

Research on Safety Risk Control and Evaluation in Bridge and Tunnel Engineering Construction

Changguo Zhang¹ Sen Zhang²

1. Zhejiang Jiaogong Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311300, China

1. Zhejiang Jiantou Transportation Infrastructure Construction Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

This study focuses on the entire construction process of bridge and tunnel projects, systematically reviewing domestic and international research on safety risk management and evaluation. It analyzes the causative mechanisms of typical accidents and the evolution characteristics of major hazards through a four-dimensional framework encompassing human factors, machinery, environment, and management systems. A comprehensive safety risk control system is established, integrating risk identification, dynamic assessment, hierarchical management, hazard remediation, emergency response, and continuous improvement. By leveraging next-generation technologies such as Building Information Modeling (BIM), digital twins, Internet of Things (IoT), AI-powered recognition systems, advanced geological forecasting, intelligent robotics, and ultra-wideband (UWB) precision positioning, the study develops digitalized, intelligent, and visualized safety management solutions while outlining future industry trends. Research findings indicate that implementing dynamic dual-prevention mechanisms, promoting deep integration of smart technologies with on-site management practices, and achieving closed-loop hazard governance can significantly enhance intrinsic safety standards in bridge/tunnel construction. These findings provide theoretical references and practical insights for risk prevention, targeted hazard mitigation, and intelligent management implementation under complex geological conditions.

Keywords

bridge and tunnel engineering; construction safety; risk management and control; risk assessment; intelligent monitoring; hidden danger management; digital twin; dual prevention mechanism

桥梁隧道工程施工安全风险管控与评价研究

张长国¹ 张森²

1. 浙江交工集团股份有限公司, 中国·浙江 杭州 311300

2. 浙江建投交通基础设施建设集团有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

摘要

本文以桥隧工程施工全过程为研究对象, 系统梳理国内外安全风险管控与评价研究现状, 从人一机一环一管四维度剖析典型事故致因机理与重大隐患演化特征; 构建集风险识别、动态评价、分级管控、隐患治理、应急响应、持续改进于一体的全流程安全风险管控体系; 融合 BIM、数字孪生、物联网、AI 智能识别、超前地质预报、智能机器人、UWB 精确定位等新一代信息技术, 形成数字化、智能化、可视化的安全管控技术方案, 并对行业未来发展趋势进行展望。研究表明, 构建动态双重预防机制、推动智能技术与现场管理深度融合、实现隐患闭环治理, 可显著提升桥隧施工本质安全水平, 为复杂地质条件下桥隧工程施工安全风险预防、隐患精准治理、智能管控落地提供理论参考与工程借鉴。

关键词

桥梁隧道工程; 施工安全; 风险管控; 风险评价; 智能监测; 隐患治理; 数字孪生; 双重预防机制

1 引言

近年来, 我国交通基础设施建设迈入高质量发展新阶段, 高速公路、高速铁路、跨海跨江通道等重大线性工程持续推进, 桥梁隧道作为关键控制性结构, 工程占比不断提高。随着项目向深山、深埋、大跨及海洋环境拓展, 施工面临软弱围岩、断层破碎带、岩溶富水、高地应力、有害气体等极

端地质条件, 加之施工空间狭小、工序交叉密集、临时结构受力复杂、作业环境恶劣等问题, 安全风险高度集中、防控难度极大。

桥隧施工一旦发生坍塌、涌水突泥、火灾爆炸、高处坠落等事故, 极易造成群死群伤、重大财产损失与恶劣社会影响, 成为交通建设领域安全监管的重点与难点。国家相继发布《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》(JTG/T 3302-2025)、《公路水运工程重大事故隐患判定标准》《“科技兴安”三年行动方案》等政策文件, 明确要求构建风险分级管控与隐患排查治理双重预防机制, 推动机械化换人、

【作者简介】张长国(1972-), 男, 中国山东菏泽人, 本科, 高级工程师, 从事隧道及地下工程研究。

自动化减人、智能化无人,全面提升工程建设本质安全水平。

2 国内外研究现状

2.1 国外研究现状

欧美、日本等发达国家桥隧工程安全风险管理体系起步早,已形成完善的法律法规、风险评价方法与智能化技术应用体系,将风险评估作为工程立项、设计审批、施工许可的强制性环节,强调全生命周期安全理念。

在风险评价理论方面,风险矩阵法、层次分析法(AHP)、故障树分析(FTA)、事件树分析(ETA)、模糊综合评价、贝叶斯网络、可靠度理论等模型已广泛应用;近年来,基于机器学习、深度学习的动态风险预测模型成为研究热点,可通过多源监测数据融合实现围岩变形、涌水突泥等风险的实时预测与超前预警。

在技术应用方面,BIM、物联网、分布式光纤传感、盾构/TBM智能控制、地质雷达超前预报、机器人巡检等技术普及,实现施工过程可视化、监测自动化、预警智能化;同时,高度重视机械化与自动化装备应用,减少高危场所人员数量,从本质上提升安全水平。总体而言,国外研究呈现法规标准化、方法量化、技术集成化、管理系统化特征。

2.2 国内研究现状

我国桥隧施工安全风险研究伴随交通建设快速推进,在政策引导、理论方法、技术应用、工程实践等方面取得显著成果。评价方法上,在传统模型基础上提出组合赋权-灰云模型、动态贝叶斯网络、可拓评价法等改进模型,更适配我国复杂地质工程特点,行业规范的发布推动风险评估走向标准化、流程化。管控体系上,普遍构建“双重预防机制”,部分工程形成全域感知、全链条管控模式,实现从被动抢险向主动预防转变。智能技术应用上,BIM、5G、物联网、AI图像识别、UWB人员定位、数字孪生等技术逐步示范应用,实现人员管理、结构监测、危险预警、违章识别等功能。

但与国际先进水平相比,仍存在明显短板:风险评价偏静态,难以适配地质突变与工序快速变化;智能技术应用碎片化,数据不通、预警误报率偏高;隐患治理重排查、轻闭环,重复隐患突出;技术与管理“两张皮”,现场执行不到位。

2.3 研究评述与本文切入点

当前桥隧施工安全风险管控已进入数字化、智能化阶段,但仍存在多发事故致因机理与隐患演化规律研究不系统、风险评价静态化、智能管控与应急缺乏一体化闭环、管控体系落地性不足等问题。因此,本文以多发事故精准预防、重大隐患闭环治理、智能技术深度融合、全流程动态管控为核心,构建适配工程实际的安全风险管控与评价体系,突出前瞻性、实用性与学术性。

3 桥梁隧道工程施工安全事故与隐患分析

3.1 典型多发事故类型

统计数据显示,桥隧施工高发事故主要包括:隧道围岩坍塌与失稳、涌水突泥、桥梁高处坠落、支架/模板/挂篮/架桥机失稳坍塌、物体打击与机械伤害、临时用电触电

及火灾爆炸、爆破伤害与有害气体中毒。其中,隧道坍塌、涌水突泥、桥梁高处坠落、支架失稳四类事故占比最高、后果最严重,是风险管控的重点对象。

3.2 事故致因“人-机-环-管”四维分析

人的因素:作业人员安全意识淡薄、违规操作、无证上岗、违章指挥、安全技术交底不到位、应急处置能力不足、疲劳作业等,人的不安全行为是事故发生的直接触发因素。

机的因素:施工机械、监测仪器老化带病运行,临电设施不规范、防护装置缺失,脚手架、挂篮等临时结构搭设不规范、未验收即使用等。

环境因素:软弱围岩、断层破碎带、岩溶富水、高地应力、有害气体等不良地质,暴雨、大风、高温严寒等极端天气,以及施工场地狭窄、交叉作业密集等恶劣作业环境。管理因素:安全管理制度不健全、风险评估流于形式、专项方案擅自变更、隐患排查不彻底、整改不闭环、应急体系缺失、监理与第三方监测履职不到位、压缩工期、分包管理混乱等,管理缺陷是事故发生的根本原因。

3.3 重大隐患特征与治理痛点

依据《公路水运工程重大事故隐患判定标准》,桥隧工程重大隐患主要包括:隧道开挖方法随意变更、支护滞后,超前地质预报缺失,瓦斯隧道安全系统失效,桥梁支架挂篮未验收试压,高空作业防护缺失,临时用电不规范,风险管控措施不落实、关键岗位缺位等。

当前隐患治理突出痛点:人工排查效率低、漏检率高、上报不及时;整改无跟踪、无复核、无销号,屡改屡犯;隐患与风险管控脱节,未实现源头治理;数据不透明,责任无法精准追溯。

4 桥梁隧道施工安全风险管控体系构建

构建“风险识别-动态评价-分级管控-隐患治理-应急响应-持续改进”六位一体全流程管控体系,实现源头到末端的闭环管理。

4.1 风险识别与清单化管理

采用专家调查法、现场踏勘、故障树、安全检查表等方法,建立全工序、全部位、全时段风险源清单。隧道重点识别围岩失稳、涌水突泥、有害气体、支护失效等风险;桥梁重点识别高处坠落、支架坍塌、起重伤害、水上作业等风险。

4.2 动态风险评估

采用“总体风险评估+专项风险评估+动态监测评估”三级评价模式:总体评估确定项目整体风险等级;专项评估针对深基坑、高支模、隧道掘进等高风险工序评价;动态评估基于监测数据实时更新风险等级。评价方法融合组合赋权、灰云模型、贝叶斯网络,实现定性与定量结合,提升评价精度。

4.3 风险分级管控

按照红、橙、黄、蓝四级风险实施差异化管控:红色风险停工评估、专家论证、严格管控;橙色风险重点监测、专人值守、每日排查;黄色风险定期检查、措施到位、加强教育;蓝色风险常规管控、定期巡查。明确建设、施工、监理、监测四方责任,落实“一岗双责”。

4.4 隐患排查治理闭环机制

建立“排查—登记—整改—复核—销号—复盘”全闭环流程：开展日常、专项、综合三级排查；隐患录入平台，明确责任人、整改措施与时限；整改完成后复检验收，合格方可销号；对重复隐患溯源分析，完善制度与技术措施，通过数字化平台实现全过程留痕、可追溯、可考核。

4.5 应急管理体系

完善综合应急预案、专项应急预案、现场处置方案，重点针对坍塌、涌水突泥、高处坠落、火灾等事故建立快速响应机制，定期开展应急演练，确保人员快速撤离、险情有效控制、救援科学高效。

5 先进安全管控技术应用

5.1 BIM + 数字孪生

基于 BIM 建立桥隧、地质、临时结构、设备、人员数字化模型，构建数字孪生场景，实现虚拟施工与方案模拟、碰撞检测与风险预演、施工进度安全质量协同管控、监测数据实时可视化映射，直观呈现结构安全状态。

5.2 物联网全域智能监测

部署分布式光纤传感、GNSS、倾角、应力、渗压及气体传感器，实时监测围岩变形、结构受力、有害气体、环境参数，通过无线传输与边缘计算实现毫米级监测、秒级响应，自动异常预警，有效预防坍塌、涌水突泥事故。

5.3 超前地质预报技术

融合地质雷达、超前钻探、红外探水、微震监测等多种手段，结合 AI 智能解译，提前识别破碎带、富水区、岩溶、瓦斯等风险，为开挖方案优化与支护设计提供数据支撑。

5.4 AI + 机器视觉智能识别

通过 AI 视频识别未戴安全帽、未系安全带、违规穿越、临边防护缺失、明火烟雾、支架倾斜、围岩掉块等违规行为与安全隐患，实现自动抓拍、实时预警、记录留痕，降低人为违章发生率。

5.5 UWB 人员与设备精确定位

实现人员实时定位、轨迹回溯、危险区域闯入预警、隧道安全步距动态监测、超员超时无证进入预警，提升现场人员安全管控精度。

5.6 智能机器人巡检

采用隧道巡检机器人、桥梁爬壁机器人，替代人工完成裂缝、渗漏水、衬砌缺陷检测及环境参数采集，减少高危区域人工作业，降低巡检风险。

5.7 智能预警与应急联动平台

整合多源监测数据，构建风险预测模型，实现多级预警分级推送、预警—通知—撤离—处置—复盘全流程联动，通过数据大屏实现一屏统管、全员可视、全程可溯。

6 结论与展望

6.1 结论

桥隧工程施工安全风险具有隐蔽性、动态性、突发性、

连锁性特征，坍塌、涌水突泥、高处坠落、支架失稳为高发事故，人一机一环一管协同失效是核心致因。

构建“风险识别—动态评价—分级管控—隐患治理—应急响应—持续改进”全流程管控体系，可提升双重预防机制效能，实现从被动处置向主动预防转变。

BIM、数字孪生、物联网、AI 识别、智能机器人等新一代信息技术深度融合，是提升安全管控精度、效率与可靠性的关键手段。

推动技术与管理深度融合，实现隐患闭环治理、风险动态管控、智能实时预警，是提升桥隧工程本质安全水平的核心路径。

6.2 发展趋势展望

全生命周期安全管控：安全管控向前延伸至设计阶段、向后延伸至运维阶段，实现数据贯通、模型复用、风险传递一体化管控。

深度智能化与无人化：大模型、数字孪生、自主巡检机器人、智能装备协同作业普及，高危作业“少人化、无人化”成为常态。

韧性安全体系构建：聚焦工程抗扰动、自适应、快速恢复能力，提升极端地质与灾害条件下的安全保障水平。

标准体系持续升级：智能监测、风险评价、隐患治理、数字平台进一步标准化规范化，推动行业整体安全水平提升。

绿色与安全协同发展：安全管控与低碳施工、生态保护、绿色建造深度融合，实现高质量、可持续、安全低碳一体化建设。

参考文献

- [1] 交通运输部. JTG/T 3302-2025 公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南[S]. 北京：人民交通出版社，2025.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于进一步加强隧道工程施工安全管理的通知[Z]. 2024.
- [3] 张明，李建军. 复杂地质公路隧道施工安全风险动态评价研究[J]. 公路交通科技，2024，41(2)：92-100.
- [4] 刘艳红，王强. 基于组合赋权-灰云模型的桥梁施工安全风险评价[J]. 中国安全科学学报，2024，34(3)：156-162.
- [5] 陈雪峰，李超. 数字孪生驱动的桥梁隧道施工智能安全管控技术[J]. 建筑科学，2025，41(1)：78-85.
- [6] 赵文，林志国. 公路隧道涌水突泥风险智能预警与防控体系研究[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(S2)：3891-3902.
- [7] 周志亮，钱亮. 智慧工地技术在桥梁隧道施工安全管理中的应用[J]. 施工技术，2025，54(5)：67-71.
- [8] 国家安全生产监督管理总局. 生产安全事故隐患排查治理体系建设指南[Z]. 2023.
- [9] 吴宗臻. 隧道施工人员定位与安全步距智能管控系统研究[J]. 现代隧道技术，2024，61(2)：112-118.
- [10] 何川，曾艳琴. 深埋高地应力隧道施工安全风险与智能防控研究进展[J]. 工程力学，2025，42(1)：1-12.