

# 公路隧道施工安全风险识别与防控策略

刘本新

云南云岭高原山区公路工程检测有限公司 云南 昆明 650000

**摘要：**本文首先深入剖析了公路隧道施工的主要风险类型，涵盖地质与水文风险、施工技术风险、设备与材料风险、管理与人为风险以及环境与公共安全风险五大维度。在此基础上，本文提出了一套“全过程、全要素、全员参与”的综合防控策略框架，其中包括：构建基于风险分级管控与隐患排查治理双重预防机制的风险管理体系；推广以新奥法（NATM）和信息化施工为核心的动态设计理念；强化人员安全素质与行为管理；推动智能化、数字化技术在风险监测预警中的深度应用；以及完善应急预案与应急响应机制。最后，本文通过一个典型软弱围岩隧道塌方事故的案例分析，验证了上述策略的有效性与必要性。研究表明，唯有将先进的技术手段、科学的管理方法与人的主观能动性有机结合，才能从根本上提升公路隧道施工的本质安全水平。

**关键词：**公路隧道；施工安全；风险识别；风险防控；双重预防机制；信息化施工；智能监测

## 引言

随着我国交通基础设施建设的不断深入，尤其是在“交通强国”战略的引领下，穿越复杂山岭、江河湖海的长大隧道工程日益增多。公路隧道以其缩短行车距离、提高通行效率、保护生态环境等优势，已成为现代综合立体交通网不可或缺的组成部分。然而，隧道工程深埋于地下，施工环境封闭、作业空间受限、地质条件复杂多变，使其成为工程建设领域公认的高危行业之一。从频发的塌方、涌水、瓦斯爆炸等事故可以看出，隧道施工安全形势依然严峻。传统的隧道安全管理多侧重于事后处理和经验总结，缺乏对风险的前瞻性、系统性识别与主动防控。这种被动式的管理模式难以适应当前大规模、高标准、高风险隧道建设的需求。因此，亟需建立一套科学、系统、可操作的风险识别与防控体系，将安全管理的关口前移，从事后处置转向事前预防和事中控制。

## 1 公路隧道施工安全风险识别

### 1.1 地质与水文风险

一是不良地质体风险：包括断层破碎带、软弱夹层、岩溶（喀斯特）发育区、高地应力区（易引发岩爆）、膨胀性围岩、松散堆积体等。这些地质体稳定性差，在开挖扰动下极易发生失稳、坍塌。例如，断层破碎带往往伴随着围岩强度急剧下降和地下水富集，是隧道施工的“拦路虎”。二是地下水风险：地下水是隧道施工的“天敌”。主要风险包括：（1）突涌水/突泥：当隧道开挖揭露承压含水层或与地表水体、暗河连通时，高压水或水-泥混合物会瞬间涌入隧道，冲毁设备、掩埋人员，后果极其严重<sup>[1]</sup>。（2）渗漏水：持续的渗漏水会

软化围岩，降低其承载力，并可能导致支护结构腐蚀失效，长期威胁隧道结构安全。（3）水压致裂：高水压作用于围岩裂隙，会加速围岩的破坏进程。

### 1.2 施工技术与工艺风险

（1）开挖方法风险：不同的地质条件需匹配相应的开挖工法（如全断面法、台阶法、CD法、CRD法、双侧壁导坑法等）。若工法选择错误或工序衔接不当（如仰拱、二衬施作滞后），会导致围岩暴露时间过长，应力释放失控，引发变形过大甚至坍塌。（2）支护体系风险：初期支护（如喷射混凝土、锚杆、钢拱架）是控制围岩变形、维持隧道稳定的第一道防线。风险点包括：支护参数设计不足、材料质量不达标、施工工艺不规范（如锚杆长度不足、注浆不饱满、喷砼厚度不够）、支护结构不及时等。（3）爆破作业风险：在钻爆法施工中，爆破设计不合理（如药量过大、起爆顺序错误）或操作不规范，不仅会过度扰动围岩，还可能引发飞石伤人、有害气体中毒、甚至诱发瓦斯爆炸等次生灾害。

（4）监控量测失效风险：监控量测是信息化施工的“眼睛”。若量测点布设不合理、数据采集不及时、数据分析流于形式，将无法真实反映围岩和支护结构的受力状态，导致决策失误，错过最佳的加固时机。

### 1.3 设备与材料风险

隧道内使用的大型机械设备（如掘进机TBM、凿岩台车、装载机、运输车辆）若维护保养不到位，易发生机械故障、制动失灵、电气火灾等事故。通风设备故障则会导致洞内空气质量恶化，危及人员健康。劣质的水泥、钢材、防水板、注浆材料等，会直接导致支护结构强度不足、防水失效，埋下严重的安全隐患。炸药、雷

管等火工品在运输、储存、使用过程中的任何疏忽，都可能酿成灾难性后果。

#### 1.4 管理与人为风险

缺乏明确的安全责任制度、安全教育培训流于形式、安全投入不足、隐患排查治理机制缺失等。作业人员安全意识淡薄、违章指挥、违章作业（如不戴安全帽、违规动火、擅自进入危险区域）、疲劳作业等<sup>[2]</sup>。缺乏针对性的应急预案，或虽有预案但未进行有效演练，导致事故发生时手忙脚乱，错失救援黄金时间。

#### 1.5 环境与公共安全风险

隧道施工不仅影响内部作业环境，也可能对周边环境和公共安全构成威胁。（1）洞内环境风险：包括粉尘、有害气体（如一氧化碳、甲烷、硫化氢）、噪声、高温高湿等，长期暴露会损害作业人员职业健康。（2）地表沉降与建筑物破坏风险：在城市或近接构筑物区域施工时，隧道开挖引起的地层损失会导致地表沉降，可能危及上方道路、管线、房屋等既有建（构）筑物的安全。（3）交通干扰风险：隧道进出口施工可能对既有道路交通造成干扰，增加交通事故风险。

### 2 公路隧道施工安全风险综合防控策略

针对上述识别出的多维度风险，必须摒弃单一、孤立的防控思路，构建一个覆盖施工全过程、涵盖所有风险要素、强调全员参与的综合防控策略体系。

#### 2.1 构建“双重预防机制”为核心的风险管理体系

“风险分级管控”和“隐患排查治理”双重预防机制是现代安全管理的核心思想。

##### 2.1.1 风险分级管控

在项目策划和施工准备阶段，组织地质、设计、施工、监理等各方专家，采用安全检查表（SCL）、工作危害分析（JHA）、预先危险性分析（PHA）等方法，对施工全过程进行系统性风险辨识。采用定性与定量相结合的方法（如风险矩阵法、LEC法）对辨识出的风险进行评估，确定其风险等级（如重大、较大、一般、低风险）<sup>[3]</sup>。根据风险等级，明确不同层级的管控责任。重大风险由企业总部直接管控，较大风险由项目部重点管控，一般及低风险由作业班组现场管控。针对不同等级风险，制定并落实相应的工程技术措施、管理措施、培训教育措施、个体防护措施和应急处置措施。

##### 2.1.2 隐患排查治理

建立日常检查、专项检查、季节性检查和节假日检查相结合的隐患排查制度。对排查出的隐患，按照“五定”原则（定整改责任人、定整改措施、定整改完成时间、定整改完成人、定整改验收人）进行治理，并通过信息化手

段实现隐患从发现、登记、整改到销号的全流程闭环管理。将隐患排查的结果反馈到风险辨识与评估环节，动态更新风险清单，实现风险与隐患的联动管理。

#### 2.2 推广以新奥法与信息化施工为核心的动态设计理念

新奥法（NATM）的核心思想是“保护围岩、调动围岩自承能力、动态设计、信息化施工”。这是应对复杂地质风险最有效的技术策略。动态设计要摒弃一成不变的设计图纸。根据开挖揭示的实际地质情况和监控量测反馈的数据，对支护参数、开挖工法等进行动态调整和优化。例如，当量测数据显示围岩变形速率异常增大时，应立即暂停开挖，采取加强支护（如增设临时仰拱、加密锚杆、补打注浆小导管）等措施。信息化施工需要采用高精度、自动化监测设备（如全站仪自动监测系统、光纤光栅传感器、多点位移计等），对拱顶沉降、周边收敛、围岩压力、钢架内力等关键指标进行实时、连续监测<sup>[4]</sup>。建立隧道施工安全监控预警平台，利用大数据分析、机器学习等技术，对海量监测数据进行深度挖掘，自动识别异常模式，预测变形发展趋势，实现从“数据采集”到“智能预警”的跨越。一旦系统发出预警，项目管理层能迅速获取信息，组织专家会诊，制定并执行应急处置方案，将风险扼杀在萌芽状态。

#### 2.3 强化人员安全素质与行为管理

改变“填鸭式”的培训模式，针对不同工种、不同风险岗位，开展有针对性的实操培训和应急演练。利用VR/AR技术模拟隧道塌方、涌水等险情，让作业人员身临其境地学习逃生和自救技能。推行行为安全观察卡制度，鼓励管理人员和同事之间相互观察、纠正不安全行为，并给予正向激励，营造“人人讲安全、人人管安全”的文化氛围。对特种作业人员实行严格的持证上岗制度，并定期进行技能复审。将安全绩效纳入个人和班组的考核体系，与薪酬、晋升直接挂钩。

#### 2.4 推动智能化、数字化技术的深度应用

推广应用智能凿岩台车、湿喷机械手、自行式液压仰拱栈桥、智能二衬台车等先进装备，减少人工作业，降低安全风险。在隧道内部署UWB（超宽带）或RFID定位系统，实时掌握人员和关键设备的位置信息，在发生紧急情况时能迅速精准定位，提高救援效率。构建隧道工程的数字孪生体，将地质模型、设计模型、施工进度、监测数据、设备状态等多源信息集成于一个虚拟空间中，实现对物理隧道的全生命周期、全方位、可视化管控，为风险预判和科学决策提供强大支持。

#### 2.5 完善应急预案与应急响应机制

针对识别出的重大风险（如塌方、涌水、火灾、瓦斯爆炸），分别制定专项应急预案。预案内容应具体、明确，包括应急组织、职责分工、报警程序、疏散路线、救援方法、物资储备等，并定期进行评审和更新。定期组织桌面推演和实战演练，检验预案的有效性，磨合各部门的协同联动机制，锻炼应急队伍的实战能力。演练后要进行评估总结，持续改进。在隧道洞口或附近设置应急物资储备库，配备生命探测仪、通风设备、排水泵、急救药品、应急通讯设备等，并确保其处于良好可用状态。

### 3 案例分析：某软弱围岩隧道塌方事故的风险防控启示

#### 3.1 事故概况

某高速公路隧道穿越F5断层破碎带，围岩为强风化泥岩夹砂岩，自稳能力极差。在采用三台阶法开挖过程中，因初期支护未及时封闭成环，且监控量测数据出现异常（拱顶沉降速率连续三天超过预警值）未引起足够重视，最终导致掌子面后方约30米段发生大规模塌方，所幸因预警及时，人员提前撤离，未造成伤亡，但导致工期延误近三个月。

#### 3.2 风险识别与防控失效分析

项目对F5断层破碎带的风险已有预判，但在施工过程中，对围岩实际揭露情况的动态风险再评估不足。防控失效：（1）技术层面：未严格执行“短进尺、弱爆破、强支护、快封闭、勤量测”的原则，仰拱施作严重滞后，导致支护体系未能形成有效承载环。（2）管理层面：监控量测数据的分析流于形式，现场技术员未能将数据异常及时上报，项目总工也未组织会诊，错过了最佳的加固时机。（3）应急层面：虽然有应急预案，但日常演练不足，事故发生时初期响应略显混乱。

#### 3.3 事后防控策略优化

事故发生后，项目部痛定思痛，全面优化了防控策略：聘请地质专家常驻现场，根据开挖面地质素描，每

日动态调整支护参数。升级信息化系统：引入自动化监测系统，并与项目管理平台联动，一旦数据超限，系统自动向项目经理、总工等关键人员手机推送预警信息。狠抓工序管理：将仰拱、二衬的步距纳入红线管理，超距即停工。加强应急演练：每月组织一次针对塌方的实战演练，确保所有人员熟悉逃生路线和自救互救方法。通过上述措施，该隧道后续穿越类似不良地质段时，均实现了安全、平稳通过。

#### 4 结语

公路隧道施工安全是一项复杂的系统工程，其风险贯穿于从勘察设计到竣工验收的每一个环节。本文通过对地质水文、施工技术、设备材料、管理人为及环境公共五大类风险的系统识别，揭示了隧道安全事故的多因性与复杂性。在此基础上，提出的“双重预防机制”管理体系、动态设计与信息化施工技术、人员行为管理、智能化装备应用以及完善的应急响应机制等综合防控策略，构成了一个有机统一、相互支撑的风险防控闭环。未来，随着人工智能、物联网、大数据等新一代信息技术的不断发展，公路隧道施工安全风险的识别将更加精准，预警将更加智能，防控将更加主动，从而为我国交通基础设施的高质量、安全发展提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1]张川东.公路隧道施工安全风险评估与管控体系构建[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集（二）.重庆农新建设工程有限公司;,2025:1501-1504.
- [2]刘勤康.XY公路隧道施工安全风险管理研究[D].广州大学,2025.
- [3]杨盛皓.公路隧道施工安全风险评价及管理措施[J].四川建材,2024,50(05):197-199.
- [4]袁贤王.公路隧道施工安全风险与现场管理研究[J].大众标准化,2023,(14):93-95.