

Analysis of information monitoring technology for highway tunnel construction safety

Farun Yi

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650217, China

Abstract

With the expansion of expressway construction into complex geological regions, the challenges in tunnel construction safety risk prevention have significantly increased. Information-based monitoring technology serves as a crucial solution to overcome limitations in traditional safety management, playing a vital role in early warning systems and process control. This study focuses on the Dajianshan Tunnel project along the Simao-Lancang Expressway. Given the high proportion of Class V rock formations and elevated penetration risks in this project, we conduct a comprehensive analysis of the information-based monitoring system for tunnel construction safety. The system encompasses core technologies such as geological advance forecasting, real-time construction monitoring, and risk early warning mechanisms. By identifying technical implementation challenges and proposing improvement strategies, this research aims to provide practical references for safety management in similar engineering projects.

Keywords

expressway tunnel; safety management; information monitoring; surrounding rock monitoring; risk warning

高速公路隧道施工安全信息化监控技术分析

矣发润

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 中国 · 云南 昆明 650217

摘 要

伴随高速公路建设向复杂地质区域推进, 隧道施工安全风险防控难度急剧上升。信息化监控技术是打破传统安全管理局限的关键方式, 在预警、过程管控等环节具有重要地位。本文以思茅至澜沧高速大尖山隧道工程作为研究对象, 由于该工程项目 V 级围岩占比多, 施工危险性高, 因此, 全面剖析隧道施工安全信息化监控技术应用体系, 涵盖地质超前预报、施工动态监测、风险预警处置等核心技术, 并探究技术应用难点以及改良方法, 旨在为类似工程的安全信息化管理给予实际参照。

关键词

高速公路隧道; 安全管理; 信息化监控; 围岩监测; 风险预警

1 引言

高速公路隧道施工地质环境复杂、空间狭小且危险源多, 传统人工巡查响应慢、数据差、预判弱等缺陷明显, 难以适应现代安全管控要求。信息化监控技术将传感、传输与智能算法相结合, 实现施工过程的实时监测、数据分析及风险预警, 是提升安全管理水平的发展趋势。大尖山隧道作为思茅至澜沧高速关键工程, 单幅全长超 8 公里, V 级围岩段达 1358 米、IV 级围岩段为 3024 米, 强风化泥灰岩和炭质泥岩为主, 断层造成岩石破碎并引发坍塌涌水事故。通过构建信息监控体系, 为隧道的安全贯通给予保障, 其经验具有可以推广性。

2 监控技术核心架构

大尖山隧道安全信息化监控体系, 将“数据采集-传输-分析-预警”作为核心流程, 构建起多层次、全要素的监测架构。底层是感知层, 通过布置各种传感器, 完成对围岩变形、爆破振动、有害气体浓度等重要指标的数据采集工作; 中间层级则是传输层, 采用有线和无线并用的方法, 在洞内的复杂环境里, 确保数据能稳定传回数据中心; 顶层即应用层面, 利用监控平台做到数据汇集整理之后的应用环节, 也就是实现数据分析判断及风险告警指令发出, 由此, 形成闭环管理的过程, 确保每一环节的高效运作, 同时感知层的传感器, 需具备高精度与强适应性, 以应对隧道内多变的地质条件和极端环境^[1]。

3 高速公路隧道施工安全信息化监控技术应用

3.1 地质超前预报技术

大尖山隧道用物探加钻探的超前预报来应对地质条件

【作者简介】矣发润 (1989-), 男, 彝族, 中国云南易门人, 本科, 工程师, 从事公路隧道工程研究。

突变的隐患,在高风险路段采用地质雷达、超前钻孔等方式提前探测围岩岩性、断层位置、地下水分布。严格按《公路工程地质勘察规范》(JTGC20-2011)进行岩芯取样和雷达检测,相互验证核实数据,保证地质信息准确。预报周期同施工进度相衔接,在左幅 ZK25+960 ~ ZK25+970 段 5 米加固区施工前 72 小时,就进行专项预报,制订含岩体完整系数等参数的双层超前小导管注浆加固计划。针对 ZK25+930 到 ZK25+950 段断层造成的岩体破碎问题,将原来的Ⅳ级围岩支护改为Ⅴ级加强支护,用 I20b 加 I18 工字钢拱架,且间距加密到 50cm。预报数据还要联动监控量测系统,高风险区段的监控频次由原来的每日一次加密到两至三次,地质勘探与监测管控精准匹配,有效降低坍塌风险。

3.2 围岩变动态监测技术

大尖山隧道把围岩变形作为隧道稳定的核心监测指标,贯通区间每 5 米设一个监测断面,每个断面在拱顶、拱腰和边墙各设 5 处监测点,用全站仪、收敛计等自动化仪器实时采集数据。系统设置分级预警,拱顶下沉或者水平收敛值达到 3mm/d 就报警上报,达到 5mm/d 就发出停工撤离指令,左幅 ZK25+960 段曾经因为拱顶下沉速度达到 4.2mm/d 而触发警报,现场及时采取径向小导管注浆加固,避免了事故的发生。为保证数据的准确性,设备使用抗干扰高精度全站仪,在洞内高粉尘环境处装设防尘罩,依据《工程测量规范》(GB50026-2007)每季度校准一次;有线为主、无线为辅的数据传输模式下,当右幅 K26+010 到 K26+030 段爆破导致有线中断时,系统自动切换到 4G 网络以防止数据丢失。监测系统可以对历史数据进行回溯分析,通过对左幅 67m V 级围岩段数据进行拟合发现开挖后 3 天变形达到峰值,据此将二次衬砌距离掌子面安全步距缩短至 30 米范围内,提高结构的稳定性^[2]。

3.3 多维度风险协同监控技术

大尖山隧道对爆破、有害气体、触电、坍塌等多方面施工风险,创建多维度协同监控体系,集中管控风险。爆破作业过程中,振动监测仪实时采集震动参数,严格依照《爆破安全规程》(GB6722—2014)设定的振动速度警戒线,当 K25+955 到 K26+005 段靠近紧急停车带的爆破施工时,通过改变炮孔间距、装药量等控制手段,将振动速度控制在 1.5cm/s 以下,以防止围岩及既有支护结构被破坏。封闭作业空间内,有害气体检测仪 24 小时不间断监测 CO、H₂S 等浓度,以多点布设、分区分片预警的方式,在掌子面、横通道接口等重要位置设检测点,当 CO 浓度大于 30mg/m³ 时,系统立即触发声光报警,远程启动轴流风机通风并推送预警给安全员手机,实现快速响应。电气设备在线观测系统主要针对稳压器、变压器等重要设备,对电流、电压、温度等参数进行实时监测,完全满足《施工现场临时用电安全技术规范》(JGJ46-2005)的要求^[3]。

监控平台将各种风险信息汇总分析,形成闭环;通过

精确控制装药量、及时通风降毒、实时监测电气参数等针对性措施,分别解决爆破震动、有害气体集聚、电气故障等安全隐患,保证隧道施工过程中各种危险因素在可控范围内,为施工安全提供全方位的技术保障。

3.4 八大系统集成应用技术

大尖山隧道整合了八个系统创建出完整的监测预警应急闭环管控系统。门禁系统使用 IC 卡/人脸识别闸机(响应≤0.5 秒),栅栏式车行闸(IP54 防护),日均出入误差≤2 人次;人员定位系统采用 UWB 技术,掌子面≤3m,二衬段≤7m,72 小时续航,双向报警,经后期系统升级,定位精度≤1m,实时显示 1358 米 V 级围岩段人员精确定位;风险监控通过安装在隧道施工重点区域安装的摄像机,可实现在值班监控室实时观察洞内、外情况,以及人、机、料的调配情况,通过与大数据中心连接,实现在远程电脑、手机 APP 上查看隧道施工作业视频,同时具备实时存储功能,录像存储不小于 30 天,像素 720P 以上,并能分时段提供回放、检索;有线声光报警系统 110dB 防水电话,涌水事故 30 秒内撤离;有毒有害气体监测系统可实时检测隧道内氧气、一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物、可燃气体、硫化氢等气体含量及粉尘状态,当气体浓度超过主机系统所设定的容许值,报警装置即刻发出声、光报警,值班人员立即启动风机,10 分钟内降至安全值;LED 显示系统使用≥18m² 户外防水屏(分辨率 1920*1080)实时显示数据;手机信号延伸系统≥2km,解决隧道掘进盲区;应急救援逃生系统包括 Φ800mm 逃生管道(抗冲击≥10MPa),20m² 物资仓库,掌子面 20m 内储备物资,设备防护等级 IP65,风险响应效率提升 40%。

4 信息化监控技术应用的优化策略

4.1 设备稳定性优化:从硬件防护到运维体系构建

针对洞内高湿度、强振动、高粉尘环境造成的设备稳定问题,要从硬件防护升级和运维体系完善两方面同时着手。在硬件选型上,首选 IP65 及以上防护等级的工业级传感器,像用于围岩变形监测的收敛计,可选用外壳为不锈钢材质、内部元件有防潮涂层的产品,以应对洞内潮湿环境;爆破振动监测仪则安装缓冲减震底座,利用橡胶垫与金属支架结合的设计,减少爆破冲击对内部元件的影响。经测试该方法能将设备振动数据漂移控制在±0.05mm 以内,远低于规范允许的±0.1mm 误差范围。

在运维管理上形成“日常巡检+定期校准+故障应急响应”三级运维机制,日常巡检由现场技术员每天检查设备外观及连接线路,重点关注传感器是否松动、线缆是否损坏;每月进行一次定期校准,使用标准校准设备对全站仪、有害气体检测仪等进行精度校验,比如,用标准浓度的 CO 气体对检测仪进行标定,确保其检测误差不超过±5%;同时,在监控平台设置设备状态监测模块,随时显示各个设备

的运行参数,当出现设备离线或者数据异常情况时,就会自动将故障信息发送为运维人员,并且标明设备位置以及初步故障原因。若某个有害气体检测仪的数据一直保持为零,系统便会发出“可能是传感器堵塞或者线路断开”的提示,从而帮助运维人员迅速找到问题所在,这样能使平均故障处理时间。从原先的 4 小时缩减到现在的 1.5 小时,显著提升设备运行稳定性。

4.2 数据智能化分析:引入算法模型与多源数据融合

要解决数据整合分析深度不够的问题,就要用智能化算法模型来创建多源数据融合分析体系。先根据大尖山隧道历史监测数据,形成围岩变形预估模型,采用 LSTM(长短时记忆网络)算法,将围岩级别、支护参数、开挖进尺、地质条件等作为输入变量,拱顶下沉速率、水平收敛值作为输出变量。经左幅 V 级围岩段 1358 米施工数据训练后,该模型预测误差可控制在 8% 以内,可以提前 24-48 小时预测围岩变形趋势。在右幅 K26+010 处施工前,该模型预测此处拱顶下沉速率约为 3.8mm/d,施工方提前调整支护方案,将工字钢间距加密到 45cm,从而将实际变形速率维持在 2.5mm/d 以下。

其次,关联分析多源数据,对地质超前预报、拱顶下沉、周边收敛、围岩变形监测等多源数据进行关联分析,通过构建关联规则算法挖掘数据间的潜在关联。研究发现,当某区段地质预报显示岩体完整度系数低于 0.3,并且爆破震动速度超出 1.2cm/s 的时候,围岩变形超标的可能性就会增大 60%,据此在监控平台设置起组合预警阈值,若同时满足上述两个条件,就立刻将预警等级升级为“重大预警”,从而触发更严格的管控措施,如暂停爆破作业、加密监测频次等。此外,可引入数字孪生技术,建立隧道三维可视化模型,将实时监测数据与模型关联,通过模型直观呈现围岩变形、有害气体扩散等动态,从而便于管理者精准掌握施工风险状态。在左幅贯通施工期间,用数字孪生模型模拟不同注浆压力下的围岩加固效果,最后确定最优注浆压力为 1.2MPa,这样既保障了加固质量,又避免了过度注浆导致的成本损耗。

4.3 应急响应效率提升:流程标准化与人员能力建设

针对现场人员预警响应速度差异较大的问题,从应急流程标准化和人员能力提升两方面优化。一方面,制定《隧道信息化监控预警应急处置规程》,细化预警分级响应机制:一般预警(拱顶下沉 3-4mm/d)由技术员 1 小时内核查

反馈;重大预警($\geq 5\text{mm/d}$):5 分钟内启动撤离程序、30 分钟内完成封控评估。将处置流程嵌入监控平台中,在预警触发时自动推送处置步骤、责任人及规范依据等关键信息。若存在有害气体超标,平台自动显示“启动通风→人员疏散→气体检测→隐患排查”标准化处置流程,并且提出设备的操作指南供现场参考。通过该机制实现全过程标准化指引与智能化推送,从而有效避免因流程不熟悉导致的处置延误,提升整体响应效率。

另一方面,加强人员培训演练,定期进行信息化监控技术及应急处置培训,内容包括设备原理、预警识别、处置流程等,并采用“理论授课+实操演练”方式开展培训,如组织现场人员进行有害气体超标应急演练,模拟传感器报警、启动通风、人员撤离等情况,考核人员对预警信息的响应速度和处置规范性,不合格者需重新培训合格后方可上岗;也可建立“师带徒”机制,由老员工带领新员工参与实际监控与应急处置工作,在现场指导下提高新员工的实际操作能力。同时将预警处置效率纳入绩效考核,对于及时、规范处理预警的人员予以奖励,并对因处置不当造成风险扩大的人员进行追责,激励约束并举提高人员对预警信息的关注度及响应速度。经统计实施该优化策略后,现场预警信息平均响应时间由原来的 25 分钟缩短至 8 分钟,处置规范率从 70% 提升到 95%。

5 结语

高速公路隧道施工安全信息化监控技术促使安全管理由“被动应对”转向“主动防控”。以大尖山隧道工程为例,通过搭建地质超前预报、围岩变形监测以及多维风险协同监控体系,化解复杂的地质施工危险,确保隧道能够安全贯通。同时,从实际操作中,可明显看到此项技术显著提升管理精确度和有效性。未来,伴随着人工智能、大数据等技术的更新换代,其将会朝着智能化、一体化方向迈进,并建立全生命周期监控系统,从而为高速建造赋予更有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 张义,张林.隧道施工视频监控在安全管理中的应用[J].交通科技与管理,2025,6(15):177-179.
- [2] 黄红亚,罗荣辉,肖文东.高速公路隧道施工安全信息化监控技术探析[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(18):37-39.
- [3] 于淼,祝玉巍,臧波.高速公路隧道施工安全信息化监控技术与质量防控[J].中国品牌与防伪,2025,(04):223-225.