

地铁隧道涌水事故应急响应体系优化

张建峰

(中交一航局城市交通工程有限公司)

摘 要: 地铁隧道施工过程中的涌水事故具有突发性强与危害程度大的特点, 建立科学高效的应急响应体系对保障施工安全具有重要意义。为了解决传统应急管理体系存在的层级传递迟滞、预警机制滞后、资源调配效率低下等问题, 提出了智能化预警、资源优化调配、扁平化信息传递等创新优化方案。在南沙至珠海(中山)城际 NZZ-1 标段地铁工程实践中, 优化后的应急响应体系实现了信息传递时间缩短 50%、预警准确率提升至 92%、应急资源调配及时率超过 95%, 显著成效, 可为地铁隧道涌水事故的科学处置提供实践指导。

关键词: 地铁隧道; 涌水事故; 应急响应; 分级响应

0 引言

随着城市轨道交通建设规模的不断扩大, 地铁隧道施工中的涌水事故频发, 给施工安全、工程进度带来严重威胁。现有应急响应体系在实际应用中暴露出反应迟缓、协调不畅、资源调配效率低下等问题。针对这些问题, 深入研究影响应急响应效率的关键要素, 优化应急响应体系, 对提高涌水事故处置效率与降低事故损失具有重要的现实意义。通过系统分析以及试验研究, 构建更加完善的应急响应体系, 可为地铁工程安全施工提供可靠保障。

1 传统地铁隧道涌水应急响应体系

传统地铁隧道涌水事故应急管理体系采用金字塔式的层级管理模式, 由项目部应急指挥中心、工区应急小组及现场应急工作组构成三级管理架构^[1]。这种管理模式在实际运行过程中暴露出诸多问题, 严重制约了涌水事故的处置效率。首先, 在组织指挥方面层级传递环节过多, 导致信息流转迟滞, 从现场到指挥中心的信息传递耗时较长, 往往延误应急处置的最佳时机。其次, 传统的预警机制过分依赖人工经验判断, 缺乏科学的预警指标体系, 预警的及时性和准确性难以保证, 且无法实现风险等级的动态调整。在资源调配环节, 传统体系采用固定库存与就近调配的方式, 未建立区域联动的共享协同机制, 导致应急物资利用率低下, 平均调配时间超过 2 h, 难以满足紧急情况下的处置需求。此外, 传统体系在应急处置过程中, 缺乏标准化的应急处置流程和智能化的决

策支持平台, 处置方案主要依靠经验制定, 科学性和可操作性不足。同时, 传统体系未建立完善的应急培训和演练机制, 应急队伍专业化程度不高, 应急演练流于形式, 无法有效提升实战能力。特别是在复杂地质条件下的涌水事故处置中, 传统应急管理体系暴露出反应迟缓、协调困难、资源调配效率低等突出问题, 已难以满足现代地铁工程建设中对涌水事故快速响应和高效处置的要求。

2 地铁隧道涌水应急响应体系优化

2.1 应急响应体系框架设计

地铁隧道涌水事故应急响应体系框架的设计需要从组织架构、职责分配、响应流程、保障措施等多个维度进行系统构建(图 1)。在组织架构方面, 设立由建设单位、施工单位、设计单位、专家组构成的应急指挥部, 明确各方职责边界及协作机制, 形成统一指挥, 分级管理与快速响应的组织体系。通过建立应急值守制度以及 24 h 应急值班机制, 确保涌水事故发生时能第一时间启动应急响应程序, 组织调动相关应急资源。在应急响应流程设计方面, 将应急处置过程划分为预警、响应、处置、恢复 4 个关键阶段, 针对每个阶段制定详细的操作规程以及技术方案^[2]。预警阶段重点关注地下水位与围岩变形等监测数据异常波动, 建立预警指标体系; 响应阶段强调快速研判以及科学决策, 根据事故等级启动相应级别预案; 处置阶段注重应急资源统筹调配以及处置措施有效实施; 恢复阶段则着重事故原因分析以及工序优化。

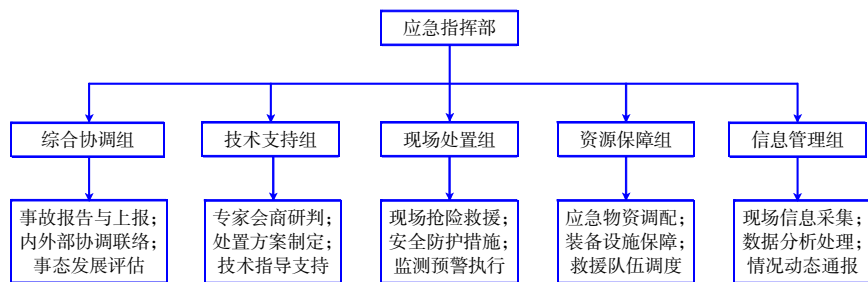


图1 地铁隧道涌水事故应急响应体系架构

2.2 分级响应机制设计

分级响应机制的设计基于涌水事故的危害程度、影响范围、处置难度等因素，将应急响应等级划分为特别重大（Ⅰ级）、重大（Ⅱ级）、较大（Ⅲ级）、一般（Ⅳ级）4个层次。针对不同等级的涌水事故，制定相应的响应启动条件、处置要求以及响应程序，确保应急响应措施与事故等级相匹配。特别重大以及重大涌水事故由市级应急指挥部统一指挥，调动全市范围内的应急资源进行处置；较大涌水事故由区级应急指挥部负责，在充分发挥属地优势基础上统筹调配区域内应急资源；一般涌水事故则由施工现场应急指挥部直接处置。在分级响应机制实施过程中，注重响应等级的动态调整，根据事故发展态势以及处置效果及时提升或降低响应等级，实现多部门与跨区域的协同处置。

2.3 应急资源配置优化

地铁隧道涌水事故应急响应体系中的资源配置优化需要综合考虑应急物资储备、应急设备调配、应急队伍建设等多个层面^[9]。针对应急物资储备，采用基于风险评估的动态储备模型，结合历史涌水事故处置经验以及工程特点，确定各类应急物资的最优储备规模以及储备结构，重点储备大功率水泵、止水材料、钢管、封堵器材等专用应急物资。在储备布局方面，依据地铁线路走向以及重点风险区段分布特征，采用“重点储备、就近调配”的原则，在关键节点设置应急物资储备库。在应急设备调配方面，建立完善的应急装备数据库，对各类应急设备的性能参数、使用状态、维护保养情况进行动态管理，并通过引入应急资源调配优化算法，制定最优的设备调配方案。在应急队伍建设层面，按照专业化与标准化的要求，组建专职应急救援队伍以及志愿者队伍，通过建立严格的准入标准及考核机制，确保应急队伍的

专业素质和实战能力。

2.4 信息传递机制优化

2.4.1 信息采集标准化

地铁隧道涌水事故应急响应过程中，信息采集标准化的实现需要建立统一的信息采集规范以及数据标准，涵盖事故类型、涌水量、水压、水质等基础信息，以及周边地质条件与工程进度、影响范围等关联数据。通过部署智能传感设备以及在线监测系统，实现对关键参数的实时采集、自动上传，确保数据的准确性、及时性^[9]。在信息采集端设置数据质量控制机制，对采集的数据进行自动校验、异常识别，为后续的信息处理、决策分析提供可靠的数据支撑。

2.4.2 传递路径优化

涌水事故应急响应中的信息传递路径优化着重解决信息流过程中的延时以及失真问题，通过构建多层级与网络化的信息传递体系，实现事故信息的快速流转和共享。在传递路径设计中，采用“扁平化+分级制”的组织模式，减少信息传递层级，确保重要信息能第一时间传递到决策层。针对不同类型的应急信息，设计差异化的传递路径，利用移动通信、卫星通信等多种通信方法，构建冗余备份的信息传输网络。

2.4.3 决策支持系统构建

决策支持系统的构建以数据分析、模型预测为核心，集成专家知识库、案例库、预案库，为应急决策提供全方位的技术支持。系统基于机器学习算法，对历史涌水事故数据进行深度挖掘分析，建立事故发展态势预测模型、处置效果评估模型。通过构建多维度的决策分析框架，结合实时监测数据以及专家经验，快速生成处置方案建议，并对不同方案的可行性、效果进行评估预测^[9]。系统设计注重人机交互界面的优化，提供可视化的决策分析工具。

3 工程应用

3.1 工程概况

南沙至珠海(中山)城际 NZZ-1 标火炬西站(原张家边站)—火炬站区间段位于中山市火炬开发区,为双线隧道工程。场区属珠江三角洲冲积平原,地层由第四系全新统冲积层及燕山期侵入岩组成,主要为淤泥质黏土(流塑—软塑、高压缩性)、粉细砂(透水性强)、全风化—强风化砂岩(透水性中等)。地下水以孔隙潜水为主、局部承压水,水位埋深 1.0~3.0 m,砂层及强风化岩层渗透系数为 5~20 m/d,局部存在上软下硬复合地层(软塑黏土+中风化砂岩),且穿越 37 处建(构)筑物(下穿 29 处、侧穿 8 处)。

工程采用 2 台 $\phi 8.86\text{ m}$ 土压平衡盾构机施工,穿越地层含高渗透砂层、富水软弱土及基岩凸起段,面临掌子面失稳、盾尾涌水等风险,尤其穿越建(构)筑物时需防控地下水突涌,地质条件对隧道涌水应急响应体系的科学性与有效性提出较高要求。

3.2 应用效果

本项目针对私盐河涌穿越段的涌水风险,实施了优化后的应急响应体系。该体系在施工现场布设了由 28 个监测点组成的智能监测网络,实现了对地下水位、围岩变形、衬砌应力等关键参数的实时采集。基于物联网技术开发的数据传输系统将监测数据实时上传至应急指挥平台,系统采用 5G 网络作为主通道,同时配备了卫星通信作为备用链路,确保信息传输的可靠性。项目应用的智能预警平台基于深度学习算法,通过对历史监测数据的分析,建立涌水风险预测模型,实现分级预警的精准推送。在突发涌水事故应急演练处置中,该预警系统实现了提前 15 min 预警,为应急响应争取了宝贵时间。

优化后的应急响应体系在该地铁项目应用过程中取得了显著成效。信息传递各环节的实际运行数据(表 1)显示,相比项目前期采用的传统模式,优化后的体系在信息处理效率方面实现了质的提升。在涌水事故处置过程中,基于 GIS 的应急资源调配系统通过智能算法优化调配路径,极大缩短了设备调配时间。通过专家决策支持系统对现场监测数据的实时分析,结合项目特定的地质条件,短时间内便可完成方案论证,大幅提升了决策效率。

表 1 项目涌水事故处置信息传递效率分析表

信息传递环节	传统模式用时/min	优化后用时/min	提升效果/%
现场数据采集	5	2.5	50
预警信息推送	3	1.5	50
应急指令下达	5	3	40
专家会商启动	15	8	47
处置方案确定	35	15	57

3.3 应急响应体系先进性指标评估

优化后应急管理体系的先进性主要体现在智能化水平、运行效率、资源利用率等方面。智能预警系统通过深度学习算法对历史涌水事故数据进行挖掘分析,预警准确率达到 92%,较传统经验判断模式提升了 45%。如表 2 所示,应急资源调配系统在提升资源利用效率方面成效显著,各类应急资源的调配及时率均超过 95%,使用效率达到 90%以上。智能化决策支持系统将专家经验数字化、模型化,形成了包含 200 余个涌水事故处置案例的知识库,系统推荐的处置方案可靠性达到 95%以上。

表 2 项目应急资源调配实际效果分析表

资源类型	传统调配及时率	优化后及时率	资源使用效率/%
大功率水泵	75	96.5	92.3
止水材料	70	95.8	90.5
注浆设备	72	97.2	93.6
监测设备	78	98.4	91.8
应急人员	82	99.1	95.2
技术专家	85	100	96.4

3.4 优化建议

基于南沙至珠海(中山)城际 NZZ-1 标段地铁项目实践经验,应急响应体系持续优化需重点关注以下内容:

- 1) 智能预警系统要进一步提升在复杂地质条件下风险识别能力,建议依据项目实测数据对预警模型动态优化并完善风险等级自适应调整机制。
- 2) 应急资源管理平台需加强和周边在建地铁项目资源联动,建立区域性应急资源共享机制。
- 3) 智能化指挥平台需和项目 BIM 系统进行深度融合,以实现涌水事故处置过程可视化管理。
- 4) 应急队伍建设方面需将项目积累经验转化

成培训案例，借助虚拟仿真等技术方法提高应急演练水平。

4 结语

针对传统地铁隧道涌水事故应急管理体系在信息传递、资源调配、响应机制等方面存在的问题，开发了基于智能化技术的优化应急响应体系。通过在地铁工程中的实践应用验证，优化后的应急响应体系在预警准确率、信息传递效率、资源调配时效等方面均取得显著提升，预警准确率达 92%，信息处理时间缩短 50%，资源调配及时率超过 95%。研究成果对提升地铁隧道涌水事故处置能力具有重要的实践指导意义，同时可为其他类型地下工程突发事故应急响应体系的优化提供

参考。后续研究可进一步探索人工智能技术在应急响应中的深度应用，提升系统智能化水平。

参考文献：

- [1] 郑顺华,王迎超,陈帆,等. 地铁隧道涌水涌砂灾害特征及灾变模式分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2025,59(1):152-166.
- [2] 赵鹏,康与超,张拥军. 断层倾角对地铁隧道突涌水的影响规律[J]. 低温建筑技术,2024,46(8):90-94.
- [3] 陈帆,王迎超,郑顺华. 地铁隧道涌水涌砂诱发地面塌陷的大型模型试验研究[J]. 土木工程学报,2023,56(11):174-183.
- [4] 莫伟平. 岩溶地区涌水对地铁隧道轨道结构的影响及防治[J]. 城市轨道交通研究,2021,24(7):115-119.
- [5] 孟小伟,马全武,马龙祥,等. 基于半无限平面隧道渗流场解析解的青岛地铁涌水实用预测公式研究[J]. 施工技术,2020,49(S1):711-714.