

## 圆形扩展式风机基础钢筋设计优化分析

郑阳

引用本文:

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.

ZHENG Yang. Design Optimization for the Reinforcement of Wind Turbine Foundation[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(增刊1): 76–82.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 海上风机基础阴极保护设计与应用

Cathodic Protection Design and Application of Offshore Wind Turbine Supporting Structure

南方能源建设. 2015(3): 76–79 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.015>

#### 海上风机导管架基础灌浆连接段受力分析

Analysis of Grouted Connection in Offshore Wind Turbine Jacket Foundation

南方能源建设. 2015(3): 80–85 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.016>

#### 山地风电场风机扇区管理优化分析与探讨

Optimization Analysis and Discussion on Fan Sector Management in Mountain Wind Farm

南方能源建设. 2018, 5(z1): 255–261 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.047>

#### 海上风机单桩基础疲劳影响因素分析

Analysis of Influencing Factors on Fatigue of Offshore Wind Turbine Monopile Foundation

南方能源建设. 2018, 5(4): 92–97 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.014>

#### 破碎波作用下单桩式海上风机水动力学数值分析

Numerical Analysis of Hydrodynamic Characteristics of Monopile-type OWT Under Breaking Wave

南方能源建设. 2020, 7(3): 70–80 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.009>

# 圆形扩展式风机基础钢筋设计优化分析

郑阳<sup>✉</sup>

(三峡融资租赁有限公司, 北京 101199)

**摘要:** [目的] 随着风电进入平价时代, 风机基础钢筋的设计优化具有十分重要的意义。[方法] 以具体的工程实例为背景, 采用CFD风机基础设计软件进行结构设计, 得到了风机基础的混凝土和钢筋工程量。然后, 采用ABAQUS有限元软件建立了风机基础的有限元模型。[结果] 分析表明, 底板底面径向钢筋的内侧端部位置、底板底面内圈环向钢筋的应力较大。通过分析计算, 指出了传统的设计方法在配筋计算中存在的问题, 总结出了优化配筋的建议, 并与原方案的配筋结果进行了对比。[结论] 结果表明, 基础底板底面径向钢筋和底板底面环向钢筋的优化幅度均在10%以上。该结论可用于指导工程设计人员开展设计优化。

**关键词:** 风机基础; 钢筋; 设计优化; 有限元分析; 结构计算

中图分类号: TK89; TU470

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S1-0076-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Design Optimization for the Reinforcement of Wind Turbine Foundation

ZHENG Yang<sup>✉</sup>

(Three Gorges Finance Leasing Co., Ltd., Beijing 101199, China)

**Abstract:** [Introduction] With wind power entering the era of parity, the design optimization of fan foundation reinforcement is of great significance. [Method] In a practical engineering case, the CFD foundation design software was used for structural design. Then, the finite element model of wind turbine foundation was established by ABAQUS software. [Result] The analysis shows that, the position of the inner end of the radial reinforcement and the inner ring of the circumferential reinforcement are the positions of the maximum stress in the reinforcement system. Through analysis, the problems existing in the reinforcement calculation of traditional design method are found. Reinforcement optimization is summarized and compared with the original reinforcement scheme. [Conclusion] The optimization range of radial reinforcement and circumferential reinforcement is more than 10%. These conclusions can be used to guide engineers for design optimization.

**Key words:** wind turbine foundation; reinforcement; design optimization; finite element analysis; structural calculation

2095-8676 © 2022 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

风能是一种重要的可再生能源, 也是最早实现商业化的可再生能源之一, 对于调整我国的能源结构, 减少温室气体的排放具有重要意义。近年来, 随着国家不断的政策投入和风电技术的进步, 我国的风电装机容量迅速增长。据统计, 截至2018年末, 我国的风电装机容量已突破200 GW, 且依然

呈现高速增长的态势。展望未来, 风电的平价上网已成为大势所趋, 据国家能源局印发的《关于公布2020年风电、光伏发电平价上网项目的通知》称, 2020年我国平价上网的风电装机规模达11.396 7 GW。因此, 在平价上网的背景下, 针对风电项目的设计环节进行全方位的设计优化, 最大限度地降低建设成本, 是风电设计领域必须要面对和重视的课题。

风机基础对于保障风电项目安全发挥了重要作

用，在设计时应引起充分重视。另一方面，风机基础在风电项目的土建投资中占比重大，因此，风机基础的设计优化对于风电项目的安全性和经济性无疑具有重大意义。圆形扩展式风机基础是陆上风电中最常用的基础形式，其具有可靠性高、适用范围广、传力路径明确、施工简便等优点。本文结合具体工程实例，探究传统设计方法中的钢筋设计优化方案。

## 1 工程案例

### 1.1 风机资料

某山地风电项目，采用2.5 MW风机，叶轮直径146 m，轮毂高度90 m。风机正常运行工况和极端工况的荷载如表1所示。

表1 正常运行工况和极端工况荷载(不含安全系数)  
Tab.1 Normal and extreme load cases (without safety factor)

工况名称	$F_r/\text{kN}$	$F_z/\text{kN}$	$M_r/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$
正常运行荷载工况	647.4	3 847.5	49 878.1	1 471.2
极端荷载工况	922.6	3 860.2	73 748.0	1 454.7

### 1.2 工程地质资料

#### 1.2.1 地层岩性

风电场场地地形地貌主要是中低山地貌，场内地内自上而下主要分布以下几类岩土层，具体描述如下：

① 含砾粘性土：棕黄色，底部夹含少量碎石。该层一般厚度0.6~2.4 m。

②-1 花岗岩：褐黄色，岩石多呈砂土状，全风化。一般厚度0.6~3.4 m。

②-2 花岗岩：褐黄色，块状构造，岩石多呈团块状，局部风化程度差。节理裂隙发育，强风化。本次勘测未揭穿。

风电场地基岩土层主要物理力学指标推荐值如表2所示。

表2 地基岩土层主要物理力学指标推荐值  
Tab.2 Recommended values of main physical and mechanical indexes of soil layer

层序	岩土类别	形状	重力密度/ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	压缩模量/ (MPa)	承载力特征值/(kPa)
①	含砾粘性土	可塑	18.6	5	120
②-1	花岗岩	全风化	20.4	12	500
②-2	花岗岩	强风化	21.2	18	840

#### 1.2.2 地震地质

根据《中国地震动参数区划图》<sup>[1]</sup>及《建筑抗震设计规范》<sup>[2]</sup>，拟建场地50年超越概率10%的Ⅱ类场地地震动峰值加速度为0.05 g，相应的地震烈度为Ⅵ度，地震反应谱特征周期为0.35 s。

## 2 风机基础设计

### 2.1 基础外形尺寸拟定

风机基础持力层选取②-1花岗岩层，地基土承载力条件良好，风机基础选用圆形重力扩展式基础。混凝土强度等级C40，钢筋主筋强度等级HRB400。

风机单机容量为2.5 MW，依据相关规范<sup>[3]</sup>，基础底板直径宜控制在16~27 m之间，基础高度宜控制在2.7~4.0 m之间，基础边缘高度宜为底板直径的1/20~1/15。同时，为满足基础底板抗冲切的要求及基底反力为线性分布的计算假设<sup>[4]</sup>，要求底板悬挑部分的长/高 $\leq 2.5$ <sup>[5]</sup>。结合计算经验、详勘报告及厂家提供的风机基础设计资料，拟定基础边缘高为0.9 m，台柱高出地面0.3 m，台柱直径为6.5 m，底板直径、圆台高度及台柱高度由计算确定。

### 2.2 施工图方案

以北京木联能软件技术有限公司开发的《CFD—风力发电机组塔架地基基础设计软件》为平台，确定的基础外形尺寸如下：基底半径 $R_1=9.4$  m，台柱半径 $R_2=3.25$  m，基础底板厚度 $h_1=0.9$  m，棱台高度 $h_2=1.6$  m，台柱高度 $h_3=1.3$  m，基础埋深 $H=3.5$  m。通过CFD风机基础设计软件的计算，得到其承载力计算结果和配筋结果。地基承载力复核计算结果详见表3，基础的主要配筋结果见表4，施工图如图1所示。单个基础混凝土用量为538 m<sup>3</sup>，钢筋用量为50.1 t。

风机基础的沉降计算和基础底板悬挑根部裂缝宽度验算均满足设计要求。

表3 风机基础承载力计算结果  
Tab.3 Calculation results of bearing capacity of wind turbine foundation

工况名称	$P_k/(\text{kPa})$	$f_a/(\text{kPa})$	结论	$P_{kmax}/(\text{kPa})$	$1.2 \times f_a/(\text{kPa})$	结论
正常运行荷载工况	92.333	962.6	满足	183.52	1 155.12	满足
极端荷载工况	103.019	962.6	满足	224.425	1 155.12	满足
多遇地震工况	92.331	1 443.9	满足	183.596	1 732.68	满足

表4 风机基础主要配筋计算结果

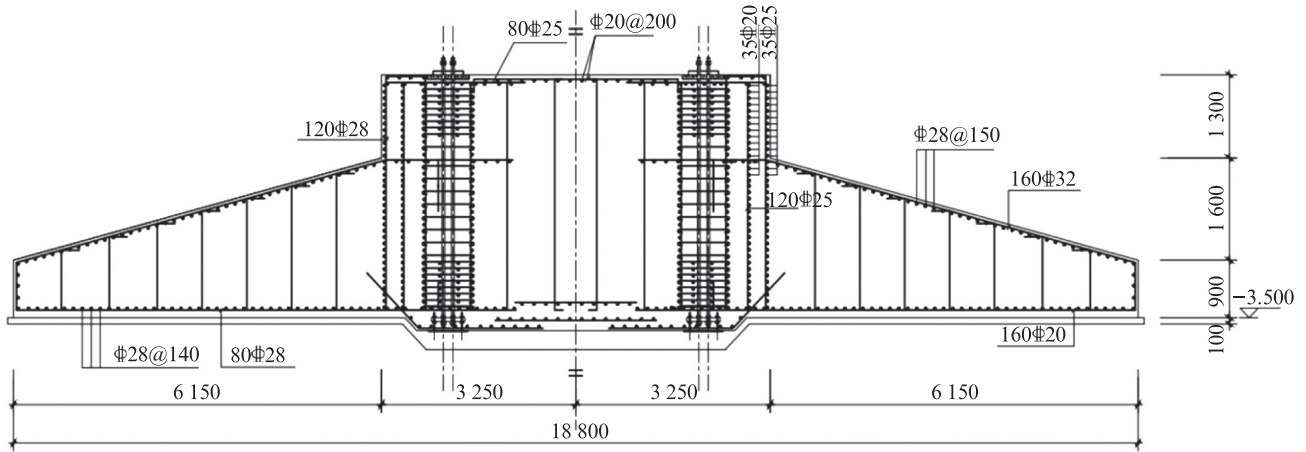
Tab. 4 Calculation results of main reinforcement of wind turbine foundation

钢筋类型	配筋	钢筋工程量/t
底板底面径向钢筋	80 $\Phi$ 28(L=8.15 m)	3.15
底板底面环向钢筋	$\Phi$ 28@140,共48圈	9.77
底板顶面径向钢筋	80 $\Phi$ 32(L=8.80 m)	4.44
底板顶面环向钢筋	$\Phi$ 28@150,共42圈	9.81
竖向钢筋	80 $\Phi$ 28(L=3.96 m)	1.53

### 3 风机基础有限元模型

#### 3.1 混凝土本构模型

考虑到分析过程中混凝土可能开裂,选用 ABAQUS 软件中的混凝土损伤塑性本构模型。在该模型中,假定混凝土的两种破坏方式为拉伸开裂破坏和压缩破坏,采用各向同性损伤弹性以及各向同性拉压塑性描述混凝土的非弹性能,混凝土的等效拉伸应变  $\bar{\varepsilon}_t^p$  和等效压缩塑性应变  $\bar{\varepsilon}_c^p$  决定了其屈服面的扩展状况<sup>[6]</sup>。



注:图中标高尺寸单位为m,其余尺寸单位为mm。

图1 风机基础施工图

Fig. 1 Construction drawing of wind turbine foundation

混凝土的单轴受拉应力-应变关系和单轴受压应力-应变关系可参照《混凝土结构设计规范》<sup>[7]</sup>附录C建立,混凝土单轴受拉的应力-应变公式为:

$$\sigma = (1 - d_t)E_c \varepsilon \quad (1)$$

$$d_t = 1 - \rho_t(1.2 - 0.2x^5), x \leq 1 \quad (2)$$

$$d_t = 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_1(x-1)^{1.7} + x}, x > 1 \quad (3)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \quad (4)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \quad (5)$$

式中:

$d_t$  ——单轴受拉损伤演化参数;

$E_c$  ——混凝土的弹性模量 (GPa);

$f_{t,r}$  ——混凝土单轴抗拉强度代表值 (GPa);

$\varepsilon_{t,r}$  ——与 $f_{t,r}$ 相应的混凝土峰值拉应变。

混凝土单轴受压的应力-应变公式为:

$$\sigma = (1 - d_c)E_c \varepsilon \quad (6)$$

$$d_c = 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n}, x \leq 1 \quad (7)$$

$$d_c = 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c(x-1)^2 + x}, x > 1 \quad (8)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}} \quad (9)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (10)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \quad (11)$$

式中:

$d_c$  ——单轴受压损伤演化参数;

$E_c$  ——混凝土的弹性模量 (GPa);

$f_{c,r}$  ——混凝土单轴抗压强度代表值 (GPa);

$\varepsilon_{c,r}$  ——与 $f_{c,r}$ 相应的混凝土峰值压应变。

混凝土处于单轴受拉状态时,在达到拉伸破坏应力 $\sigma_0$ 之前,其应力-应变关系为线弹性。在此之

后，随着微裂缝的发育，应力-应变关系由线弹性转为软化阶段<sup>[8]</sup>。

而当混凝土处于单轴受压状态时，初始的应力-应变关系亦为线弹性。但当其达到屈服应力 $\sigma_{e0}$ 之后，进入应力强化阶段，混凝土的强度开始缓慢增大。在此之后，随着应力的增长，当应力超过了压缩极限应力 $\sigma_{cu}$ ，强度开始慢慢减小<sup>[8]</sup>。

根据该理论，可以对C40混凝土的塑性损伤本构模型进行计算，得到其非弹性应变与应力的关系。

### 3.2 模型材料参数

在对风机基础进行建模分析之前，还需要对地基土建模，地基土采用“摩尔-库伦模型”<sup>[9]</sup>，其与基础底面之间为非线性摩擦接触，取切向摩擦系数为0.5。地基土的土体半径取基础半径的6倍，土体厚度取基础高度的5倍，这样可以消除荷载传递的边际效应的影响<sup>[10]</sup>。风机基础与地基土的模型位置关系见图2。

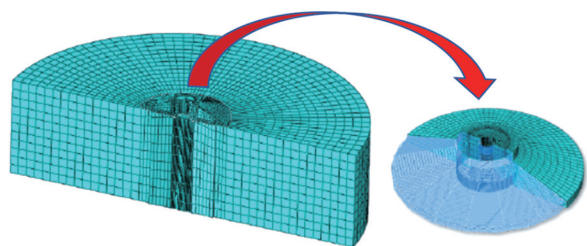


图2 风机基础与地基土有限元模型

Fig. 2 Finite element model of turbine foundation and foundation soil

按照第2节的设计结果建立有限元分析模型。混凝土采用C3D8实体单元。基础内的钢筋只考虑主筋（竖向和径向）和环向箍筋，不考虑架立筋。钢筋采用ABAQUS中自带的truss单元，考虑理想弹塑性。

根据锚栓厂家提供的资料，锚板的钢材等级为Q345E，上锚板厚度40 mm，下锚板厚度45 mm。预应力锚栓材质为M42-8.8级，锚栓设计预拉力为500 kN，超张拉系数1.1。锚栓和锚板采用C3D8R实体单元，仅考虑弹性。锚栓的预应力的施加通过ABAQUS命令流中的关键字“\*INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS”来实现<sup>[11]</sup>。

基础回填土采用C3D10单元<sup>[12]</sup>，基础和钢筋网的有限元模型详见图3。模型材料参数详见表5。

### 3.3 荷载组合

按照相关规范<sup>[3]</sup>的要求，计算基础配筋时应采用承载能力极限状态下的基本组合，最不利荷载组合为“1.0V+1.4H+1.4M”。荷载作用点为风机基础顶面，在加载过程中，竖向荷载保持不变，弯矩和水平推力采取线性加载方式<sup>[8]</sup>。

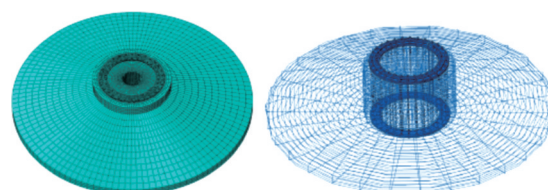


图3 基础混凝土与钢筋有限元模型

Fig. 3 Finite element model of foundation concrete and reinforcement

表5 模型材料参数

Tab. 5 Parameters of model material

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
钢筋	200	0.3	7 800
混凝土	32.5	0.2	2 500
锚栓、锚板	215	0.3	7 800
回填土	0.01	0.4	1 800

## 4 钢筋设计优化

### 4.1 分析结果

通过计算分析可得到钢筋应力分布图，如图4所示。由图中可知，极端荷载工况下，大部分的钢筋都没有达到屈服应力，仅底板底面径向钢筋的内侧端部位置、底面内圈环向钢筋的应力较大，这部分钢筋主要承受弯矩作用。竖向钢筋受力比较复杂，既协同混凝土一起承受压应力，也承担切向剪力以及由水平荷载产生的弯矩。整体而言，钢筋工程量有一定的优化空间。

图5所示为风机基础底板底面径向钢筋、底面最内圈环向钢筋的应力与加载等级的关系曲线。由图中可知：（1）随着外部荷载增大，底板底面径向钢筋、底面内圈环向钢筋应力均会相应增大，且当荷载接近极端荷载时，应力增速显著放大；（2）不论外部荷载如何变化，底板底面内圈环向钢筋的应力始终高于底板底面径向钢筋，由此说明底面径向钢筋的配筋是偏于保守的；（3）相比于底板底面径向钢筋，底面内圈环向钢筋的应力对外部荷载的变化更为敏感。

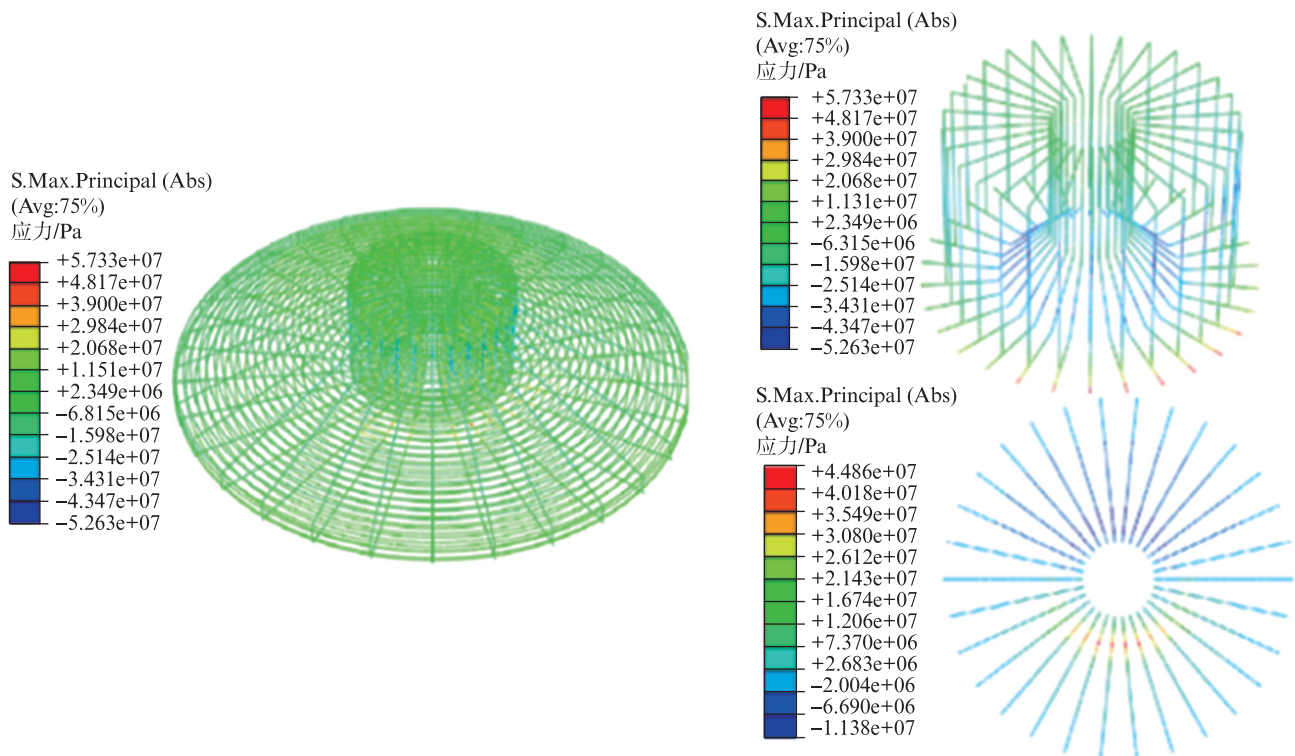


图4 钢筋整体应力分布云图

Fig. 4 Nephogram of overall stress distribution of reinforcement

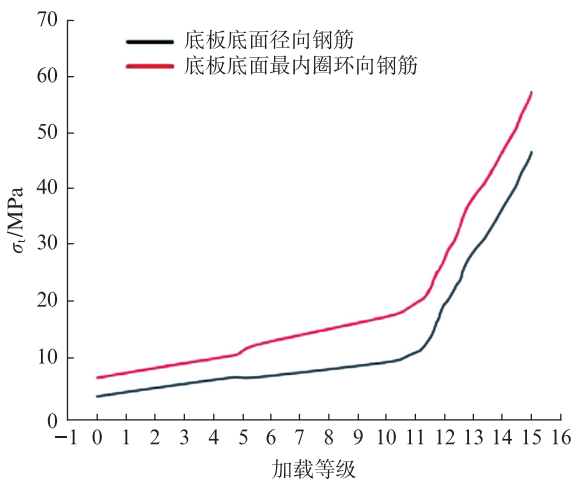


图5 钢筋应力与加载等级关系图

Fig. 5 Relationship between reinforcement stress and loading grade

## 4.2 设计优化复核计算

按照 ABAQUS 有限元模型的计算结果, 可对风机基础的配筋进行一定的设计优化, 优化建议如下:

1) 原设计中, 底板底面径向钢筋的配筋略偏保守, 可采取适当的优化措施, 但内侧端部应力

集中的位置的配筋应适当加密。就本项目而言, 底板底面径向钢筋的配筋为  $80\Phi 28$  ( $L=8.15$  m), 可优化为  $80\Phi 25$  ( $L=8.15$  m)。另外, 由于底板底面径向钢筋的内侧端部位置弯矩较大, 经过 ABAQUS 软件计算, 在底板底面径向钢筋内侧端部, 加密布置  $80\Phi 14$ , 加密钢筋长度  $L=2.4$  m, 配筋方案更加合理。径向钢筋的工程量由 3.15 t 优化到了 2.74 t, 优化幅度为 14.96%, 优化结果详见表 6。

2) 对于底板底面环向钢筋, 内圈钢筋可按原方案配置, 但底面外圈钢筋的直径可适当减小。就本项目而言, 其环向钢筋的原配筋为  $\Phi 28@140$ , 共配置 48 圈。经过 ABAQUS 软件计算, 对外侧的 18 圈钢筋的配筋调整为  $\Phi 25@140$ , 其余环向钢筋保持不变。环向钢筋的工程量由 9.77 t 优化到了 8.80 t, 优化幅度为 11.02%, 优化结果详见表 6。

3) 优化后的钢筋配置还应满足最小配筋率以及基础底板悬挑根部裂缝宽度验算的要求。

4) 值得说明的是, 竖向钢筋的受力比较复杂, 既协同混凝土一起承受压应力, 也承担切

向剪力以及由水平荷载产生的弯矩。因此, 竖向钢筋应力最大的工况不一定是“ $1.0V+1.4H+1.4M$ ”, 而可能是其他工况, 这与  $V$ 、 $H$ 、 $M$  的大小有关。因此对于竖向钢筋, 依然采用原设计方案中的包络设计进行配筋计算, 而不再进行设计优化。

表6 风机基础钢筋优化对比表

Tab.6 Comparison of reinforcement optimization for wind turbine foundation

钢筋类型	原配筋	原方案钢筋工程量/t	优化后配筋	优化后钢筋工程量/t	优化幅度/(%)
径向钢筋	$80\Phi 28(L=8.15m)$	3.15	$80\Phi 25(L=8.15m)+80\Phi 14(L=2.4m)$	2.74	14.96
环向钢筋	$\Phi 28@140$ , 共48圈	9.77	$\Phi 28@140$ (内侧30圈)+ $\Phi 25@140$ (外侧18圈)	8.80	11.02

## 5 结 论

1) 通过 ABAQUS 有限元软件建模分析可知, 对本项目而言, 采用传统设计方法设计的风机基础配筋偏于保守, 仅局部钢筋应力较大, 底板底面径向钢筋与底板底面环向钢筋均有优化余地。

2) 在风机基础的结构设计过程中, 针对 CFD 软件的计算结果, 可采用 ABAQUS 有限元软件做复核计算, 优化钢筋配置。在本算例中, 底面径向钢筋的优化幅度为 14.96%, 底板底面环向钢筋的优化幅度为 11.02%。

3) 以上结论及方法可用于指导工程设计人员开展设计优化。

### 参考文献:

- [1] 中国地震局. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
China Seismological Bureau. Seismic ground motion parameter zonation map of China: GB 18306—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010(2016版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the Peo-

ple's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010(2016版) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.

- [3] 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: 中国水电水利出版社, 2020.  
National Energy Administration. Code for design of wind turbine foundations for onshore wind power projects: NB/T 10311—2019 [S]. Beijing: China Hydropower and Water Conservancy Press, 2020.
- [4] 王斯伟, 白宝华, 潘启科, 等. 圆形扩展式风机基础体型优化设计研究 [J]. 云南电力技术, 2019, 47(5): 86-89. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7345.2019.05.023.  
WANG S W, BAI B H, PAN Q K, et al. Research on optimization design of basic shape of circular extended wind turbine foundation [J]. Yunnan Electric Power, 2019, 47(5): 86-89. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7345.2019.05.023.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [6] 杨涛. 超长混凝土框架结构温度应力及其裂缝的数值分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
YANG T. Numerical analysis of temperature stress and cracks in super-long concrete structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010(2015版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010(2015) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [8] 郑阳. 结构抗连续倒塌关键构件的评价方法及敏感性分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
ZHENG Y. A study of critical element of the structure during the progressive collapse and sensitivity analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [9] 陈小平. 基于摩尔库伦准则的岩石地基极限承载力研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 95-98.  
CHEN X P. Study on the ultimate bearing capacity of rock foundation based on Mohr-Columb Criterion [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 95-98.
- [10] 刘一新, 雷勇, 邓家政, 等. 岩石地基极限承载力的计算 [J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2019, 28(1): 1-5. DOI:

10.3969/j.issn.1672-7304.2019.01.0001.

LIU Y X, LEI Y, DENG J Z, et al. Calculation of ultimate bearing capacity of rock foundation [J]. Journal of Hunan City University, 2019, 28(1): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7304.2019.01.0001.

- [11] 李晓. 后张法装配式预应力桥墩抗震性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

LI X. Study on seismic performance of post tensioned prefabricated prestressed pier [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

- [12] 郑培鑫. 地基稳定性的分区与分步耦合分析及有限元二次开发 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

ZHENG P X. Zonal and step coupling analysis of foundation stability and secondary development of finite element method

[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

作者简介:



郑阳

郑阳 (通信作者)

1987-, 男, 山东淄博人, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事结构设计与审查工作 (e-mail) 1217zhengyang@163.com。

(责任编辑 李辉)

