

风电基础结构施工技术与质量控制研究

石鑫¹ 赵光明²

1. 华电郑州机械设计研究院有限公司, 河南 郑州 450046

2. 华电科工股份有限公司, 北京 100070

[摘要]随着风力发电机日益增多并且长期处于动态风荷载以及恶劣环境之下,风电机组的基础结构的质量好坏直接影响整个风电场的安全和使用寿命。本文主要对风电基础结构工程施工技术和质量管理进行研究,在此基础上总结出目前施工中存在的四个主要技术性难题以及质量问题并对其进行了详细的论述,同时对基坑开挖和地基加固处理,钢筋工程及预埋件定位,大体积混凝土浇筑与温度控制,从预应力锚杆安装以及特殊环境下的施工等五个方面进行重点讨论,并在最后提出了原材料把控、施工过程把控、混凝土质量保障、沉降观测以及安全管理方面具体的质量管控方法,旨在对风电基础结构工程建设提供技术支持。

[关键词]风电基础; 施工技术; 质量控制; 大体积混凝土; 预应力锚栓

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19589

中图分类号: TM614

文献标识码: A

Research on Construction Technology and Quality Control of Wind Power Infrastructure

SHI Xin¹, ZHAO Guangming²

1. Huadian Zhengzhou Mechanical Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450046, China

2. Huadian Heavy Industries Co., Ltd., Beijing, 100070, China

Abstract: With the increasing number of wind turbines and their long-term exposure to dynamic wind loads and harsh environments, the quality of the foundation structure of wind turbines directly affects the safety and service life of the entire wind farm. This article mainly studies the construction technology and quality management of wind power foundation structure engineering. Based on this, four main technical difficulties and quality problems in current construction are summarized and discussed in detail. At the same time, five aspects are emphasized, including excavation and foundation reinforcement treatment, steel reinforcement engineering and embedded parts positioning, large volume concrete pouring and temperature control, prestressed anchor installation, and construction in special environments. Finally, specific quality control methods for raw material control, construction process control, concrete quality assurance, settlement observation, and safety management are proposed, in order to provide technical support for the construction of wind power foundation structure engineering.

Keywords: wind power foundation; construction technology; quality control; large volume concrete; prestressed anchor bolt

引言

在国家“双碳”发展目标的引导下,我国风电装机量增长迅猛,风电场开发扩展到了高原、戈壁滩、近海洋等特殊地区。而大型风力发电机塔架高达上百米,其叶片直径已经达到200m以上,在运转的时候就会给基础带来巨大的倾覆力矩及疲劳荷载。而基础结构则是风机塔筒跟地面之间的纽带部位,所以它的质量如果出现瑕疵就很难再进行补救了,甚至会造成整个风机倒塌这样的重大事故。但是风电的基础施工包含了大量混凝土的大体积现浇以及预埋高精度的锚栓组合件等多种难题,在实际的工程项

目当中也经常会出现各种质量问题。所以,细致整理风电基础施工技术重点,制定完善的质量管理体系,对于保证风电场工程质量及长久稳定运行有着积极作用。

1 风电基础结构施工中存在的问题

目前风电基础施工过程中存在着很多明显的技术难题和质量问题,主要集中在地基稳定性的方面。风电机组的基础对地基的要求较高,有承载力、变形以及稳定性三个方面,天然地基上的基础要建在原有的素土地基上,基面最好设置在标准冻结线下方。但是软弱地基、冻土层及岩溶地形等地质缺陷十分普遍,在地基处理不好会导致基

础下沉程度不同,造成塔筒倒塌,而混凝土开裂问题也不可小觑,风电机组的基础大多属于大体积混凝土浇筑,一次成型量可达到几百方,混凝土的裂缝问题会受到水泥水化热的影响,环境温度的变化也会导致混凝土出现裂缝,再加上混凝土自身的收缩作用、基础的下沉以及施工方法的影响、结构受力等都会使混凝土发生裂缝。现场浇筑时,混凝土内外温差经常超过 25°C 的门槛值,温度应力造成混凝土表面不同程度上开裂,降低了基础的耐久性和防水能力。钢筋绑扎的质量问题是钢筋间距误差过大、保护层厚度掌握不好。预埋件位置偏差也很常见,在大直径预应力螺杆的安装过程中,水平偏差过大直接影响到上塔筒法兰连接质量。另外,施工对于环境季节的影响不容忽视,冬季气温过低影响混凝土养护,沿海地区基础经年累月被海水中的氯离子侵蚀,使得钢材锈蚀、混凝土耐久性不断降低。

2 风电基础结构施工关键技术

2.1 基坑开挖与地基处理技术

基坑挖掘是风电基础建设的首项工作,其准确性关系到之后的模板安装及钢筋排布位置。在挖掘之前要根据地质勘探报告确定放坡系数,对较为松软的地层要做好支撑防护工作防止边坡塌落,在挖掘完毕后需要将基槽面处理到规定的标高处并检查地质承载力能否达到设计标准。而根据《风电工程风机地基处理技术规范》(T/CEPPEA 5055-2024)的规定,地基处理的方法主要有换填垫层地基法、压实法、强夯法、复合地基法,还有高压旋喷桩加固法、注浆加固法、锚筋加固法等等不同的方法。相对而言较为松软的土地多用碎石桩或水泥土搅拌桩来加强地基。使复合地基承载力与抗剪能力有所提升。对存在岩溶地段处,必须采取注浆充填溶腔及设置锚杆支护相结合的方式使基础下部岩层连成整体而稳定,地基处理完成后必须做载荷试验检测其承载力的实际值不应小于设计规定值的 1.0 倍。

2.2 钢筋工程与预埋件精确定位技术

钢筋工程是风力发电机基础结构的主要支撑结构,钢筋的加工与安装的质量好坏直接影响到整个基础的抗弯、抗剪强度大小,在钢筋进场的时候需要检查产品的合格证及力学检测报告,并取样的复核力学性能;在绑扎钢筋的过程中要严格按照设计图纸的要求控制好钢筋间的距离、排距以及锚固长度等,特别是基础最底下一层及顶层的钢筋位置一定要精确到位,根据《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB50204-2015)要求受力钢筋保护层厚度的合格率需做到 90%及以上,基础钢筋保护层厚度的允许

误差范围不超过 $\pm 10\text{mm}$ 。现场施工一般用预制混凝土垫块或者高强度塑料垫块来进行保护层厚度的控制,垫块之间间距不宜过大。埋件定位的技术难题的关键步骤,基础环或者锚栓笼的安装质量关系到整个风力发电机塔架是否垂直以及安装的安全性问题。施工过程中一般使用全站仪坐标法与十字轴线控制网相结合的方式,分别从预埋件平面位置及标高两个方面来进行检验。对于高精度锚栓笼,则可以借助定位架以及模板系统来进行暂时稳固,在绑扎好钢筋笼之后再作一次全面检查以保证锚板平整度的误差满足设计标准。

2.3 大体积混凝土浇筑与温控技术

大体积混凝土浇筑是风电基础工程施工的主线。风力机基础混凝土浇筑量很大,一般都超过 1m ,属典型的大体积混凝土构筑物,在浇筑过程中由于水泥的水化作用产生大量的热,不易散出,很容易造成温度开裂,《风机大体积混凝土基础裂缝防治技术和温控监测研究实践》显示温度高点、最大温差主要集中在浇筑 4 天左右,裂痕大小与基础的厚度以及周围环境温度下降的速度关系很大。为了防止出现裂缝,在施工前要做好以下措施:一是调整混凝土的配比,使用低水化热的矿渣硅酸盐水泥,并加入粉煤灰、高效减水剂减少每立方米水泥用量。浇筑时采取分层连续浇筑或者斜面推进法浇筑,每层浇筑厚度为 $300\sim 500\text{mm}$,保证上下层之间紧密结合,混凝土浇筑入模温度不超过 30°C ,夏天用冰水搅拌或者浇筑前对骨料进行冷却降温 and 保湿措施,浇筑后及时覆盖塑料薄膜和保温被进行保温保湿养护,养护期不少于 14d。根据《大体积混凝土施工规范》规定,混凝土内外温差不大于 25°C ,降温速度不大于 $2.0^{\circ}\text{C}/\text{d}$,砼浇筑体内表面与环境温差不大于 20°C 。在施工过程中要对桩基中及外设置温度检测点以测得各部分温度的变化情况,在温度变化接近临界值的时候要要及时开启循环水冷管道或者提高外层保护的强度。

2.4 预应力锚栓组合件安装技术

在现代风电基础的设计里,预应力锚栓基础因其传力路线清晰、方便维修等特点得到了普遍的应用。锚栓组合件是由上锚板、下锚板、锚栓杆以及配套螺母所组成的,一台大型风力发电机单个基础的锚栓数经常超过百个,安装精度要求十分严格,在施工现场首先通过测量控制网点定出锚栓笼中心点及高程基准点,再把下锚板放在定位架上初步找正,《风力发电机组预应力基础锚栓笼组合件技术规范》(T/CRES 0018-2023)对锚栓笼的工作场地、安装步骤、定位锚栓安装、普通锚栓安装、锚栓笼校正、验评程序还有张拉工序都做了规定。锚杆钻入以后,要保

证每根锚杆的倾斜度都在规定的范围之内, 在施工过程中有的项目会使用全站仪及激光准直仪多次复核锚杆笼子的中心偏位和间距偏差, 混凝土灌注前一定要对锚杆组进行复测, 使上锚板表面平顺达到设计标准的要求。混凝土达到设计强度后通过液压拉伸器分阶段进行张拉锚杆的操作, 张拉的过程中要严格控制油压表的数值并且依据锚杆伸缩量来校正张拉力大小情况, 保证预紧力稳定可靠。

2.5 特殊环境施工技术(冬施/雨季/近海等)

寒冷地区的冬季施工不仅要防止低温度混凝土的凝结以及冻结膨胀, 而且还要防止低温混凝土产生冷缩裂缝。当外界日均温度持续低于 5 摄氏度五天, 就要进行冬季施工。这时要采取整体蓄热法或者暖棚法等措施来保证施工。混凝土拌和用水应加热到 60℃ 以上, 石子不得带有冰块, 搅拌机上要安装保温隔热材料, 浇筑完毕的基础要及时用电热毯包裹起来并覆盖上保温棉被, 在条件允许的情况下还要在外围搭设防风保温棚, 使混凝土在冻结之前获得足够的抗压能力。在雨季施工要重点做好基坑排洪和防治泥沙冲刷的工作。施工时基坑开挖完毕后应在坑底做好集水坑、排水沟, 选用合适功率抽水泵, 快速排出汇集的降水, 防止基底发生因浸水而导致的土体饱和、崩解等情况的发生。我国北方沿海浅海区域风电工程多桩承台经常处在冻融与氯盐侵袭的恶劣环境之中, 混凝土抗冻融及抗氯离子渗透能力经受着巨大的挑战, 因此近海基础必须使用高标号的海工混凝土, 严格限制其水胶比不超过 0.40, 添加优质引气剂以及阻锈剂, 在钢筋外侧包裹环氧涂层, 以此形成复合式的防护体系。

3 风电基础结构质量控制措施

3.1 原材料质量控制

材料的质量是工程项目的质量基础。水泥要尽量选择低发热量的矿渣硅酸盐水泥或者粉煤灰水泥, 并且其稳定

性和初凝终凝时间必须通过复试合格之后才能作为施工用水泥使用; 粗细骨料要颗粒均匀、含粉率达标, 严禁在粗骨料中出现风化、氧化铁等杂质以及活性二氧化硅成分, 严禁使用海砂为细骨料, 在拌合水中要选用清洁水质, 氯化物含量须在指标范围内; 外加剂的选择需要与水泥相匹配, 减水剂、缓凝剂、引气剂的数量要依据实验调整。进场的钢筋必须检查出厂合格证和产品质保单, 并按批次抽检拉拔实验、弯曲实验和断面重量误差实验。预应力锚栓及其配套的螺母要提供可以查证的机械性能检测报告, 硬度、抗拉强度以及保证载荷都不得小于设计值。

3.2 施工过程质量控制

工程施工质量管理是风电基础工程质量管理的重要步骤。施工过程中每一工序完成后都必须经过质检员与监理工程师共同验收, 做到流程上的闭环管理, 在预埋件定位、模板尺寸、混凝土浇筑等方面的重要质量控制点必须设为停检点, 并指定专人进行全程旁站。浇筑过程中技术人员要监督好钢筋绑扎、基础环吊装就位、混凝土分层振捣等工序是否按质按量完成, 严格依照相关规定执行; 并且对仪器仪表以及测量仪具做好定期检验工作以保证检测结果的真实可靠。各个重要工序的质量控制重点见表 1。

3.3 混凝土质量控制

对混凝土的质量把控覆盖了从搅拌、运输、浇筑直至养护的全过程。搅拌站要使用电子称量控制系统保证配合比的准确实施, 每盘混凝土配料误差不能超过规定范围; 运输过程需保证罐体不停地旋转, 运输过程不能超过 90 分钟, 绝不能中途添加水来改变其塌落度, 在运输到工地以后每一车都必须检测一下其塌落度以及入模时候的温度, 如果出现分离或者塌落度过大的状况就及时退货。灌注工序必须不间断地进行, 停工的时间不超过混凝土初凝时间, 新老混凝土接茬部位要认真对待避免出现施工

表 1 风电基础施工过程质量控制要点

工序	控制项目	允许偏差/标准	检验方法	检查频率
基坑开挖	基底标高	±50mm	水准仪	每基坑不少于 6 点
钢筋安装	钢筋间距	±10mm	钢尺量	每构件 3 个断面
钢筋安装	保护层厚度	±10mm	钢尺/扫描仪	每构件 8 处
预埋锚栓	锚栓中心偏移	≤2mm	全站仪	逐根检查
上锚板安装	表面平整度	≤1.5mm	水准仪/塞尺	每板 4 个方向
模板安装	轴线位置	±5mm	钢尺/经纬仪	每轴线 4 点
混凝土浇筑	坍落度	160±20mm	坍落度筒	每车或每 50m ³
混凝土养护	里表温差	≤25℃	温度传感器	实时监测
地基处理	承载力	≥设计值	载荷板试验	每基础不少于 1 处

冷缝。混凝土振捣应做到“快插慢拔、分布合理”，插入下层混凝土深度约为 50~100mm，当混凝土表面出现溢浆、停止下沉并开始冒出气泡时即可。拆模后应立即对混凝土表面覆盖保温材料进行保湿养护，在养护期间禁止在基础上堆放其它物品或者其它设备等。

3.4 基础沉降监测控制

基础沉降观测是对地基状态的判断以及对建筑物长期稳定性的评价方法之一。在施工过程中应在基础顶面上沿圆周方向等距布置沉降标点，在每根桩基上不应少于 4 个点。第一次观测应在基础浇筑完毕、拆模之后及时开展，得到基座的初始读数。以后观测的时间间隔取决于地基情况与施工进度不同而定，一般情况下每当浇筑完一台风电机组基础就需要进行一次全面的数据收集，在风电塔筒吊装前、后也要再测量一次，风电场运行后的头一年要每隔三个月检测一次。如果基础沉降速度连续两个月大于 2mm/月或者累计下沉幅度达到预计下沉幅度的百分之七十以上，则需要加大基座观测密度并且启动加固计划。所有的沉降量都要如实记载在沉降观测记录本里，做出加载-沉降-时间曲线图，来观察地基的固结情况以及长时间内的变化规律，给风电场后期运维工作以可靠参考。

3.5 施工安全管理措施

施工质量和基础息息相关，安全防护工作到位能够避免很多的质量问题。施工现场要形成由项目负责人担任主要负责人的一级责任制体系，层层签署安全生产责任书。对深坑开挖、大体积混凝土浇筑及锚栓张拉等高风险部分分项工程，都需做好有针对性的安全施工专项方案，经专家评审通过后方能进行施工。入基坑之前必须检测好坑壁稳定性，做好临时支撑以及搭设上下爬梯。泵送管线连接要紧密封实，以免喷溅造成伤害。预应力锚栓张拉区域周围需设立围挡警戒，操作过程中禁止人员站在锚栓头部方向。另外还需要加强对施工单位的安全教育培训以及技术交底工作，提升施工现场的一线操作工人的质量和安全意识，做到有备无患防范在先，消灭隐患于萌芽状态。

4 结语

文章对风电基础工程建设过程中遇到的主要技术难

题及质量控制重点进行了归纳总结，明确介绍了基坑开挖及地基处理、钢筋和预埋件准确定位、大体积混凝土养护、预应力锚栓埋设及异常气候条件下施工五大关键技术的内容。混凝土结构裂缝防护、锚栓埋设精确度控制以及地基沉降情况观测是工程质量控制的关键所在，事实证明，唯有将从前期预防到中段管理再到后期检查的质量把控思路贯穿整个施工过程，在每个环节都按相应规范要求做好工序质检工作，根据不同特殊情况采取相应的技术手段才能建成安全放心、使用寿命长的优质风电基础工程，支撑风电产业的健康发展。

[参考文献]

- [1]刘刚伟.山地风电基础土岩组合稳定性与施工技术研究[J].中国新技术新产品,2023(7):86-88.
- [2]李彦彬.海上风电机组基础结构设计的关键技术问题与讨论[J].中国战略新兴产业,2026(9):122-124.
- [3]赵彦贤,刘孝刚.海上风电基础结构选型与施工工艺探讨[J].全面腐蚀控制,2025,39(11):178-180.
- [4]李一凡.风电能源技术发展模式研究[J].石化技术,2025,32(10):105-107.
- [5]王羽波.我国海上风力发电基础结构型式相关专利分析与对策[J].天津科技,2026,53(3):103-106.
- [6]陈世伟,罗健敏,韩硕,等.漂浮式海上风电结构基础及发展现状分析[J].中国石油和化工标准与质量,2026,46(02):81-83.
- [7]张瑞刚,孙海涛,雷航,等.漂浮式海上风电浮式基础结构安全性评估[J].热力发电,2026,55(1):56-64.
- [8]张勋,刘佳,何森,等.黄土风电桩基础-结构随机动力响应模型试验研究[J].建筑科学,2025,41(5):33-42.
- [9]刘祺.海上风电风机基础结构型式分析研究[J].中国水运,2025(2):54-55.
- [10]刘占领,黄远远.基于海上风电结构安全监测系统的研究[J].船舶工程,2024,46(1):166-171.

作者简介:石鑫(1984—),男,高级工程师,本科/学士,从事火电、新能源及多能耦合联合供能方面的研究工作;赵光明(1985—),男,高级工程师,研究生学历,工学硕士学位,从事火电、新能源方面的研究工作。