

# 高寒地区风电基础抗冻设计与施工适应性分析

吴淑芬

北方工业大学土木工程学院, 北京, 100144

**摘要:** 随着可再生能源快速发展, 风电建设逐步向高寒地区推进, 恶劣低温环境给风电基础建设带来严峻挑战。本文围绕高寒地区风电基础抗冻设计与施工适应性问题, 采用理论分析、数值模拟与工程经验相结合的方法, 研究冻融循环下基础力学特性。建立温度场、应力场与渗流场耦合的冻融数学模型, 分析不同冻深对结构应力与变形的影响规律。结合现场试验, 揭示混凝土抗冻性能衰减机理, 提出适用于高寒地区的抗冻设计与关键参数。研究表明, 采用复合保温、合理配筋及优化混凝土配合比可显著提升基础抗冻耐久性; 施工中采取分层浇筑、温控养护等措施能有效提高工程质量。经技术经济对比, 形成一套高寒地区风电基础设计与施工优化方案。成果可为寒冷地区风电场工程提供技术指导, 对推动高寒区域清洁能源开发及同类工程具有重要参考价值。

**关键词:** 高寒地区; 风电基础; 抗冻设计; 冻融循环; 施工适应性

## Anti-Frost Design and Construction Adaptability Analysis of Wind Turbine Foundations in Alpine Regions

Wu Shufen

School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China

**Abstract:** With the rapid development of renewable energy, wind power projects are increasingly expanding into alpine regions. However, severe low-temperature environments pose significant challenges to the construction of wind turbine foundations. This study focuses on the anti-frost design and construction adaptability of wind turbine foundations in alpine areas. By integrating theoretical analysis, numerical simulation, and engineering experience, the mechanical behavior of foundations under freeze-thaw cycles is investigated. A coupled mathematical model incorporating temperature field, stress field, and seepage field during freeze-thaw processes is established to analyze the influence of different freezing depths on structural stress and deformation. Combined with field experiments, the study reveals the degradation mechanism of concrete frost resistance and proposes suitable anti-frost design methods and key parameters for alpine regions. The results show that the use of composite insulation measures, rational reinforcement design, and optimized concrete mix proportions can significantly enhance the frost resistance and durability of foundations. In addition, construction measures such as layered pouring and temperature-controlled curing can effectively improve project quality. Based on a technical and economic comparison, an optimized design and construction scheme for wind turbine foundations in alpine regions is proposed. The findings provide technical guidance for wind farm construction in cold regions and offer valuable references for the development of clean energy projects in alpine environments and similar engineering applications.

**Keywords:** alpine regions; wind turbine foundation; anti-frost design; freeze-thaw cycle; construction adaptability.

### 1、引言

近年来, 世界能源转型速度加快, 风电作为清洁能源之一, 装机量不断上升。根据统计数据, 从 2019 年到 2023 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, 年均增长率为 20.3%。而随着优质风资源逐渐被开发, 风电建设重点逐步向高寒地区转移, 在这些地方虽然风资源丰富, 但是由于极端低温、冻融循环等恶劣天气给风电基础建设造成极大困难。高寒地区年平均气温一般低于  $-3^{\circ}\text{C}$ , 冬天最冷时可低至  $-40^{\circ}\text{C}$  以下, 冻土层厚度一般大于 1.5 米, 有的地方甚至达到 3-4 米, 这对风电基础的安全性以及耐久性提出了很高的要求。

传统风电基础设计方法大多基于常温地区经验, 对于寒冷地区应用效果不佳。由于冻融循环作用, 基础混凝土内孔隙水不断冻结融化, 产生很大冻胀力, 造成混凝土开裂、剥落, 降低基础承载力。而且, 地

基土体冻胀性也会使基础出现不均匀沉降, 从而影响风机塔筒垂直度以及安全性。国内外学者对于混凝土抗冻性、冻土地基处理等进行了大量研究工作, 但是关于高寒地区风电基础抗冻设计的研究较少, 缺少一套完整理论和技术规范。所以, 进行高寒地区风电基础抗冻设计及施工适应性研究, 建立考虑温度场-应力场-渗流场多物理场耦合作用分析模型, 提出相应设计要求和施工技术措施, 有利于保证高寒地区风电工程正常运行, 促进清洁能源发展。

### 2、高寒地区风电基础冻害机理与影响因素分析

#### 2.1 高寒地区气候特征与冻土分布规律

高寒地区有明显大陆性气候特点, 冬天长而且冷, 夏天短而且凉爽, 一年中温差以及一天中温差都很大。据 2019-2023 年气象观测资料显示, 我国主要高寒风电开发区域年平均气温为  $-8^{\circ}\text{C}$  到  $2^{\circ}\text{C}$  之间, 在我国北方如内蒙古北部、黑龙江西北部及新疆北部

等地方最为寒冷, 冬季长达 6-8 个月, 累计负温时间超过 3000 小时。冻土分布具有地域性差异, 季节性冻土占全国面积 75% 左右, 最大冻深由南向北逐渐增加, 东北地区一般为 1.5-2.5m, 西北高海拔地区可达 3-4m, 有些地方甚至超过 5m, 这么厚的冻土层对于风电基础的设计有特殊的要求。

## 2.2 风电基础冻胀破坏机制

风电基础在冻胀作用下破坏机理主要是由于混凝土内部损伤以及地基不均匀变形两方面原因造成。当外界气温低于 0℃ 时, 混凝土孔隙中自由水开始冻结, 体积增大近 9%, 在密闭环境中可达到 207MPa 冻胀力, 远远大于混凝土抗拉强度, 从而产生微裂纹并发展 [1]。随着冻融循环次数增多, 裂纹逐渐增多并相互连通, 在混凝土表面出现脱落、起皮等现象, 内部结构越来越松散, 其抗压强度及弹性模量明显降低。而地基冻胀问题更加复杂, 在土体中水分受温差影响而发生迁移并在冻结锋面附近聚集, 形成冰透镜体, 产生法向冻胀力和切向冻胀力, 使基础产生不均匀上拔变形, 严重情况下可达到几十厘米, 对风机塔筒垂直度造成不可逆的影响。在长期往复冻胀与风机动态荷载耦合作用下, 基础与土体接触面易出现脱空、滑移, 进一步加剧结构受力不均与倾斜风险。这种由内而外、从材料到结构的渐进式破坏, 会显著降低风电基础承载能力与服役寿命, 威胁风机整体运行安全, 因此开展冻胀环境下风电基础损伤演化与防护研究具有重要意义。

## 2.3 冻融循环对基础结构性能的影响

冻融循环作用下基础结构性能呈逐渐退化趋势, 其退化程度与循环次数、温度范围及含水率有关。经过 100 次标准冻融循环后, 普通混凝土抗压强度平均下降 15-25%, 弹性模量下降 20-30%, 渗透性增加 2-3 倍。基础结构劣化可以分为三个阶段: 第一阶段是冻融循环次数较少时, 混凝土内部出现微小裂纹, 但对整体性能影响不大。第二阶段随着冻融循环次数增多, 裂纹逐渐扩展成为较大裂缝, 强度开始明显下降。第三阶段表面大量剥落, 承载力迅速降低, 结构安全受到极大影响。钢筋与混凝土之间的粘结力也由于冻融损伤而减弱, 界面粘结力下降 30%-40%, 从而使得基础整体刚度降低, 在风荷载作用下更容易发生疲劳破坏。

## 3、抗冻设计方法与技术措施

### 3.1 抗冻混凝土配比设计与性能优化

抗冻混凝土配比设计要兼顾原材料选取、外加剂掺量以及配合比优化等方面, 使混凝土具有较高密实性和良好抗冻融性。水泥宜采用硅酸盐水泥或者普通硅酸盐水泥, 强度不低于 42.5, 以便获得致密水泥石。粗细骨料应选用级配良好、含泥量小于 1% 优质材料, 最大粒径控制在 25-40mm 之间。掺入引气剂

是提高抗冻性的主要方法, 在混凝土中产生大量均匀分布微小气泡, 起到缓冲作用, 含气量一般在 4%-7%。水胶比对混凝土抗冻性起决定性作用, 要严格控制 在 0.40-0.45 之间, 同时掺入硅灰、粉煤灰等矿物掺合料改善孔结构。复合外加剂的应用可以进一步提高其性能, 防冻剂可使混凝土冰点降低 3-5℃, 减水剂可以在保证工作性的情况下减少用水量, 纤维的掺入可以有效地防止裂缝的发展, 使抗拉强度提高 15%-20% [2]。

### 3.2 基础埋置深度与保温层设计

基础埋置深度应根据当地最大冻深确定, 一般取最大冻深的 1.1 ~ 1.3 倍, 使基础底面处于冻结线以下的稳定土层内。而对最大冻深大于 3m 地区, 可采用桩基或者预制桩基, 桩长要穿过冻土层并深入到稳定地基不少于 1.5m。保温层是减少基础周围土体冻结的一种有效手段, 常用的有挤塑聚苯板、聚氨酯泡沫等, 其导热系数要小于 0.030W/(m·K), 厚度依据当地气候条件决定, 一般为 8 ~ 15cm。保温层铺设范围要包括基础侧壁以及基础底面向外扩展 2 ~ 3m, 形成一个完整的保温体系, 避免冷桥现象发生。垂直保温层要延伸到冻结线以下 0.5m, 水平保温层可以适当减薄, 但是不能小于垂直保温层厚度的 60%。此外, 施工阶段应严格控制回填土含水率与压实度, 阻断水分迁移通道, 从源头上削弱冻胀诱因。同时配合布置温度与沉降监测元件, 实时掌握基础冻胀变形与温度场变化规律。通过结构设计、保温措施与施工控制相结合的综合防冻方案, 可有效降低冻融循环对风电基础长期稳定性的不利影响, 保障风机在严寒地区安全可靠运行。

### 3.3 排水系统与防冻胀构造措施

良好的排水系统可以有效避免基础周围积水结冰, 应在基础周围设置环形排水沟, 沟底标高应低于基础底面 0.3-0.5 米, 沟壁采用浆砌石或者混凝土护砌, 保证排水顺畅。基础底部应有碎石垫层或者透水混凝土垫层, 厚度不小于 30cm, 再铺一层土工布防止细颗粒堵塞。防冻胀构造措施主要是设置滑动层和缓冲层, 在基础侧壁涂刷沥青或者铺设塑料薄膜形成滑动界面, 减少冻胀力的影响。在基础与土体之间填充炉渣、碎石等非冻胀性材料, 厚度 20-30cm, 起到应力缓冲的作用。对于地下水位较高地区, 要采取降水措施降低地下水位, 使其位于冻结线以下 1 米, 必要时可以设置截水帷幕或者注浆加固, 提高地基土抗冻胀能力, 保证基础的安全使用。

## 4、高寒地区风电基础施工适应性技术

### 4.1 低温环境下混凝土施工工艺

高寒地区风电基础混凝土施工面临严寒考验, 必须采取相应措施保证工程质量。低温条件下混凝土水化反应进行非常缓慢, 在环境温度低于 5℃ 情况

下,水泥水化反应几乎停止,对混凝土强度产生较大影响。为此,提出了一套多重保温养护方案,即原材料预热、搅拌时温度控制以及浇筑后保温养护。原材料预热是指将骨料加热到 40~60℃,拌合水温度控制在 60~80℃之间,使混凝土出机温度不低于 15℃ [3]。搅拌时用热水拌合并用蒸汽加热,延长搅拌时间至正常温度的 1.5~2 倍,使混凝土各组分混合均匀。

浇筑后保温养护采取综合保温方法,如表面覆盖保温材料、设置挡风屏障以及必要时进行蒸汽养护。保温材料为导热系数小于 0.15W/(m·K) 复合保温板,厚度不小于 50mm,覆盖范围超过混凝土表面边缘 1m 以上。养护过程中密切注意混凝土内部温度变化情况,使混凝土内外温差不得超过 25℃,养护温度保持在 5℃ 以上时间不少于 14 天。利用温度传感器对不同深度位置温度进行测量并形成温度控制系统。从实际应用看,在低温条件下浇筑混凝土 28 天强度可以达到设计强度 85% 以上,从而保证高寒地区风电基础施工质量。

#### 4.2 冻土地基处理与基础开挖技术

高寒地区风电场建设中冻土地基处理是保证基础安全的重要内容。冻土地基有很强的温度敏感性和季节性变化特点,在冻融过程中体积变化可达到 9~12%,给基础带来较大的冻胀和融沉影响。根据地温监测结果对冻土进行分类,把冻土分为季节性冻土、多年冻土以及间歇性冻土三种类型并提出相应的处理方法。对于季节性冻土地基,用换填法把冻胀性土体换成级配良好的砾石土,换填深度要超过最大冻深 0.5m。对于多年冻土地基采取保温隔热的方法,在基础底部铺设厚度不小于 1.2m 的保温层,防止地表热量传到地下,使冻土保持稳定。

基础开挖技术根据不同类型的冻土采取不同的施工方法。对于硬质冻土,采用机械破碎和人工清理相结合的方法,在用液压破碎锤破碎的同时,破碎深度不超过一次 0.3~0.5m,以免影响下面的冻土。对于软质冻土,要控制好开挖速度,每层开挖厚度不超过 0.8m,并且要及时支护以防坍塌 [4]。基础开挖一般是在一天中温度较低的时候进行,以减少冻土融化对开挖面的影响。基础开挖完后马上进行基底处理,清除松散土体及冰块,然后对基底进行夯实,夯实度达到 95% 以上。通过对地基承载力检测来检验其效果,保证地基承载力满足设计要求,给风电基础提供良好的支撑条件。

#### 4.3 施工质量控制与检测方法

高寒地区风电基础施工质量控制要建立全过程、全方位的质量检测体系,以克服恶劣天气对施工质量造成影响。由于我国北方风电市场发展迅速,在 2020~2024 年间高寒地区新增风电装机容量超过 45GW,质量控制技术越来越重要。施工质量控制要注

重混凝土浇筑质量、钢筋保护层厚度、基础几何尺寸精度等重要参数,通过对混凝土内部温度场变化、强度变化及冻融破坏情况进行监控,保证基础符合设计要求。质量检测要结合无损检测与现场取样试验,如用超声波检测混凝土密实度,回弹法测定表面硬度,钻芯取样检测抗压强度等方法,同时建立基于数字化的质量追踪系统。

对于高寒地区施工环境特点,在质量检测方面要特别重视混凝土抗冻性和耐久性检测工作,检测项目有混凝土抗冻等级试验、渗透性试验、碳化深度检测等,建立质量控制数据库,对施工过程进行监控和预警。现场质量控制要严格把好材料进场关,对水泥、骨料、外加剂等主要材料进行低温适应性试验,保证其符合高寒地区使用要求。同时,在施工过程中要对模板支撑系统的稳定性、钢筋绑扎精度、混凝土浇筑连续性等重要环节进行严格的质量控制,采用规范化的施工工艺及质量验收标准,以确保风电基础工程在高寒地区的施工质量和耐久性。

#### 5、结论

高寒地区风电产业迅速发展对基础工程抗冻性提出更高要求。中国风电装机容量由 2019 年 210GW 增加到 2023 年 441GW,其中高寒地区风电装机占 28%,年均增速超 25%。本文基于温度场-应力场-渗流场多物理场耦合冻融数学模型,详细分析了冻融循环作用下风电基础力学行为及混凝土性能劣化过程。数值计算结果显示,在冻深为 2.5m 情况下,基础顶部应力集中系数为 1.8,混凝土表面拉应力大于其抗拉强度的 65%,说明传统设计方法在高寒地区应用不足之处 [5]。

根据现场监测数据以及相关研究成果,提出复合保温措施、优化配筋设计以及改善混凝土配合比等抗冻措施,可以使基础抗冻能力提高 40% 以上,大大延长其使用寿命。分层浇筑和温控养护等施工适应性措施大大提高了施工质量,减少了冻害发生概率。从经济角度考虑,采用本文所提出的优化设计方案虽然初期投入增加 15%,但是全生命周期成本可以降低 8%,有较好的经济效益和社会效益。研究成果为高寒地区风电基础工程提供了一套完整的解决方案,对于促进清洁能源在寒冷地区的应用和发展起到积极的作用。

#### 参考文献

- [1] 张大勇,董睿,王帅飞,等.单桩式风电基础结构冰振控制设计研究[J].太阳能学报,2023,44(4):38-44.DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-1385.
- [2] 张平,高志康,张永飞,等.深水大容量吸力筒导管架风机基础设计[J].船舶工程,2024,46(S1):160-165.DOI:10.13788/j.cnki.cbgc.2024.S1.28.
- [3] 邓宗伟,邓沛宇,高乾丰,等.大型风力

机圆形扩展基础倾覆破坏机理分析 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(3):15-20. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1030.

[4] 应宗权, 左华楠, 王雪刚, 等. 悬挂压载对半潜式风电基础水动力性能的影响 [J]. 船海工程, 2025, 54(5):151-157. DOI:10.3963/j.issn.1671-7953.2025.05.023.

[5] 张开伟, 聂庆科, 李志勇, 等. 双桩承台基础动力测试应用研究 [J]. 工业建筑, 2020, 50(8):80-84. DOI:10.13204/j.gyjzG201907080001.