

公路隧道施工安全风险评估与应对策略研究

李子石 杨 菊

红河红发城市运营有限公司 云南 红河 661199

摘 要：随着公路交通网络的不断拓展，隧道建设规模日益扩大，施工安全问题愈发凸显。公路隧道施工环境复杂，涉及地质条件、施工技术、人员管理等多方面因素。一旦发生事故，不仅会造成巨大的经济损失，还会危及施工人员的生命安全，影响工程进度和社会稳定。本文旨在系统研究公路隧道施工安全风险的评估方法与应对措施，为隧道施工安全管理提供理论支持和实践指导。

关键词：公路隧道施工；安全风险；风险评估；风险应对；安全管理

引言

公路隧道作为连接山区、跨越障碍的关键工程，其建设规模和复杂性不断攀升。近年来，国内外隧道施工事故频发，不仅造成了巨大的经济损失，更对施工人员的生命安全构成了严重威胁。

1 公路隧道施工安全风险评估

1.1 风险评估体系构建

公路隧道施工安全风险评估体系是进行有效风险评估的基础框架，它整合了多种评估方法和指标，旨在全面、准确地识别和分析潜在风险。构建该体系时，需综合考虑工程特点、地质条件、施工工艺等多方面因素^[1]。在宜宾至昭通高速公路项目中，充分结合了当地的地形地貌、地质构造以及所采用的隧道施工技术，确定了一系列关键评估指标。这些指标涵盖地质条件、施工设备、施工管理等多个维度，例如岩石的稳定性、地下水的分布情况、施工机械的可靠性以及安全管理制度的完善程度等^[2]。同时，采用科学的评估方法对这些指标进行量化分析，如层次分析法、模糊综合评价法等。层次分析法通过建立层次结构模型，将复杂的风险问题分解为多个层次，对各层次元素进行两两比较，确定其相对重要性权重，从而为风险评估提供量化依据。

1.2 风险识别与分析

风险识别是风险评估的首要步骤，旨在找出公路隧道施工过程中潜在的各类风险因素。在宜宾至昭通高速公路隧道施工中，通过对工程资料的详细研究、现场勘查以及专家经验判断等方式，识别出了众多风险因素。从地质方面来看，该区域可能存在断层、破碎带等不良

地质构造，这会增加隧道坍塌的风险；地下水丰富，可能引发涌水、突泥等灾害，不仅影响施工进度，还对施工人员和设备安全构成严重威胁^[3]。在施工技术方面，若爆破参数设计不合理，可能导致爆破效果不佳，甚至引发安全事故；隧道支护不及时或支护强度不足，无法有效支撑围岩，容易引发坍塌。施工通风不畅会导致有害气体积聚，危害施工人员的身体健康。

2 公路隧道施工安全风险影响因素

2.1 地质与环境因素

地质与环境因素是制约隧道施工安全最根本、也是最难以掌控的外部条件。宜宾至昭通高速公路隧道穿越滇东北乌蒙山区，地形起伏剧烈，沟壑纵横，最大埋深超过800米，工程地质条件极其复杂。场区位于多个地质构造单元交汇部位，地层岩性变化频繁，主要包括灰岩、砂岩、泥岩及煤系地层。其中，强度差异大、遇水易软化的泥岩段，开挖后围岩应力释放快，变形大，自稳时间极短，易发生洞壁收敛甚至大变形；广泛分布的石灰岩地层中岩溶发育程度不均，隐伏溶洞、溶槽充填物性质不明，开挖揭露时易引发塌方或突水突泥。地质构造方面，隧道轴线需穿越F5、F6等多条区域性大断层，断层带内物质胶结差、极为破碎，且常为地下水的良好通道，不仅围岩稳定性极差，还汇集了大量地下水，水头压力高，是施工中重大安全事故的高发区。水文地质条件同样严峻，大气降水通过裂隙、溶隙迅速补给地下水，动态变化显著，施工扰动极易改变原有水文平衡，引发大规模涌水。此外，隧道进口段位于一大型古滑坡体前缘，开挖切坡可能破坏其暂时平衡状态，在暴雨等诱发因素下存在整体复滑的风险，严重威胁洞口施工安全^[4]。

2.2 施工技术与工艺因素

施工技术与工艺的先进性、适用性及操作的规范性

作者简介：李子石（1992.4-）男，汉族，云南昆明，本科，职称：工程师，研究方向：公路工程方向。

杨菊（1988.10-）女，汉族，云南红河，本科，职称：无，研究方向：公路工程方向。

是直接影响隧道施工安全的核心内在因素。在宜宾至昭通高速公路隧道项目中,采用的钻爆法开挖工艺环节多、技术要求高。爆破技术的关键在于精确的设计与严格的执行:炮孔布置、钻孔深度、角度、装药结构、单段药量及起爆时序等参数必须根据现场岩性进行动态优化调整。若参数设计不当或施工偏差,极易造成开挖断面不平整、超挖导致围岩扰动加剧,或欠挖需二次处理增加风险,更严重的是可能引发爆破震动超标、飞石过远,甚至拒爆、盲炮处理不当等直接安全事故。支护作业的及时性与质量是控制围岩变形、防止坍塌的关键。初期支护必须紧跟开挖面,喷射混凝土的强度、厚度及均匀性,锚杆的打设角度、深度及预应力施加,钢拱架的间距、垂直度及连接质量,任何一环的缺失或质量缺陷都会显著降低支护体系的整体承载能力,在软弱围岩地段可能引发灾难性后果。此外,施工辅助工序同样至关重要:通风系统需经过严谨计算设计,保证足够的新鲜风量送达掌子面,防止有害气体聚集;排水系统需具备足够的排水能力,保持洞内作业环境干燥;出渣运输环节中,车辆调度、信号管理、照明条件等若存在缺陷,易发生机械伤害或交通事故。因此,施工技术的每一个细节都直接链接着整体的安全绩效。

2.3 人员与管理因素

在所有影响因素中,人员与管理因素是能动的、处于核心地位的因素,它直接决定了其他要素效能发挥的程度。施工人员作为各项作业的直接执行者,其安全意识和技能水平是防范事故的第一道防线。在隧道施工这一高风险环境中,部分作业人员可能来自农村,缺乏系统性的安全培训和专业技能考核,对隧道内存在的各类危险源认知不足,对安全操作规程理解不深、执行不力,容易出现冒险作业、违章指挥甚至违反劳动纪律的行为,这些不安全行为是众多事故的直接诱因。管理层的安全理念与管理能力则决定了整个项目的安全氛围和管控效果。如果项目经理部未能真正树立“安全第一、预防为主”的理念,存在重进度、轻安全的倾向,就会导致安全投入不足、安全管理制度流于形式、安全教育培训缺乏针对性实效性。此外,安全管理责任若未能有效分解落实到每一个班组、每一个岗位,缺乏清晰的可追溯的责任体系和完善的奖惩激励机制,就无法形成全员、全过程、全方位的安全管理合力。

2.4 设备与材料因素

施工机械设备与工程材料的性能状态是保障隧道施工安全的重要物质基础。现代化隧道施工高度依赖大型专用设备,如凿岩台车、湿喷机械手、液压仰拱栈桥、

锚杆钻机、通风机等。这些设备的自身可靠性至关重要:若设备老化严重、故障频发,或关键部件存在缺陷,不仅会直接影响施工效率和质量,更可能引发机械伤害、电气事故甚至导致支护作业延迟,间接引发围岩失稳。例如,湿喷机械手故障会导致喷射混凝土作业中断,无法及时封闭岩面;通风机意外停机可能迅速导致洞内有害气体聚集。同样,施工材料的质量直接关系到工程实体结构的安全。支护材料如水泥、砂石料的质量不合格会导致喷射混凝土强度达不到设计要求;锚杆杆体强度不足、锚固剂性能失效会严重影响锚杆的支护效果;防水板、土工布等材料存在缺陷则可能引发后期渗漏水。此外,爆破器材的采购、运输、储存、领用和退库管理必须严格遵守国家民用爆炸物品管理条例,任何管理疏漏都可能造成极其严重的后果。因此,建立严格的设备维护保养制度、材料进场检验制度以及危险品管理制度,是预防此类风险的基本保障。

3 公路隧道施工安全风险应对策略

3.1 风险预防策略

风险预防策略着眼于“防患于未然”,旨在从源头上消除或削弱风险因素,是成本最低、效果最持久的安全策略。对于宜宾至昭通高速公路隧道工程,首要的预防措施是强化地质勘察的精度与广度。在初步设计勘察基础上,施工阶段应积极采用TSP、地质雷达、超前水平钻探等综合超前地质预报技术,精准探明掘进前方至少100米范围内的地质情况,特别是断层、溶洞、富水区等不良地质体的位置、规模及性质,为动态调整施工方案和采取预加固措施提供决策依据,变“被动应对”为“主动预警”。必须坚持“方案先行”,根据预报结果和围岩变化,精心选择和优化施工工法与支护参数,如在极破碎带采用超前管棚、预注浆等方式预加固地层,严格控制循环进尺,实现“短进尺、弱爆破、强支护、快封闭”。核心在于“人”的预防,要建立系统化、常态化的安全教育培训体系,覆盖所有进场人员,培训内容不仅要包括安全规章制度、操作规程、危险源辨识,更应结合VR等新技术进行事故体验和应急演练,深刻提升一线人员的安全意识和避险自救能力。同时,严格执行特种作业人员持证上岗制度,并建立作业人员动态安全档案。

3.2 风险控制策略

风险控制策略侧重于施工过程中的实时监控与干预,是风险管理的核心环节,旨在将已识别的风险控制在可接受范围内。在宜宾至昭通高速公路隧道施工中,需建立全方位、立体化的风险控制网络。技术控制方面

严格推行“岩变我变”的动态设计施工理念,根据围岩监控量测数据及时反馈并调整支护参数,确保支护体系始终有效;对爆破作业实行“一炮一设计”和“第三方监督”制度,严格控制装药量和爆破震动速度;优化通风系统,采用压入式与巷道式混合通风,确保掌子面空气新鲜,并安装CO、CH₄等有害气体自动监测报警装置,实现实时监控。管理控制方面实施风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制,将识别出的重大风险源公示于施工现场,明确管控责任人和具体措施;坚持日常巡检、专项检查和领导带班制度,对发现的“三违”现象和安全隐患立即责令整改,并跟踪验证整改效果,实现闭环管理;加强对分包单位和劳务队伍的管理,将其纳入统一的安全生产管理体系,杜绝“以包代管”。设备材料控制方面严格执行机械设备日常检查、定期保养和强制性报废制度,确保设备处于良好状态;对所有进场建材和支护材料进行抽样检测,严防不合格产品用于工程实体。通过这一系列精细化的过程控制措施,牢牢掌握风险管理的主动权。

3.3 风险应急处置策略

再完善的预防和控制体系也无法绝对保证事故零发生,因此,建立高效、可靠的风险应急处置机制是减轻事故后果的最后一道坚固防线。针对宜宾至昭通高速公路隧道项目可能面临的坍塌、涌水、火灾、爆炸等重大风险,必须事先制定详尽、可操作性强的专项应急预案和现场处置方案。预案内容须明确应急指挥体系架构,清晰界定从现场带班人员到项目经理、乃至公司层级的总指挥在应急响应中的职责与权限;规定准确、快捷的事故信息报告流程与时限;细化不同事故类型的预警发布条件、响应分级标准、人员疏散路线、抢险救援程序、医疗救护方案以及舆情沟通机制。预案绝不能停留在纸面,必须通过定期组织实战化演练来检验其有效性,并基于演练评估结果持续修订完善。物资保障是应急响应的基础,应在洞内外关键位置配备充足的应急物资,如大功率抽水泵、应急照明、通风设备、急救药箱、担架、撬棍、切割机等,并建立物资台账,定期检查维护,确保随时可用。此外,必须与当地消防、医疗、公安及专业救援队伍建立紧密的应急联动机制,熟悉社会应急资源,确保一旦发生自身无法控制的险情,能够第一时间获得专业外部支援,形成救援合力,最大限度减少人员伤亡和财产损失^[5]。

3.4 信息化与智能化风险管控

随着数字技术的发展,构建基于信息化、智能化的风险管控平台已成为提升隧道安全管理水平的必然趋势。该平台以BIM技术为基础模型,集成物联网(IoT)、云计算、移动通信和人工智能(AI)等先进技术,实现对施工全过程风险的动态感知、智能预警与精准管控^[6]。具体而言,在隧道内外关键部位布设各类智能传感器,实时采集围岩应力变形(通过收敛计、应力传感器)、支护结构受力、地下水位与水压、有害气体浓度、通风风速、施工机械运行状态、人员定位等海量数据。数据通过无线网络传输至云端平台,利用大数据分析技术进行实时处理与深度挖掘,自动判断当前安全状态。平台可建立风险预警模型,一旦监测数据超越预设阈值,系统立即通过声光、短信、APP推送等多种方式向相关管理人员发出分级预警,指导现场迅速采取处置措施^[7]。同时,利用人员定位系统,可实时掌握洞内作业人员分布,在紧急情况下实现快速人员清点和高效疏散指挥。信息化平台的构建,实现了风险管控从传统被动式、经验型管理向现代化主动式、数据驱动型管理的深刻转变,极大提升了风险管理的效率和可靠性^[8]。

4 结语

通过对公路隧道施工安全风险评估与应对策略的系统研究,为隧道施工安全管理提供了理论支持和实践指导,有助于降低施工风险,保障工程顺利实施和人员安全,对推动公路隧道建设高质量发展具有重要意义。

参考文献

- [1]杰罗挺达.山区高速公路隧道施工安全管理及控制[J].汽车周刊,2024,(11):192-194.
- [2]杨盛皓.公路隧道施工安全风险评估及管理措施[J].四川建材,2024,50(05):197-199.
- [3]王志坚.公路隧道施工安全评价与控制[C].江西雄瑞建设工程有限公司,2023:2.
- [4]徐峰.太佳高速公路隧道风险评估与灾害防治研究[D].长安大学,2011.
- [5]邓祥辉,高书通.公路隧道洞口段施工风险评估与控制研究[J].铁道建筑,2014(7):4.
- [6]甘迎新.公路工程施工对环保的影响及环保措施研究[J].黑龙江交通科技,2020,43(11):163-164.
- [7]朱永皓.探究公路日常养护与生态环保[J].建材与装饰,2020,(07):273-274.
- [8]魏茸,张欣,雷延峰.环保理念下的高速公路施工优化研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(12):63-64.