

## 风机基础局压受力钢筋的配置及分析

董其明<sup>1,2</sup> 于 恺<sup>1,2</sup> 崔国桥<sup>1,2</sup>

1 河北鲲能电力工程咨询有限公司, 河北 石家庄 050000

2 河北省分布式能源应用技术创新中心, 河北 石家庄 050000

**[摘要]** 目前, 风机塔架与风机基础的连接方式主要为预应力锚栓笼连接。当塔基与基础间采用预应力锚栓笼连接时, 在预应力锚栓预紧力和风荷载产生的外力作用下, 基础台柱顶部及基础底部锚固区的混凝土将承受着较大的局部压力, 传统配筋方式已不适用。为解决上述问题, 文中针对风机基础局部受压区域, 提出了一种风机基础局部受压区的配筋方式, 并对该配筋方式下的承载力进行验算分析, 对风机基础局压受力分析及设计具有一定参考意义。

**[关键词]** 风机基础; 预应力锚栓; 局压; 承载力

DOI: 10.33142/hst.v6i2.8312

中图分类号: TU279.7

文献标识码: A

## Configuration and Analysis of Local Pressure Bearing Steel Bars for Fan Foundation

DONG Qiming<sup>1,2</sup>, YU Kai<sup>1,2</sup>, CUI Guoqiao<sup>1,2</sup>

1 Hebei Kunneng Power Engineering Consulting Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

2 Hebei Province Distributed Energy Application Technology Innovation Center, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** At present, the main connection method between the wind turbine tower and the wind turbine foundation is prestressed anchor cage connection. When prestressed anchor cage connection is used between the tower foundation and the foundation, under the external force generated by the pre tightening force of the prestressed anchor bolt and wind load, the concrete at the top and bottom anchoring areas of the foundation column will bear significant local pressure, and traditional reinforcement methods are no longer applicable. In order to solve the above problems, this paper puts forward a reinforcement method for the local compression area of fan foundation, and checks and analyzes the bearing capacity under this reinforcement method, which has certain reference significance for the analysis and design of local compression force of fan foundation.

**Keywords:** fan foundation; prestressed anchor bolt; local pressure; bearing capacity

### 引言

2020年9月我国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标。2023年国务院政府工作报告进一步指出, 要稳步推进节能降碳, 统筹能源安全稳定供应和绿色低碳发展, 科学有序推进“碳达峰”及“碳中和”, 推动光伏、风电等新兴产业加快发展。近五年, 通过优化能源结构, 我国实现超低排放的煤电机组超过10.5亿千瓦, 可再生能源装机规模由6.5亿千瓦增至12亿千瓦以上, 清洁能源消费占比由20.8%上升到25%以上。风力发电作为清洁能源的重要组成部分, 是实现上述目标的主要生力军之一, 已逐渐成为未来新能源发展重心之一。

风电机组及基础是风力发电项目的重要组成部分, 其中风电机组及基础造价约占整个风电项目总造价的15%~20%, 且是风力发电项目的核心基础, 因此保证风电机组的安全运行是对项目投资的重要保障之一。而风机基础的设计则是保证风电机组安全运行不可忽视的重要环节, 因此, 风机基础的设计至关重要。

随着大型机组的不断涌现, 风机基础与风机塔架的连接也在不断发展优化。传统风机机组与基础之间主要

采用基础环连接方式, 由于基础环连接本身存在一定的局限性, 已逐渐被预应力锚栓笼连接所取代。而预应力锚栓笼连接和基础环连接相比, 基础混凝土的受力模式有着本质的区别, 预应力锚栓连接方式在其台柱顶部及基础底部的锚固区将产生较大的局部压应力, 传统的配筋模式已不适用, 若配筋设计不合理, 锚固区混凝土将受压开裂, 存在较大的安全隐患, 因此, 风机基础局压受力钢筋的配置及分析对风电项目具有重要意义。本文将结合工程实际, 针对风机基础局压受力钢筋的配置及验算进行分析。

### 1 工程概况

某山地风力发电工程位于山西省大同市, 项目规划装机容量为99MW, 拟安装33台单机容量为3.0MW的风电发电机组, 风力发电机组的轮毂高度90m, 叶轮直径146m。风电机组塔架与风机基础采用预应力锚栓笼连接。

#### 1.1 风力发电机组厂家荷载

由于局部受压计算的控制工况为极端荷载工况, 因此仅需考虑极端荷载工况作用下的局部受压计算即可。本工程某风电机组厂家提供的风机塔架传至基础顶部的极端

荷载工况下的荷载见表 1 所示。

表 1 风机塔架传至基础顶部的极端荷载

荷载工况名称	水平合力 $F_r$ (kN)	竖向力 $F_z$ (kN)	弯矩 $M_r$ (kNm)	扭矩 $M_z$ (kNm)	安全系数
极端荷载工况	846.45	-4266.47	73824.22	1192.74	1.0

### 1.2 预应力锚栓笼组件参数

本工程某风机厂家提供的预应力锚栓笼组件主要包括预应力锚栓、上下锚板及螺母等。锚栓组件立面示意图如图 1 所示。

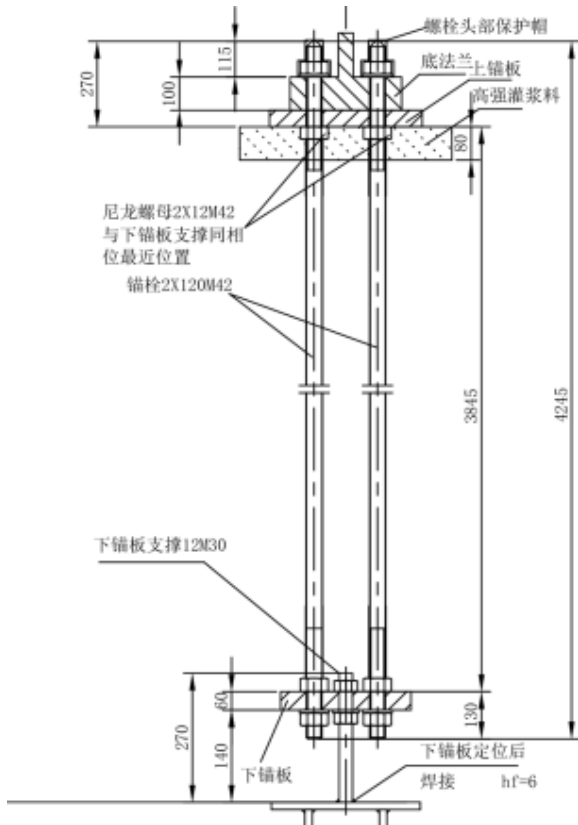


图 1 锚栓参数图

本项目单台风机基础对应的单套锚栓组件共配置 240 根 8.8 级预应力锚栓，预应力锚栓直径 42mm，预应力锚栓沿锚板按两圈均匀布置，锚栓布置所在的圆周直径分别为 4620mm 和 4290mm，每根预应力锚栓的设计预拉力为 500kN，超张拉系数为 1.1；

本工程单套锚栓组件共设置上、下两块环形 Q355NE 钢锚板，上锚板厚度  $t_1=55\text{mm}$ ，下锚板厚  $t_2=60\text{mm}$ ，上、下锚板外径  $D$  均为 4900mm，内径  $d$  均为 4010mm，上、下锚板平面布置图如图 2 所示；上锚板与基础台柱顶部设置 80mm 厚高强灌浆料，高强灌浆料随锚板按环形布置，高强灌浆料外径 5060mm，内径 3850mm，高强灌浆料宽度

605mm，每边宽出锚板 80mm。

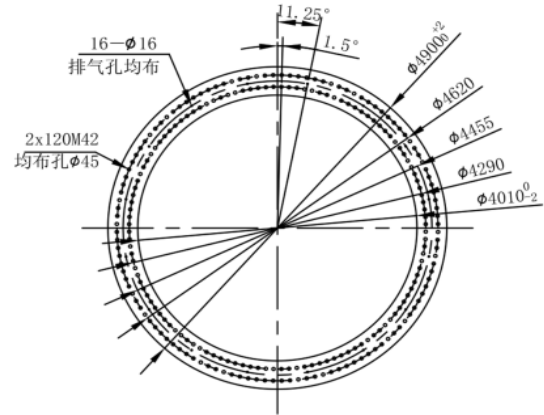


图 2 上、下锚板平面图

### 1.3 地勘资料

本工程风电机组所处地形地貌属低山丘陵区，山势一般较缓。拟建场地覆盖层厚度小于 3m，场地土类型为中硬土~基岩，场地类别为  $I_1$  类。

本工程场地地震烈度为 VII 度（第二组），场地基本地震动峰值加速度 0.15g，基本地震动加速度反应谱特征周期 0.40s，基本地震动加速度反应谱特征周期 0.30s。

根据区域地质资料及本次勘测结果，场地内 25.0m 深度范围内，主要揭露地层分为残积土及基岩等。现分别叙述如下：

(1) 残积土①：黄褐色~黑褐色，稍湿，稍密，以粉土混碎石为主，见大量植物根系。表层覆盖植被，多为杂草。该层山体顶部较薄。

(2) 全风化砂岩②：褐黄色、红褐色、灰褐色为主，全风化，原岩结构已基本破坏，残余结构可辨认，部分已风化成砂状和土状，含少量块状，主要矿物成分为石英、长石。

(3) 强风化砂岩③：褐黄色、红褐色、灰褐色为主，强风化，砂质结构，块状构造，节理裂隙发育，岩石呈碎块状。岩体破碎~较破碎，岩石坚硬程度为软岩，岩体基本质量等级 V 级。

(4) 中风化砂岩④：褐黄色、红褐色、灰褐色为主，中风化，砂质结构，中厚层构造，砂质胶结，胶结一般，矿物成分以石英、长石为主，节理裂隙发育一般，岩体较完整，岩石坚硬程度为较软岩，岩体基本质量等级 IV 级。

根据本工程地质资料，各层地基土的物理力学性质及基础设计参数见下表 2 所示。

### 1.4 风电机组基础体型及技术参数

根据本工程地质勘察资料，并结合风电机组厂家提供的风电机组荷载资料及预应力锚栓组件资料，在满足地基承载力及结构构造的前提下，本工程确定的风电机组基础的主要体型尺寸参数及技术参数如下。

表 2 地基土物理力学性质及基础设计参数表

土层名称	土层重度平均值 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	承载力特征值 $f_{ak}$ (kPa)	压缩模量 $E_s$ 推荐值 (MPa)	(似) 内摩擦角 $\phi$ (°)	粘聚力 $C$ (kPa)
全风化砂岩	20.0*	200	20.0*	25*	5*
强风化砂岩	22.0*	400	20.0*	30*	0*
中风化砂岩	23.0*	800	—	—	—

注：带\*为经验值。

体型参数方面：风电机组基础承台底面半径为 9.80m，棱台顶面半径为 3.55m，承台台柱半径为 3.55m，承台底板外缘高度为 1.00m，承台底板棱台高度为 1.50m，台柱高度为 1.30m，基础埋深为 3.50m。材料参数方面：基础采用 C40 混凝土，基础垫层采用 C15 混凝土，基础钢筋采用 HRB400 和 HPB300 级钢筋，灌浆料采用抗压强度 80MPa 的高强灌浆料。风电机组基础具体尺寸及体型如图 3 所示。

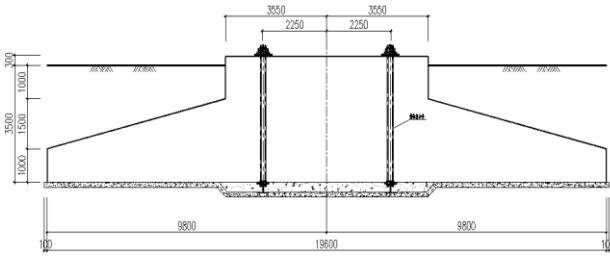


图 3 基础体型图

## 2 局压钢筋配置

在风电机组塔架传至基础顶的荷载和锚栓预应力荷载共同作用下，上锚板下方对应的混凝土锚固区将承受很大的局部压应力，该局压应力一般大于 40MPa，仅靠混凝土自身的抗压强度一般难以抵抗该局部压应力，因此需在混凝土受压锚固区配置间接钢筋来提高混凝土的局部受压承载力。

根据混凝土结构设计规范，间接钢筋配置一般分为方格网式和螺旋式钢筋两种。由于锚栓组件中锚栓数量较多且具有沿圆周分布的特点，配置螺旋式钢筋施工难度极大，因而不具备技术可行性；而方格网式配筋则能很好的适应锚栓组件的布置，且施工操作较为方便。因此，基础局压间接钢筋的配置推荐采用方格网式配筋。由于风电机组基础台柱为圆形、锚栓沿台柱环形均布的特点，风机基础局压钢筋可采用径向钢筋和环向钢筋组成的网状配筋。

根据混凝土设计规范，局部受压面积按照同心对称原则，风电机组基础顶部的局部受压宽度取高强灌浆料的三倍宽度（当三倍宽度超出基础台柱边缘时，以实际宽度为准）。局压钢筋的布置范围也应布置在该范围内，布置宽度略小于局压宽度即可；另外根据规范，局压钢筋在台柱内的布置高度应不小于局部受压区宽度。规范关于局部受压间接钢筋的配置要求如图 4 所示。

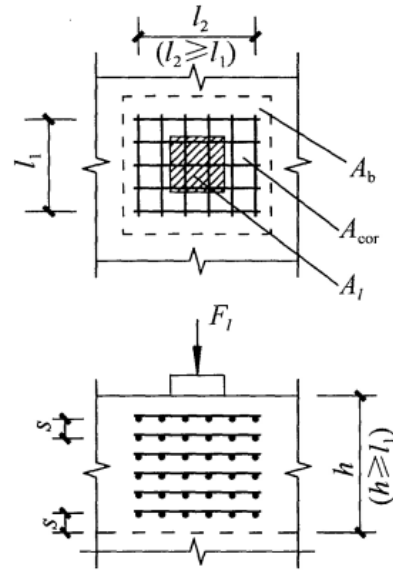


图 4 规范对应间接钢筋布置范围

基于风机基础体型及锚栓组合件的布置特点，并结合规范构造规定的相关要求，风机基础台柱顶部局压区域的间接钢筋配置采用径环向钢筋网形式，径环向钢筋直径均为 12mm，钢筋等级均为 HPB300 级，钢筋网平面布置及剖面布置分别见图 5 和图 6。

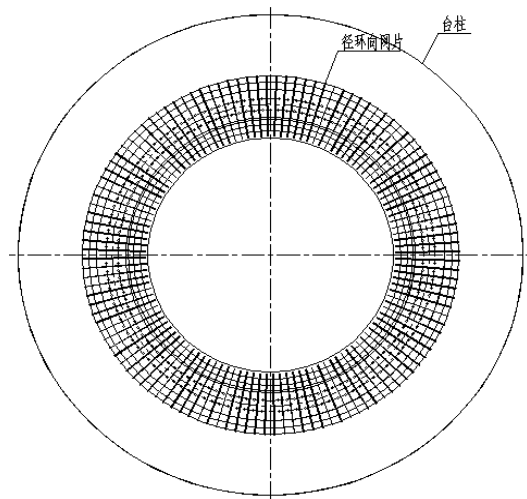


图 5 局压钢筋网平面布置图

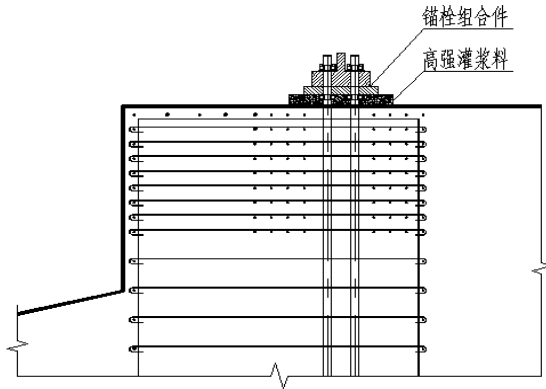


图6 局压钢筋网剖面布置图

### 3 局压承载力验算

#### 3.1 局部压应力计算

锚板下方设置的高强灌浆料为环形构件,灌浆料下方最大压应力按下式计算:

$$\sigma_{\max}=1.3*(F_{zk}+n*P_a)/A_n+1.3*M_{rk}/W \quad (\text{式1})$$

式中,

$F_{zk}$  为塔架传至基础顶部的压力;

$M_{rk}$  为塔架传至基础顶部的弯矩;

$P_a$  为单根预应力锚栓的预应力;

$n$  为单套预应力锚栓的锚栓个数;

$A_n$  为高强灌浆料的净截面面积;

$W$  为高强灌浆料的截面抵抗矩。

将各数据代入式1中,经计算可得:

$$\sigma_{\max}=33.07\text{MPa}.$$

#### 3.2 截面尺寸验算

根据规范,局部受压区的截面尺寸应满足下式:

$$F_1 \leq 1.35 * \beta_c * \beta_1 * f_c * A_{ln} \quad (\text{式2})$$

其中,  $F_1 = \sigma_{\max} * A_{ln}$

式中,

$A_{ln}$  为混凝土局部受压净截面面积;

$\beta_c$  为混凝土强度影响系数;

$\beta_1$  为混凝土局压强度提高系数

经计算,

$$F_1=267431.86\text{kN}$$

$$1.35 * \beta_c * \beta_1 * f_c * A_{ln}=361117.23\text{kN}$$

可知,  $F_1 < 361117.23\text{kN}$ 。即计算结果满足公式2对于局部受压区的截面尺寸要求。

#### 3.3 局部受压承载力验算

根据规范,配置间接钢筋的局部受压承载力应符合

下式:

$$F_1 \leq 0.9 * (\beta_c * \beta_1 * f_c * A_{ln} + 2 * \alpha * \rho_v * \beta_{cor} * f_{yv}) * A_{ln} \quad (\text{式3})$$

式中,

$\alpha$  为间接钢筋对混凝土约束的折减系数;

$\rho_v$  为间接钢筋的体积配箍率;

$\beta_{cor}$  为局压承载力提高系数;

$f_{yv}$  为间接钢筋的抗拉强度

经计算,公式3右侧结果为483176.16kN,且已计算得公式3左侧结果  $F_1=267431.86\text{kN} < 483176.16\text{kN}$ 。可知,最终结果满足公式3对于局部受压承载力的要求。

### 4 结论

风机基础采用预应力锚栓连接时,台柱锚固区存在较大的局部压力。本文主要提出一种提高混凝土局部承载力的间接钢筋配置方式,并对该配筋方式下的承载力进行验算分析,验算结果表明该配筋方式可满足规范对截面尺寸和局部受压承载力的相关要求,对风机基础局压受力分析及设计具有一定参考意义。

#### [参考文献]

- [1]周新刚.风力发电机组钢筋混凝土基础设计问题的探讨[J].水利水电技术,2014,45(2):114-118.
- [2]黄强.MW级风电机组基础环结构分析与优化设计[D].重庆:重庆大学,2014.
- [3]刘焱,张立英,崔振磊,付志强.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.
- [4]住房和城乡建设部.《混凝土结构设计规范》GB50010-2010局部修订的条文及条文说明[J].工程建设标准化,2015(11):35-39.
- [5]吴新翔,周俊杰,陈海根,等.风电机组基础环连接与预应力锚栓连接对比研究[J].风能产业(2018年2月),2018(9):94-99.
- [6]陈海,朱山青.风电机组基础局部受压在塔架基础设计软件中计算问题的探讨[J].广州建筑,2020,48(4):35-39.
- [7]申宽育,李振作.陆上风电场工程风电机组基础设计发展[J].西北水电,2020(6):12-16.
- [8]韩莹,李继祥,王东元.陆地风电机组重力基础旋转刚度计算[J].四川建筑,2021,41(4):131-134.
- [9]杨卫忠,刘伟.砌体局部受压承载力计算的改进[J].四川建筑科学研究,2005(4):34.

作者简介:董其明(1988.12-),连理工大学,建筑与土木工程,当前就职于河北鲲鹏电力工程咨询有限公司,结构工程设计,工程师兼一级注册结构师。