

# Excavation support technology and construction risk control of wind turbine foundation in onshore wind farms under complex geological conditions

Xinjie Wang Tong Li

China Power Construction Group Hebei Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050021, China

## Abstract

As wind farms expand into complex geological zones, foundation excavation faces challenges from soft soil, karst formations, and elevated groundwater levels, posing significant challenges to onshore wind farm construction. Serving as the core load-bearing structure supporting 100-meter turbine towers, wind turbine foundations must withstand tremendous vertical loads and overturning moments. During excavation processes, these foundations are prone to safety hazards such as pit collapses and water/sand surges. This paper analyzes typical geological characteristics in complex environments—including soft soil, karst formations, and high groundwater levels—summarizing key technical considerations for foundation excavation support systems. A comprehensive risk management framework is established through four core processes: risk identification, assessment, response, and monitoring. These measures provide technical support for wind farm construction in complex geological areas, ensuring both safety and quality of turbine installation while guaranteeing project completion.

## Keywords

Complex geological conditions; Onshore wind farms; Turbine foundations; Excavation support technology

# 复杂地质条件下陆上风电场风机基础开挖支护技术及施工风险管控

王新杰 李通

中国电建集团河北工程有限公司, 中国·河北 石家庄 050021

## 摘要

随着风电场不断向复杂地质区域拓展, 风机基础开挖面临软土、岩溶、高地下水位等不利因素的制约, 给陆上风电场建设带来严峻考验。风机基础是支撑百米塔筒的核心受力结构, 需承受巨大竖向力与倾覆力矩, 在基础开挖施工过程中, 易引发基坑坍塌、涌水涌砂等安全事故。本文结合复杂地质条件下软土、岩溶、高地下水位等典型特征, 总结风机基础开挖支护施工技术关键点, 提出针对性施工解决方案, 并从风险识别、风险评估、风险应对、风险监控四个核心流程, 构建风机基础开挖全过程施工风险管控体系。此举可为复杂地质区域风电场建设提供技术支撑, 保障风机施工安全与质量, 确保项目顺利竣工。

## 关键词

复杂地质条件; 陆上风电场; 风机基础; 开挖支护技术

## 1 引言

随着能源革命推进, 以风能为主的清洁能源产业蓬勃发展。受土地制约, 风电场向山区、黄土区、岩溶区等不良地质区拓展, 这些区域地质复杂、地形起伏大、地下水位多变, 不利工程施工。风机基础是风电场核心承载结构, 其开挖质量关乎风电场长期稳定运行。传统开挖支护技术难适配复杂地质, 易引发基坑坍塌、边坡失稳等风险, 还可能延长工期、

增加费用甚至导致事故。因此, 研究适配复杂地质的风机基础开挖支护技术, 构建科学风险管控机制, 对陆上风电场高质量建设、能源施工安全及风电可持续发展意义重大。

## 2 复杂地质条件对陆上风电场风机基础开挖的影响分析

### 2.1 不良地质现象的影响

复杂地质区域普遍存在软土、膨胀土、湿陷黄土及岩溶等不良地质条件, 易引发地质灾害, 直接影响风机基础开挖基坑稳定。由于软土承载力低、压缩性高, 开挖过程中会导致基坑侧壁下沉变形, 甚至坍塌; 由于膨胀土遇水膨胀、

【作者简介】王新杰, (1972-), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 工程师, 从事光伏及风电施工安全技术措施研究。

失水收缩,反复膨胀收缩会导致基坑土体开裂、破坏土体结构;由于湿陷黄土遇水易发生湿陷,失水后又收缩,反复膨胀会破坏土体结构,不利于基础开挖;由于岩溶地貌易形成溶洞、溶沟等,开挖过程中若遇到未探明的溶洞,易引发基坑突水、土体垮塌,对施工造成不利影响。

## 2.2 复杂地形地貌的制约

山区、丘陵等复杂地形,基础场地狭窄、高差大,不利于土石方开挖。一方面,场地狭窄导致大型开挖设备进场与移场困难,开挖效率低;另一方面,地形复杂使边坡坡度控制难度大,若坡度控制不当,在降雨冲刷、土石自重等因素作用下极易发生边坡失稳滑坡事故;此外,山高岭峻、沟壑纵横的地形易导致地表径流汇集,一旦地表径流涌入基坑,极易引发地质灾害事故<sup>[1]</sup>。

## 2.3 地下水文条件的威胁

在复杂地质区域,高地下水位、高承压水或渗流等问题对风机基础开挖的影响更为显著。“高地下水位”会增加基坑积水量,不仅不利于开挖作业,还会降低土体抗剪强度,软化基坑周壁土体;“高承压水”若控制不当,易冲破基坑底隔水层,导致基坑涌水、涌砂,破坏基坑底土体结构;“渗流”会带走基坑周围土体中的细小颗粒物,使土体孔隙增大、承载力降低,严重时会造成基坑垮塌。

## 2.4 岩土体性质不均的挑战

同一风机基础基坑可能穿越黏性土、砂性土、碎石土等不同性质的岩土层,不同岩土层的开挖难易程度与稳定性差异较大。若对不同岩土层一概采用相同的开挖支护方案,难以适配其特性,极易出现单个支护结构失效,如砂性土层管涌、黏性土层蠕变变形等问题,因此需针对不同岩土层采取差异化防护措施,防止影响整个基坑稳定<sup>[2]</sup>。

# 3 复杂地质条件下陆上风电场风机基础开挖支护技术

## 3.1 支护技术方案选型原则

风机基础开挖支护技术方法选择应遵循“安全可靠、经济适用、因地制宜”的原则。首先,本着确保施工安全的原则,根据地质勘察资料,对坑壁坍塌、涌水危险性进行分级,选择可适应复杂地质条件的合理支护技术方法。其次,在满足安全要求的前提下,对比不同支护技术方法的造价,选择经济性最优的方案,避免盲目采用过度支护方案,造成财力与物力的浪费<sup>[3]</sup>。再次,需结合具体地质条件选择适配的支护结构,例如针对软土地质、岩溶地质及高地下水位工况,分别确定对应的支护结构与施工工艺。

## 3.2 典型地质条件下的支护技术应用

复杂地质的风机基础开挖支护应根据不同地质条件进行分类,通过不同技术方案的选择,兼顾安全与施工效率,确保开挖支护满足挡土、防渗和抗变形等要求。

### 3.2.1 软土与高地下水位区域

该区域土体含水量高、抗剪强度低,且地下水位高,

受水影响极易软化,优先采用“排桩+止水帷幕+内支撑”工法。其中,排桩采用直径 $\phi 800 \sim 1200\text{mm}$ 的钻孔灌注桩,桩中心距 $1.2 \sim 1.5\text{m}$ ,钻孔垂直度偏差 $\leq 1\%$ ,采用混凝土导管法连续浇筑,避免出现串孔现象;止水帷幕采用三重管高压旋喷桩,桩径 $\phi 600 \sim 800\text{mm}$ ,桩与桩之间搭接长度不小于 $200\text{mm}$ ,施工时提拔速度控制在 $10\sim 20\text{cm/min}$ ,旋转提升作业,喷压保持 $20\sim 30\text{MPa}$ ,确保止水帷幕渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ ;内支撑根据开挖深度选择,开挖深度 $< 8\text{m}$ 时,选用 $\text{H}400 \times 400$ 及以上规格的型钢内支撑,开挖深度 $> 8\text{m}$ 时选用混凝土内支撑,内支撑间距 $3 \sim 5\text{m}$ ,遵循“随挖随施”原则,确保 $24\text{h}$ 内完成施工;同时布设超深 $3 \sim 5\text{m}$ 的降水井,通过降水井将地下水位降至开挖面以下 $0.5 \sim 1.0\text{m}$ 后,再开展开挖作业。

### 3.2.2 岩溶与破碎岩区域

根据溶洞、裂隙发育风险,采用“溶洞预处理+地下连续墙”的处置方案。预处理前需通过地质雷达探测与钻孔勘察明确地质情况:体积 $< 5\text{m}^3$ 的小溶洞,采用掺加 $5\%$ 微膨胀剂的 $\text{M}30$ 水泥砂浆,以 $0.3\sim 0.5\text{MPa}$ 压力高压灌注填充;体积 $> 5\text{m}^3$ 的大溶洞,清空内部杂物后,采用厚度 $\geq 500\text{mm}$ 的 $\text{C}30$ 钢筋混凝土盖板配合直径 $600\text{mm}$ 的灌注桩进行支护处理。地下连续墙施工参数如下:墙厚 $600\sim 800\text{mm}$ ,采用抓斗成槽工艺,泥浆护壁(泥浆相对密度控制在 $1.2\sim 1.3$ ),混凝土强度等级 $\geq \text{C}35$ 且抗渗等级 $\text{P}8$ ;成槽后需进行超声波检测,确保墙身垂直度容差 $\leq 1/300$ ,随后浇筑高压旋喷桩;在地下连续墙外侧布设水位监测井,若发现渗漏情况,必要时采用聚氨酯灌浆进行封堵<sup>[4]</sup>。

### 3.2.3 山区与高边坡区域

该区域支护重点为边坡加固与卸荷平衡,采用“土钉墙+锚杆+喷锚支护”结合分级开挖的方案,具体参数如下:锚杆选用 $\text{HRB}400$ 级钢筋,其中直径 $25\text{mm}$ 的精轧螺纹钢锚杆(长度 $3\sim 6\text{m}$ ,间距 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ )注浆压力控制在 $0.2\sim 0.4\text{MPa}$ ,直径 $32\text{mm}$ 的精轧螺纹钢锚杆(长度 $8\sim 12\text{m}$ ,间距 $3\text{m} \times 4\text{m}$ )设计承载力 $150\sim 200\text{kN}$ ;喷锚面层采用 $\text{C}25$ 混凝土,厚度 $100 \sim 150\text{mm}$ ,内置 $\Phi 8@200 \times 200$ 钢筋网,湿喷施工压力 $0.3\sim 0.5\text{MPa}$ ;分级开挖高度控制在 $2 \sim 3\text{m}$ ,每级开挖平台宽度 $\geq 1.5\text{m}$ ,平台外侧设置 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 截水沟及高度 $100\text{mm}$ 的挡土坎,边坡坡度 $> 45^\circ$ ;同时布设截面尺寸 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的抗滑桩(长度 $10 \sim 15\text{m}$ ,间距 $3\text{m} \times 4\text{m}$ ),增强边坡整体稳定性。

## 3.3 支护施工工艺与质量控制

支护施工需严格依设计工艺,做好各环节质量管控。以排桩施工为例:钻孔垂直度偏差 $\leq 1\%$ ,防桩体倾斜影响挡土效果;钢筋笼加工精准控制钢筋间距与保护层厚度,防运输安装变形;混凝土浇筑用导管法连续作业,避免断桩。质量控制建立“事前检测-事中检测-事后验收”体系:事前检测钢筋、混凝土等材料性能,不合格禁用;事中专人监督施工,记录参数并纠正违规;事后专项验收,通过超声波

测排桩完整性、抗拔试验测锚杆承载力。此外,施工后布置沉降观测点与测斜管监测边坡沉降及位移,异常时及时加固。

## 4 复杂地质条件下陆上风电场风机基础施工风险管控

### 4.1 施工风险识别

建立“地质勘察+工程分析+经验总结”的风险识别体系。首先,根据地质勘察报告,梳理不良地质、地下水、地形地貌等风险因素,明确软土失稳、岩溶突水、边坡滑坡等风险类型及对应风险源;其次,结合风机基础开挖支护施工各环节,梳理开挖设备倾落、支护结构失效、高空坠落等环节性风险源;最后,参考类似工程事故案例,总结历史风险事件,识别易被忽视的风险源点,建立风险清单,作为后期风险管控的依据。

### 4.2 施工风险评估

风险评估采用“定性+定量”分析相结合的方法。定性分析采用专家打分法,即邀请地质、结构、施工等领域专家,对风险发生的可能性、影响程度进行打分,确定低、中、高三个风险等级;定量分析采用故障树分析法,选取“基坑坍塌”“涌水涌砂”等重大风险作为顶事件构建故障树模型,计算各风险因素的重要度,精准识别关键风险点。例如,通过定量分析软土区基坑坍塌风险因素,得出“地下水位控制不当”“支护桩强度不足”为核心风险因素,为风险应对提供明确方向<sup>[5]</sup>。

### 4.3 施工风险应对策略

根据风险等级制定差异化风险应对预案,遵循“防一减一转一避”原则,实现施工风险从前期预防到过程管控的全流程覆盖。

风险防范:针对高概率、广影响的重大风险点,提前开展物探与地质勘察双重验证,开挖前落实防范措施。地下水位较高区域,施工前依物探数据完善降水井布置,遵循“先降水、后开挖”策略,按 2-3m 间距布井,双电源供电,将水位降至开挖面下 0.5~1.0m,避免地基土体下陷软化;岩溶发育区,通过地质雷达、钻探及探孔(每 500 m<sup>2</sup> ≥3 个)分治溶洞,小溶洞(<5m<sup>3</sup>)用 M30 水泥砂浆高压灌注,大溶洞用 ≥500mm 厚 C30 钢筋混凝土盖板+600mm 桩径灌注桩处理,做好记录。

风险减轻:针对中等风险,优化工艺并加强管控。山区边坡用“分层开挖、分层支护”,单次开挖 2~3m,1 天内完成土钉墙或喷锚支护;设备使用前专项检查挖掘机、起重机等,记录情况,同时培训操作人员,减少机械故障与操作失误风险。

风险转移:通过合同约定与投保方式适度转移部分风险,将工程中复杂地质条件下的支护施工任务交由具备地质灾害治理资质的专业单位承担,在合同中明确支护质量要

求、事故赔偿比例等条款;购买建筑工程一切险与第三者责任险,保险范围覆盖基坑坍塌、涌水涌砂导致的工程损失、人员伤亡责任及临近设施损坏赔偿责任,保险金额设定为项目工程造价的 1.2—1.5 倍,确保风险发生时经济损失可控。

风险规避:针对不可控风险点,立即启动方案修改程序。例如,开挖过程中发现体积大于 50m<sup>3</sup> 且未探明的溶洞,或监测数据显示边坡单日位移值超过 10mm(即超过预警位移值(单日预警值通常为 5mm)2 倍)时,需立即停止施工,组织专家研判风险。若判定为不可控风险,应果断放弃既定施工方案,重新开展地质勘察工作,依据新一轮勘察结果重新选取地质条件良好或无溶洞发育的岩层区域,或采用桩基础穿越风险区域,从根源上避免重大安全事故发生。

### 4.4 施工风险动态监控

构建“实时监测+警报响应+动态调整”的风险动态监测模式。监测方面,布置自动化监测设备,对基坑边坡沉降、水平位移、地下水位及支护结构内力等参数进行实时采集,监测频次根据施工阶段调整,开挖阶段每 2h 监测 1 次,基坑稳定阶段每 12h 监测 1 次;警报响应方面,设定风险警报阈值,当边坡单日位移超过 5mm、地下水位突然上升 1m 时触发警报,警报响应分为蓝、黄、红三个等级,对应采取不同响应措施,其中红色警报触发后需立即停工并组织人员撤离;动态调整方面,根据监测数据与警报情况,实时调整风险应对策略与作业安排,例如当支护桩内力超过允许值时,及时增加内支撑根数,确保风险始终处于可控范围<sup>[6]</sup>。

## 5 结语

复杂地质下陆上风电场风机基础开挖支护及风险管控,是风电产业与项目风险管控协同的重要内容,影响风电场可持续运营与建设经济性。风电场向山区、岩溶区推进后,支护方案需问题导向、因地制宜,解决土质差异、地下水、破碎地层稳定问题,严控施工质量,保障基础安全经济。风险管控需破传统模式,凭实时监测掌握风险动态,构建“识别-评估-应对-监控”闭环体系,避免基坑坍塌等事故。未来需结合先进技术与经验,完善技术及管控体系,助力“双碳”目标。

### 参考文献

- [1] 何晓春,汤宁,秦汉华.陆上风电场风机吊装施工组织与管理[J].安装,2024,(S2):1-3.
- [2] 王坤.陆上风电场风机基础更换损坏锚栓施工技术探讨[J].山东工业技术,2021,(02):102-106.
- [3] 朱峰林.某陆上风电场风机基础选型及结构安全性分析[J].水电与新能源,2018,32(10):72-75.
- [4] 樊建峰,林运胜,周熙.风电场风机基础大体积混凝土冬季施工技术探讨[J].红水河,2024,43(04):90-93.
- [5] 刘丰.风电场中岩石锚杆风机基础应用研究[D].沈阳建筑大学,2022.
- [6] 马艺.基于生命周期评价的风电场建设与运营碳排放评价及减排潜力研究[D].深圳大学,2022.