

复杂地质条件下桩基础施工技术适应性研究

程洪民, 王京丽

中车山东风电有限公司, 山东 济南 250000

DOI:10.61369/ME.2024080011

摘要 : 针对风力发电场复杂地质条件下桩基础施工中常见的孔壁坍塌、沉渣过厚与桩端持力不稳等问题, 本文以某大型风机基础工程为依托, 开展了成孔工艺、扩底处理与桩端注浆等关键工艺适应性研究。结合现场岩土结构与荷载特性, 构建泥浆护壁稳定性模型与承载力计算方法, 提出反循环钻进联合扩底及注浆复合技术路径。试验结果表明, 扩底桩和注浆桩的极限承载力分别提升至3410kN与3265kN, 桩顶位移控制在4.1mm与4.6mm以内, 沉渣厚度降低至48–52mm, 桩身完整性均达I类标准。研究验证了所提工艺在风机基础复杂地层下的适应性与推广价值, 为类似区域风电桩基施工提供技术支撑。

关键词 : 复杂地质; 钻孔灌注桩; 成孔工艺; 扩底处理; 桩端注浆; 承载性能

Research on Adaptability of Pile Foundation Construction Technology under Complex Geological Conditions

Cheng Hongmin, Wang Jingli

Zhongche Shandong Wind Power Co., LTD. Jinan, Shandong 250000

Abstract : To address common issues in pile foundation construction under complex geological conditions of wind farms, such as hole wall collapse, excessive sediment, and unstable pile end bearing capacity, this study focuses on a large-scale wind turbine foundation project. It conducts research on the adaptability of key processes, including hole formation techniques, enlarged bottom treatment, and pile end grouting. By integrating the on-site rock-soil structure and load characteristics, a slurry wall stability model and bearing capacity calculation method are developed, proposing a composite technology path that combines reverse circulation drilling with enlarged bottom treatment and grouting. The experimental results show that the ultimate bearing capacity of enlarged bottom piles and grouted piles has been increased to 3410kN and 3265kN, respectively. The displacement at the top of the piles is controlled within 4.1mm and 4.6mm, respectively, and the sediment thickness is reduced to 48–52mm. The integrity of the pile bodies meets Class I standards. This study verifies the adaptability and promotion value of the proposed technology in complex strata for wind turbine foundations, providing technical support for similar regional wind power pile foundation construction.

Keywords : complex geology; drilled shafts; hole formation techniques; enlarged bottom treatment; pile end grouting; bearing performance

作为建筑物的重要支撑结构, 桩基础在土建施工中起着关键作用, 其施工质量直接关系到建筑物的安全性和稳定性^[1]。风力发电场作为大型能源基础设施, 其桩基础系统需在复杂地质环境中长期稳定承载高频次旋转载荷与强水平风力作用, 结构安全性要求远高于一般建筑基础。风机基础施工区域常分布有软弱夹层、富水卵石层及风化破碎岩体, 形成渗透性强、结构不连续、扰动敏感等不良地质特征, 易诱发桩孔坍塌、沉渣聚积与承载力退化等问题。传统等径钻孔灌注桩在此类地质条件下适应性不足, 难以满足风机运行中的应力均化与桩端支承刚度需求。为提升桩基结构在复杂地层中的成桩质量与承载性能, 本文以某典型风电场项目为例, 系统分析成孔、扩底与桩端处理等施工关键环节对成桩质量的影响, 提出可操作性强的复合施工工艺, 并通过静载与声测数据进行定量验证, 为风电工程在复杂地质条件下的桩基施工优化提供理论支持与技术依据。

一、工程概况

本文以某大型风机基础工程为研究案例，基础施工区域面积约500m²，主要采用钻孔灌注桩基础形式。设计桩径为1.0m，单桩长度在20-30m之间，总计施工桩基40根。场地地质条件复杂，分布有中风化泥岩、强风化砂质泥岩、饱和粉质黏土及富水碎石层，地层间呈透镜状交错分布，岩土界面起伏较大，部分夹层厚度变化剧烈，地质结构不连续性强。地下水位平均埋深4.2m，局部区域具高渗透性特征，极易发生孔底失稳和泥浆渗漏等问题，需配合高性能泥浆体系与实时监测系统成孔控制。基础桩端嵌入持力层深度要求不小于2.5m，桩顶承台结构为钢筋混凝土整体式布置，配套设置双层钢筋网与抗剪锚固装置，施工精度与完整性要求较高。工程对桩基施工工艺、设备适应性及质量控制提出了较高技术要求，具有典型的复杂地质特征与实践代表性，适合作为桩基适应性施工优化研究的典型对象。

二、桩基础施工技术适应性分析

(一) 不良地质对施工的影响

本风电场工程区域地层中广泛分布粉质黏土、富水碎石夹层与强风化泥岩，地质结构破碎、软硬交错、渗透性强，具有典型的不良地质特征。在桩基施工过程中，地层扰动易引发孔壁坍塌、护壁失稳及沉渣超厚等问题，严重影响风机基础在运行中对竖向承载与水平抗拔性能的要求。特别是在地下11-18m卵石层区域，受地下水和钻进扰动叠加影响，局部段落沉渣厚度实测达145mm，明显超过《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2001)中100mm的限值，致使桩端嵌岩质量无法满足高荷载风机结构的基础响应需求。

为保障成孔稳定性与桩底质量，施工中采用膨润土泥浆护壁体系，其比重需满足下列护壁稳定性条件^[2]：

$$P_m = \gamma_m \cdot h \geq K_0 \cdot \gamma_s \cdot h = P_s \quad (1)$$

其中，P_m为泥浆静压力(kPa)，γ_m为泥浆重度(g/cm³)，h为孔深(m)，K₀为静止土压力系数(无量纲)，γ_s为地层天然重度(g/cm³)，P_s为地层侧压力(kPa)。代入案例数据计算如下：

$$P_m = 1.22 \times 26 = 31.72 \text{ kPa}$$

$$P_s = 0.6 \times 1.92 \times 26 = 29.95 \text{ kPa}$$

由此可见，泥浆护壁静压力已满足侧向稳定性要求。然而在地层渗透性突变区域，仍存在泥浆滤失加剧与局部孔壁失稳风险，需结合实时监测系统实施泥浆黏度动态控制、成孔时间限控与连续循环加压措施，以确保孔壁完整性和后续桩端施工的安全性，保障风机运行期的结构稳定性基础条件。

(二) 常规桩型适应性问题

风机基础在运行过程中需长期承受显著的竖向重力荷载、循环变幅的旋转荷载及不均匀的水平风力作用，对桩基系统的整体

刚度与端部嵌固稳定性提出了更高要求。常规等径钻孔灌注桩在富水软弱夹层与强风化-中风化岩交界地层中，常出现桩侧摩阻贡献不足、应力集中部位屈服变形、桩端虚接触等问题，难以保障大功率风机运行过程中的荷载响应性能，进而诱发桩身裂纹或竖向-水平耦合位移超限风险。

本项目初期设计采用等径钻孔灌注桩方案，桩径1.0m，桩长20-30m不等，桩端嵌入中风化泥岩层深度不小于2.5m。考虑到风电荷载特性，该桩型在岩性突变及高位软弱夹层地段的适应性明显不足，尤其在桩端支承刚度不足或导管偏心灌注等不利工况下，易导致桩底沉渣过厚、局部空桩、灌注密实度不均等成桩缺陷。

桩基极限承载力的基本计算公式如下：

$$Q_u = q_b \cdot A_b + \sum f_{si} \cdot A_{si} \quad (2)$$

其中，Q_u为桩基极限承载力(kN)，q_b为桩端持力层抗力特征值(kPa)，A_b为桩端面积(m²)，f_{si}为第i层土的侧阻力特征值(kPa)，A_{si}为第i层的桩侧面积(m²)。

以某26m长灌注桩为例，桩径1.0m，桩端嵌入中风化泥岩2.6m，桩端持力层抗力特征值取q_b=2800kPa，则桩端面积为：

$$A_b = \pi \cdot \left(\frac{1.0}{2}\right)^2 = 0.785 \text{ m}^2$$

桩侧穿越四种不同土层，经综合换算侧阻力与面积乘积为∑f_{si}·A_{si}=680kN，代入计算得：

$$Q_u = 2800 \cdot 0.785 + 680 = 2198 + 680 = 2878 \text{ kN}$$

理论计算值满足设计承载力标准值2500kN，但若成孔精度不足或导管偏移导致桩底沉渣厚度>120mm，则有效嵌岩深度下降，承载力将随之降低，且在结构验收中易出现桩身完整性Ⅲ类缺陷。

(三) 技术适配性对比分析

为适应风机基础在复杂地质环境下对桩端嵌固稳定性和多维荷载抵抗能力的高要求，工程采用扩底桩与桩端注浆桩两种增强型桩基结构形式，并依据不同地层结构进行分区布置与技术适配^[3]。这两类技术均针对风电荷载传递路径中“端部失稳”和“侧摩阻弱化”的核心问题提出改进，对提升桩体承载能力和运行期稳定性具有重要意义。

扩底桩采用机械扩孔工艺，通过液压装置将桩端底径从原设计的1.0m扩大至1.4m，显著增强了桩端承载面积与嵌固刚度。其端部极限承载力计算公式如下：

$$Q_b = q_b \cdot A_b \quad (3)$$

其中，Q_b为桩端极限承载力(kN)，q_b为持力层抗力特征值(kPa)，A_b为扩底后桩端面积(m²)。代入计算得：

$$Q_b = 2800 \times 1.54 = 4312 \text{ kN}$$

较常规桩端承载力Q_b=2800×0.785=2198kN提升约96%，显著增强端阻控制能力，适用于岩性稳定区。扩底施工采用TZG-100型液压扩底装置，配套视频探孔设备进行扩底形态校验，确保扩孔对称性和底部完整性。

桩端注浆则通过向桩底扩散高压水泥浆液，增强接触面密实度和抗剪强度。典型注浆参数为水灰比0.6、注浆压力0.6MPa、浆液量0.12m³/根，浆液有效扩散半径约2.5-3.0m，注浆设备为ZBQ-50/5型螺杆泵，搭配压力传感器实现恒压控制^[4]。注浆结束后采用小型激光波速仪评估加固区密实性变化，理论提升桩端复合承载力35%左右，特别适用于碎石夹层及软岩区间，可显著改善端部扰动层结构稳定性。

三、关键施工技术与优化措施

(一) 成孔工艺优化

在复杂地质条件下，为确保风机基础桩孔的垂直度、孔壁稳定性与成孔尺寸精度，本工程优先采用反循环钻进工艺，搭配全封闭循环系统与多点参数监测机制，增强复杂地层的穿透能力与施工过程的可控性。

(1) 施工设备配置：成孔设备选用BG-26型反循环钻机，主卷扬额定提升力260 kN，转速0-40 r/min可调，匹配ZJ-40型空压泵和Φ600mm金刚石复合钻头，适配中风化岩与碎石层段双工况，满足风机桩长与孔径刚性要求。

(2) 钻进工艺控制：软弱地层段采用低速大扭矩方式进尺，进尺速率控制在0.4-0.6 m/min，严禁空转抽钻，防止扰动增大；岩层段采用冲击旋进结合方式，每钻进3m取样一次，记录岩粉厚度与孔径扩散情况，确保岩性过渡区段成孔质量。

(3) 泥浆护壁系统：护壁采用膨润土泥浆体系，比重控制在1.20-1.25g/cm³，漏斗黏度30-40s，配套LYQ-40型循环泥浆池与自控搅拌系统^[5]。施工期间，每隔1小时监测一次泥浆重度与砂率，实时修正加水比，提升护壁性能以适应风电基础端部扰动特性。

(4) 沉渣控制与清孔工艺：孔底沉渣清除采用Φ50mm高压空气反冲管联合多次反复循环冲洗，清孔结束后使用HD-60型沉渣检测探管进行沉渣厚度复核，控制在≤60mm，优于规范规定的≤100mm限值，确保桩端嵌固面洁净、承载路径完整。

(二) 桩端与扩底处理

针对部分中风化岩层强度波动大、嵌岩深度难以控制的问题，采用机械扩底与桩端注浆相结合的复合端处理技术，以增强风机基础桩端抗压与抗拔性能。

(1) 扩底工艺流程：在成孔至设计深度后，通过下放TZG-100型液压扩底装置实现端部机械切扩，扩底直径控制在1.3-1.4m，扩底深度不大于1.8m。扩底过程中保持稳定压力切削，扩孔速率≤0.2 m/min，实时监测钻压波动，确保切削范围均匀对称，避免出现偏底、滑扩等缺陷。

(2) 扩底质量验证：扩底完成后采用SONO-A型声波仪检测底部扩展区轮廓变化与对称性，并通过孔底高清视频探管进行断面复查，确保扩底形态完整、无塌落死角，满足风机运行期基础响应的嵌固刚性要求。

(3) 桩端注浆工艺：在扩底完成并清孔合格后，启动高压注浆系统（型号：ZBQ-50/5型），采用0.6水灰比水泥浆，浆液

由Φ38mm注浆管定点送至桩端扩底区，注浆压力控制在0.5-0.8 MPa，总注浆量控制在0.10-0.15 m³/桩。注浆过程由实时压力-时间曲线记录，确保注浆均匀扩散，浆液渗入半径控制在2.5-3.0m范围内，增强持力层与桩端之间的接触强度与密实性。

(三) 灌注与钢筋笼控制

为确保混凝土浇筑连续性与钢筋笼安装精度，施工阶段严格落实分项控制节点与全过程检测机制，满足风电基础对成桩均匀性与结构刚度的高标准要求。

(1) 导管安装与密封：采用Φ200mm法兰式钢制导管，首节长度6.5m，全长拼装不超过三节，接头采用三道胶圈加钢卡结构，确保密封防漏。导管下放前进行压力水封试验，检查接缝密闭性；埋深控制在≥2.5m，灌注前复测导管底距孔底距离，确保不小于0.3m，避免灌注扰动桩端结构。

(2) 混凝土灌注控制：混凝土采用C35商品混凝土，坍落度控制在180-220mm，入孔时间控制在搅拌后45min内。灌注采用连续法，配备二次供料槽，确保首盘砼入导管后不间断灌注。灌注中每灌注4-5m记录一次导管埋深，及时调整高度，避免导管提升过快造成离析或断桩，确保桩身致密一体成型。

(3) 钢筋笼吊装与定位：钢筋笼采用整体预制，吊装长度最长27.8m，起吊设备为25t履带吊配套Φ32钢丝绳双点同步控制。笼体采用Φ16、Φ25双层纵筋，横向间距20cm，设对称定位筋与限位环，笼顶预留吊钩锚固长度600mm。针对风机荷载集中度高的特点，钢筋笼在桩顶设置加密区，提升抗弯刚度；笼身整体结构需满足扭转稳定性要求。下笼过程中控制吊点对中、导向管辅助定位，垂直度偏差≤1%，顶面标高误差≤30mm。

(4) 成桩质量复核：桩体灌注完成后24h内开展首轮声波透射管水压密封性检测，72h后进行超声波完整性检测^[6]，定位灌注密实区与可能缺陷段，确保桩身整体结构满足完整性标准要求，为后续风机荷载传递提供结构保障。

四、应用效果评估

为验证优化施工工艺在复杂地质条件下的适应性效果，本文选取工程中典型的三类桩型（常规等径桩、扩底桩、桩端注浆桩）进行静载试验和成桩质量检测，重点对比承载性能、桩身完整性与施工稳定性等指标。测试采用《基桩静载试验规范》（JGJ 106-2014）与《建筑地基基础技术规范》（GB 50007-2011）标准进行，检测桩共计9根，每类桩型3根，均布设于同一地质分区，保证试验结果的可比性。试验及检测结果如表1所示。

表1：不同桩型成桩质量与承载性能对比

桩型	静载极限承载力 (kN)	桩顶位移 (mm)	桩身完整性等级	沉渣厚度 (mm)	施工周期 (h/根)
常规灌注桩	2485	7.6	B	105	8.2
扩底灌注桩	3410	4.1	A	52	9.5
桩端注浆桩	3265	4.6	A	48	10.3

从表1可见,扩底桩与注浆桩在承载性能与成桩质量方面显著优于常规桩。扩底桩极限承载力达3410kN,较常规桩提升37.2%,桩顶位移控制在4.1mm以内;注浆桩承载力为3265kN,提升31.4%,且沉渣厚度控制在48mm,桩身完整性均为A类。尽管两者施工周期较常规桩略长,但在成桩质量、承载稳定性及适应复杂地层能力方面具有明显优势,验证了优化工艺在复杂地质条件下的工程适用性与推广价值。尤其在夹层界面突变、孔底扰动严重或桩端难以稳定嵌岩的区域,扩底与注浆技术通过结构放大与持力层增强手段,有效解决了承载力不足与质量缺陷频发的问题,为类似项目提供了明确的技术路径和数据支持。

五、结论

本文基于风机基础在复杂地质环境下的施工难点,提出了反循环钻进、机械扩底与桩端注浆相结合的复合施工工艺,显著改善了桩端持力条件与桩身完整性。工程实测结果表明,相较常规灌注桩,扩底桩与注浆桩在承载力、沉渣控制及成桩均匀性等方面表现更优,满足风机高荷载运行的结构需求。研究成果可为地层扰动大、夹层交错频繁的风电项目提供可复制的成桩方案,具备良好的现场适配性与推广价值。

参考文献

- [1] 张志恒. 复杂地质条件下地铁隧道盾构机选型与适应性分析[J]. 装备制造, 2023(3): 16-21.
- [2] 贾连辉, 鲁义强, 贺飞, 等. 适应复杂多变地质隧道双结构TBM研制与应用[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2): 14-25.
- [3] 王庆国. 复杂地质情况下冲孔灌注桩施工技术[J]. 四川水泥, 2021, 000(012): P.135-136.
- [4] 赵立新, 吴金泽. 复杂地质条件下采矿工程中巷道支护技术的优化[J]. 前卫, 2023(28): 0153-0155.
- [5] 孙盛梅. 建筑工程土建施工中的桩基础施工技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2022(7): 4.
- [6] 钟宇泽. 分析复杂地质条件下桥梁桩基施工质量控制措施[J]. 交通科技与管理, 2021(24): 0145-0146.