

可移动风沙屏障与固沙剂在基础施工中的协同应用

张小明 朱红兵 冷武霖 李闽 杨兵

中国水利水电第七工程局有限公司，四川成都，610000；

摘要：为了应对风沙对基础施工造成的掩埋、侵蚀及设备干扰，本文提出可移动风沙屏障与固沙剂协同应用方法，构建集物理阻挡与地表固结于一体的防护体系。通过现场布设可移动屏障对主风向风沙进行定向遮挡，并同步喷洒固沙剂固结松散沙粒，稳定施工面环境。结果表明，该协同方式显著改善施工区能见度与作业稳定性，减少混凝土表面缺陷，提高设备运行连续性和人员作业安全性，以期为风沙频发地区基础施工提供可靠的防护技术路径与实践参考。

关键词：可移动；风沙屏障；固沙剂；基础施工；协同应用

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.023

引言

在基础施工领域，风沙危害是影响工程进度与质量的关键难题。风沙活动不仅会掩埋施工场地、侵蚀建筑材料，还可能破坏施工设备，导致施工停滞。可移动风沙屏障虽能临时阻挡风沙，但存在防护范围有限、稳定性受环境影响等问题；固沙剂虽可固定沙粒，但单独使用效果易受风沙动态变化干扰^[1]。鉴于此，探索可移动风沙屏障与固沙剂在基础施工中的协同应用模式，整合二者优势，成为应对复杂风沙环境、保障施工顺利推进的重要研究方向。

1 工程概况

本工程位于内蒙古自治区锡林郭勒盟二连浩特市境内，风电场中心位置为北纬 43° 38' 42"、东经 112° 11' 24"。场区属沙化草原地貌，规划面积约 109km²，实际场址呈不规则多边形，近南北向展布，东西宽约 2.5~12.0km，南北长约 26.1km，面积约 213.3km²。地势北高南低，向南倾斜，属波状高平原地貌，海拔在 980m~1170m 之间，相对高差小于 200m，地表多为牧场和草场，有栅栏分割。当地气候为典型温带半干旱大陆性季风气候，寒冷、风大、雨少、日照长、温差大、蒸发力强。冬季漫长寒冷，春季多风少雨，夏季温热干燥，秋季凉爽温润。无霜期 115d~120d，全年降水量 150~200mm，5 月~10 月降水占全年 90.5%。年均气温 3.1℃，结冰期 5 个月，寒冷期 7 个月，极端最高气温 41.5℃，极端最低气温 -39.6℃。工程范围涵盖 25 台风机共计 250MW，包括风机基础、吊装及附属设备安装、站内道路、35kV 集电线路，以及 220kV 升压站 1 座。由

于当地风沙环境恶劣，风沙侵蚀对混凝土基础施工和运行带来诸多挑战，影响基础稳定性和设备维护，威胁施工安全与效率，因此亟需开发新型基础结构和施工技术以应对风沙侵蚀问题^[2]。

2 风沙地区混凝土基础施工现状分析

目前在多风沙地区进行混凝土基础施工面临着极端环境和复杂地质条件的双重挑战。这些地区的混凝土基础项目普遍面临施工难度大、周期长、成本高的问题。由于风沙侵蚀和沉降问题的存在，传统的桩基础和混凝土基础在这些环境中经常表现出不稳定性和易损性，施工过程中还需要不断清理风沙，以确保基础施工的顺利进行。

3 新型抗风沙侵蚀基础结构设计

为解决风沙侵蚀对混凝土基础结构长期稳定性的破坏性影响，本项目围绕风沙地区的特殊环境条件，提出具有针对性的抗风沙侵蚀基础结构设计方案。首先，在结构表面引入微米级凹凸结构，通过模拟风沙颗粒撞击路径和角度，设计规则化的微结构阵列，使风沙粒在接触表面时分散能量、减缓磨蚀速率。这类表面形态不仅具备良好的抗冲刷性能，还能在一定程度上削弱局部风力的附加冲击。其次，针对传统混凝土结构易出现风蚀剥落的问题，项目采用了高耐磨性复合涂层材料作为结构表面防护层。该涂层由无机硅酸盐基体与耐磨陶瓷颗粒组成，具有良好的附着性和自修复能力，能在风沙冲击下维持稳定的防护效果。该涂层可通过喷涂、滚涂或热喷涂方式施工，适应性强、易于现场应用^[3]。此外，项目团队还利用流体动力学模拟方法对基础结构整体

外形进行优化设计。通过改变结构底座的圆角半径、斜面坡度和边缘转角形式,使风沙在接触基础结构时形成可控导流路径,降低紊流区和冲击区的范围,减小局部风压与颗粒冲刷强度。

4 新型施工工艺施工

4.1 预制构件制造

项目所处的多风沙地区,为有效应对施工现场风沙频繁、作业条件恶劣等问题,采用预制构件制造工艺成为提升施工效率和质量的重要手段。预制构件主要包括基础承台、环形基础板、钢筋笼底座及桩头连接模块。依据设计图纸和标准规范,在室内工厂环境中统一生产,实现混凝土强度控制、养护周期统一、钢筋定位精准等标准化目标。

在制造过程中,基础板尺寸为直径 10m、厚度 1.6m,采用 C40 抗冻混凝土,坍落度控制在 $160\text{mm} \pm 20\text{mm}$,保障浇筑密实度与施工性能。钢筋采用 HRB400 型钢筋,直径分别为 25mm 与 16mm,按照双层双向布置,并预埋 M30 精轧螺纹锚栓与桩头连接。制造模具为高强钢模定型装配,误差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内,确保构件间装配精度。

在养护方面,采用蒸汽养护与保温毯双重措施,在温度控制 $40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内进行阶段升温养护,有效缩短混凝土强度增长周期,使 28 天设计强度在 7 天内即可达标。所有预制构件在出厂前进行外观质量检测、抗压强度试验与钢筋定位检测,并加贴构件二维码标识,便于现场调度及后续安装跟踪。

4.2 现场运输与安装

预制构件完成工厂生产后,需安全、高效地运输至现场并完成安装。本项目现场道路条件良好,但由于风电场地广阔、距离工厂平均运输半径达 18km,需进行专项运输方案设计。运输采用专用低平板挂车,单次可装载直径 10m 的基础板或两套桩头模块,运输过程配备缓冲垫和防震支架,以防构件在颠簸中发生微裂或掉角。运输时间避开强风时段,优先在早晚低风速时段进行,每车次前后由作业车队、交通协管车全程引导,确保道路安全。卸货点位于施工平台预设的堆放区,设置防风围挡与软垫层,避免构件在强风中二次碰撞造成损伤。

安装采用 100 吨履带式起重机进行吊装作业。每块基础板设有 4 个预埋吊环,起吊过程中使用四点同步起吊系统,配合激光对位仪进行位置校准。安装基座提前

精修找平,垫层厚度控制在 20mm 以内,垫料为级配砂石,并用夯实机压实。每块基础安装时间控制在 1.5 小时内,单日可完成 4~6 个单元模块安装,明显优于传统现场浇筑作业的工作效率。安装完成后进行初步拼接加固,并根据天气情况设置防风布,避免构件在未完全固结前遭遇强风破坏^[4]。

4.3 连接与加固

预制构件现场安装完成后,连接与加固工序成为确保整体结构稳定性和使用寿命的关键环节。连接采用机械连接与高强螺栓连接相结合的方式,主要包括钢筋端头锚接、基础板与桩头节点咬合连接、及外部刚性拉结。施工前由测量人员利用全站仪确认拼接面垂直度与平整度,控制误差在 $\pm 2\text{mm}$ 范围内。

钢筋连接采用套筒灌浆连接技术,灌浆材料为 CGM 高性能无收缩灌浆料,初凝时间 2 小时,终凝时间 8 小时,28 天抗压强度不低于 60MPa。螺栓连接部位使用 M30 高强螺栓,连接后施加扭矩为 280Nm,采用双螺母锁紧,防松垫片和螺纹胶进行二次防护。

节点部位加设钢筋箍筋和短肢柱加强肋,有效提升基础整体抗剪性能。在接口部位涂刷两遍防水密封胶,防止风沙通过缝隙侵入混凝土界面引起磨损。连接完成后,对拼接缝进行结构验收,采用超声波法检测灌浆饱满度与结构结合强度,检测合格率达到 100%。

在加固阶段,设置环向预应力钢绞线封闭带,提高基础环向承压能力,施工后张拉力保持在 90kN 以上。此外,混凝土表面统一喷涂 1mm 厚高耐磨涂层,具备抗冲刷、抗风蚀性能,延缓结构老化。整个连接加固流程既实现了结构刚度与延展性的平衡,又有效封闭潜在渗砂通道,是提升整体结构抗风沙性能的核心技术支点。



图 1 预制混凝土基座

4.4 高效防风沙措施

施工期间风沙对混凝土浇筑、钢筋绑扎、设备运行

造成显著干扰。基于此,项目系统布设了可移动风沙屏障和固沙剂喷洒协同防护体系,实现施工过程与环境动态变化的双重适应。

可移动风沙屏障采用模块化钢结构骨架与高密度聚酯纤维网布构成,单模块尺寸为 $3\text{m}\times 4\text{m}$,设置滚轮与定向锁脚装置,便于随风向调整角度与位置。屏障间距布设为 10m ,设置在施工区四周及主风口方向,形成施工区缓冲带。网布透风率控制在 $20\%\sim 30\%$,可有效降低风速、延缓沙粒进入,实测风速降幅达 50% 以上。屏障布设后明显改善作业区能见度与作业安全性,有效避免混凝土表面干裂、早期失水等问题。

地表固沙措施采用喷洒环保型有机固沙剂,其主要成分为多糖与植物纤维复合胶凝材料,可在 12 小时内形成稳固结皮,维持时间约 $10\sim 15$ 天,对周围植被无不良影响。喷洒采用电动雾化喷头,作业宽幅 3m ,每日覆盖面积可达 2000m^2 。重点喷洒区域包括基础作业面、钢筋堆放区、道路两侧及人员出入口通道。



图2 施工现场的防风沙措施

5 施工技术优化

本项目通过一系列施工技术和设备优化措施,提升施工效率和安全性,确保了项目能够顺利进行。具体优化措施如下:

5.1 引入智能化设备管理系统

在风沙环境中,传统的设备管理方式往往导致设备资源浪费和管理混乱。为提升设备运行效率和调度精度,本项目采用基于物联网技术的智能化设备管理系统。通过安装传感器和GPS定位系统,设备的实时状态、位置、负载、油耗等数据能够被系统实时采集与监控。项目管理人员可通过移动端或电脑端远程查看设备的运行情况,并进行实时调度与维护预警。该系统能根据现场施

工需求自动优化设备调度。例如,在风沙天气较强时,系统会自动调整作业设备的工作负荷,避免设备在恶劣天气下过度运行造成损坏。同时,系统监控设备的运行状态,提前预警潜在故障,确保施工设备始终处于最佳运行状态^[5]。

5.2 高效除尘设备的应用

项目引进了多台高效除尘设备,包括负压吸尘系统和湿法除尘系统,通过实时吸附和清除空气中的尘土与沙粒,确保施工现场始终保持清洁。负压吸尘系统通过强力吸附将施工中产生的沙尘集中处理,避免了扬尘扩散到空气中,减少了对混凝土表面的污染。湿法除尘系统通过喷雾技术,在施工过程中将水雾与沙尘结合,沉降于地面,减少了空气中的扬尘,改善了施工现场的能见度。高效除尘系统的应用,降低了因扬尘造成的混凝土施工质量问题,同时减少了施工人员的健康风险,提高了工作效率。

6 试验与验证

为确保本项目中采用的新型基础结构和防风沙技术的可行性与效果,项目组选择典型的风沙环境作为试验场地。通过模拟风沙侵蚀、温湿度变化以及环境动态等多种因素,验证新型设计方案的实际表现,确保其在极端环境中的可靠性和长期稳定性。

首先,在试验设计方面,选择了内蒙古锡林郭勒盟二连浩特市的风电场作为主要试验场地,该地区的风沙环境典型且极端,风速可达到 20m/s 以上,沙尘暴频发,符合真实施工现场的环境条件。试验中,模拟了多种风沙侵蚀情况,特别是高风速、大粒径沙尘的冲击。试验用的基础结构与实际施工中所使用的混凝土材料、加固设计保持一致。采用了高耐磨性涂层和微米级凹凸结构的基础板,以检验其抗风沙侵蚀的实际效果。其次,采用流体动力学模拟和沙尘暴再现设备进行风沙侵蚀模拟。风沙环境测试持续了 6 个月,期间对混凝土表面进行多次检测,重点评估了基础结构的磨损、裂缝扩展以及材料的老化程度。结果表明,引入的高耐磨涂层有效减少了风沙对基础的侵蚀,涂层表面在长期暴露于风沙中后未出现明显剥离。结构的抗压强度也在测试中保持了较高水平,平均降低幅度仅为 5% ,远低于传统结构材料的损耗率。

7 应用效果

首先,施工现场的风沙侵蚀现象得到了显著减少。可移动风沙屏障有效地阻挡了大部分风沙进入施工区域,尤其在沙尘暴天气时,屏障通过合理调整位置,保证了施工场地内的风沙浓度低于 $50\text{g}/\text{m}^2$,确保了混凝土浇筑和养护过程中没有受到风沙的直接侵蚀。相比没有防护的情况下,风沙对基础混凝土表面的损伤减少了约 80%。基础表面保持平整无裂缝,混凝土的抗压强度和整体稳定性未受到风沙侵害。其次,固沙剂的应用进一步增强了防风沙措施的效果。固沙剂能够在地面形成一层坚固的保护膜,有效固定沙粒,减少了扬尘对施工设备和人员的影响。固沙剂的覆盖面积超过施工区域的 90%,最大程度地减少了风沙对施工过程的干扰,施工设备的故障率比常规环境降低了约 40%。特别是在强风天气下,设备能够稳定运行,减少了由于风沙侵蚀导致的设备故障和维修频次,从而降低了整体的维护成本。最后,协同应用模式的实施还提高了施工的安全性。在施工期间,施工人员处于较为安全、洁净的工作环境中,减少了风沙对作业人员的健康威胁,施工事故率下降了约 35%。整体施工进度也得到了保障,项目按计划顺利推进。

8 结束语

综上所述,本文通过可移动风沙屏障与固沙剂协同应用,构建了物理阻挡与地表固结相结合的防护体系,

有效解决了风沙地区基础施工中的风沙侵蚀、设备干扰及作业安全难题。试验与应用结果表明,该技术改善了施工环境,提高了基础结构稳定性和施工效率,降低了设备故障率与施工风险。未来,进一步优化协同防护体系的智能化调控与材料性能,拓展其在极端环境下的应用场景,为风沙频发地区工程建设提供更高效、可靠的解决方案。

参考文献

- [1] 付志祥,王国庆,范鹏辉,等. 构筑吉林西部生态屏障将风沙之城变为绿色之城[J]. 国际人才交流,2023,(08):16-18.
- [2] 新疆维吾尔自治区林业和草原局. 新疆:担使命治风沙筑牢西北生态安全屏障[N]. 亚洲中心时报(汉),2024-01-30(013).
- [3] 杜华,方庆旭,蔚建峰,等. 筑牢京津绿色屏障——包头市京津风沙源治理工程草原建设项目 20 年综述[J]. 内蒙古林业,2023,(07):9-10.
- [4] 刘玥,郭强,袁立敏,等. 三种植物基固沙剂对风沙土水分入渗和蒸发的影响[J]. 干旱区研究,2025,42(04):658-667.
- [5] 柴绍琦,董雷,刘悦,等. 保水剂和固沙剂对露天排土场植物特征及土壤含水率的影响[J]. 绿色科技,2025,27(06):40-48.