截面高度解决;锚索未出现受拉屈服,埋设周围混凝土未发生局部破坏;锚索倒肋式基础比梁板式基础成本节省 40%~60%。结论 锚索倒肋式基础结构设计合理,其抗倾覆稳定性、受力性能、经济性比梁板式基础更加优异,可应用于实际工程。

**关键词** 锚索倒肋式风机基础;梁板式风机基础;有限元分析;倾斜率;局部破坏

中图分类号 TU476

文献标志码 A

## Study on Mechanical Properties of a New Type of Anchor Cable Inverted Beam Plate Fan Foundation

HAI Hong, GAO Yufei, ZHANG Yannian

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

**Abstract:** In order to solve the disadvantages of large foundation size, large amount of material and large amount of excavation of the current onshore wind turbine, a new type of anchor cable inverted beam plate fan foundation was invented. Taking the 2.5 MW wind turbine as an example, the ABAQUS finite element analysis software is used to establish the foundation model of the anchor cable inverted beam plate fan foundation and the beam slab fan foundation. Then, the inclination rate, and local damage of the two foundations under extreme load conditions were compared, and the economics of the two foundations were compared in combination with the material consumption, the amount of earthwork excavation and other indicators. The horizontal displacement of the anchor cable inverted beam plate fan foundation is 4.56 mm, the detachment

收稿日期:2022-03-29

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。

rate is 19% ,the inclination rate is 0.287% ,and the settlement is 18.29 mm ,all of which meet the requirements of the design specification. Slight cracking occurs at the connection between the leeward side rib beam and the pier abutment and the mid-span bottom of the rib beam in the anchor cable inverted beam plate fan foundation ,which can be solved by increasing the section height of the rib beam. The anchor cable does not yield under tension ,and there is no local damage to the surrounding concrete. The anchor cable inverted beam plate fan foundation saves about 40% -60% of the cost compared to the beam slab fan foundation. The design of the anchor cable inverted beam plate fan foundation structure is reasonable ,and its anti-overturning stability ,mechanical performance and economy are better than that of the beam-slab foundation ,which can be applied to practical projects.

**Key words:** anchor cable inverted beam plate fan foundation ; beam slab fan foundation ; finite element analysis ; inclination rate of the fan foundation ; local damage

受能源危机以及环境恶化等因素影响,风能作为一种节能环保能源备受关注。与其他能源的开发利用相比,风力发电具有投入成本低、建设周期短、商业发展潜力大等优点,成为各国能源发展战略中的重要选择之一<sup>[1-2]</sup>。风机基础作为风机结构的重要组成部分,其设计施工的安全性以及经济性,不仅关系风机的正常运行,而且影响风机的投资效益,因此一直是风电产业发展中的重点研究对象<sup>[3-4]</sup>。

为满足当前大功率风机的受力要求,传统梁板式、重力式、岩石锚杆式等类型风机基础的尺寸不断增加,导致基础的材料用量和土方开挖量逐渐提高,基础经济性下降<sup>[5-7]</sup>。为此,如何在保证风机基础安全性与稳定性的前提下,最大程度上减小基础尺寸、优化结构、降低成本是目前急需解决的问题。笔者提出一种新型锚索倒肋式风机基础,利用ABAQUS 软件建立梁板式与锚索倒肋式基础的三维模型,将两种基础在极端荷载工况下的位移、倾斜率、应力、损伤等计算结果进行对比,对锚索倒肋式基础的抗倾覆稳定性、抗滑移稳定性、局部破坏等情况进行分析。研究表明,锚索倒肋式风机基础可以充分利用倒置肋梁与锚索相结合的结构优势,不仅提高了基础的抗倾覆能力,而且减小了基础尺寸和土方开挖量,大大降低了成本。

1 工程背景

辽宁省某风电场采用单机容量 2.5 MW 风机 20 台,风机轮毂高度为 95 m,场内原状黏土层地质条件良好,满足地基承载力要求,风机基础均采用梁板式基础。笔者参考《陆上风电场工程风电场风电机组基础设计规范》(NB/T 10311—2019)进行锚索倒肋式基础设计<sup>[8]</sup>,并与该项目梁板式基础进行对比。两种基础主要由墩台、肋梁、环梁、板等构件组成,考虑锚索倒肋式基础利用锚索抵抗倾覆,无需较大的悬挑尺寸,因此设计肋梁长度为 3 m,高度为 3.6 m,满足最小高跨比 1/6。基础参数如图 1 所示。

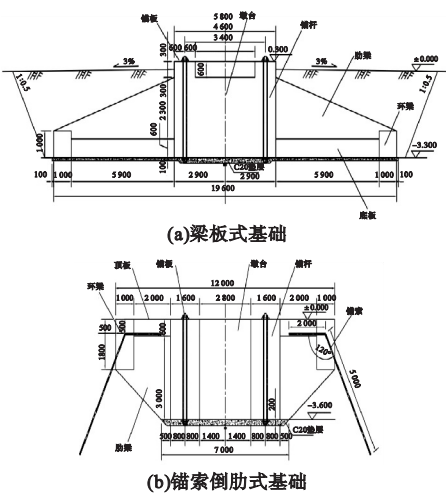


图 1 基础剖面图

Fig. 1 The cross-sectional view of foundation

2 有限元模型建立

2.1 本构模型及材料参数

模型中混凝土采用塑性损伤本构模型,根据《混凝土结构设计规范》(GB5001—2010)<sup>[9]</sup>计算其本构关系曲线如图2所示。由于锚杆、锚索、锚板、钢筋的材料均为钢材,因此采用理想弹塑性本构模型<sup>[10]</sup>,其本构关系曲线如图3所示。地基采用摩尔—库伦本构模型<sup>[11]</sup>。各材料具体参数见表1。

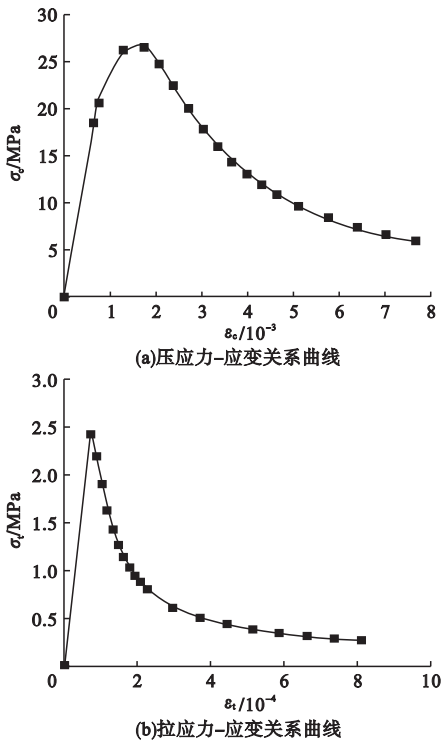


图2 混凝土塑性损伤本构关系曲线  
Fig. 2 Stress-strain curves of CDP

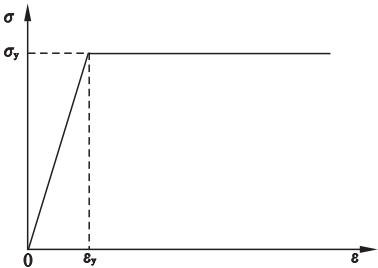


图3 钢材本构关系曲线  
Fig. 3 Stress-strain curve of steel

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比
混凝土(C40)	2 500	32.5	0.2
钢筋(HRB335)	7 800	200	0.3
锚杆、锚板	7 800	200	0.3
锚索	7 800	196	0.3
地基	2 400	0.04	0.25

2.2 单元类型及网格划分

模型中混凝土、锚板、地基均采用C3D8R单元,钢筋、锚杆、锚索采用T3D2单元<sup>[12]</sup>,其中混凝土和锚板单元长度为300 mm,钢筋单元长度为150 mm,地基单元长度为600 mm。针对C3D8R单元采用六面体扫掠划分技术,经多次划分修改后模型各部分网格呈环向对齐分布<sup>[13]</sup>。有限元模型如图4所示。

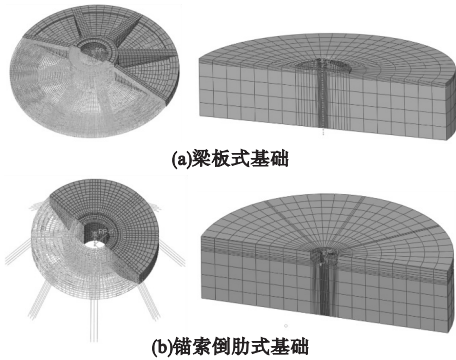


图4 有限元模型

Fig. 4 FEM models of foundations

2.3 边界条件及加载方式

在地基底面和侧面施加三向固定约束,还原地基固结状态。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,因此在三者之间采用通用接触,其中切向采用“罚”摩擦,摩擦系数为0.35,法相采用硬接触<sup>[14]</sup>。钢筋、锚杆、锚索直接内置到整个模型中,同时将锚杆两端分别与上下锚板绑定,并通过降温法施加预应力<sup>[15]</sup>。

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、水平力以及外力偶,并通过与基础上锚板运

动耦合的参考点施加<sup>[16]</sup>,其中梁板式基础的加载方式如图5所示。各工况荷载设计值见表2。

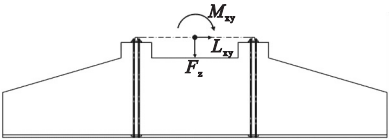


图5 梁板式基础加载方式

Fig. 5 Loading method of beam slab fan foundation

表2 荷载设计值

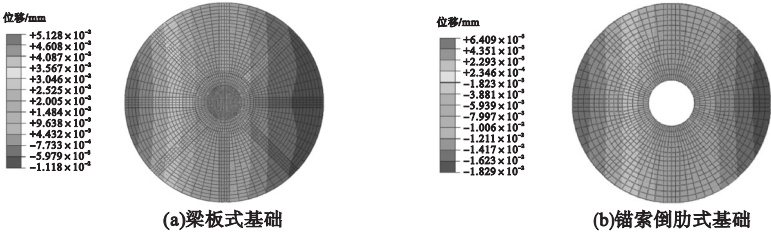
Table 2 Load standard values

工况	竖向力 $F_z$ / kN	外力偶 $M_{xy}$ / (kN·m)	水平力 $F_{xy}$ /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 结构稳定性分析

风机基础的竖向位移、水平位移、倾斜



(a)梁板式基础

(b)锚索倒肋式基础

图6 竖向位移云图

Fig. 6 Vertical displacement plots of foundation

3.1.2 水平位移及倾斜率

为研究基础水平位移及倾斜率在加载过程中的变化趋势,采用0.1~1倍的荷载加载方式,对 $F_z$ - $M_{xy}$ - $F_{xy}$ 荷载进行同步逐级加载,并选取基础上表面圆心作为参考点,绘制基

础的水平位移变化曲线如图7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,绘制基础的倾斜率变化曲线如图8所示。

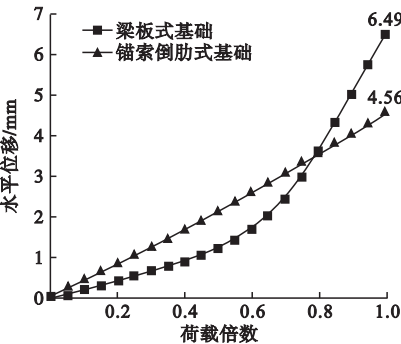


图7 水平位移变化曲线

Fig. 7 Variation curves of horizontal displacement with loading

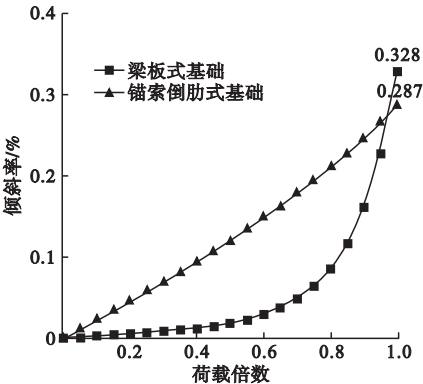


图8 倾斜率变化曲线

Fig. 8 Change curves of slope rate with load

分析图7和图8可知,锚索倒肋式基础的水平位移为4.56 mm,倾斜率为0.287%,均小于梁板式基础的水平位移6.49 mm,倾斜率0.328%。此外,观察两种基础的水平位移及倾斜率变化曲线的增长趋势发现,锚索倒肋式基础的水平位移和倾斜率随加载等级呈线性增长,梁板式基础呈非线性增长,析原因为锚索倒肋式基础在加载过程中水平段锚索抵抗水平力,倾斜段锚索抵抗倾覆弯矩,基底脱开率较小,地基摩阻力大,锚索未受拉屈服;而梁板式基础加载后期背风侧基底反力增大底板向上弯曲开裂,迎风侧底板翘起脱开面积增大,摩阻力减小,因此水平位移以及倾斜率增长速度逐渐提高。由此可见,锚索倒肋式基础的抗滑移和抗倾覆稳定性明显优于梁板式基础。

3.1.3 脱开率

极端荷载工况下,两种基础的底部脱开

情况如图9所示。从图中可以得出,锚索倒肋式基础的脱开率约为19%,小于梁板式基础的脱开率24%,并且小于25%,满足设计规范要求。此外,两种基础的底面脱开形状不同,锚索倒肋式基础的脱开形状为扇形,梁板式基础的脱开形状为月牙形,分析原因为锚索倒肋式基础在肋梁中布设有锚索,基础迎风侧在翘起时受到多个方向上锚索的限制,随着荷载增大迎风侧边缘锚索应力应变增加,基础与地基最先脱开,而其他位置锚索受力较小,肋梁及顶板仍未脱开,因此脱开形状为扇形;梁板式基础迎风侧顶板在翘起过程中不受限制,由于混凝土较土体刚度更大,因此基础背风侧地基产生压缩变形,脱开界线近似为直线,脱开形状为月牙形。由此可见,锚索有效提高了锚索倒肋式基础的抗脱开性能。

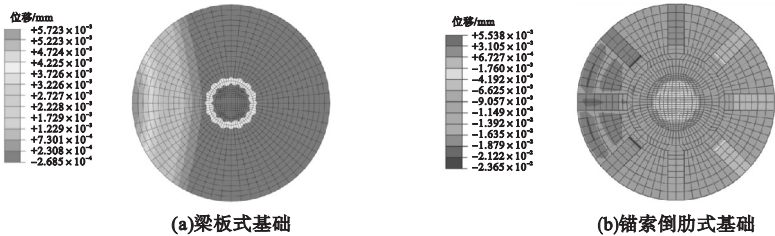


图9 基底脱开云图

Fig.9 Detachment diagrams of the foundation

3.2 混凝土受力分析

风机基础在荷载作用下,呈现为迎风一侧受拉背风一侧受压,而混凝土作为基础的重要组成部分,其抗压性能较好,抗拉性能较差,因此在受力过程中容易产生受拉破坏,对基础受力性能产生影响,需重点分析研究。

3.2.1 混凝土应力

极端荷载工况下,两种基础的应力分布情况如图10和图11所示。分析可知,锚索倒肋式基础的拉应力主要分布在背风侧肋梁底部以及迎风侧顶板与墩台连接处,其中混凝土最大拉应力为2.35 MPa,位于背风侧肋梁跨中底部;梁板式基础的拉应力主要分布在背风侧底板与墩台连接处以及迎风侧肋梁

上部与墩台连接处,其中混凝土最大拉应力为2.39 MPa,位于背风侧底板与墩台连接

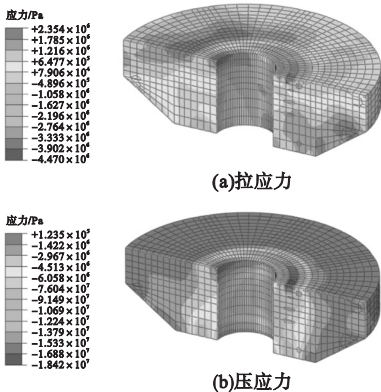


图10 锚索倒肋式基础混凝土应力云图

Fig.10 The tensile and compressive stress plots of anchor cable inverted beam plate fan foundation



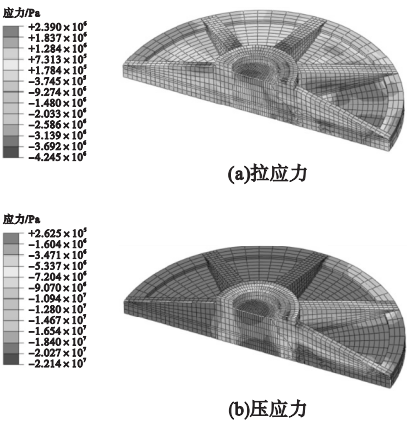


图 11 梁板式基础混凝土应力云图

Fig. 11 The tensile and compressive stress plots of beam slab fan foundation

处。两种基础的压应力主要分布在墩台上下端与锚板接触位置,并且混凝土最大压应力均位于背风侧墩台上端。其中锚索倒肋式基础混凝土最大压应力为 18.42 MPa,梁板式基础混凝土最大压应力为 22.14 MPa。由此可见,锚索倒肋式基础混凝土的应力分布比梁板式基础更加均匀。

3.2.2 混凝土损伤

极端荷载工况下,两种基础混凝土的损伤分布情况如图 12、图 13 所示,将其分别与图 10、图 11 对照可知,两种基础混凝土的最大拉应力均已超过 C40 混凝土轴心抗拉强度标准值 2.39 MPa,发生开裂破坏。其中锚索倒肋式基础的受拉破坏由背风侧肋梁与墩台连接处开始沿竖向扩展以及由背风侧肋梁底部跨中开始向两侧扩展,混凝土最大受拉损伤因子为 0.86;梁板式基础的受拉破坏由背风侧墩台下部与底板连接处开始,沿径向往基础外侧扩展,底板开裂形状为多层圆弧,混凝土最大受拉损伤因子为 0.9。两种基础混凝土的最大压应力均未超过 C40 混凝土轴心抗压强度标准值 26.8 MPa。两种基础的受压损伤主要分布在背风侧墩台底部,锚索倒肋式基础的最大受压损伤因子为 0.12,梁板式基础的最大受压损伤因子为 0.23。由此可见,锚索倒肋式基础混凝土受拉和受压的破坏程度以及破坏面积明显小于梁板式基础。

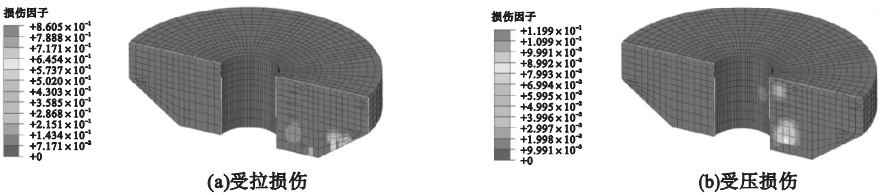


图 12 锚索倒肋式混凝土损伤云图

Fig. 12 Plots of tension and compression damage of anchor cable inverted beam plate fan foundation

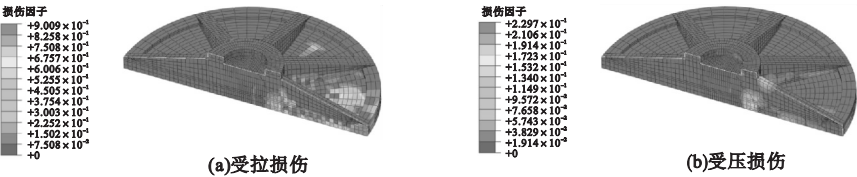


图 13 梁板式基础混凝土损伤云图

Fig. 13 Plots of tension and compression damage of beam slab fan foundation

3.3 钢筋、锚索应力分析

极端荷载工况下,两种基础的钢筋应力分布情况如图 14 所示。从图中可以得出,锚索倒肋式基础背风侧的肋梁底部纵筋以及迎风侧的顶板上部环向钢筋、径向钢筋受拉较为明显,其中最大拉应力为 67.27 MPa,位于

背风侧肋梁底部纵筋跨中位置处;梁板式基础背风侧底板的环向钢筋、径向钢筋以及迎风侧肋梁上部纵筋受拉较为明显,其中最大拉应力为 262.3 MPa,位于背风侧底板径向钢筋与墩台搭接处。可见两种基础的钢筋最大拉应力远小于 HRB335 钢筋的屈服强度标

准值335 MPa,没有屈服风险,但锚索倒肋式基础钢筋的最大拉应力明显小于梁板式基础钢筋,说明锚索倒肋式基础钢筋比梁板式基础钢筋具有更多的安全储备。锚索倒肋式基础的锚索应力分布情况如图 15 所示,分析可知,锚索拉应力在迎风侧肋梁与地基接触位置处较为集中,最大拉应力为 1 568 MPa,小于锚索屈服强度标准值 1 650 MPa,并且对照图 10 和图 12 可知,锚索埋设周围混凝土应力分布均匀未出现应力集中以及局部受拉破坏,说明锚索与混凝土锚固良好,协同受力,满足要求。

解决。而梁板式基础在发生倾斜时不受约束,基础底部产生的反力较大,肋梁和底板的一端与墩台固定,另一端悬挑,在基底反力作用下,肋梁和底板与墩台连接位置处的剪力和弯矩较大,因此破坏更严重。另一方面,锚索倒肋式基础的肋梁与顶板结合,可近似为 T 形截面梁,使肋梁截面有效高度增加,抗剪和抗弯强度提高。而梁板式基础的底板位于肋梁下部,不仅受到的剪力及弯矩更大,而且厚度较小,因此更容易产生破坏。

4 经济性分析

笔者以 2.5 MW 陆上风机为例,将风电场中采用的梁板式基础与新型锚索倒肋式基础进行经济性对比,结果见表 3。

表 3 经济性对比

Table 3 Economy comparison table					
基础类型	直径/ m	埋深/ m	混凝土 用量/ m <sup>3</sup>	钢筋 质量/ t	挖方量/ m <sup>3</sup>
梁板式基础	19.6	3.3	380.22	48.66	1130.0
锚索倒肋式基础	12.0	3.6	191.25	34.93	330.92

由表 3 可知,锚索倒肋式基础相较于梁板式基础成本可节省 40% ~ 60%,大大减少了基础的材料用量以及基坑开挖难度。由此可见,锚索倒肋式基础与梁板式基础相比更具有经济性优势。

5 结 论

(1)锚索倒肋式基础在极端荷载工况下的水平位移为 4.56 mm、脱开率为 19%、斜率为 0.287%,沉降量为 18.29 mm,均满足设计规范要求,并且比梁板式基础具有更好的抗滑移和抗倾覆稳定性。

(2)锚索倒肋式基础受力性能优于梁板式基础,仅在背风侧墩台与肋梁连接处及肋梁跨中底部发生轻微开裂,可通过增加肋梁截面高度改善。

(3)锚索倒肋式基础的内部锚索与混凝

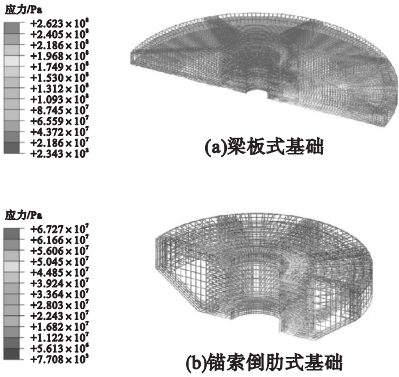


图 14 钢筋应力云图

Fig. 14 The tensile stress plots of reinforcement

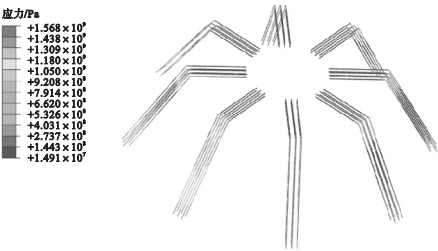


图 15 锚索应力云图

Fig. 15 Plot of tension and compression damage of anchor cable inverted beam plate fan foundation

综上所述,锚索倒肋式基础的受力性能明显优于梁板式基础,一方面,锚索倒肋式基础在发生倾斜时受到锚索约束,基础底部产生的反力较小。肋梁的一端与墩台固定,另一端埋设锚索,在基底反力作用下,肋梁两端产生的剪力以及跨中产生的弯矩较小,因此破坏较轻,并且可通过增加肋梁的截面高度

土锚固良好,协同受力,未产生受拉屈服,而且埋设周围混凝土应力分布均匀,未出现应力集中及局部破坏现象。

(4)以2.5 MW 陆上风机为例,采用锚索倒肋式基础可比梁板式基础成本节省40%~60%,具有显著的经济性优势。

## 参考文献

- [1] 李昊璋,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] MUHAMMAD A, BRENDAN O. Global status of wind power generation: theory, practice, and challenges [J]. International journal of green energy, 2019, 16(14): 1073-1090.
- [3] 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.)
- [4] 张国辉.风机基础的优选及经济性比较分析[J].建筑与预算,2021(12):5-7.  
(ZHANG Guohui. Optimization and economic comparative analysis of fan foundation [J]. Architecture and budget, 2021(12): 5-7.)
- [5] WAEL M, PER-ERIK A. A comparative study of three onshore wind turbine foundation solutions [J]. Computers and geotechnics, 2018, 94: 46-57.
- [6] 段波,桂重.圆形重力式风机基础基底压力计算方法研究[J].山西建筑,2018,44(36):67-68.  
(DUAN Bo, GUI Zhong. Research on calculation method of foundation pressure of circular gravity foundation for wind turbines [J]. Shanxi architecture, 2018, 44(36): 67-68.)
- [7] 廖杰洪,谭星舟,陈明祥,等.自锁锚杆在风机基础改造中的应用研究[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(增刊1):274-277.  
(LIAO Jiehong, TAN Xingzhou, CHEN Mingxiang, et al. Research on the application of self-locking anchor in the improvement of wind turbine generator tower foundation [J]. Journal of Wuhan university (engineering science), 2020, 53(S1): 274-277.)
- [8] 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: NBT 10311—2019 [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2019.)
- [9] 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 Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011.)
- [10] AMIN M, MEYSAM B, 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.
- [11] 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.
- [12] 阎石,宋壁丞,孙威,等.风力发电机岩石锚杆基础静力弹塑性分析与应力状态监测[J].工程力学,2014,31(增刊1):36-40.  
(YAN Shi, SONG Bicheng, SUN Wei, et al. Pushover analysis on rock anchor foundation for wind turbo-generator and stress state monitoring [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(S1): 36-40.)
- [13] 刘宜松.风机基础混凝土损伤对基础环偏移量的影响研究[D].长沙:长沙理工大学,2020.  
(LIU Yisong. Research on the influence of wind turbine foundation concrete damage on foundation ring offset [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2020.)
- [14] GUO Y H, ZHANG P Y, DING H Y, et al. Design and verification of the loading system and boundary conditions for wind turbine foundation model experiment [J]. Renewable energy, 2021, 172: 16-33.
- [15] 张鹏程,陈杨.基于初始应力法的预应力结构的有限元分析[J].山西建筑,2020,46(20):64-66.  
(ZHANG Pengcheng, CHEN Yang. Finite element analysis of prestressed structure based on initial stress method [J]. Shanxi architecture, 2020, 46(20): 64-66.)
- [16] CHEN J L, XU Y Q, LI J W. 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.  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)