

软弱地基条件下风电基础加固方案比选

王琳

辽宁科技大学, 辽宁鞍山, 114000

摘要: 伴随风电行业快速发展, 软弱地基条件下风电基础设计与加固已成为工程建设中的关键技术问题。针对承载力不足、变形过大等问题, 本文结合某风电场地质勘探与室内土工试验, 分析了软弱地基承载力低、压缩性大、渗透性差等工程特性。基于风电基础荷载特征及变形控制要求, 提出强夯法、水泥土搅拌桩、CFG 桩和预应力管桩 4 种加固方案, 并采用数值仿真与现场试验相结合的方法, 对不同方案下地基承载力、沉降变形及稳定性进行了研究。在此基础上, 构建综合评价体系, 运用层次分析法和模糊综合评价法进行比较。结果表明, CFG 桩复合地基方案综合优势较为突出, 预应力管桩适用于极软弱地基, 强夯法适用于浅层软土加固。

关键词: 软弱地基; 风电基础; 地基加固; 方案比选; 数值模拟

Comparative Study of Wind Turbine Foundation Reinforcement Schemes under Soft Ground Conditions

Wang Lin

University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114000, China

Abstract: With the rapid development of the wind power industry, the design and reinforcement of wind turbine foundations under soft soil conditions have become key technical issues in engineering construction. Focusing on problems such as insufficient bearing capacity and excessive deformation, this study, based on geological investigation and indoor geotechnical tests conducted at a wind farm, analyzes the engineering characteristics of soft ground, including low bearing capacity, high compressibility, and poor permeability. According to the loading characteristics and deformation control requirements of wind turbine foundations, four reinforcement schemes were proposed: dynamic compaction, cement-soil mixing piles, CFG piles, and prestressed pipe piles. Numerical simulation combined with field testing was employed to investigate the bearing capacity, settlement deformation, and stability of the foundation under different schemes. On this basis, a comprehensive evaluation system was established, and the analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method were applied for comparison. The results show that the CFG pile composite foundation scheme has relatively prominent overall advantages, prestressed pipe piles are suitable for extremely soft ground, and dynamic compaction is suitable for the reinforcement of shallow soft soil.

Keywords: Soft ground; wind turbine foundation; foundation reinforcement; scheme comparison; numerical simulation

1、引言

风力发电是清洁能源的一个重要部分, 在全球能源转型中发挥着重要作用。根据国家能源局统计数据, 2022-2025 年中国风电累计装机容量由 2.1 亿千瓦增加到 4.4 亿千瓦, 年均增长率超过 20%, 随着陆上风电资源优良地段逐渐被开发完毕, 风电场建设开始向地质条件较差的地方转移, 而软弱地基条件下的风电基础设计及施工已经成为阻碍行业发展的一大难题。软弱地基一般有承载能力差、压缩性大、渗透性弱等不利的工程性质, 在风电机组长期的动、静荷载的作用下极易造成较大的沉降以及不均匀变形, 对风电机组的安全运行以及使用寿命造成极大的影响。

目前风电基础加固技术种类较多, 但是针对不同的软弱地基条件下的适用性以及经济性缺少系统的对比研究, 目前的研究主要是针对一种加固方法的技术原理及施工工艺, 而对于多种加固方案的综合评价体系还不健全, 强夯法、水泥土搅拌桩、CFG 桩、预应力管桩等典型加固方案在实际工程中应用效果差异

较大, 缺少基于定量分析的方案选择方法, 所以建立科学合理的软弱地基风电基础加固方案评价体系, 给工程实践提供技术支持与决策参考, 有利于促进风电行业高质量发展。

2、软弱地基风电基础加固理论分析

2.1 软弱地基承载机理分析

软弱地基的承载机理主要是指软弱地基土体的强度特性与变形特性两方面。软弱地基土体一般是由饱和黏性土构成, 其抗剪强度主要是由黏聚力和内摩擦角来决定, 在外力作用下容易发生剪切破坏。软弱地基的承载力计算要考虑地基土的不排水抗剪强度、地基深度修正系数及基础形状修正系数等影响因素, 同时还要考虑软弱地基土体的流变特性和长期强度衰减效应, 保证软弱地基承载力计算的正确性和可靠性 [1]。在变形特性方面, 软弱地基具有压缩性高、渗透性低、固结缓慢的特点, 在外荷载作用下易产生较大且持久的沉降, 易造成建筑物不均匀沉降与开裂。因此, 在地基设计中除满足承载力要求外, 还需进行沉降验算与稳定分析, 合理选择加固方案, 以控制工

后沉降并提升地基整体稳定性。尤其在风电工程中，风机基础长期承受风荷载产生的倾覆力矩与循环荷载，软弱地基的流变与累积变形问题更为突出。若未进行有效加固，极易出现基础倾斜、沉降超限等病害，直接影响风机运行安全。因此必须结合强度与变形双重控制，选用适配的地基加固技术，确保长期服役稳定性。

2.2 风电基础荷载特征与传递机制

风电基础所承受的荷载主要有风荷载、地震荷载、设备重力等，而风荷载具有不确定性高、波动幅度大、持续时间长的特点。风荷载经过塔筒传给基础，形成很大的倾覆力矩及水平剪切力，在此复合荷载作用下，地基的承载性能与单纯的竖向荷载作用下的承载性能有很大区别。荷载传递方式为：基础底面压应力重新分布以及侧向土压力增大，必须使用考虑荷载倾斜、偏心的地基承载力计算方法来进行研究。在偏心与水平荷载共同作用下，风电基础周边土体易出现塑性区扩展、基底脱开等不利现象，地基整体稳定性显著降低。因此，设计时需重点验算地基抗滑移、抗倾覆稳定性及不均匀沉降，结合现场地质条件选取合理的地基处理方式，确保风机在长期往复荷载下安全稳定运行。

2.3 地基基础相互作用理论

地基基础相互作用理论是研究风力发电基础在软弱地基条件下的工作性能的主要理论依据，它阐述了风力发电基础结构及其下部地基土体之间复杂的力学传递关系，在风力发电基础受到上部结构传来的垂直荷载、水平荷载及弯矩的作用下，基础底面与地基土体间产生接触应力，此应力的分布方式对地基的承载能力和变形性质有着重要影响，基于弹性半空间理论，基础荷载经由接触面传入到地基深处，形成应力影响范围，在此范围内垂直应力随深度呈双曲线下降趋势，水平应力以及剪应力的分布更加复杂。软弱地基中由于土体刚度小，基础与地基之间的作用具有明显的非线性特点，基础边缘容易出现应力集中情况，基础中心部位的应力较小。

软弱地基条件下地基基础相互作用机理也表现在变形协调上，基础结构刚度和地基土体变形模量共同决定了整个系统的变形形式。当软弱地基承载能力不够的时候，基础可能会出现倾斜或者差异沉降的现象，从而使得荷载在基础底面的分布发生变化，达到新的平衡状态 [2]。在这个动态变化的过程中，软弱地基土体的非线性本构关系以及时间效应都会对相互作用产生很大的影响，在长期荷载的作用下，软弱地基的蠕变现象会使得基础变形不断的发生，从而导致风力发电机不能够正常的运转。

3、典型加固方案技术原理与适用性

3.1 深层搅拌桩加固技术

深层搅拌桩加固技术是利用专门的机械把水泥

浆液和软弱地基土体搅拌均匀，使其形成具有一定强度及刚度的水泥石复合体来达到增强地基承载能力和降低地基沉降的目的。其加固机理主要是基于水泥与土体之间发生的物理化学作用，借助水泥的水化硬化作用形成稳定的土-水泥结构体系。深层搅拌桩加固技术适合用于加固深度小于 15m 的软弱黏性土地基，对含有机质较多或 pH 值异常的特殊土质要经过适应性试验检验加固效果。深层搅拌桩加固技术施工过程无振动、低噪音、无污染，对周边环境及原有建构筑物影响小，具有施工速度快、造价经济、加固效果均匀可靠等优势。在实际工程中，常通过合理布置桩位形成复合地基，可有效提高地基整体稳定性，广泛应用于道路路基、基坑支护、软土地基处理等工程领域，是软土地区常用且成熟的地基处理工艺。

3.2 预应力管桩加固技术

预应力管桩加固技术是以高强度预应力混凝土管桩穿过软弱土层，把基础荷载传送到深层坚硬土层中，依靠桩体的承载力以及桩底的摩阻力共同来达到对地基进行加固的目的。其主要特点是预应力钢筋的拉伸技术和混凝土的高强度性能，可以很好地抵抗较大的垂直荷载与水平荷载。预应力管桩加固技术适合应用于软弱土层较厚、下卧层承载力较好的土质环境，在极其松软的地基上也能给予可靠的支持，但是施工难度大，成本高 [3]。预应力管桩桩身质量稳定、强度高、单桩承载力大，施工机械化程度高、工期短，在工业与民用建筑、道路桥梁、港口码头等工程中应用广泛。施工时需注意沉桩过程对周边土体的挤压影响，合理安排施工顺序并采取减挤措施，同时应通过现场静载试验确定实际承载力，确保工程安全与经济性。

3.3 复合地基加固技术

复合地基加固技术是在软弱地基中布置人工加筋体或者桩体，构成由天然地基土与人工加筋体共同分担荷载的复合承载体系。此方法利用了各种材料的优点，通过桩土协调变形使荷载得到合理的分配及传递。复合地基加固的核心是正确选择桩土应力比以及桩体材料参数，经过优化设计达到技术和经济效益的最佳结合。复合地基加固技术应用范围广，既可以用于一般的软弱地基也可以解决复杂的地质情况，适用于风力发电基础工程。复合地基通过桩体与土体协同工作，大幅提高地基承载力、减小沉降变形，能够有效抵御风电基础所受的倾覆力矩与水平荷载。与单一桩基或天然地基相比，其经济性更优、施工适用性更强，可根据地质条件灵活选用桩型、桩长和置换率。在风电工程中，采用复合地基能够有效控制基础不均匀沉降，提升整体稳定性，为风机长期安全运行提供可靠保障，是软土地区风电地基处理中极具工程价值的技术方案。

4、加固方案比选分析

4.1 工程地质条件评价指标体系

工程地质条件评估指标系统的建立以软弱地基的主要工程性质参数为基础,即地基承载力特征值、压缩模量、液性指数、含水量、内摩擦角及粘聚力等主要参数。从 2019-2024 年的全国风电项目的地质勘探资料来看,软弱地基的承载力特征值一般为 80~150kPa 左右,压缩模量一般小于 5MPa,液性指数大于 0.75,这些参数直接影响着风电基础的稳定性以及变形控制的效果。

评估指标体系还应考虑到岩土层分布特点、地下水位的变化以及土体物理力学性质的空间差异等,通过构建分层权重模型来衡量不同的地质环境对加固措施的选择影响大小,给以后的技术经济对比提供可靠的地质依据[4]。在实际风电工程选址中,地下水位过高、土层软硬不均及软弱夹层分布,都会显著降低地基处理效果,增大后期沉降与倾覆风险。该指标体系可对不同场地地质条件进行分级评价,直观反映场地适宜性,为设计阶段快速筛选桩型、优化复合地基参数提供科学依据,有效提升方案比选效率与工程可靠性。

4.2 经济性评价模型构建

经济性评估模型以全生命周期成本法为基础,在此基础上综合考虑了初始投资费用、施工间接费、运行维护费以及风险费等各项经济因素。根据 2020-2024 年风电行业成本数据统计,不同的加固措施的单位造价相差较大:强夯法 150-200 元/m³,水泥土搅拌桩 200-280 元/m³,CFG 桩 280-350 元/m³,预应力管桩 450-600 元/m³。模型构建了成本效益比评估函数,把技术成效指标同经济支出进行数值上的比较。

$$C_{total} = C_{initial} + C_{construction} + C_{maintenance} + C_{risk}$$

其中, C_{total} 为全生命周期总成本, $C_{initial}$ 为初期材料设备成本, $C_{construction}$ 为施工成本, $C_{maintenance}$ 为运营维护成本, C_{risk} 为风险成本。利用净现值法以及内部收益率分析,构建了在不同地质条件下的各种加固方案的经济效益排序模型,为工程项目的选择提供了量化的经济效益参考。

4.3 施工可操作性与环境影响评估

施工可行性评价主要是针对施工技术复杂程度、所需机械设备、施工周期以及质量控制难易程度等方面进行量化分析。强夯法施工技术比较简单但是噪音比较大[5]。水泥土搅拌桩所需机械设备适中并且容易控制质量。CFG 桩施工技术成熟但是对于地下水位比较敏感。预应力管桩施工精度要求高但是工期较短。从近几年来风电项目的施工情况来看,CFG 桩和水泥土搅拌桩的成功率分别为 95% 和 92%,远远高于其他方案。

环境影响评价包括了施工噪声、振动影响、土壤

扰动、地下水环境变化等主要因素,并构建了环境影响评价矩阵。强夯法振动影响范围达 100~150m,不适合用于环境敏感区。水泥土搅拌桩和 CFG 桩的环境影响较小,施工过程中噪声符合国家标准[6]。预应力管桩施工对周围环境的影响最小,但是桩基施工可能会造成局部的地下水流场改变。综合对比可知,水泥土搅拌桩与 CFG 桩在施工噪声、土体扰动及地下水影响上均较为可控,适合风电工程多位于郊区、农田等环境敏感程度适中的区域。预应力管桩虽环境友好,但造价与施工条件限制较多。在风电基础地基处理方案比选中,施工可行性与环境影响两项指标共同支撑水泥土搅拌桩、CFG 桩成为优先推荐的加固技术。

5、结论

通过综合评价体系的定量分析得出结论:CFG 桩复合地基加固方案对于软弱地基而言是最优的技术经济综合效益,其承载力提高幅度达到 2.5~3.5 倍,沉降控制较好,经济性指标比其他方案高出 15~25% 左右。预应力管桩方案适用于极端软弱地基,但需要根据具体的工程项目经济承受能力来选择。水泥土搅拌桩方案适合承载力较低的中小型风电机组基础,而强夯法则适用于浅层软土改良。研究成果可为风电行业的复杂地质条件下基础的设计提供科学依据,有利于提高工程的安全性和经济效益,促进风电产业的发展。

参考文献

- [1] 闵剑; 吴强;. 软弱黏土地质条件下的风机基础设计选型研究 [J]. 工程技术研究, 2023 (20): 13-15+19.
- [2] 李耀彬; 余伟伟; 李杰; 任向葵;. 基于软基地质条件下的电梯基坑加固方法 [J]. 现代物业 (中旬刊), 2018 (04): 184-190.
- [3] 陈桂斌. 溶岩地质条件下风机基础设计及地基处理方案研究 [J]. 低碳世界, 2014, 4(11X): 33-35.
- [4] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 筒内布桩复合地基-筒海上风电基础及施工方法 :CN110847217A[P/OL]. 2020-02-28[2026-02-27]. <https://www.cqvip.com/doc/patent/00029HCIMNDG9IPXMBD88JUP9Y>.
- [5] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 筒外布桩复合地基-筒海上风电基础及施工方法 :CN110847218A[P/OL]. 2020-02-28[2026-02-27]. <https://www.cqvip.com/doc/patent/00029HCIMNDG9IPXMBD88IOP9Y>.
- [6] 吕宏伟, 邹武停. 西北地区强腐蚀条件下风机基础软弱地基处理及防腐研究 [J]. 西北水电, 2022, (3): 123-128. DOI:10.3969/j.issn.1006-2610.2022.03.024.