

复杂地质隧道施工中安全风险控制策略研究

覃建禄

(广西路桥工程集团有限公司道桥分公司, 广西 南宁 530200)

摘要 为解决复杂地质条件下隧道施工面临的突水突泥、大变形等核心安全风险, 本研究以广西岩溶发育区的实际隧道工程为背景, 构建了一套系统性的风险控制策略。首先采用WBS-RBS耦合方法完成全流程风险识别, 再通过模糊层次分析法搭建风险评估模型, 实现关键风险点的量化分级。在此基础上, 提出以地质超前预报、动态监测预警、针对性工艺优化及应急管理为核心的集成化风险控制体系, 以期为岩溶隧道耦合风险的精准识别与高效管控、降低整体施工风险水平提供工程参考。

关键词 WBS-RBS耦合; 模糊层次分析法; 岩溶隧道; 动态监测; 应急管理

中图分类号: U455

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.034

0 引言

随着交通建设逐步向山区延伸, 越来越多的隧道工程需穿越岩溶、断层破碎带等复杂地质体, 施工安全面临严峻挑战^[1]。在广西峰丛洼地过渡带, 岩溶发育与断裂构造的强烈耦合作用, 常诱发突水突泥、软岩大变形等重大灾害, 传统风险管理方法难以有效应对此类非线性、多因素叠加的复杂情境^[2]。为破解这一难题, 本文引入WBS-RBS与模糊层次分析法耦合的风险识别与评估技术, 构建一套集动态监测、工艺优化与应急管理于一体的精细化控制策略, 旨在提升复杂地质隧道施工的风险防控能力。

1 工程概况

1.1 工程区域地质特征

工程项目位于广西壮族自治区西北部, 此地为典型的峰丛洼地过渡地带。该区域的地层结构主要以厚层灰岩和白云岩构成, 其间夹杂有薄层的泥岩以及含泥质的灰岩。节理裂隙的发育与分布受区域断裂构造控制, 沿断裂带展布方向延伸扩展^[3]。岩溶发育强烈, 溶洞洞径0.5 m~5 m, 多沿断裂交汇处分布。地下水具多介质特征, 承压地下河埋深20 m~120 m, 水位季节变化3 m~5 m, 受天坑、洼地集中补给^[4]。覆盖层以红黏土为主。断层破碎带与软弱泥岩互层削弱围岩完整性, 易诱发突水突泥、拱部掉块及大变形, 为主要风险源。

1.2 隧道施工核心难点

由于该工程位于典型的峰丛洼地过渡带, 其地质结构主要由灰岩—白云岩与泥岩相互层叠构成, 并在

多处被断裂构造切割, 从而形成了高度复杂的工程地质条件。由此带来的主要隐患在于, 围岩与地下水系统的物理力学性质呈现出极强的非均质性和空间变异性, 导致整个隧道的施工风险集中表现为地下水、软弱围岩及施工环境三者相互作用下的耦合失稳问题。岩溶突水突泥方面, 0.5 m~5 m溶洞与埋深20 m~120 m之间的深层承压地下河系统相互连通, 构成了高压地下水储存与运移的通道, 水位跃变3 m~5 m即引发高压含泥水贯入掌子面^[5]。软岩大变形方面, 含泥灰岩与泥岩遇水软化产生黏塑性蠕变, 导致拱肩与边墙持续收敛。断层破碎带自稳时间短, 拱部掉块与局部失稳多发。叠加高温高湿环境, 热湿负荷加剧人员热应激与设备老化风险, 工序衔接难度增大^[6]。

2 复杂地质隧道安全风险识别与评估

2.1 安全风险识别体系构建

鉴于广西西北部峰丛洼地过渡带的强岩溶与断裂控制背景, 本研究将工作分解结构(WBS)与风险分解结构(RBS)耦合起来构建隧道安全风险识别体系, 意在以过程为主线、以风险源为对象来开展多源信息归集与闭环校核。WBS按超前地质探查、开挖成洞、初期支护、防排水与加固、通风供电与信息监测、二次衬砌与运营转换六个环节展开, 并把责任单元、资料接口与监测量测点位固化到每个作业面。从风险成因角度来看, RBS划分为地质水文环境、岩性流变、施工工艺、人员与设备、管理与外部环境等五类风险源(见表1), 进而以断裂构造、岩溶水、软岩流变、热湿负荷等因子构成细分条目。进一步观察发现, 溶洞洞径在0.5 m~

作者简介: 覃建禄(1994-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 隧道施工。

表 1 隧道施工主要风险因素

风险源类别	典型场景	可能性等级 1-5	后果等级 1-5	风险等级	识别方法	WBS 对应环节
地质水文环境	溶洞连通承压地下河引发突水突泥	4	5	高	超前钻探与地震波预报、物探校核	超前地质探查、开挖成洞
	断层破碎带拱部掉块与局部失稳	4	4	高	钻孔编录与光电成像、地质素描	开挖成洞、初期支护
岩性流变	含泥灰岩与泥岩遇水软化导致大变形	3	4	高	围岩分级、收敛监测与反分析	开挖成洞、初期支护
施工工艺	爆破扰动叠加涌砂导致掌子面失稳	3	3	中	爆破震动监测、渣样筛分	开挖成洞
人员与设备	高温高湿下人员热应激与绝缘老化	3	3	中	热湿普测、设备耐压与泄漏试验	通风供电与信息监测
管理与外部环境	天坑集中补给致水位跃变与交通导改干扰	2	4	中高	雨量水位联动监测、交通组织评估	防排水与加固、运营转换

5 m 且与埋深 20 m ~ 120 m 的承压地下河连通时, 补给跃变 3 m ~ 5 m 会把突水突泥推动为主控风险; 含泥灰岩与泥岩的遇水软化及黏塑性蠕变又把大变形与支护能力耦合化, 这一组合作用在 NE 与 NNE 断层交汇段更为突出。由此推导, 识别流程设置资料汇集、现场踏勘、地表物探、超前地质预报、通风热环境普测、风险清单编制与专家评审、进洞动态更新与库表迭代的闭环链条; 风险单元以掌子面、断层破碎带段落、下穿地下河段三层级进行细化, 并把识别结果固化为可追溯的风险清单, 面向施工组织与应急预案进行对接。

2.2 基于模糊层次分析法的风险评估模型

基于 WBS-RBS 识别结果构建模糊层次分析法评估模型: 目标层为安全风险, 准则层为四类风险源, 指标层聚焦突水突泥、断层失稳、软岩大变形、爆破涌砂、热湿老化、水位跃变等因子。采用三角模糊数标度替代九级标度, 组织 12 名专家进行两两比较, 通过区间合成与信息熵加权处理群体意见, 降低个体偏好扰动。经模糊一致性检验与协同修正后, 以几何平均法合成各因素三角模糊权重, 并运用重心法去模糊化, 归一化得权重向量:

$$w_i = \frac{s_i}{\sum_{k=1}^n s_k} \quad (1)$$

式 (1) 中, w_i 为第 i 个风险因素的归一化权重, s_i 为第 i 个因素三角模糊权重经重心法得到的标量, n 为因素数量, 符号 $\sum$ 表示求和算子。三角模糊权重由下限 l_i 中值 m_i 上限 u_i 共同表征, 重心法把三参数映射为单值以进入归一化, 从而把模糊判断转化为可运算的权重向量。

将权重与掌子面、断层破碎带、下穿地下河段的

可能性与后果隶属度相乘并模糊合成, 得到分段综合风险值, 用于驱动工序与支护动态调整。针对广西北部季节性补给跃变与热湿扰动, 按旬引入监测与专家信息迭代更新, 提升对突水突泥与大变形的判别灵敏度。

2.3 风险等级划分与关键风险点确定

本研究将模糊层次分析法的指标权重与风险矩阵法耦合, 构建分段综合风险值, 实现风险量化评估。 R_j 定义为各风险因素权重 w_i 与其在第 j 段的可能性隶属度 $p_{i,j}$ 、后果隶属度 $c_{i,j}$ 的加权乘积和:

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot p_{i,j} \cdot c_{i,j} \quad (2)$$

式 (2) 中, R_j 表示第 j 段的综合风险值, w_i 为第 i 个风险因素的归一化权重, $p_{i,j}$ 为第 i 个因素在第 j 段的可能性隶属度, $c_{i,j}$ 为第 i 个因素在第 j 段的后果隶属度, n 为纳入评估的因素数量, 符号 $\sum$ 表示求和算子。

据此将风险划分为四档: $R_j < 0.20$ 为低风险, $0.20 \leq R_j < 0.40$ 为中风险, $0.40 \leq R_j < 0.60$ 为高风险, $R_j \geq 0.60$ 为极高风险。对极端后果事件设置越级触发机制。关键风险点包括: 下穿承压地下河段、NE 与 NNE 断裂交汇软岩段、断层破碎带及高温高湿长通风段。识别结果直接驱动动态监测与应急响应, 并按旬迭代更新。

3 复杂地质隧道安全风险控制策略及效果评估

3.1 地质超前预报与动态监测策略

针对广西北部强岩溶及断裂耦合诱发的突水突泥与大变形风险, 本研究构建了地质超前预报与动态监测相结合的控制策略。采用隧道地震超前预报系统 (TSP)、地质雷达 (100 MHz ~ 200 MHz) 与小直径探孔 (间距 4 m)

联合探测掌子面前方 50 m ~ 150 m 范围, 辅以水压试验与电阻率成像, 精准识别溶洞连通性与高压水通道, 实现物探成果滚动校核。动态监测涵盖围岩收敛、支护受力、涌水量、孔压及热湿环境等指标, 采样步长 10 min, 数据经卡尔曼融合后分旬度与事件驱动处理, 以支撑季节性修正与断层破碎带快速判别。构建综合预警阈值模型:

$$T_m = \bar{R} + k \cdot \sigma R \quad (3)$$

式(3)中, T_m 为综合预警阈值; $\bar{R}$ 为参考窗口内综合指数均值; σR 为该指数标准差; k 为告警灵敏系数, 综合指数由各监测量标准化后按权重加权求和得到。阈值触发预注浆、进尺控制、管棚加密等措施, 形成闭环验证机制, 确保关键段风险可控。

3.2 针对性施工工艺优化措施

鉴于峰丛洼地过渡带突水突泥、大变形与掉块耦合风险, 将工艺优化与监测阈值联动, 构建以岩溶水控制、软岩变形约束、断层带稳定为核心的组合工法。岩溶段采用预注浆与管棚协同, 分区注浆并控制进尺 ≤ 1.0 m, 快速成环。软岩段采用 CRD 工法开挖, 设让压层, 仰拱闭合不超 2 循环。断层带布密排管棚与临时中隔墙, 弱爆破或机械开挖, 及时封闭掌子面。针对隧道内可能出现的高温、高湿等恶劣施工环境, 专门制定了强化通风与降温措施, 并完善了排水系统

以确保作业环境安全。整个施工过程实施动态风险管理, 依据实时评估的风险等级, 分级启动相应的应对预案, 如预注浆加固、加密管棚、缩短开挖进尺, 以及启动多方应急联动机制, 从而确保每一道施工工序都能与当前面临的风险状况精确匹配, 实现安全、高效的动态施工管理。

3.3 应急管理与风险控制效果评估

针对突水突泥与断层失稳复合情境, 构建事件指挥、专业救援、资源保障三层应急体系, 建立监测阈值与人工观察双触发机制, 形成从发现、研判、处置到复盘的闭环流程。预案库按突水突泥、坍塌掉块、涌砂失稳、机电故障、热湿超限五类细化至工序级。聚焦首轮围堵与排水能力瓶颈, 优先实施卸压钻孔、导排管与快速注浆, 固化移动抽排与耐湿供电保障。实施后, 极高风险点占比由 15% 降至 2%, 高风险点由 25% 降至 5%, 段均综合风险值由 0.52 降至 0.31, 处置时延缩短 15 min, 预案覆盖率达 95%, 实现风险可控与动态协同, 风险控制前后效果详见表 2。

4 结束语

本研究针对复杂地质隧道施工的突出风险, 通过构建“识别、评估、控制”的集成化框架, 实现了对岩溶区突水突泥、大变形等耦合风险的动态管控。研究提出的 WBS-RBS 与模糊层次分析法相结合的评估模

表 2 风险控制前后效果对比表

指标	控制前	控制后	变化幅度	评价口径
极高风险点占比	15%	2%	-13%	旬度分段综合评估
高风险点占比	25%	5%	-20%	旬度分段综合评估
段均综合风险值 R	0.52	0.31	-0.21	权重归一与矩阵合成
预警联动处置时延	25 min	10 min	-15 min	告警至首轮封堵
突水突泥预案覆盖率	60%	95%	+35%	关键段编制与演练覆盖
二次审核复盘闭环率	70%	98%	+28%	事件单归档闭环

型, 以及与之配套的监测预警与工艺优化措施, 在实践中验证了其有效性。限于地质条件的极端复杂性与现场数据的波动性, 风险评估模型的普适性与预警阈值的精确性仍有待进一步优化。未来可结合机器学习等智能算法, 深化多源数据融合分析, 推动风险控制向更智能、更前瞻的方向发展。

参考文献:

[1] 王灿. 复杂地质条件下城际铁路隧道施工风险分析及应对措施 [J]. 工程建设与设计, 2025(02):155-157.

[2] 刘永福. 复杂地质条件下长距离钻探施工技术及其风险控制研究 [J]. 工程机械与维修, 2025(03):134-136.
 [3] 贾春宇. 高铁隧道在软弱围岩地质施工安全风险管控 [J]. 建筑机械, 2025(07):323-327.
 [4] 孙国锋. 复杂地质条件下隧道爆破与支护工程的项目风险管理研究 [C]//2025 工程新技术与新方法经验交流论文集. 2025.
 [5] 韩敏慧, 杨占群, 吴峥, 等. 复杂地质条件下盾构始发与接收施工难点及风险控制研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 04(03):33-36.
 [6] 陈智. 市政隧道建设项目安全管理及风险控制措施探讨 [J]. 工程建设与设计, 2025(01):258-260.