

引用格式: 李宇翔, 吴强, 马桑, 等. 环形均布荷载作用下风机基础竖向应力规律研究 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(增刊 1): 127-134. LI Yuxiang, WU Qiang, MA Shen, et al. Research on vertical stress law of fan foundation under annular uniform load [J]. Southern energy construction, 2024, 11(Suppl. 1): 127-134. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.S1.20.

环形均布荷载作用下风机基础竖向应力规律研究

李宇翔[✉], 吴强, 马桑, 马俊, 徐皇冈
(湖南三一智慧新能源设计有限公司, 湖南长沙 415000)

摘要: [目的] 采用预应力锚栓式连接设计的风机基础为目前的主流设计。预应力锚栓连接基础的受力特征为一种环形荷载的力学特征。在这种力学特征下没有详细的分析资料可以参考, 设计人员往往借助有限元分析来分析此处的结构安全性, 但花费时间较长。为了能够快速计算基础核心区的应力数值。[方法] 文章根据摩尔库伦理论和弹性力学理论, 推导了一套适用风机基础核心区设计的竖向应力计算公式, 并与精细化有限元分析结果对比验证。[结果] 对比结果表明, 文章推导的公式具有良好的准确性及可靠性。[结论] 提出的推导公式, 可以作为风机基础配筋设计的依据, 为工程设计所参考。

关键词: 陆上风电机组; 基础配筋; 优化设计

中图分类号: TK89; TU470

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)S1-0127-08

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.S1.20

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Research on Vertical Stress Law of Fan Foundation Under Annular Uniform Load

LI Yuxiang[✉], WU Qiang, MA Shen, MA Jun, XU Huanggang
(Hunan Sany Smart New Energy Design Co. Ltd., Changsha 415000, Hunan, China)

Abstract: [Objective] The fan foundation with prestressed anchor bolt type connection design is the mainstream design at present. The mechanical characteristic of the foundation connected by prestressed anchor bolt is a kind of circular load. There is no detailed analysis data to refer to under such mechanical characteristics. The designers often rely on finite element analysis to analyze the structural safety here, but it takes a longer time. This paper aims to quickly calculate the stress value of the core region of the foundation [Method] Based on the Mohr-Coulomb theory and elastic mechanics theory, a set of vertical stress calculation formula suitable for the design of the core area of fan foundation was derived in this paper, and compared and verified with the fine finite element analysis results. [Results] Comparative results indicate that the formulas derived in this paper demonstrate good accuracy and reliability. [Conclusion] The derived formula presented in this paper can be used as the basis of fan foundation reinforcement design and reference for engineering design.

Key words: onshore wind turbine; foundation reinforcement; optimization design

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

采用预应力锚栓式连接的风力发电机组的基础 (以下简称“风机基础”), 通过在预应力锚栓施加预

应力, 来产生足够的压应力抵抗风力发电机组传递给基础的弯矩而产生的拉应力。这种传力形式, 形成了一种圆环形均布荷载的力学特点。针对这种形式, 目前主流的设计规范^[1-3]未给出相应的设计方法。

收稿日期: 2024-03-21 修回日期: 2024-04-18

基金项目: 湖南三一智慧新能源设计有限公司企业科技项目“大容量风机基础非线性计算分析研究项目”(2012874)

由于风电行业的快速发展,许多学者开展了对风机基础的研究,包括根据《混凝土结构设计规范》中的局压设计公式,给出了风机基础锚板下混凝土的配筋设计方法、利用有限元分析法对风机基础进行了力学特征分析,揭示了风机基础的力学分布特点、利用有限元分析法证明基础锚栓锚板压的受力特征符合局压受力特征等结论^[4-16]。但都未对基础应力提出一种解析解或近似解。

根据目前研究成果^[17-19],研究学者对圆形或矩形范围内中心点以下的竖向附加应力解析解进行了推导论证。而对于风机基础这种圆环形受力范围内,圆环宽度中线以下的附加应力解析解研究较少。为此文章给出一个求解思路,并通过有限元分析软件进行验证,论证了该思路的可靠性。为风机基础核心区设计提供了一条思路。

1 风机基础核心区竖向应力分布规律公式

混凝土局压理论^[20-22]认为,混凝土在承受局部受压荷载的过程中,随着外荷载的增加,核心受压混凝土逐步形成由剪切破坏形成的楔形体,进一步的产生了劈裂力,导致构件的破坏。在楔形体区域以外的弹性体区域,主要受力形式为压应力及压应力产生劈裂力。

基于上述理论,基础在锚栓锚板的作用下,可以认为是局压破坏形式,受力机理如图 1 所示。

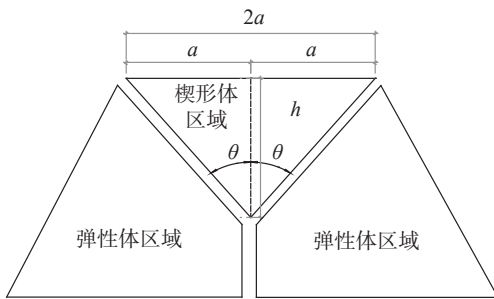


图 1 混凝土局压强度计算模型

Fig. 1 Calculation model of local compressive strength of concrete

1.1 楔形体区域的范围计算

在临近破坏阶段,楔形体的破坏机理为剪切破坏,适用摩尔库伦强度准则。有:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c \cos \varphi + \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi}{2} \quad (1)$$

式中:

σ_1 ——基础混凝土第一主应力(MPa);

σ_3 ——基础混凝土第三主应力(MPa);

c ——混凝土粘聚力(MPa);

φ ——混凝土内摩擦角(°)。

令 $u = \tan \varphi$ 代入(1)得:

$$(u + \sqrt{1+u^2})^2 \sigma_1 - \sigma_3 = 2c(u + \sqrt{1+u^2}) \quad (2)$$

令 $m = u + \sqrt{1+u^2}$ 代入(2)得:

$$m^2 \sigma_1 - \sigma_3 = 2cm \quad (3)$$

考虑混凝土材料为单向受拉状态时: $\sigma_3 = 0$

上式为:

$$m^2 \sigma_1 = m^2 f_t = 2cm \quad (4)$$

考虑混凝土材料为单向受压状态时: $\sigma_1 = 0$

上式为:

$$\sigma_3 = f_c = 2cm \quad (5)$$

基础设计往往采用 C40 混凝土,其抗拉强度设计值为 $f_t = 1.71(\text{N}/\text{mm}^2)$ 及抗压强度设计值为 $f_c = 19.1(\text{N}/\text{mm}^2)$,将公式(4)/(5)有

$$m^2 = \frac{f_c}{f_t} = \frac{19.1}{1.71} = 11.1696 \quad (6)$$

求解得 $\varphi = 56.683^\circ$

按照摩尔强度理论有,剪切破坏面与第一主应力 σ_1 的夹角为:

$$\theta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2} = 16.6585^\circ \quad (7)$$

则有楔形体高度:

$$h = \frac{a}{\cos \theta} \quad (8)$$

式中:

$2a$ ——承受局部荷载的受力长度(m);

2θ ——楔形体的破坏角(°)。

在楔形体高度范围内的配筋计算可以按照《混凝土结构设计规范》第 6.6.3 条进行设计。

1.2 楔形体范围以外的竖向应力计算

基础局压楔形体以外的区间应力水平明显低于楔形体区域。在楔形体剪切破坏前都属于弹性变形阶段,可以认为是小变形的问题,在不考虑钢筋的加强作用前提下,基础混凝土结构满足连续均匀连续体的弹性力学基本假定。故可以采用弹性力学理论求解该区域的应力水平。

基于弹性力学的理论分析,在半空间弹性体表面作用竖向集中力 F 时,弹性体内部的任一点的应

力有 Boussinsq 解答^[23], 如下所示。

$$\sigma_z = \frac{3Fz^3}{2\pi R^5} \quad (9)$$

式中:

σ_z ——任意一点竖向应力(MPa);

F ——分析单元所受外荷载, 对于微分单元为均布荷载大小值(kN);

z ——所求点距离荷载作用面的垂直距离(m);

R ——为所求点距离集中力 F 的空间距离(m)。

对于风机基础这种圆环形受力范围内, 圆环宽度中线以下的附加应力解析解, 本文给出一个求解思路如图 2 和图 3 所示。

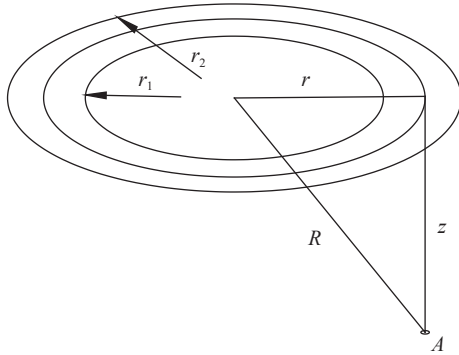


图 2 圆环形荷载作用下竖向附加应力推导 1

Fig. 2 Derivation 1 of vertical additional stress under circular loading

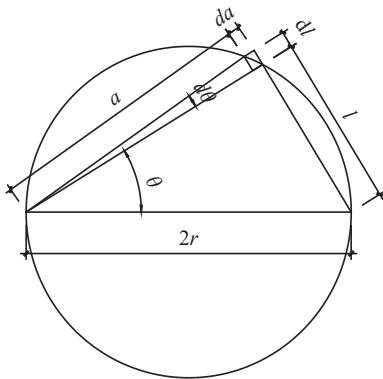


图 3 圆环形荷载作用下竖向附加应力推导 2

Fig. 3 Derivation 2 of vertical additional stress under circular loading

根据图 2、图 3 所示, 有以下关系式:

$$R^2 = r^2 + z^2 \quad (10)$$

$$a = 2r \times \cos \theta \quad (11)$$

$$l = 2r \times \sin \theta \quad (12)$$

$$dl = a \times d\theta \quad (13)$$

式中:

A ——所求应力状态点;

r —— A 点所在分度圆距离圆环荷载圆心距离(m);

l ——圆环上荷载点距离 A 点的水平距离(m);

a ——局部施加的均布荷载的作用长度(m);

θ ——计算变量;

dl 、 da ——荷载微分点的长宽(m);

r_1 ——圆环形荷载内直径(m);

r_2 ——圆环形荷载外直径(m);

对于圆环均布荷载作用下, 任一点 A 的竖向应力有:

$$\sigma_z = \iint_D d\sigma_z \quad (14)$$

D ——圆环形荷载面积(m^2)。

根据积分面积的对称性及将公式(9)~公式(13)带入公式(14)有:

$$\sigma_z = 2 \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{3Fz^3 \times 2 \times r \times \cos \theta}{2\pi(4 \times r^2 \times \sin^2 \theta + z^2)^{\frac{5}{2}}} d\theta da \quad (15)$$

由于 a 的长度难以通过变量 θ 表示, 故为了化简上式, 根据简单的力学原理, 并令 $m = \frac{z}{2r}$ 有:

$$\sigma_z = 2 \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{3Fz^3 \times 2 \times r \times \cos \theta}{2\pi(4 \times r^2 \times \sin^2 \theta + z^2)^{\frac{5}{2}}} d\theta da \leq \quad (16)$$

$$2 \times b \times \frac{3Fz^3}{2\pi \times (2r)^4} \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta}{(\sin^2 \theta + m^2)^{\frac{5}{2}}} d\theta$$

式中:

b ——圆环形荷载的宽度(m), $b = r_1 - r_2$

通过观察式(16), 我们可令

$$\sigma_z = 2 \times b \times \frac{3Fz^3}{2\pi \times (2r)^4} \times K_a \quad (17)$$

式中:

K_a ——即为圆环形荷载的基底附加应力系数。

K_a 可通过数值分析软件编程求解, 如 Matlab、Mathematica 等, 由于 K_a 仅与 m 值有关, 通过对 m 值进行赋值并制成表 1, 实现对基础核心区竖向应力的快捷计算。

表 1 圆环形均布荷载作用下的附加应力系数

Tab. 1 Additional stress coefficient under circular uniform distribution load

m	K_α	m	K_α	m	K_α	m	K_α
0.10	6666.42	0.30	82.09	0.50	10.49	0.70	2.65
0.12	3214.78	0.32	63.37	0.52	8.95	0.72	2.36
0.14	1735.15	0.34	49.68	0.54	7.68	0.74	2.10
0.16	1017.01	0.36	39.49	0.56	6.62	0.76	1.88
0.18	634.83	0.38	31.77	0.58	5.74	0.78	1.69
0.20	416.43	0.40	25.85	0.60	4.99	0.80	1.52
0.22	284.36	0.42	21.23	0.62	4.37	0.82	1.37
0.24	200.71	0.44	17.60	0.64	3.83	0.84	1.24
0.26	145.66	0.46	14.71	0.66	3.38	0.86	1.12
0.28	108.24	0.48	12.38	0.68	2.99	0.88	1.02

2 风机基础核心区有限元分析

2.1 有限元模型建立

本研究利用大型通用有限元分析软件 ABAQUS 对混凝土、钢筋、锚栓组合件及地基土进行一体化建模分析及计算。其中混凝土、锚栓组合件、地基土采用 C3D8R 实体单元进行模拟,钢筋采用 T3D2 杆单元进行模拟,模型最大单元尺寸不超过 0.1 m。

模型组装模型如图 4 所示。

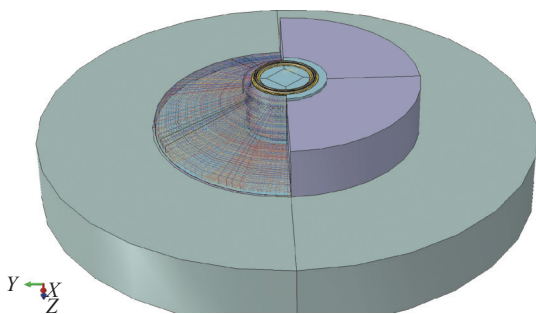


图 4 风机基础组装模型

Fig. 4 Fan foundation assembly model

2.2 材料参数

模型材料包含混凝土、钢筋、锚栓组合件及地基土,由于本次分析为探寻核心区的应力分布规律,故材料本构模型均采用弹性模型,本构模型参数的标定参照《混凝土结构设计规范》即文献 [2] 确定。

2.3 边界条件

有限元基础模型中主体混凝土与锚板、混凝土与地基土、锚板与锚栓之间施加面与面的库伦接触约束。其法向传递压力,切向传递摩擦力,选用小范围滑动,接触缝隙容差为 0。摩擦系数设置为各向同

性,钢与混凝土之间取 0.3,混凝土与混凝土之间取 0.4,混凝土与岩石层之间取 0.4。

2.4 基础核心区有限元结果

为了保证有限元结果准确性,本文建立细致的有限元分析模型如图 5 所示,并对部分单元格进行加密,单个单元格大小小于 0.05 m,以保证分析结果准确性。

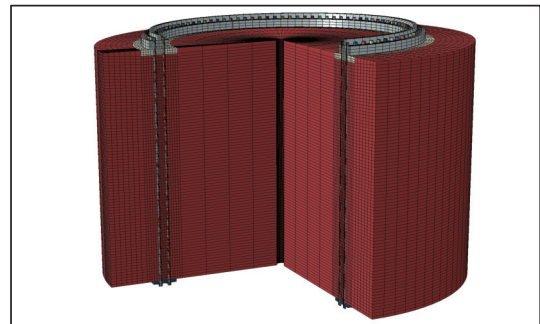


图 5 精细化的基础模型示意(局部)

Fig. 5 Detailed foundation model schematic (partial)

为章节 1 的分析结论,通过有限元分析计算 G 点的应力结果,G 点的取值范围为章节 1 所提到的弹性体区域范围,位于局部荷载的中线位置。G 点范围示意图如图 6 所示,有限元分析结果如表 2 所示。

3 计算示例及结果验证

3.1 计算示例

某项目风力发电机组单机容量为 6.25 MW,轮毂高度 110 m,叶轮直径 183 m。塔筒与基础采用了预应力锚栓连接。地基承载力良好,采用重力扩展式基础。

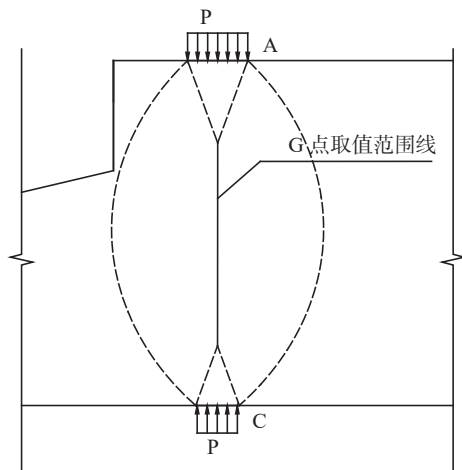


图 6 G 点取值范围示意图

Fig. 6 G point value range diagram

风机基础主体混凝土强度等级为 C40, 钢筋主筋强度等级 HRB400。设计安全等级为一级, 基础底板直径为 21 m, 基础总高度为 4.25 m, 台柱直径为 6.7 m, 台柱高度为 1.34 m, 基础悬挑根部高度为 2.86 m, 基础边缘高度为 0.8 m, 基础埋深为 3.8 m。塔筒底法兰通过 192 根 M42 的锚栓与基础连接, 锚栓设计预拉力为 617 kN, 超张拉系数为 1.15。上锚板半径尺寸为 2 152~2 508 mm, 宽度为 356 mm。下锚板半径尺寸为 2 112~2 546 mm, 宽度为 434 mm。

风机基础外形尺寸如图 7 所示。

风机基础受力分析复杂, 同时受到锚栓预应力, 及上部风力发电机组传给基础的弯矩, 竖向力, 扭矩及水平力, 为方便解释本文理念, 本文给出仅考虑锚栓预应力作用的计算示例。

对此可以通过先求解基础所受最大压应力数值, 代入本文公式进行计算, 进一步的进行风机基础核心区竖向钢筋的配筋计算。

根据公式(8), 求得上下锚板间楔形体高度分别为 372 mm, 449 mm, 取为 500 mm, 即锚板之间 500 mm 范围内的混凝土不采用弹性理论计算基础应力。

参照文献 [7] 所示计算过程首先求得上下锚板压应力:

$$p_1 = 24.50 \text{ MPa}$$

下锚板压应力:

$$p_2 = 19.83 \text{ MPa}$$

根据式(17)及表 1 求得基础在 0.5~3.7 m 范围

表 2 计算结果对比表

Tab. 2 Comparison table of calculation results

计算点深度/ mm	计算值/ MPa	有限元分析值/ MPa	计算值/有限元分析值 的比值
500	-11.23	-10.14	1.11
550	-10.34	-9.38	1.10
600	-9.60	-8.63	1.11
650	-8.98	-8.06	1.11
700	-8.46	-7.50	1.13
750	-8.00	-7.07	1.13
800	-7.61	-6.65	1.14
850	-7.26	-6.32	1.15
900	-6.96	-5.98	1.16
950	-6.69	-5.73	1.17
1 000	-6.45	-5.47	1.18
1 050	-6.24	-5.26	1.19
1 100	-6.05	-5.05	1.20
1 150	-5.88	-4.89	1.20
1 200	-5.73	-4.73	1.21
1 250	-5.59	-4.60	1.22
1 300	-5.47	-4.47	1.22
1 350	-5.35	-4.37	1.22
1 400	-5.25	-4.27	1.23
.....
2 750	-5.13	-4.19	1.22
2 800	-5.21	-4.26	1.22
2 850	-5.31	-4.36	1.22
2 900	-5.42	-4.46	1.22
2 950	-5.54	-4.58	1.21
3 000	-5.67	-4.71	1.21
3 050	-5.82	-4.87	1.20
3 100	-5.98	-5.03	1.19
3 150	-6.17	-5.23	1.18
3 200	-6.38	-5.43	1.17
3 250	-6.61	-5.69	1.16
3 300	-6.87	-5.94	1.16
3 350	-7.16	-6.26	1.14
3 400	-7.50	-6.58	1.14
3 450	-7.88	-6.98	1.13
3 500	-8.33	-7.39	1.13
3 550	-8.84	-7.90	1.12
3 600	-9.45	-8.42	1.12
3 650	-10.16	-9.12	1.12
3 700	-11.03	-9.81	1.12

(取值点位置同图 6 所示:G 点取值范围示意图)内竖向附加应力如表 2 及图 8 所示。

通过与精细的有限元模型结果对比, 本文提出

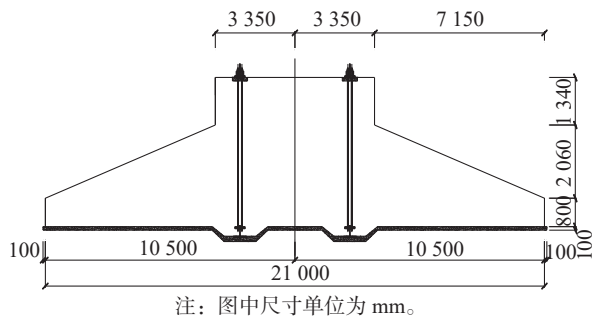


图 7 风机基础外形尺寸图

Fig. 7 External dimension diagram of fan foundation

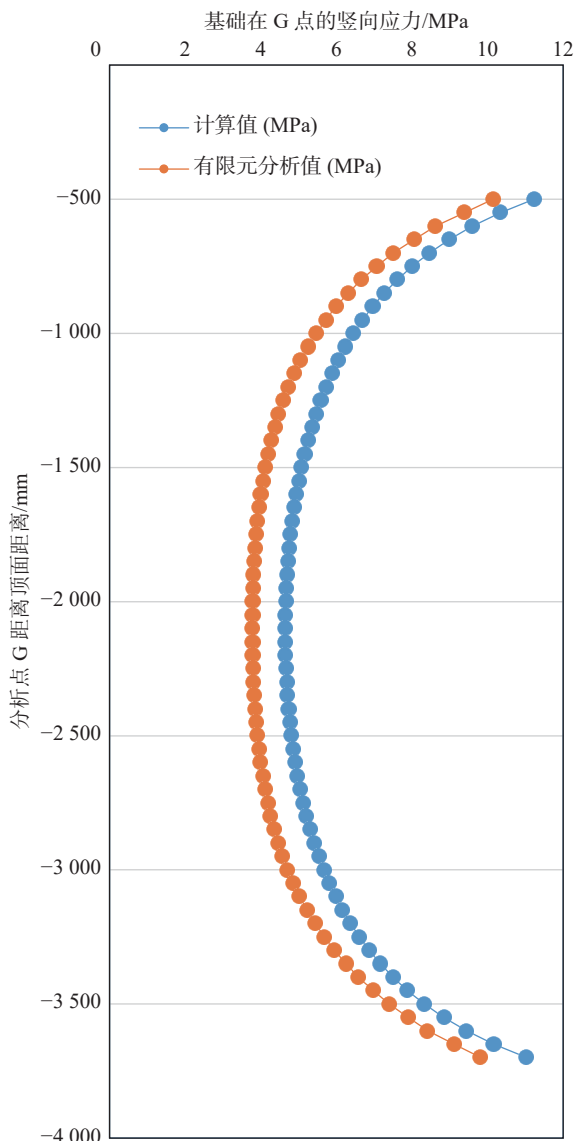


图 8 计算结果对比图

Fig. 8 Comparison of calculation results

的非楔形体的应力计算公式是偏于安全, 高于有限元分析值 10%~25%, 且应力差值维持在 0.95~1.1 MPa,

这是由于式(16)为简化计算而放大了环向荷载的应力效应导致的, 是可以为工程设计所接受的。

4 结论

1) 风机基础核心区的应力状态可分为楔形体部分和非楔形体部分, 楔形体部分混凝土不会发生受压破坏, 非楔形体部分通过弹性力学的方法求解应力大小。

2) 通过与精细的有限元模型结果对比, 本文提出的非楔形体的应力计算公式是偏于安全, 高于有限元分析值 10%~25%, 是可以为工程设计所接受的。这是由于式(16)为简化计算而放大了环向荷载的应力效应导致的。在有经验的前提下, 可以考虑通过增加折减系数, 来减少式(16)简化计算的影响。

3) 风机基础在外荷载及预应力的共同作用下, 荷载变化并不是均布的, 而是随弯矩作用方向呈现线性分布规律, 对此可以通过先求解基础所受最大压应力数值, 代入本文公式进行计算, 进一步的进行风机基础核心区竖向钢筋的配筋计算。

4) 下一步研究可以通过求解微分单元下的竖向力 F 与 x 的方程。并带入公式(16)求解。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 陆上风电场工程风电机组基础设计规范: NB/T 10311—2019 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
National Energy Administration. Code for design of wind turbine foundations for onshore wind power projects: NB/T 10311—2019 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2020.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB 50010—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, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018 [S].

- Beijing: People's Communications Press, 2018.
- [4] 王泽国, 卢红前, 吉春明, 等. 沿海地区风电场预应力锚栓基础受力特性有限元研究 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2018, 51 (增刊 1): 149-156.
- WANG Z G, LU H Q, JI C M, et al. Finite element study of mechanical behavior of prestressed anchor bolt foundation in coastal wind turbine farm [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(Suppl.1): 149-156.
- [5] 刘斌, 张立英, 崔振磊, 等. 风电机组预应力锚栓基础局部承压分析 [J]. 西北水电, 2015(4): 99-101. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2015.04.025.
- LIU P, ZHANG L Y, CUI Z L, et al. Analysis on local pressure of prestressed anchor bolts foundation of wind turbine generator [J]. Northwest hydropower, 2015(4): 99-101. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2015.04.025.
- [6] 郑阳. 圆形扩展式风机基础钢筋设计优化分析 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊 1): 76-82. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.012.
- ZHENG Y. Design optimization for the reinforcement of wind turbine foundation [J]. Southern energy construction, 2022, 9(Suppl.1): 76-82. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S1.012.
- [7] 吴强, 贺广零, 邹庆水. 预应力锚栓风机基础设计局压承载力探讨 [J]. 工程建设与设计, 2022(3): 32-35. DOI: 10.13616/j.cnki.gcsysj.2022.02.008.
- WU Q, HE G L, ZOU Q S. Discussion on local compression bearing capacity of prestressed bolt wind turbine foundations design [J]. Construction & design for engineering, 2022(3): 32-35. DOI: 10.13616/j.cnki.gcsysj.2022.02.008.
- [8] 梅毕祥, 杨敏. 陆上风机圆形基础底板承载力计算方法研究 [J]. 港工技术, 2016, 53(2): 50-54. DOI: 10.16403/j.cnki.ggjs20160213.
- MEI B X, YANG M. Calculation method for bearing capacity of circular foundation slab supporting onshore wind turbine [J]. Port engineering technology, 2016, 53(2): 50-54. DOI: 10.16403/j.cnki.ggjs20160213.
- [9] 许新勇, 刘峥, 张迪. 兆瓦级风机塔架基础地基力学特性研究 [J]. 水力发电, 2012, 38(12): 74-76. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2012.12.023.
- XU X Y, LIU Z, ZHANG D. Study on ground mechanical characteristics of tower foundation of wind turbine with capacity more than one megawatt [J]. Water power, 2012, 38(12): 74-76. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2012.12.023.
- [10] 蒋莉, 许新勇, 李静, 等. 风机塔架基础接触非线性分析 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(8): 164-166. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2011.08.049.
- JIANG L, XU X Y, LI J, et al. Contact nonlinear analysis of tower foundation of wind turbine generator [J]. Water resources and power, 2011, 29(8): 164-166. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2011.08.049.
- [11] 张宁, 郭春雷, 孙建勋. 风机基础结构与计算 [J]. 水利水电工程设计, 2018, 37(1): 39-41. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6980.2018.01.018.
- ZHANG N, GUO C L, SUN J X. Structural design and calculation of fan base [J]. Design of water resources & hydroelectric engineering, 2018, 37(1): 39-41. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6980.2018.01.018.
- [12] 肖珍, 易祺, 邓小勇. 有限元方法在风机基础设计中的应用 [J]. 低温建筑技术, 2020, 42(11): 62-65. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2020.11.016.
- XIAO Z, YI Q, DENG X Y. Application of finite element method in design of foundation of wind turbine [J]. Low temperature architecture technology, 2020, 42(11): 62-65. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2020.11.016.
- [13] 迟俊德, 刘殿忠, 赵凤瑞. 风机基础结构有限元分析 [J]. 吉林地质, 2011, 30(1): 151-155. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2427.2011.01.036.
- CHI J D, LIU D Z, ZHAO F R. Finite element analysis of wind generator foundation structure [J]. Jilin geology, 2011, 30(1): 151-155. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2427.2011.01.036.
- [14] 张力, 陈珂, 元国凯, 等. 基于马尔科夫矩阵的灌浆连接段疲劳性能研究 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊 2): 6-10. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.002.
- ZHANG L, CHEN K, YUAN G K, et al. Research on fatigue performance of grouted connections based on Markov matrix [J]. Southern energy construction, 2022, 9(Suppl.2): 6-10. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.002.
- [15] 刘学新. 风机基础承台底面形式的优化分析 [J]. 吉林电力, 2012, 40(4): 25-27. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2012.04.008.
- LIU X X. Optimization analysis of wind turbine base supporting bottom type [J]. Jilin electric power, 2012, 40(4): 25-27. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2012.04.008.
- [16] 董其明, 于恺, 崔国桥. 风机基础局压受力钢筋的配置及分析 [J]. 水电科技, 2023, 6(2). DOI: 10.33142/hst.v6i2.8312.
- DONG Q M, YU K, CUI G Q. Configuration and analysis of reinforcement bar under local pressure of fan foundation [J]. Journal of hydropower science and technology, 2023, 6(2). DOI: 10.33142/hst.v6i2.8312.
- [17] 孙杰, 周晓智, 袁磊. 基于 MATLAB 的圆形基础附加应力的数值积分求解 [J]. 工业建筑, 2014, 44(增刊 1): 847-849, 856. DOI: 10.13204/j.gyjz2014.s1.294.
- SUN J, ZHOU X Z, YUAN L. The numerical integration on

- additional stress in soil of circular foundation based on MATLAB [J]. *Industrial construction*, 2014, 44(Suppl.1) : 847-849,856. DOI: [10.13204/j.gyjz2014.s1.294](https://doi.org/10.13204/j.gyjz2014.s1.294).
- [18] 胡洪龙, 谈至明. 圆形均布荷载下铺面结构层应力的水平向分布规律 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2014, 42(12): 1868-1872. DOI: [10.11908/j.issn.0253-374x.2014.12.013](https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.2014.12.013).
HU H L, TAN Z M. Horizontal distribution of pavement structure layer stress under a circular uniform load [J]. *Journal of Tongji University (natural science)*, 2014, 42(12) : 1868-1872. DOI: [10.11908/j.issn.0253-374x.2014.12.013](https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.2014.12.013).
- [19] 石中平. 垂直均布荷载矩形基础地基任意点附加应力系数公式推导 [J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 2015, 42(2): 244-256. DOI: [10.3969/j.issn.1671-9727.2015.02.14](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-9727.2015.02.14).
SHI Z P. Formula derivation of additional stress coefficient at any point in rectangular foundation subsoil under vertical even load [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (science & technology edition)*, 2015, 42(2): 244-256. DOI: [10.3969/j.issn.1671-9727.2015.02.14](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-9727.2015.02.14).
- [20] 赵军卫, 郑文忠. 预应力混凝土局压承载力计算及端部间接钢筋的配置问题 [J]. *工业建筑*, 2007, 37(11): 47-52. DOI: [10.13204/j.gyjz200711013](https://doi.org/10.13204/j.gyjz200711013).
ZHAO J W, ZHENG W Z. Some problems on calculation of local compression load bearing capacity and placing of indirect reinforcement in end zone of prestressed concrete [J]. *Industrial construction*, 2007, 37(11) : 47-52. DOI: [10.13204/j.gyjz200711013](https://doi.org/10.13204/j.gyjz200711013).
- [21] 尉尚民, 蔡绍怀, 焦占拴. 套箍混凝土的局部承压强度 [C]//中国建筑学会建筑结构委员会混凝土结构学组, 清华大学土木工程系. 约束与普通混凝土强度理论及应用学术讨论会论文集, 烟台, 1987-10-26. 北京: 中国建筑学会建筑结构委员会, 1987: 72-80.
WEI S M, CAI S H, JIAO Z S. Local compressive strength of hooped concrete [C]//Concrete Structure Group of the Architectural Structure Committee of the Chinese Society of Architecture, Department of Civil Engineering, Tsinghua University. Proceedings of the Symposium on the Theory and Application of Confined and Ordinary Concrete Strength, Yantai, October 26, 1987. Beijing: Building Structure Committee of Architectural Society of China, 1987: 72-80.
- [22] 嵇蕾. 预应力筋约束混凝土局部受压承载力研究 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2014.
JI L. Study on bearing capacity of the local compression concrete constrained by prestressed tendon [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2014.
- [23] 徐芝纶. 弹性力学 (5 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
XU Z L. Elasticity mechanics (5th ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2016.

作者简介:



李宇翔

李宇翔 (第一作者, 通信作者)

1996-, 男, 学士, 主要从事新能源结构设计与研究工作(e-mail)3201808088@qq.com。

吴强

1989-, 男, 工程师, 硕士, 一级注册结构工程师, 从事风电行业结构工程设计与研究工作(e-mail)wuqiang07@163.com。

马燊

1984-, 男, 副总工程师, 硕士, 一级注册结构工程师, 从事风电行业结构工程分析与研究工作(e-mail)3010233618@163.com。

马俊

1986-, 男, 工程师, 硕士, 一级注册结构工程师, 从事风电行业结构工程分析与研究工作(e-mail)maj67@sany.com.cn。

徐皇冈

1982-, 男, 高级工程师, 硕士, 一级结构工程师, 从事风电行业结构工程分析与研究工作(e-mail)xhg8162@163.com。

(编辑 赵琪)