

隧道施工安全与风险管理研究

樊云鹏

中国建筑一局(集团)有限公司 北京 100161

摘要: 隧道施工安全与风险管理是保障工程顺利推进的核心环节。其研究聚焦于地质条件复杂、施工环境多变带来的安全风险,涵盖地质灾害、设备故障、人员操作失误及管理漏洞等关键因素。通过构建地质预报、动态支护、智能监控等风险控制技术体系,结合全员安全责任制、标准化管理、应急响应机制等管理策略,可有效降低事故发生率,提升施工安全性,为隧道工程的高质量建设提供科学支撑。

关键词: 隧道; 施工安全; 风险管理

引言: 在基础设施建设蓬勃发展的当下,隧道工程作为交通、能源等领域的关键节点,其施工安全至关重要。隧道施工环境复杂,地质条件多变,存在塌方、涌水等诸多不可预见风险,一旦发生事故,后果不堪设想。加强安全与风险管理,不仅能有效预防和减少事故,保障人员生命与财产安全,还能提升工程效益与质量。因此,深入研究隧道施工安全与风险管理具有重要的现实意义。

1 隧道施工安全风险理论体系

1.1 隧道施工安全风险定义与特征

(1) 风险内涵: 隧道施工安全风险指隧道建设过程中,因自然、技术、管理等各类不确定因素导致人员伤亡、财产损失或工程延误的可能性与损失程度的组合。其中自然风险涵盖不良地质、极端天气等自然环境突变因素;技术风险涉及施工方案缺陷、工艺不成熟等技术层面隐患;管理风险包括安全制度缺失、人员管控不当等管理漏洞。(2) 风险动态性与复杂性分析: 动态性体现为风险随施工进度、地质条件变化而动态演化,如开挖阶段风险与支护阶段风险存在显著差异;复杂性源于多风险因素交织叠加,自然、技术、管理风险相互关联,形成复杂风险网络,增加风险管控难度^[1]。

1.2 风险识别与分类

(1) 风险识别方法: 常用方法包括专家调查法,依托行业专家经验判断潜在风险;故障树分析法,通过反向推导事故成因梳理风险点;BIM技术则借助三维建模可视化施工全过程,精准排查隐蔽性风险,提升识别效率与准确性。(2) 风险分类: 按风险来源可分为地质风险(如塌方、涌水)、施工工艺风险(如支护不及时、开挖偏差)、设备风险(如设备故障、操作不当)、环境风险(如周边构筑物影响、生态破坏)等类别,为精准管控提供分类依据。

1.3 风险评估理论模型

(1) 定量评估方法: 蒙特卡洛模拟通过随机抽样模拟风险变量分布,量化风险发生概率与损失;模糊综合评价针对风险因素的模糊性,采用模糊数学方法综合评判风险等级,提升评估科学性。(2) 定性评估方法: LEC法通过评估危险性、暴露频率、后果严重度判定风险等级;风险矩阵法以风险概率和影响程度为维度,划分风险等级,操作简便,适用于初步风险筛查。

2 隧道施工安全风险关键影响因素分析

2.1 地质条件因素

(1) 岩土体性质: 不同类型岩土体的强度、稳定性差异显著,软土、粉质黏土等软弱岩土体易发生坍塌、变形,硬岩虽强度高但易产生岩爆,均会威胁施工安全;(2) 断层破碎带: 断层破碎带内岩土体松散、胶结性差,且常伴随地下水渗透,施工穿越时极易引发突泥、突水等重大安全事故;(3) 地下水: 地下水的水位、水压及渗透系数直接影响施工安全,过高水位会增加支护荷载,渗透水流易导致岩土体失稳,引发坍塌或涌水。

2.2 施工技术因素

(1) 开挖方法: 盾构法、钻爆法等不同开挖方式适配不同地质条件,方法选择不当会加剧围岩扰动,如硬岩区盲目采用盾构法易导致设备损耗及围岩坍塌,软岩区钻爆法控制不当易引发塌方;(2) 支护技术: 支护结构的类型、参数及施工时机直接影响围岩稳定性,支护不及时、支护强度不足或支护结构与围岩适配性差,会导致围岩变形加剧,引发安全事故;(3) 爆破振动控制: 钻爆法施工中,爆破振动强度若超过围岩及周边构筑物耐受极限,会导致围岩裂隙扩展、周边建筑物开裂,诱发安全风险^[2]。

2.3 设备与材料因素

(1) 机械设备故障: 盾构机、钻机、装载机等核心

施工设备若存在老化、维护不当或质量缺陷,易在施工中出现机械故障,不仅导致施工中断,还可能引发设备倾覆、部件脱落等安全事故;(2)材料质量缺陷:钢筋、混凝土、锚杆、注浆材料等支护材料若未达标,会降低支护结构的承载能力和耐久性,如劣质混凝土强度不足、锚杆锚固力不够,无法有效抵御围岩压力,易造成支护结构失效,进而引发坍塌风险。

2.4 管理与人为因素

(1)安全管理制度:完善的安全管理制度是规范施工行为的前提,若制度缺失、责任划分不明确或执行不到位,会导致安全检查流于形式、隐患排查不彻底,违规操作现象频发,为安全事故埋下隐患;(2)人员培训:施工人员、管理人员若未接受系统的安全培训,缺乏风险辨识能力、规范操作技能和应急处置常识,易因误操作、风险预判不足引发安全事故;(3)应急响应能力:应急预案不完善、应急物资储备不足或应急演练流于形式,会导致突发安全事故发生时,无法快速有效开展处置工作,进而扩大事故损失^[1]。

2.5 环境与社会因素

(1)周边建筑物影响:隧道施工产生的地层沉降若超过允许范围,会导致周边老旧建筑物、桥梁、管线等设施开裂、倾斜甚至坍塌,引发安全事故和社会纠纷;(2)气候条件:暴雨、台风、高温、严寒等极端气候会干扰施工,暴雨易引发山体滑坡、泥石流,还可能导致地下水暴涨;高温易造成施工人员中暑,严寒则会影响混凝土强度发展、冻结路面引发设备打滑;(3)政策法规:安全生产、环境保护、文物保护等相关政策法规的要求,直接约束施工行为,若未严格遵守,可能导致施工中断、行政处罚,同时也会因违规施工加剧安全风险。

3 隧道施工安全风险评估模型构建

3.1 评估指标体系设计

(1)基于AHP(层次分析法)的指标权重确定:首先构建递阶层次结构,将隧道施工安全风险目标层分解为地质条件、施工技术、设备材料、管理人为、环境社会5个准则层,再细化为岩土体性质、开挖方法等具体指标层。通过邀请隧道工程、安全管理领域专家对各层级指标进行两两对比评分,构建判断矩阵,经一致性检验后计算各指标权重,确保权重分配符合工程实际与专家经验,突出核心风险因素的影响作用。(2)多维度指标筛选:从多维度出发筛选指标,确保评估全面性。安全维度聚焦可能引发人员伤亡、工程坍塌的核心指标;经济维度纳入风险事故可能导致的工期延误、造价增加等关联指标;环境维度涵盖施工对周边生态、地下水、空

气质量的影响指标。同时通过相关性分析剔除冗余指标,保留代表性强、数据易获取的关键指标,提升评估效率与准确性。

3.2 综合评估模型

(1)模糊综合评价模型应用:针对隧道施工风险指标难以精准量化的特点,引入模糊综合评价法。通过建立模糊评价矩阵,将专家对各指标风险等级的定性判断转化为定量数据,结合AHP确定的指标权重,进行模糊合成运算,得出综合风险评价结果。该方法可有效处理评估过程中的不确定性因素,提升评价结果的合理性与可靠性。(2)风险等级划分标准:依据模糊综合评价结果,结合行业规范与工程实践,制定四级风险等级划分标准。低风险等级指风险发生概率极低,后果轻微,无需特殊管控;中风险等级指风险可能发生,后果可控,需加强日常监测;高风险等级指风险发生概率较高,后果严重,需制定专项管控措施;极高风险等级指风险极易发生,后果灾难性,需暂停施工并优化方案,为风险管控提供明确依据。

3.3 模型验证与优化

(1)通过案例数据验证模型可靠性:收集多个不同地质条件、施工工艺的隧道工程实际案例数据,包括历史风险事故记录、施工监测数据、安全检查结果等,将案例数据输入构建的评估模型,对比模型输出的风险等级与工程实际风险状况。若两者吻合度较高,说明模型具备良好可靠性;若存在偏差,分析原因并调整指标体系或权重分配。(2)敏感性分析优化参数:选取权重较高的核心指标(如断层破碎带、支护技术、应急响应能力等)进行敏感性分析,通过改变指标参数值,观察模型输出结果的变化幅度。识别对评估结果影响显著的敏感参数,针对敏感参数进一步细化量化标准、优化权重系数,提升模型对关键风险因素的响应精度,增强模型在不同工程场景下的适应性。

4 隧道施工安全风险控制与应对策略

4.1 风险控制技术措施

(1)地质预报技术:构建“长中短”相结合的综合地质预报体系,长距离采用TSP隧道地震波探测技术,精准识别前方100-150米范围内的断层破碎带、富水区域等重大地质风险源;中短距离运用地质雷达,对掌子面前方30米内的岩土体性质、地下水分布进行精细化探测。通过多技术融合验证,提前预判地质条件变化,为施工方案调整提供科学依据,从源头规避突发地质灾害风险。(2)动态支护设计:基于实时地质预报结果实施动态支护优化,针对软弱围岩、断层破碎带等高危区域,优先

采用超前小导管注浆、管棚支护等超前支护措施,提前加固掌子面及周边岩土体,增强围岩稳定性;对富水区域实施帷幕注浆,阻断地下水渗透通道,降低涌水突泥风险。施工过程中根据围岩变形监测数据,动态调整支护参数(如锚杆长度、间距、喷射混凝土厚度),确保支护结构与围岩受力状态精准匹配,避免支护不足或过度支护导致的安全隐患与资源浪费^[4]。(3)智能化监控系统:搭建基于物联网的智能化监控平台,在围岩、支护结构、施工设备上布设位移传感器、应力传感器、振动传感器等设备,实时采集围岩变形、支护结构应力、爆破振动、设备运行参数等数据。通过5G技术实现数据高速传输,经后台系统数据分析与阈值预警,当监测数据超出安全范围时自动触发声光报警,提醒管理人员及时处置,实现风险的实时感知、智能预警与快速响应。

4.2 管理优化策略

(1)安全管理体系构建:引入PDCA循环管理模式,构建“计划-执行-检查-改进”的闭环安全管理体系。结合隧道施工特点制定标准化作业流程,明确各岗位安全职责、施工工序安全要求及风险排查标准,规范开挖、支护、爆破等关键工序的操作行为。定期开展安全检查与体系评审,及时发现管理漏洞与流程缺陷,持续优化管理措施,确保安全管理规范化、常态化。(2)人员安全培训与应急演练:建立分层分类的人员安全培训体系,对管理人员开展风险管控理论、管理体系应用培训,对一线施工人员开展安全操作技能、风险辨识方法培训,确保全员具备相应的安全素养。定期组织突泥突水、坍塌、火灾等典型事故的应急演练,模拟事故发生场景,提升施工人员的应急处置能力与协同配合能力,强化应急响应意识,确保突发事件时能够快速有序应对。(3)保险与经济风险转移机制:结合隧道工程风险等级,合理配置工程保险,如建筑工程一切险、安装工程一切险、第三者责任险及安全生产责任险等,通过保险机制转移部分经济损失风险。同时建立风险准备金制度,预留专项资金用于应对突发安全事故的处置与善后工作,降低事故对工程造价与工期的影响,保障工程建设的顺利推进^[5]。

4.3 应急预案与处置流程

(1)事故分级响应机制:依据事故造成的人员伤亡、财产损失、工程影响程度,将隧道施工安全事故划分为一般、较大、重大、特别重大四个等级,对应制定四级响应机制。明确各级事故的启动条件、响应主体、处置权限及响应流程,一般事故由项目部自行启动响应处置,较大及以上事故立即上报上级主管部门并请求支援,确保响应等级与事故严重程度精准匹配,提升处置效率。(2)救援资源配置与协同机制:提前梳理救援资源需求,配备充足的救援设备(如挖掘机、装载机、生命探测仪、通风设备)、急救物资(如急救药品、担架、呼吸机)及专业救援队伍(如矿山救护队、消防队伍、医疗队伍),建立救援资源台账并定期检查维护,确保应急状态下可快速调用。构建“项目部-施工企业-地方政府-专业救援机构”的协同救援机制,明确各主体的职责分工与联动流程,通过提前签订协同救援协议、开展联合演练,提升多方协同处置能力,最大限度减少人员伤亡与财产损失。

结束语

隧道施工安全与风险管理研究是保障工程顺利推进、守护生命财产安全的基石。通过全面剖析风险成因、精准识别潜在隐患、科学构建评估模型,并针对性地制定技术控制与管理优化策略,可显著降低事故发生率。然而,隧道工程复杂多变,安全风险管控需持续创新技术、完善制度、强化人员素养。未来,需进一步融合智能化监测与大数据分析,推动安全管理体系向精细化、动态化升级,为隧道建设高质量发展筑牢安全屏障。

参考文献

- [1]谭万林.隧道工程施工安全风险与管理策略[J].交通世界,2024,(29):9-11.
- [2]俞洋.隧道工程施工现场安全风险分析与安全管理措施[J].大众标准化,2023,(05):90-92.
- [3]仇小宁.复杂地质隧道施工安全风险与施工管理对策[J].运输经理世界,2025,(11):66-68.
- [4]张华旻,褚子仪,陈晓青.盾构隧道施工的风险管理研究[J].交通工程,2025,25(03):86-90.
- [5]彭志敏.隧道施工安全管理与风险预警技术研究[J].工程建设与设计,2024,(24):220-222.