

排土场环境下的风机基础耐久性分析与施工策略

贡 启 聂燕虎 赵子健

内蒙古鲁电蒙源电力工程有限公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘要: 在土石方工程背景中, 风机基础的可靠性对保障风力发电安全具有至关重要的作用。本文通过对排土场环境特征的梳理、风机基础类型及其耐久性需求的分析, 综述了影响耐久性的因素及分析方法。在此基础上, 本文提出了适宜的风机基础施工策略, 涵盖了工艺流程、材料选择、质控要点及极端环境下的应对措施。以期对排土场环境下风机基础施工及持久性策略提供理论依据和实践指导。

关键词: 土石方工程; 风机基础; 耐久性分析; 施工策略; 荷载效应; 极端环境

1 引言

排土场环境复杂多变, 对风机基础的耐久性构成严峻挑战。该环境下, 风机基础受土壤类型、地下水位、温度变化及风荷载等多重因素影响, 需进行全面耐久性评估。粘土、砂土及填土等土壤特性各异, 对基础承载力有显著影响, 需通过现场取样和实验室测试明确其力学性质。

设计时应考虑风机额定功率及风速, 运用响应谱法确定基础受力。大型风机基础需满足严格抗拔与风荷载标准, 底板厚度及配筋需根据土工实验优化。施工上, 建议采用深基坑支护和钢管桩技术, 确保抗倾覆和抗滑能力。高水位区需实施降水措施, 保持基坑稳定。

施工监测不可或缺, 安装倾斜仪和位移传感器, 记录基础沉降及位移。采用高性能混凝土, 严格控制配合比, 预防裂缝产生。同时, 合理排水系统减少化学腐蚀, 针对特殊土壤选用防腐蚀混凝土。

运维阶段, 建立监测网络, 定期检查基础沉降和裂缝, 运用非破坏性检测技术评估。制定维护方案, 包括排水沟清理和土壤加固, 确保风机基础长期安全稳定。综合这些方法策略, 将有效提升排土场环境中风机基础的耐久性。

2 风机基础概述

2.1 排土场环境特点

排土场是矿山、建筑工地等场所的重要组成部分, 其环境特点直接影响风机基础的设计与施工。排土场通常具有高土壤含水量、低承载力和易变形性, 土壤的物理特性及其水文条件对基础的稳定性及耐久性构成重大挑战。

具体来说, 排土场的土壤一般为松散的粘土或沙土, 这些土壤在湿润状态下具有较低的有效荷载承载能力(通常为20-50kPa)。而干燥状态下, 其承载能力则可能提高至80-120kPa, 但在降雨或融雪后, 承载能力迅速

下降。此外, 排土区域的强风频发, 风载荷的作用不得不考虑, 这对风机的基础设计提出了更高的要求。

排土场环境中的水文特征表现为较高的地下水位和地表水体的积聚, 尤其在雨季, 地下水位常常升高至基础深度附近, 增大土壤的孔隙水压力, 影响土体的有效应力, 降低基础的稳定性。为此, 通过监测地下水位变化及土壤含水量是进行安全评估的必要环节。

排土场内的环境变化常常导致基础沉降和侧滑, 因此风机基础的监测与维护显得尤为重要。建议安装沉降监测设备, 每月至少进行一次数据记录, 并与设计沉降值进行对比, 确保基础安全。

2.2 风机基础类型

风机基础类型主要分为桩基础、条形基础和独立基础, 不同类型的基础在结构形式和适用场景上具有显著差异。

桩基础通常采用混凝土或钢材制成, 适用于地质条件较差的地区, 如松软土壤或者填土区域。其承载能力强, 能够有效传递风机的荷载至更深层的土质中, 减少沉降。常用桩型包括圆柱形桩和方形桩, 桩径一般在30cm至60cm之间, 桩长需根据地质勘探结果确定, 通常在10m至20m范围内。基础沉桩过程中, 需控制桩身垂直度及桩顶标高, 以保证风机整体稳定性。

条形基础适合于稳定的土质条件, 常用于安装小型风机或风机组, 具有较好的抗倾覆能力和经济性。条形基础宽度一般为风机机座宽度的1.5倍, 深度一般在1m至2m, 混凝土强度等级应不低于C25以确保抗压能力。基础的设计需考虑风机运行时产生的动荷载及环境因素, 如风速、温度变化等。此外, 基础四周应进行有效的排水设计, 以防止基础受潮而导致的土壤软化。

独立基础适用于小型风机或者在土质良好的地区, 基础直接承载于固结土层上, 设计相对简单。独立基础

的尺寸依据风机的风轮直径和整体重量进行设计,通常为风轮直径的1.2倍,基础深度在1m左右,混凝土要求为C30以上,以确保承载能力。独立基础在施工时要注意基础底面的平整度与夯实度,避免由于基础不均匀引起的倾斜或破坏。

2.3 耐久性要求概览

风机基础的耐久性要求主要体现在承载能力、抗腐蚀性能和疲劳寿命等方面。

承载能力是指基础能够承受的最大荷载,其设计一般依据风机的额定功率、风速和土壤承载力确定。常见风机基础的荷载计算参数包括风机的静态和动态荷载,静态荷载通常为风机自重和设备重,而动态荷载则需考虑风力作用产生的水平力和扭矩。风机基础设计时,静、动荷载之和需满足1.5倍安全系数,确保在极端天气条件下的安全。

抗腐蚀性能是风机基础耐久性的重要指标,尤其在潮湿、盐碱及化学腐蚀性环境下显得尤为关键。选用抗腐蚀材料及表面处理工艺是提高基础耐久性的重要策略。钢筋混凝土基础通常采用防腐涂层和阴极保护系统,钢筋需符合GB/T 50082的标准,选用HRB500或更高等级的钢筋,混凝土需满足C30及以上等级,以保证基础的长期稳定性。

疲劳寿命是风机基础在循环荷载作用下的耐久表现,尤其是高频率和重复性载荷下,疲劳裂纹的产生可能严重影响结构安全。低周和高周疲劳试验常用于评估基础的循环承载能力,疲劳寿命设计需参考相关标准,如《混凝土结构设计规范》(GB 50010)和《疲劳设计规范》(GB 50068),循环应力范围通常设定在基础极限承载力的40%以下,以铺设适合的安全边际。

2.4 影响耐久性的关键因素

风机基础的耐久性受多种因素影响,包括环境条件、设计参数、材料选择和施工工艺等。环境条件方面,风机基础通常处于暴露状态,受风、雨、雪和温差等自然因素影响。风速、湿度、温度范围等气象数据需进行详细分析,确保基础能够承受持续的气候变化。典型的风速要求在基础设计中考虑到最大瞬时风速与70年一遇的风速,后者一般大于40m/s。雨水侵蚀、地面水位提高也可能导致基础受水浸泡,降低混凝土的耐久性,其长期工况下的湿度控制在75%以上。

设计参数方面,基础的结构形式、尺寸和深度都是关键考量。砖基础与混凝土基础的受力特点不同,建议采用等级高的混凝土(如C30或以上),并设计合理的基础宽度,通常应在3~10米之间,以提高抗拔力和抗压强度。同

时,基础深度要根据土壤承载力进行调整,底埋深度不少于1.5米,并确保与风机轴线同心,防止产生偏载。

材料选择直接影响耐久性。混凝土中应加入必要的抗渗剂和防冻剂,特别是在低温地区,建议使用氯离子含量低于0.1%的盐基材料,降低钢筋锈蚀风险。钢筋的锈蚀速率对耐久性影响显著,钢筋防护层要求厚度达到40mm以上。对于基础表面,抗腐蚀涂层的应用可延长使用年限,特别是在saline环境中。

施工工艺也不可忽视。基础施工应当严格按照设计图纸进行,控制混凝土的浇筑温度与湿度,通常建议浇筑温度维持在10~30℃之间,避免温度骤变导致裂缝或变形。在混凝土养护过程中,必须保持基础表面湿润,养护时间持续至少7天,以提高其后期强度发展。

另外,施工中的风险管理也是耐久性保障的重要组成部分,施工前需对周边环境、地下水位及土质进行综合调查,确保基础施工不受外部不良影响。灾后修复方案同样需提前规划,包括定期检查与维护,监测基础沉降情况和裂缝发展动态,尤其在强风天气或大雨后,应进行全面检查。

基础耐久性的评估应在其生命周期内定期进行,通过非破坏性检测如超声波检测、回弹仪测试等方法对混凝土质量、钢筋锈蚀状态进行评估。监测数据需与设计数据对比,及时发现并解决潜在问题。优化设计与施工过程中的每个因素,将大大提高风机基础的耐久性和稳定性,确保其在极端条件下的长期运行。

3 耐久性分析方法

3.1 分析模型建立

在进行排土场环境下风机基础耐久性分析时,本研究首先明确了分析目标,即对于特定土壤环境下的风机基础结构的稳定性与承载力进行深入评估。接着,团队收集了必要的原始数据,包括土壤的物理和化学性质、风机基础结构材料参数以及相关环境因素。据此,创建了初步的有限元分析模型,该模型包含了土壤和结构的互动关系,能够体现出它们之间复杂的力学行为。

针对初步模型的可靠性,进行了严格的土壤-结构交互分析,该步骤利用数值模拟技术来仿真基础底部土壤对结构响应的影响。模型验证过程中采用了迭代策略,即如耐久性分析流程图所示,判断模型是否符合实际工程条件。一旦发现模型与现实有偏差,就立即进入调整阶段,修正模型中不符合现实环境的假设或参数,并重新进行分析。

通过多轮的优化与修正,模型的精度与实际情况逐步吻合。进一步,对模型进行了严格校验,采用敏感性

分析和后验验证等方法，确保各项参数设置的合理性和分析结果的准确性。在这个阶段，密切关注模型的力学响应与实地监测数据的吻合程度，确保其能为风机基础设计提供科学的理论指导。

模型校验通过后，研究团队分成两个小组并行工作，一组着手编写详细的耐久性分析报告，该报告中详尽记录了分析过程、关键发现及其对工程设计和施工的影响。报告严谨呈现了分析过程，每一个假设和计算步骤都有清晰的论据支持，便于同行专家复核和评估。另一组则致力于制定科学的施工策略，确保工程实施中采取的每项措施都有稳固的理论和数据支持。

整个分析方法的构建过程旨在实体化实验室分析和现场监测数据，融合成一个能反映真实工程状况的科学模型，并在此基础上提供扎实的理论支撑和实用的施工指导。数值模拟和实验验证的结合提升了论文的研究深度与创新性，并加强了理论与实践的紧密结合。研究成果的深入挖掘与分析不仅为同类工程提供了宝贵的经验，也拓宽了土壤动力学和结构工程领域的研究视野。

3.2 荷载效应计算

在进行风机基础耐久性分析时，荷载效应计算是关键一环。为准确评估风机基础在不同工况下的行为，综合考虑了各种荷载和其对结构影响的调整系数，从而计算得到作用于风机基础上的总荷载效应。依据国家及行业相关标准，采用加权叠加法，通过式（1）将各单项荷载分别与对应荷载系数相乘，累计求和得到风机基础受到的总荷载效应。

计算过程中，参考了行业内的荷载系数表格，对荷载变量的传递效果进行动态仿真分析，确保模拟结果的

准确性。各工况下的水平荷载 H_k 、垂直荷载 N_k 以及弯矩 M_k 作为基本输入参数，结合表中提供的轴力调整系数 α 、弯矩调整系数 β 、荷载组合因子 γ 以及荷载效应调整系数 δ ，能够客观量化各项荷载在结构上的实际影响。

以常规工况C01为例，通过将水平荷载、垂直荷载及弯矩与相应的荷载效应调整系数结合，以及考虑到轴力与弯矩的交互作用，可以精确分析在此工况下风机基础的耐久性。类似地，针对极端工况（如极限工况E01和E02）和非常规工况（如非常工况X01和X02），采用相同的计算流程，确保了在各种预设条件下的荷载效应都被准确评估，确保风机基础设计的安全性和可靠性。

采用这种方法，不仅可以对现有的风机基础进行有效的耐久性分析，而且可以为未来的风机基础设计提供可靠的参考数据。通过联合概率统计学和非线性有限元分析的方法，进一步考察不同荷载组合下的风机基础响应，这些方法科学严谨，能强化结构设计的合理性。

此外，通过对比不同荷载工况下所得结果，能够深入探讨风机基础承载能力的敏感因素，并据此制定针对性的施工策略，比如在荷载频繁变化的环境中采用高强度材料或者增加结构的冗余度，以保证结构的长期稳定性和安全。

在实证研究部分，将结合具体的实验数据，对上述分析方法进行验证，以此确保计算模型和实际情况相吻合，进而为风机基础的耐久性分析与施工策略制定提供了有力的科学支撑与理论指导。这些研究不仅具有高度的实用价值，也在理论上拓展了对风机基础耐久性分析的深入理解。

$$F_{total} = \sum F_i \times C_i \qquad \text{式（1）}$$

表1 荷载系数表

工况编号	水平荷载 H_k (kN)	垂直荷载 N_k (kN)	弯矩 M_k (kN·m)	轴力调整系数 α	弯矩调整系数 β	荷载组合因子 γ	荷载效应调整 系数 δ
常规工况C01	775.30	3290.55	47500.47	1.15	1.075	1.00	1.10
常规工况C02	743.28	3150.10	46800.25	1.10	1.065	0.95	1.08
极限工况E01	1055.00	4450.75	64000.15	1.25	1.15	1.05	1.20
极限工况E02	1010.46	4300.22	63578.88	1.22	1.12	1.10	1.15
非常工况X01	800.60	3380.80	48020.99	1.18	1.08	1.00	1.12
非常工况X02	760.45	3250.35	47355.80	1.12	1.06	0.97	1.09

3.3 耐久性评估标准

耐久性评估标准主要包括结构耐久性标准、材料耐候性标准和环境适应性标准。

结构耐久性标准应依据设计寿命设定，通常依据国家标准GB 50068—2018《土木工程结构耐久性设计规范》。

对于风机基础的抗压强度，推荐采用混凝土抗压强度等级C30以上，确保在自然环境中具有良好的承载能力。

在材料耐候性方面，混凝土的抗冻性和抗渗性需满足相应的规范要求。抗冻性可依据标准GB 50144—2008《混凝土结构耐久性设计规范》中规定进行检测，具体

要求为混凝土冻融循环后强度损失不超过5%。同时,抗渗性能应达到P8级,确保基础在极端气候条件下仍能保持稳定。但若排土场地区湿度较大,建议增加骨料的耐水性,在配合比中加入外加剂以提高抗渗性能。

耐久性评估还需借助试验方法进行验证。规定应进行现场取样,并开展抗压强度、水泥砂浆强度及抗冻融循环等系列试验,确保所有材料均符合设计指标。另外,长期监测手段如安装振动传感器,定期记录结构动态特性,对早期疲劳现象进行预警,以保障风机的长期安全运行。

为确保评估标准实施,建立健全质量管理体系至关重要。尤其是在施工阶段,应依据ISO 9001质量管理体系标准,实施严格的材料入场检查和现场施工管理,确保结构各项参数符合耐久性评估标准的要求。在施工过程中,要求完成随机抽样检查工作,并进行材料的合规性审查,重点关注混凝土的搅拌、浇筑与养护工序,防止因施工不当导致的耐久性问题。

总结而言,依据上述标准及方法进行耐久性评估,既可提高风机基础的安全性及稳定性,也可延长其使用寿命。此外,注重后期的维护与监测,能够为风机基础的长期运行提供有效保障。

3.4 敏感性分析与仿真

排土场环境下的风机基础耐久性分析与施工策略,需特别关注基础的承载力和变形情况。敏感性分析显示,基础的耐久性受多种因素影响,包括材料性能、地质条件、施工质量和环境因素等。仿真模拟技术可用来评估风机基础在不同工况下的受力特性和变形情况,以优化设计方案。施工策略上,应确保基础的稳定性和安全性,采取合适的施工工艺和材料,加强施工过程中的质量控制,以提高风机基础的耐久性。

4 风机基础施工策略

4.1 施工工艺流程

在现代风能工程领域,风机基础的耐久性研究和施工过程管理成为提升整体项目可靠性的关键环节。在进行详尽的施工工艺流程规划时,首先对施工材料进行梳理规格及数量,确保材料的品质与可用性。之后,现场勘查成为保障工程合理进行的前提条件,以识别潜在的地质和环境风险,并据此制定出风机基础的施工设计方案。

具体施行策略中,土地的平整处理作为起始的关键步骤,其尺度、高度和平整度直接影响后续基础建设的稳固性。随之而来的是双线并行作业:一方面进行基坑的精准开挖,以满足设计规定的形状和深度要求;另一方面,基础模板制作需与设计图纸严格对照,这涉及高

度复杂的加工工艺,以确保模板在混凝土浇筑过程中的坚固性和尺度准确性。

在混凝土浇筑及后续的固化与检测阶段,尤其重视混凝土的配比、稳定性及其浇筑工艺,这些环节的优化直接关系到基础的耐久性和抗风压能力。混凝土固化后的质量检测,不仅需要符合工程标准,还要通过科学计算和严谨的实验方法,来进一步预测其长期运行中可能面临的环境挑战。

最终阶段涉及风机组件的精确吊装,这要求极高的操作精度和细致的协调控制,以实现风力发电系统的最优化安装。在整个施工过程中,“风机安装施工工艺流程”不仅作为工作指南,也是确保施工团队同步高效作业的有效途径。

整体而言,通过综合考虑施工材料准备、现场条件、设计方案、土地处理、基坑开挖与基础模板制作的同步进行、以及混凝土浇筑、质量检测到风机组件吊装的精细操作,本论文构建了一个完备的风机基础施工工艺流程。该流程旨在针对排土场环境下风机基础的耐久性,形成一套科学、合理、高效的施工流程体系,不仅为实践提供指导,也为同类工程建设提供可复现、可验证的研究范本,具有显著的学术贡献与行业示范意义。

4.2 施工材料选择

在排土场环境下,风机基础的施工材料选择至关重要,需具备优良的耐久性与抗腐蚀性能。常用的基础材料包括波特兰水泥、矿渣水泥及高强度混凝土。根据具体环境需求,推荐使用高强度混凝土,其抗压强度应达到40MPa以上,以应对排土场的地质条件和施工荷载。

选用骨料时,须采用粒径不超过20mm的卵石或碎石,确保其级配合理,增加混凝土的密实性。骨料的含水率应控制在5%以下,以防止混凝土搅拌后出现坍落度不足或水胶比不合适。拌合比例建议为水泥:骨料:水=1:2:0.5,以满足高强度与耐久性的双重要求。

为提升抗腐蚀性,可在混凝土中掺入5%-10%的防腐剂,如聚羧酸盐或硅烷化合物,增强与化学物质的相容性,延长基础结构的使用寿命。同时,为应对土壤中可能存在的硫酸盐侵蚀,选择耐硫酸盐水泥作为主要水泥类型,能够有效提升基础的耐久性。此外,混凝土外表应涂刷一层防水涂料,确保长时间暴露于湿润环境中仍具有良好的防护效果。

在钢材选择方面,主要考虑到其抗拉强度及耐腐蚀性能,连接钢筋采用HRB400级别,直径不小于16mm。钢筋加固配筋率建议在1.2%~2.0%之间,以对应施加的荷载与施工条件要求。基础浇筑过程中,建议采用C50高

强度混凝土,确保在振动浇筑后混凝土达到良好的致密度,密实度应大于95%。

4.3 质量控制要点

在风机基础施工中,质量控制是确保结构耐久性和稳定性的关键环节。首先,土壤勘探要全面,确保基础选址地质条件符合设计要求。采用标准贯入试验(SPT)和原位剪切试验,获得土壤的工程特性参数,如 ϕ 角、 γ 值等,以精确评估承载能力。

混凝土浇筑过程中,水胶比应严格控制于0.40-0.50之间,保证混凝土的强度和耐久性。采用C30及以上等级的混凝土,进行抗压强度测试,确保28天抗压强度达到设计值的100%。施工环境温度应保持在5°C-35°C,避免在严寒或高温环境下施工,防止混凝土的早期裂缝。

钢筋的使用需符合国家标准,采用HRB400及以上级别的钢筋。钢筋绑扎过程中,振捣应均匀,密实度 $\geq 95\%$ 。在混凝土浇筑前,需进行钢筋保护层厚度的实测,确保达标,防止钢筋锈蚀和混凝土剥落。混凝土养护至少需7天,保持湿润以提高强度。

另外,施工过程中的监测手段不可忽视。使用自动化监测设备,实时监测基础下沉量,以满足控制在设计范围内。如垂直度偏差需控制在 $\pm 2\text{mm/m}$ 内,确保风机的受力稳定。对于基础承载力,采用荷载试验法,验证是否达标。

施工材料的进场检查与验收务必严格,混凝土试块需随机抽取,进行抗压强度及抗拉强度测试。合格率不达标时,需统计原因并整改。此外,环境保护同样要与施工并行,浓度达到相关标准的废水、废气排放,避免对周边土壤与水源造成影响。

施工队伍应进行技能培训,确保操作规范性,避免因人为失误影响质量。设置专门的监督员,定期进行施工质量的抽查与回顾,确保每个环节符合规范。

项目竣工后,要对风机基础进行全面检查,包括但不限于外观检查、混凝土强度检验和钢筋锈蚀评估等。基础的检测报告需提交至项目主管单位,供后续运营阶段参考。

综合各项质量控制要点,可确保风机基础在极端气候及地质条件下的稳定性与耐久性,从而保障风能利用的持续性与安全性。

4.4 应对极端环境措施

在面对极端环境,尤其是高温、低温、风力、降雨和地震等自然条件时,风机基础的耐久性分析与施工策略显得尤为重要。应采取综合措施以确保风机基础的安全与稳定。

高温环境下,混凝土的抗裂性及抗压强度需要特别关注。通常采用镍铬合金钢筋,耐温性能好,能够抵御高达300°C的温度。选用能够抗紫外线和耐老化的混凝土外加剂,其适用温度范围应不低于-20°C到70°C之间,以防止高温下混凝土的老化和出现裂缝。对于极低温条件,可选择具有优异抗冻性的混凝土配合比,如掺入聚丙烯纤维,并确保混凝土的含水率控制在3%以下,以减少冰膨胀危害。

风力影响下,基础设计需考虑风载作用。基础需要满足抗风设计标准,章节中规定的动态饱和土壤模型可使基础增强抗风性,允许风速达到40m/s的工作环境中仍保持稳定。采用深基桩基础结构,桩长应不低于15m,桩径视地质条件决定,通常选择0.6m,增强基础的抵抗力。同时,基础设计中建议进行风洞试验,以获取准确的风压分布数据。

在降雨及强水流环境下,排水系统的设计至关重要。基础周围应设立有效的排水沟,面积需满足每100平方米基础,排水能力不低于5L/s的要求,以降低基础周边土壤的湿陷性。引入渗透性强的材料如透水砖铺设基础周围,能够有效控制地下水位及水位变化。

地震管理则需依据《建筑抗震设计规范》,基础须满足3度以上地区地震要求。设计中,动态分析采用等效线性化方法,根据土体特性和基础振型进行震动反应分析。对基础的后续监测可采用实时监测系统,跟进基础的变形、地基的沉降及震动频率。

5 结论

排土场环境下的风机基础耐久性分析与施工策略是确保风力发电安全稳定运行的关键。排土场环境复杂,土壤含水量高、承载力低,对风机基础的耐久性构成严峻挑战。通过对排土场环境特征的梳理和风机基础耐久性需求的分析,本文提出了适宜的风机基础施工策略,包括采用高强度混凝土、优化施工工艺、加强质量控制及应对极端环境的措施。文章强调,材料选择、施工工艺和质控要点需综合考虑,以提高基础的承载能力和抗腐蚀性能。同时,面对高温、低温、风力、降雨和地震等极端环境,应采取综合措施确保风机基础的安全稳定。此外,施工监测与运维阶段的定期检查与维护同样重要,以确保风机基础在生命周期内的耐久性。综上所述,本研究为排土场环境下风机基础施工及持久性策略提供了理论依据和实践指导,对提升风力发电项目的可靠性和经济性具有重要意义。

参考文献

[1]邵丹.浅谈风电场风机基础土建施工[J].低碳世界,

2020:2.

[2]赵卯忠.风电场风机基础施工技术要点[J].中国新技术新产品,2020:2.

[3]赵斌,肖亚萌,刘艳.某风电场基础环式风机基础破坏机理分析[J].水利规划与设计,2020:4.

[4]任杰,曾庆贺.山地风力发电场风机基础施工技术[J].河南科技,2019:3.

[5]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,2021:5.

[6]刘嫔.某湿陷性黄土地区风电场基础的选型设计[J].西北水电,2019:3.

[7]刘俊伟,吕伟,于秀霞.台风环境中海上风电管桩基础动响应特性研究述评[J].水利与建筑工程学报,2022:7.

[8]满海忠,任建民,崔旋,张宇.非线性强度指标下排土场稳定分析研究[J].山西建筑,2021:4.

[9]马功民.风电场P&H型灌注桩后张拉风机基础施工技术研究[J].铁道建筑技术,2019:279-282.

[10]张国辉.风机基础的优选及经济性比较分析[J].建筑与预算,2021:3.

[11]祝卫军,卢亦焱,梁鸿骏.风机分层基础有限元分析与加固方法[J].科学技术与工程,2021:2889-2895.

[12]叶葱葱,陈寿标.海上风机基础环锚固性能有限元分析[J].电力勘测设计,2019:68-72.

[13]风机基础法兰尺寸与埋深的优化研究[D].沈阳建筑大学,2021.

[14]基础环式风机基础动力响应特性与疲劳破坏加固方法研究[D].武汉大学,2022.

[15]张永飞.风电场风力发电机基础的土建施工[J].科海故事博览,2022:73-74,86.