

复杂地质条件下地下工程围岩稳定性动态评估方法

罗冉¹ 张博¹ 任荣¹ 徐睿泽¹ 刘夕奇²

1. 中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 610299

2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广东 广州 510611

摘要: 针对断层、岩溶、高地应力等复杂地质下, 地下工程围岩稳定性静态评估难适配参数动态变化的问题, 刘夕奇结合岩石力学理论与实时监测技术, 构建多维度动态评估体系。通过优化监测采集、融合多源数据、建地质适配模型, 实现围岩状态实时研判, 为支护调整、风险预警提供依据, 提升工程安全与效率, 可为同类工程提供技术支撑。

关键词: 复杂地质; 地下工程; 围岩稳定性; 动态评估; 多源数据融合

引言

我国地下工程向深部复杂区域推进, 地铁隧道、水利隧洞常遇断层破碎带、岩溶发育区等地质难题, 围岩稳定性决定施工安全与寿命。传统静态评估依赖勘察数据, 无法反映施工中应力重分布、参数劣化等变化, 易引发事故。为此, 刘夕奇开展研究, 旨在建立精准动态评估方法, 为工程决策提供支撑。

1 围岩稳定性动态评估理论基础

围岩稳定性动态评估以岩石力学理论为核心, 结合实时监测技术, 形成“力学分析-数据采集-状态研判”框架。岩石力学层面, 摩尔-库仑强度理论通过黏聚力、内摩擦角分析围岩抗剪能力, 适配完整岩体弱扰动场景; 霍克-布朗准则针对节理岩体, 精准描述断层破碎带、岩溶区等非均质围岩受力规律, 为判断破坏临界状态提供依据。地下工程开挖打破原岩应力平衡, 应力向开挖轮廓线转移, 在拱顶、边墙形成集中区, 掌子面前方形成卸荷区, 需动态监测捕捉应力变化。监测技术上, 全站仪测地表及洞口位移, 测斜仪探围岩深部位移, 光纤传感器实时感知应力, 渗压计捕捉岩溶、富水地层突水风险, 多技术协同为动态评估提供多维度数据支撑。

2 复杂地质条件下围岩稳定性评估现状与问题

2.1 监测参数采集时效性不足

当前多数地下工程仍采用“人工定期采集”模式, 数据采集周期较长, 难以匹配复杂地质下围岩参数的快速变化。某断层破碎带隧道施工中, 掌子面开挖后短时间内围岩变形速率骤增, 人工次日采集数据时, 围岩已出现局部掉块, 错失支护调整最佳时机。同时, 传统监测设备存在“数据传输瓶颈”, 有线传感器在掌子面扰动区易受损, 无线设备受地下封闭环境影响, 信号衰减导致无法实时上传数据。此外, 监测参数筛选缺乏针

对性。某岩溶发育区水利隧洞施工中, 仅监测拱顶位移, 未采集渗压数据, 当地下水压力骤增时, 虽位移未超限, 但溶洞顶板因水压力作用发生坍塌, 造成工期延误。此类案例表明, 参数采集的时效性与针对性缺失, 已成为制约评估准确性的关键因素^[1]。

2.2 评估模型对复杂地质适应性差

现有评估模型多基于均质岩体构建, 未充分考虑复杂地质特殊性。应用广泛的RMR围岩分类法, 在断层破碎带中暴露明显缺陷: 该模型中岩石单轴抗压强度权重占比较高, 但断层区围岩以松散岩块为主, 节理发育密集, 此时节理状态对稳定性的影响远大于岩石强度, 固定权重导致评估结果偏高, 将“不稳定”围岩误判为“基本稳定”, 某隧道据此采用常规锚杆支护, 最终引发拱顶坍塌。数值模拟模型同样存在局限, 建模时多假设围岩为连续介质, 而岩溶发育区溶洞、溶隙使围岩呈现“非连续、非均质”特性, 计算出的围岩变形量与实际偏差较大; 高地应力区评估模型更为匮乏, 现有模型多忽略岩爆风险, 某矿山井巷施工中, 监测位移未超限, 但应力已接近岩石强度极限, 最终发生岩爆, 造成设备损坏。

2.3 多源监测数据融合程度低

复杂地质下围岩稳定性受多因素耦合影响, 但当前评估多“单一数据独立分析”, 未建立关联机制。某岩溶隧道仅依据位移数据判定围岩稳定, 忽视渗压骤增的变化, 几天后溶洞顶板因水压力坍塌, 证明单一数据评估的片面性。同时, 多源数据存在“格式不统一、精度不一致”问题, 位移、应力、渗压等数据单位不同, 直接融合易产生量纲干扰; 不同监测设备精度差异显著, 若采用“等权重融合”, 易放大低精度数据的误差, 导致评估结果偏差。此外, 数据预处理环节缺失, 某隧道

因环境干扰出现异常渗压数据,未剔除该“噪声数据”导致模型误判为“失稳”,停工核查造成经济损失。数据融合的技术短板,严重制约评估结果的可靠性。

3 复杂地质条件下地下工程围岩稳定性动态评估方法构建

3.1 优化复杂地质下监测参数采集体系

针对复杂地质特性,建立“地质类型-监测参数-设备选型-频率”四维匹配机制。①在断层破碎带中,重点监测三大核心参数:围岩位移速率采用高精度测斜仪,监测频率缩短至每30分钟一次,可精准捕捉深部滑移趋势;节理开合度选用高灵敏度节理仪,实时反映岩体完整性变化;应力集中系数监测采用光纤应力传感器,合理布设间距,快速识别应力突变风险。某断层隧道应用该体系后,参数采集滞后时间大幅缩短,成功提前预警围岩失稳,为支护调整争取充足时间。②岩溶发育区需强化水动力参数监测:在溶洞周边合理范围布设渗压计,监测频率每15分钟一次,实时追踪地下水压力变化;搭配地下水流量仪,同步采集涌水量数据,形成“渗压-流量”双参数预警。某岩溶隧洞通过该设置,在渗压与流量达预警值时,提前预警突水风险,及时采取注浆封堵措施,避免事故发生。③高地应力区重点部署声波监测与应力监测:采用声波测试仪,定期采集波速数据,当波速明显下降时触发预警,及时发现岩体完整性劣化;应力监测选用无线应力传感器,实现数据实时传输,当应力接近岩石强度极限时,自动推送警报至管理人员终端。④设备选型上,位移监测采用适应地下环境的自动化系统,应力监测用无线路由干扰的分布式光纤,渗压监测用长续航无线设备。某高地应力矿山井巷应用该体系后,监测数据有效率显著提升,为后续评估提供高质量数据基础^[2]。

3.2 多源监测数据融合处理技术

构建“数据预处理-特征提取-多维度融合-精度验证”四级处理体系,解决多源数据融合难题。①在数据预处理阶段,采用“异常值识别-数据标准化”双流程:通过合理准则结合施工日志,剔除设备故障、环境干扰导致的异常数据,减少噪声对评估的影响;采用标准化方法,将不同单位的数据统一转换至相同区间,消除量纲干扰,提升数据一致性。②特征提取阶段,针对不同数据特性构建特征参数库:位移数据重点提取日变形速率、累积变形量、变形加速度,某断层隧道通过追踪变形加速度变化,提前识别围岩失稳趋势;应力数据提取应力峰值、应力变化速率、应力集中系数,高地应力区当应力集中系数超标时立即触发预警;渗压数据提取渗

压峰值、渗压变化幅度、渗压-时间曲线斜率,岩溶区斜率超标时提示突水风险,为风险预判提供清晰依据。③多维度融合采用“加权融合+机器学习融合”组合方法:基于层次分析法确定各数据权重,根据不同地质类型调整权重分配,如岩溶区提升渗压数据权重,高地应力区提升应力与声波数据权重;再将标准化数据输入机器学习算法,输出0-100分稳定性评分(80分以上稳定、60-80分基本稳定、40-60分预警、40分以下失稳)。某工程融合后评估准确率大幅提升,有效保障评估可靠性。精度验证环节,采用“现场实测值-融合计算值”对比分析,误差在合理范围内判定合格,超差则回溯调整权重与算法参数,确保融合结果与实际工况高度契合。

3.3 基于复杂地质特性的动态评估模型构建

采用“分层建模+参数动态更新”思路,针对三种典型复杂地质建立专项子模型,提升评估适应性。①断层破碎带子模型以“节理发育程度、围岩完整性系数、位移速率、应力集中系数”为核心输入参数:通过现场地质编录确定节理组数与间距,划分优劣等级;采用声波测试获取围岩完整性系数;结合监测数据中的位移速率、应力集中系数,综合判定稳定性等级。某断层隧道应用该模型,评估某断面为预警状态,现场采用加强支护后,位移速率显著下降,评分升至基本稳定,与实际状态完全吻合。②岩溶发育区子模型重点纳入“溶洞规模、地下水渗压、渗流量、位移量”参数:通过地质雷达探测溶洞面积与埋深,划分等级;采用模糊综合评价法,构建评价矩阵与权重向量,计算稳定性隶属度,量化溶洞与地下水对围岩稳定性的影响。某岩溶隧洞溶洞规模与渗压达预警值,模型计算隶属度为“失稳”,现场注浆加固后,渗压降至安全范围,隶属度转为“稳定”,预警准确率高。③高地应力区子模型引入“最大主应力、岩石单轴抗压强度、声波波速、应力变化速率”,建立岩爆预警子模块:当应力与岩石强度比值及应力变化速率超标时,判定为岩爆预警;结合声波波速(波速过低提示岩体破碎),综合输出稳定性评分。某矿山井巷监测到应力与变化速率超标,模型预警岩爆风险,采用超前应力释放措施后,应力降至安全范围,未发生岩爆事故。模型定期自动更新参数计算评分,实现与围岩状态的同步动态匹配。

3.4 动态评估与工程决策联动机制

建立“评估等级-支护方案-施工参数-动态反馈”闭环联动体系,让评估直接指导工程实践。①制定《稳定性等级-支护措施对应手册》,明确量化标准:稳定状态采用常规支护,锚杆与喷射混凝土按常规参数施工;基

本稳定状态实施强化支护,适当增加锚杆长度与喷射混凝土厚度;预警状态采取加强支护,搭配钢支撑与注浆措施;失稳状态启动抢险支护,立即停工,采用管棚、高强度注浆及密集临时钢支撑。某断层隧道评估为预警状态,按手册采用加强支护后,短时间内位移速率降至安全范围,支护效果显著。②在施工参数调整方面,建立“评估结果-开挖参数”联动规则:断层破碎带预警时,缩小开挖进尺与降低开挖速度,减少对围岩的扰动;岩溶区预警时,先对溶洞进行注浆填充,再采用合理开挖方法;高地应力岩爆预警时,采用微震爆破,配合超前应力释放措施,降低岩爆风险。某高地应力隧道应用该规则后,开挖扰动区范围缩小,岩爆发生率降至零,保障施工顺利推进。③构建“动态反馈”机制,支护调整后加密监测频率,定期重新评估:若评分提升至安全范围,逐步恢复常规施工;若评分无提升或下降,立即启动方案优化。某岩溶隧道注浆后评估仍为预警,分析发现注浆量不足,补充注浆后评分升至基本稳定。同时,开发可视化评估报告系统,自动生成应力云图、位移-时间曲线,直观展示围岩状态,现场施工人员可快速把握风险点,决策效率提升^[3]。

3.5 动态评估模型的验证与优化

为确保动态评估模型的可靠性,需结合实际工程案例进行验证,并建立长期优化机制。①选取断层破碎带隧道、岩溶发育区水利隧洞、高地应力矿山井巷三个不同复杂地质条件的地下工程案例开展验证,通过“现场监测数据-模型评估结果-实际稳定性状态”的对比分析,检验模型准确性。②在断层破碎带隧道案例中,模型评估某断面为预警状态,现场监测显示位移速率超标,采用加强支护后,位移速率降至安全范围,模型重新评估为基本稳定,与实际状态一致,验证模型在断层破碎带中的有效性;在岩溶发育区水利隧洞案例中,模型识别

出某区域渗压与流量异常,评估为失稳风险,现场核查发现溶洞顶板出现裂缝,及时注浆加固后,围岩状态恢复稳定,证明模型对岩溶区突水风险的识别能力;在高地应力矿山井巷案例中,模型监测到应力与波速异常,预警岩爆风险,采用应力释放措施后,未发生岩爆事故,验证模型对岩爆风险的预警效果。③基于验证结果,建立模型优化机制:每完成一个工程案例的评估,收集模型偏差原因,如权重分配不合理、特征参数缺失等,针对性调整模型参数;定期汇总不同地质条件下的工程数据,更新模型数据库,提升模型对复杂地质的适配性;结合行业技术发展,引入更先进的监测技术与算法,持续优化模型性能,确保动态评估方法始终贴合工程实践需求,为复杂地质条件下地下工程围岩稳定性管控提供可靠技术支撑。

结语

本研究构建的动态评估方法,突破传统静态评估局限,通过理论与技术结合,实现围岩状态实时精准研判,能应对复杂地质挑战,为支护调整提供依据。后续需结合白鹤滩水电站等工程实践优化模型,提升对极端地质的适应性,成果可为更多复杂地下工程提供参考,助力行业发展。

参考文献

- [1]刘阳阳,苏永华,罗彪,杨忠武,陈斌.基于极限状态的隧道围岩稳定性分析原理与方法[J].铁道科学与工程学报,2024,21(10):4175-4186.
- [2]闫喜生,代峰,郑波,郭军伟.复杂地质条件下采矿巷道稳定性分析与优化[J].石油石化物资采购,2025(7):163-165.
- [3]童政,俞钟杰,邱钦焱,张胡琦,谭尧升,荣冠.白鹤滩水电站蓄水过程对左岸地下厂房围岩稳定性影响评价[J].中国农村水利水电,2025(4):210-218.