

隧道围岩稳定性自动化监测预警技术研究

赵笠

广东省重工建筑设计院有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i3.2476

[摘要] 隧道围岩稳定状态影响工程施工保障水平与构筑物长期服役品质,自动化监测预警技术布设传感装置捕捉围岩位移、应力、沉降核心参数,持续把控围岩实时状态并完成动态研判。监测指标体系搭建、数据收发传输、预警临界值划定及智能分析模式成为核心探究方向,挖掘自动化模式融入风险甄别、灾害治理及安全管控的实际价值。这套技术强化围岩失稳预判水准,缩小人工监测产生的数值偏差,为隧道现场施工防护与专业决策筑牢技术保障。

[关键词] 隧道工程; 围岩稳定性; 自动化监测; 预警技术; 安全控制

中图分类号: U45 **文献标识码:** A

Research on automatic monitoring and early warning technology of tunnel surrounding rock stability

Li Zhao

Guangdong heavy industry Architectural Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] The stability of tunnel surrounding rock affects the engineering construction support level and the long-term service quality of structures. The automatic monitoring and early warning technology arranges sensing devices to capture the core parameters of surrounding rock displacement, stress and settlement, and continuously control the real-time state of surrounding rock and complete dynamic research and judgment. The establishment of monitoring index system, data transmission, early warning threshold delimitation and intelligent analysis mode have become the core research directions, and the actual value of the automation mode into risk screening, disaster management and safety control has been excavated. This set of technology strengthens the pre judgment level of surrounding rock instability, reduces the numerical deviation caused by manual monitoring, and provides technical support for tunnel site construction protection and professional decision-making.

[Key words] tunnel engineering; Surrounding rock stability; Automatic monitoring; Early warning technology; safety control

引言

隧道工程施工环境复杂,围岩受地质条件、开挖扰动、支护方式和地下水等多种因素影响,容易出现变形、松动甚至失稳等问题,传统人工监测频次低、误差大且信息反馈滞后,难以适配工程安全管理的及时需求。自动化监测预警技术可对围岩状态连续感知、动态分析,为风险识别和施工调整提供可靠支撑。开展隧道围岩稳定性自动化监测预警技术研究,能提升工程安全控制水平,降低突发灾害的发生概率。

1 隧道围岩稳定性监测技术的应用基础

1.1 围岩变形参数的动态采集

围岩变形参数动态采集需贴合隧道开挖扰动后岩体位移、收敛变化、拱顶下沉、地表沉降、支护结构受力各类核心指标。

隧道施工过程中,原始地应力释放、爆破振动冲击、机械开挖干扰、地下水渗流作用与支护时效作用都会作用于围岩自身,岩体变形同时具备连续演化与突发异变双重特征。拱顶、拱腰、边墙、仰拱及掌子面周边可布设位移计、收敛计、测缝计、压力盒、锚杆轴力计等装置,自动化监测系统依托这类装置实时感知围岩和支护结构产生的各类变化。

动态采集模式相较人工定期量测模式,提升现场监测频次,规避人为读数带来的数值偏差,围岩变形全过程都能依托时间序列数据完整展现。围岩等级、埋深条件、断层破碎带分布、地下水发育程度、施工工法特质都会左右参数采集布局,以此划定监测断面布设点位和测点疏密程度。软弱围岩路段、大变形隧道区域与浅埋偏压地段可增加监测点位布设数量,强化现场异

变变形的捕捉效能。测点数值波动之外还要研判变形速率、累计变形量和相邻测点联动状态,围岩稳定状态判定工作便能拥有完整参考依据。单处测点数值只能体现局部区域状态波动,缺失周边测点参照比对,设备故障偏差或局部施工扰动极易被判定为围岩整体出现异变。

1.2 多源监测数据的传输整合

多源监测数据传输整合关乎围岩稳定性和自动化识别整体成效,隧道监测有着丰富信息来源,传感器获取的位移、应力、应变、沉降、裂缝宽度等结构性信息,还有地质素描、超前地质预报、地下水观测、施工进尺、支护参数、爆破振动记录等工程过程资料都涵盖在内。各类数据有着不一样的采集频率、格式标准、空间位置和时间尺度,没有规范统一的整合模式会形成信息孤岛,干扰围岩稳定性研判精准程度^[1]。有线光纤、无线传输、物联网网关搭配现场数据采集终端组成自动化监测系统架构,把各个分散测点实时信息归集至一体化数据库。

断点续传、异常校验、噪声过滤、数据备份等功能需配置在数据传输流程中,规避隧道内部高湿多尘、电磁干扰、通信不稳等环境因素引发的数据丢失与信号失真。时间、里程、断面、测点类型及风险等级可作为数据整合的关联依据,让监测成果和现场施工工序形成精准匹配。多源信息融合处理能够发掘单一数据无法显现的隐蔽隐患,围岩位移增幅明显且锚杆轴力出现反常波动,支护体系原有承载状态便会产生改变。

1.3 自动化预警平台的运行机制

自动化预警平台运行逻辑衔接数据接入、状态识别、阈值判断、预警发布、处置反馈形成完整闭环。现场监测设备实时传输围岩变形、支护受力、环境变化相关信息录入系统,后台依托数据清洗、曲线拟合、趋势分析、异常识别手段研判围岩整体稳定态势。预警阈值摒弃单一固定数值标准,参照围岩等级、施工阶段、支护形式、历史监测规律完成层级划分,正常、关注、警戒、危险构成四大预警层级,匹配适配现场管控举措。

围岩变形速率陡然攀升、累计变形量贴近管控标准、支护结构受力持续走高、多项指标同步出现异动,平台自动推送预警信息,借助监控大屏、移动终端、短信、声光报警渠道送达现场管控人员。平台搭载监测曲线展示、风险断面定位、数据追溯、报表生成、处置记录等多项功能,预警信息可为现场管控提供参考依据。报警管控流程整合停工检查、加密监测、调整开挖步距、强化初期支护、补强注浆相关举措并纳入系统存档,串联风险甄别到工程治理全流程环节。存档信息涵盖报警时点、预警层级、异常测点区位、核心波动参数、现场核验结论、管控负责人员、整改落地进度。管控举措落地后持续盯控围岩变形速率、支护受力波动、裂缝延展走向,核验各类举措实际管控成效。全过程流程留存痕迹规范预警处置流程,也为后续工作追溯提供可靠依据。

2 围岩失稳识别中的关键薄弱环节

2.1 监测点布设与地质条件匹配不足

监测点布设与地质条件不匹配,直接降低围岩稳定性监测

结果的代表性,隧道穿越区域岩性多变,断层破碎带、节理裂隙发育、浅埋偏压、富水软弱夹层等复杂情况普遍存在,不同地段围岩受力与变形状态各不相同。监测断面按固定间距刻板布设,易遗漏局部高风险部位,采集数据仅能反映一般段落变化,无法及时捕捉突发性失稳信号。部分工程布点过分依赖设计图纸,对开挖揭露的实际地质变化应对不及时,掌子面前方破碎带、拱脚应力集中区、仰拱隆起区及边墙裂隙扩展区监测覆盖不足。

测点类型选择不当会导致监测信息片面,软岩大变形段仅关注拱顶下沉,缺少水平收敛、锚杆轴力和围岩压力数据,无法判断支护结构与岩体的相互作用。测点安装质量影响数据可靠性,传感器埋设深度、固定方式、防水保护及初始读数标定控制不严,后续数据可能出现漂移或异常波动。布设方案缺乏动态调整机制,地质条件变化无法及时转化为监测方案优化,风险识别易滞后于围岩变形发展。

2.2 预警阈值设定与风险等级偏差

预警阈值搭配风险等级出现偏差,会造成围岩稳定状态判定出现偏差,隧道自动化监测预警依托累计变形量、变形速率、支护受力、裂缝扩展等多项指标完成等级划定,各类围岩级别、埋深条件、施工方式、支护时点都会让参数演变规律产生较大区别。硬性套用统一管控标准会让硬岩区域产生频繁误报现象,软弱破碎区域也会错失最佳治理窗口。不少工程参照行业经验与规范限值划定阈值,未结合现场历史资料、地质环境特征、施工扰动强度做多维度校核,预警层级和现场实际风险程度难以相互匹配^[2]。

变形速率呈现的阶段起伏会干扰现场判定,开挖作业初期围岩变形释放幅度偏大,支护结构闭合后变形走势慢慢趋于平稳,阈值未结合施工阶段特征调整会让报警结果脱离真实稳定态势。风险等级划分标准过于宽泛,正常起伏状态、持续异常现象、快速失稳趋势边界模糊,现场无法匹配适配管控手段;划分标准设置过细会增多报警次数,弱化工作人员对预警信号的重视程度。单一指标触发预警存在明显短板,累计位移未触及限定范围,变形速率保持上升走势、锚杆轴力出现大幅波动、围岩压力产生骤然变化,岩体内部潜藏的失稳隐患仍会逐步演化。

2.3 数据分析滞后与联动响应不强

数据分析滞后与联动响应偏弱,会弱化自动化监测预警技术在现场安全管控中的实际成效。隧道工程即便完成传感器布设与数据上传工作,后台分析依旧停留在曲线查看、人工比对及定期报表阶段,做不到对异常趋势的实时甄别。监测数据录入平台后,清洗、筛选、校核与趋势研判工作若未能及时开展,异常信息会被常规波动遮蔽,压缩风险处置的有效时段。固化的数据分析模式会约束预警效能,只参照数值临界标准做判断,忽略变形速率起伏、曲线转折节点、相邻断面差距及多指标耦合特征。

预警信息和施工管理相互割裂是联动响应偏弱的主要表现,警报触发后,开挖进尺、支护参数、注浆加固、人员撤离及复测

安排没有形成标准流程, 预警仅停留于基础信息提示。现有部分平台缺失责任划分、处置存档与反馈校验相关功能, 风险处置结果不能反向完善预警模型。现场通信状态波动、数据接口标准不一、施工及监测各方信息互通不畅, 都会拉低整体响应效率。围岩失稳兼具突发演变与渐进发展双重特质, 数据分析无法提前预判走势, 现场处置举措不能快速落地, 自动化系统就无法完全释放风险防控的固有作用。

3 自动化监测预警技术的优化路径

3.1 监测指标体系的精细化构建

监测指标体系精细化构建需遵循围岩稳定性演化规律, 把地质条件、结构受力、施工扰动和环境因素纳入同一评价框架。指标选择不应只局限拱顶下沉和周边收敛这类常规项目, 结合隧道埋深、围岩等级、岩体完整性、地下水发育程度及支护结构形式, 增设围岩压力、钢拱架应力、锚杆轴力、衬砌裂缝、仰拱隆起、掌子面挤出变形等监测类目。断层破碎带、软弱夹层、浅埋偏压段和高地应力区, 侧重变形速率、支护受力变化和水压变化这类敏感指标, 监测内容可匹配各类风险特征。

指标体系划分基础指标、敏感指标和辅助指标类别, 基础指标把控围岩整体变形走向, 敏感指标捕捉失稳前置征兆, 辅助指标厘清异常波动内在缘由。指标数据设定统一编码规则, 界定测点位置、采集频率、计量单位、精度要求和异常判定标准, 缩小不同设备、不同断面的数据偏差。分类分层划定指标条目, 围岩稳定性评价脱离单项数值判定模式转为多维状态识别, 拉近监测结果和现场地质条件的匹配程度。

3.2 智能算法与分级预警协同应用

智能算法搭配分级预警协同运作可把实时监测数据转化为可落地的风险判定结论。围岩变形自带非线性、阶段性、不确定特质, 人工经验或是固定阈值无法精准甄别复杂工况下的失稳走向。自动化平台纳入时间序列分析、灰色预测、支持向量机、神经网络、随机森林各类模型, 整合历史监测资料与实时采集信息开展运算, 捕捉变形曲线拐点、速率异动、应力骤变及多指标同步波动特征^[3-4]。

算法运行期间参照施工进尺、开挖模式、支护闭合时长、地质揭露实况完成参数校正, 规避正常施工扰动被判定为高等级风险的情况。蓝色、黄色、橙色、红色依据风险程度纳入分级预警体系, 不同层级匹配专属管控举措。低层级预警侧重加密观测与数据核验, 中层级预警侧重调校施工参数并加固支护体

系, 高层级预警即刻落实停工核查、人员疏散与专项治理工作。算法研判结果和分级预警体系保持联动, 模型识别结论直接对接现场处置流程, 杜绝预警信息仅停留在数据展示层面。

3.3 工程应用反馈与安全管控提升

工程应用反馈与安全管控提升依托监测结果、现场处置和后续验证构建闭环循环体系, 在自动化监测预警技术投入现场后, 各类报警、复核、处置及效果验证信息均录入工程数据库, 搭建全程可追溯的安全管理链路。围岩产生异常变形走势时, 结合监测曲线走势、掌子面地质实况、支护成型质量及施工参数波动开展综合研判, 依照风险等级落实缩短开挖进尺、调整爆破参数、增设锁脚锚杆、加密钢拱架、提前封闭仰拱、补强注浆等相关举措^[4]。

各类处置工作落地后, 依托连续监测数值判别变形速率回落幅度、支护受力稳定状态、裂缝扩展受控程度, 让治理举措实际成效实现量化核验。工程积累的反馈信息可校准预警阈值标准并完善监测点位布局, 针对频繁误报、漏报及响应偏弱的断面开展重新评估梳理。

4 结语

隧道围岩稳定性自动化监测预警技术可捕捉围岩变形、支护受力、环境变化全过程动态信息, 给施工风险甄别筑牢参考根基。优化监测点位布局、健全指标架构、科学划定预警阈值, 搭配智能算法模型与分级响应机制, 拉高现场异变识别精度及应急处置效率。工程落地场景里强化数据流转反馈、处置流程闭环及安全管控联动, 让隧道施工风险管控模式从事后应对转向前置防控。

[参考文献]

- [1]李怀国, 黄铭, 刘雪山, 等. 隧洞施工期围岩变形监测确定性模型研究[J]. 水科学与工程技术, 2025, (03): 71-75.
- [2]杨帆. 隧道施工围岩变形智能预测与预警研究[D]. 东华理工大学, 2025.
- [3]曹善凯. 基于机器视觉的隧道围岩变形监测及预警研究[D]. 东北电力大学, 2025.
- [4]张博文. 深部巷道围岩蠕变力学特性试验研究[D]. 安徽理工大学, 2025.

作者简介:

赵笠(1991--), 男, 汉族, 河南虞城县人, 研究生, 高级工程师, 工程监测, 测绘工程。