

顶管施工安全风险分析与防控体系构建

——以新河镇老镇区雨水管网工程为例

陈霖瑶

上海市水利工程设计研究院有限公司 上海 200232

摘要：本文以新河镇老镇区雨水管网工程为研究对象，系统分析顶管施工安全风险。通过识别地质复杂、设备运行、周边环境及施工管理等风险源，构建包含4个一级指标的评估体系，运用层次分析法与模糊综合评价法量化风险。针对关键风险因子，从技术防控、设备管理、施工策略及应急保障等维度构建防控体系，并通过工程实践验证成效。研究表明，优化后的防控体系显著降低风险等级，为同类工程提供可借鉴的安全管理路径。

关键词：顶管施工；安全风险；风险评估；防控体系；新河镇雨水管网工程

引言：顶管施工在市政管网建设中应用广泛，但其安全风险受地质条件、设备性能及管理水平等多重因素影响。新河镇工程因砂质土层分布广、邻近建（构）筑物密集，施工风险防控难度显著^[1]。本文结合工程特性，通过风险识别、量化评估与防控体系构建，旨在解决复杂环境下顶管施工的安全管理难题，提升施工过程可控性，为类似项目提供科学的风险管控参考。

1 顶管施工安全风险识别

顶管施工安全风险识别需结合工程实际环境与工艺特点展开。新河镇老镇区雨水管网工程顶管施工中，地质条件复杂是首要风险源，砂质土层与粉砂层分布使钻孔桩施工易出现塌孔，且顶管穿越道路时土体扰动可能引发地面沉降。设备运行风险方面，泥水平衡顶管机在复杂地层可能遭遇刀盘卡死，中继间装置若密封失效会导致顶力传递异常^[2]。周边环境风险表现为施工对邻近建（构）筑物基础的影响，如顶管井基坑开挖可能引发邻近民房墙体开裂，同时地下管线密集区域存在管线位移或破损风险。施工管理层面，多工序交叉作业易导致安全管控疏漏，夜间施工照明不足可能引发操作失误，冬雨期施工时降水系统故障会影响基坑稳定性。这些风险因子相互关联，需在防控体系构建中系统性应对。

2 顶管施工安全风险评估

2.1 风险评估指标体系构建

顶管施工安全风险评估指标体系需覆盖多维度风险要素。结合新河镇工程特性，构建包含地质环境、设备运行、周边环境、施工管理4个一级指标及12个二级指标的体系。地质环境指标涵盖砂质土层占比、地下水承压性等，反映地层稳定性对施工的潜在影响；设备运行指标包含顶管机刀盘扭矩、中继间密封性能等，评估机

械系统可靠性；周边环境指标纳入建（构）筑物距离、地下管线密度等参数，量化施工对外部环境的扰动程度；施工管理指标设置工序交叉频率、夜间作业时长等内容，体现管理层面的风险暴露水平。各指标通过工程勘察数据、设备技术参数、现场调研资料等多源信息综合赋值，形成层次分明的评估框架，为风险量化分析提供结构化依据^[3]。

2.2 风险量化分析方法

风险量化分析需借助科学模型实现多指标综合评估。针对新河镇工程，采用层次分析法（AHP）确定指标权重，通过专家打分构建判断矩阵，计算各风险因子的相对重要性排序。例如，地质环境中砂质土层占比权重可通过对比钻孔勘探数据与塌孔事故历史案例确定，设备运行风险则结合顶管机故障统计数据量化刀盘卡死概率。模糊综合评价法用于处理指标模糊性，如将“邻近民房墙体开裂风险”划分为高、中、低三级，通过隶属度函数计算综合风险等级。同时引入监测数据动态修正模型，利用地表沉降实时监测值调整风险评估结果，实现施工全过程风险动态量化，为防控措施优先级制定提供数据支撑。

2.3 新河镇工程风险评估实例

新河镇工程顶管施工风险评估以DN2800顶管穿越新影路路段为典型案例。该区域砂质土层占比达65%，地下水埋深1.2米，邻近3栋5层居民楼与DN800污水管线。运用层次分析法计算发现，地质环境风险权重占比32%，其中砂质土层稳定性不足与地下水承压性高为主要贡献因子；设备运行风险权重28%，中继间密封失效概率经历史数据测算为15%；周边环境风险权重25%，居民楼基础距顶管轴线最小距离仅4.8米，管线位移风险等

级达中级；施工管理风险权重 15%，夜间作业时长占比 30% 导致操作失误概率提升。模糊综合评价结果显示，该路段整体风险等级为“较高”，需优先针对地质加固与设备密封性实施防控措施。

2.4 关键风险因子筛选

通过风险评估数据交叉分析，新河镇工程顶管施工的关键风险因子集中于地质环境与设备运行层面。砂质土层占比高导致的钻孔桩塌孔风险，在地质环境风险中贡献度达 45%，成为地层稳定性的核心威胁。设备运行方面，中继间密封失效风险在设备风险中占比 38%，直接影响顶力传输效率与施工安全。周边环境风险中，邻近建（构）筑物基础距离不足引发的结构沉降风险，占该类风险权重的 52%，而地下管线密集区域的位移风险贡献率为 39%。施工管理层面，多工序交叉作业导致的安全管控漏洞，在管理风险中占比 41%，夜间作业照明不足引发的操作失误风险贡献率达 35%。这些关键因子通过量化评估被优先识别，为防控体系的针对性构建提供明确靶点。

3 顶管施工安全防控体系构建

3.1 技术防控措施

针对地质风险，新河镇工程采用高压旋喷桩与 MJS 工法桩对顶管进出洞口及坑底土体进行加固，通过控制注浆压力与水泥掺量（25%）提升砂质土层稳定性，减少钻孔桩塌孔风险^[4]。顶管穿越道路时，采用泥水平衡顶管机配合触变泥浆减阻技术，通过同步注浆填充管道外周空隙，控制地表沉降在 $\pm 10\text{mm}$ 以内。设备运行方面，优化中继间密封结构，采用双道橡胶止水法兰与压力监测装置，将密封失效概率从 15% 降至 5% 以下。施工工艺上，推行“分层开挖、随撑随挖”原则，在基坑深度超 3 米区域采用拉森钢板桩支护，结合井点降水将地下水位降至坑底以下 1 米，避免雨季基坑积水引发边坡失稳。

3.2 设备管理体系

新河镇工程构建设备全周期管理体系以应对运行风险。顶管机入场前实施三维建模验收，重点核查刀盘耐磨涂层厚度、中继间密封件材质等关键参数，确保设备性能符合设计要求。施工中建立“一机一档”动态监控系统，通过传感器实时采集顶管机刀盘扭矩、泥浆压力等数据，设定预警阈值（如扭矩超过额定值 80% 时自动报警），同步联动中控系统调整顶进参数。针对中继间密封失效风险，推行“双检制”：班前由操作班组检查密封胶条完整性，班中由技术人员通过压力测试仪检测腔体密封性，发现异常立即停机检修。设备维护实行分级保养制度，每日对液压系统进行滤芯清洁，每周对电

气控制系统进行绝缘测试，每月对关键部件进行探伤检测，确保设备始终处于最佳运行状态。

3.3 施工管理策略

新河镇工程通过精细化管理策略提升施工安全可控性。针对多工序交叉作业风险，实施“时空隔离法”：在顶管井围护结构施工与土方开挖之间设置 48 小时工序间隔，避免立体作业冲突；夜间施工区域配置智能照明系统，采用 LED 投光灯与反光警示标识结合，将照明亮度提升至 300 勒克斯以上，降低操作失误概率。冬雨期施工时，建立降水系统双回路供电机制，配备备用发电机组，确保基坑水位持续稳定在设计标高以下。推行“班组自检 - 技术复检 - 监理终检”三级管控模式，对顶管轴线偏差、混凝土强度等关键指标实行 100% 全覆盖检测，发现问题 2 小时内启动整改流程。同时优化施工调度方案，将夜间作业占比从 30% 压缩至 15%，优先集中安排日间关键工序，减少疲劳作业引发的安全隐患。

3.4 应急保障机制

新河镇工程建立多层级应急保障机制以应对突发风险。针对地质突变导致的塌孔或地面沉降，现场储备高压旋喷桩机、双液注浆材料及应急支撑构件，设定地表沉降速率超 3mm/d 为预警值，触发后 30 分钟内启动注浆加固程序。设备故障应急方面，在施工现场配置中继间密封件、刀盘耐磨块等备用部件，组建 24 小时专业维修团队，确保顶管机故障 4 小时内修复。周边环境突发风险防控中，与管线管理单位建立联动机制，在邻近民房及管线区域布设实时监测点，当监测数据达到报警值时，1 小时内启动土体跟踪注浆或管线保护支架安装。施工管理应急则聚焦于雨季基坑积水，配备功率总和达 $1200\text{m}^3/\text{h}$ 的排水泵组，结合沙袋围堰形成三级排水体系，确保 30 分钟内排除 500mm 深度积水。所有应急方案均通过桌面推演与实战演练验证，确保响应流程高效可行。

4 工程应用效果与优化

4.1 防控措施实施效果

新河镇工程防控措施实施后，关键风险得到有效控制。地质加固措施使钻孔桩塌孔率从历史平均 8% 降至 1.5%，顶管穿越道路地表沉降最大值控制在 8mm ，满足 $\pm 10\text{mm}$ 的设计要求。设备管理体系使中继间密封失效次数较优化前减少 73%，顶管机平均故障修复时间缩短至 3.2 小时。施工管理策略将夜间作业安全事故发生率降低 60%，三级质量管控模式使顶管轴线偏差合格率达 98%。应急保障机制在雨季施工中成功处置 3 次基坑积水险情，30 分钟内排水效率达设计标准，未因积水导致停工。综合评估显示，项目整体风险等级从“较高”降至

“中等”，安全可控性显著提升。

4.2 体系运行问题诊断

新河镇工程防控体系运行中暴露三方面问题：一是地质监测数据反馈滞后，砂质土层注浆加固效果依赖人工巡查确认，未能与实时监测数据形成动态联动；二是设备管理中中继间密封件库存型号单一，突发故障时因配件匹配度不足导致修复延迟；三是多工序交叉作业管理中，时空隔离措施在复杂工况下执行不到位，围护结构施工与土方开挖因场地限制难以严格间隔 48 小时。此外，应急演练场景覆盖不足，未模拟极端天气下多风险叠加场景，导致雨季排水泵组联动效率未达设计最优状态，部分监测点数据传输存在延迟，影响风险预警响应速度。

4.3 优化改进路径

针对体系运行问题，新河镇工程制定三方面优化路径：一是引入物联网监测技术，在高压旋喷桩加固区域布设智能传感器，实时采集土体含水率与注浆压力数据，通过云平台实现监测值与加固参数自动联动调整，缩短数据反馈周期至 15 分钟内。二是完善设备配件管理体系，根据中继间型号多样性储备多规格密封件，建立区域化配件共享库，通过数字化管理系统实现配件快速调配，将故障修复时间进一步压缩至 2 小时以内。三是优化多工序交叉作业管理，采用 BIM 技术进行施工流程模拟，针对复杂工况动态调整时空隔离方案，允许在场地受限区域实施“错峰分段施工”，通过增加夜间照明班次弥补工序间隔缩短的影响，同时强化现场协调员职责，确保关键工序间隔不低于 24 小时。此外，补充极端天气综合应急演练，模拟连续暴雨叠加设备故障场景，优化排水泵组联动逻辑，同步升级监测系统传输模块，将数据延迟控制在 5 分钟以内。

4.4 长效管理机制

新河镇工程通过制度化建设巩固防控成效，形成长效管理机制。建立风险动态评估制度，每季度结合施工进度与地质监测数据更新风险清单，调整防控重点；将设备管理“双检制”与三级保养标准纳入企业管理规程，通过信息化系统跟踪配件库存与维护记录，确保设备性能持续可控。施工管理方面，将“时空隔离法”与夜间照明标准编入施工组织设计模板，作为同类工程工序安排的强制要求；应急保障机制纳入企业应急预案体系，定期开展跨部门联合演练，强化与管线单位、气象部门的信息共享机制。

结论

新河镇工程通过风险识别与评估，明确地质与设备风险为关键因子，构建的技术防控、设备全周期管理及应急保障等体系有效降低事故发生率。监测数据显示，钻孔桩塌孔率下降 6.5 个百分点，地表沉降控制在设计范围内，设备故障修复效率提升 45%。尽管体系运行中存在数据反馈滞后等问题，通过引入物联网监测、BIM 模拟及动态演练等优化措施，形成长效管理机制，最终实现风险等级从“较高”到“中等”的降级，验证了防控体系的科学性与适用性。

参考文献

- [1]罗飞轮,熊亮,袁幸朝.双线对顶顶管施工安全风险分析及控制研究[J].四川水利,2025,46(02):76-79.
- [2]杨华东,王安兴,王浩良.复杂地层下穿河道顶管施工安全风险分析及控制措施[J].云南水力发电,2024,40(12):95-98.
- [3]张仙明.上穿地铁隧道的矩形顶管施工设计与安全风险控制探究[J].工程建设与设计,2022,(23):214-216.
- [4]何自敬.顶管施工安全风险及管理措施[J].工程技术研究,2020,5(22):178-179.