

山区复杂地形条件下公路工程施工安全风险评估与控制策略

朱东志

新疆北新岩土工程勘察设计有限公司 新疆 乌鲁木齐 831400

摘要:随着我国交通基础设施建设向中西部纵深推进,山区公路工程日益成为国家路网建设的重点。然而,山区地形地貌复杂、地质条件多变、气候环境恶劣,给公路工程施工带来了极大的安全挑战。本文以山区复杂地形条件下的公路工程为研究对象,系统分析了施工过程中存在的主要安全风险源,构建了基于层次分析法(AHP)与模糊综合评价法相结合的风险评估模型,并提出了针对性的风险控制策略。研究表明,通过科学识别、定量评估和动态管理,可有效降低山区公路施工安全事故的发生概率,提升工程整体安全水平,为类似工程提供理论支撑与实践指导。

关键词:山区公路;复杂地形;施工安全;风险评估;控制策略;AHP-模糊综合评价

引言

近年来,国家“交通强国”战略和“乡村振兴”政策持续推进,大量高等级公路项目向地形起伏大、地质构造复杂的山区延伸。据统计,截至2024年,我国山区公路里程已占全国公路总里程的45%以上,且呈持续增长趋势。然而,山区公路工程具有线路长、高差大、桥隧比高、作业面分散等特点,施工过程中极易受到滑坡、崩塌、泥石流、岩爆、突涌水等地质灾害影响,加之施工组织难度大、机械设备运行受限、人员作业环境恶劣等因素,导致安全事故发生率显著高于平原地区。因此,如何科学识别山区复杂地形下的安全风险,建立有效的评估体系,并制定切实可行的控制策略,已成为保障山区公路工程顺利实施的关键课题。本文旨在系统梳理山区公路施工中的典型风险因素,构建科学合理的风险评估模型,并提出多层次、全过程的安全控制策略,以期为工程实践提供理论依据和技术支持。

1 山区复杂地形条件下公路工程施工的主要安全风险源识别

1.1 地质与地形风险

山区地质构造普遍复杂,断层、褶皱、软弱夹层等不良地质体广泛分布,使得施工过程面临诸多不可预见的地质风险。在路基开挖或隧道掘进过程中,原本处于平衡状态的岩土体可能因扰动而失稳,进而诱发边坡滑塌、围岩冒落甚至大规模塌方。特别是在高陡边坡区域,若支护措施滞后或设计参数不足,在降雨入渗或爆破震动作用下,极易发生局部或整体失稳。隧道穿越破碎带或断层带时,围岩自稳能力极差,常出现片帮、掉块现象,严重时可导致掌子面封闭困难甚至人员被困。

此外,喀斯特地貌区地下溶洞、暗河发育,一旦施工扰动引发突水突泥,不仅会中断工期,更可能造成重大人员伤亡^[1]。而在深埋隧道中,高地应力环境下岩体能量积聚,可能突然释放形成岩爆,对作业人员和设备构成直接威胁。这些由地质与地形条件引发的风险具有突发性强、破坏力大、预测难度高的特点,是山区公路施工安全管理的重中之重。

1.2 气象与水文风险

山区气候系统敏感,局地性极端天气频发,显著增加了施工安全的不确定性。短时强降雨是诱发次生灾害的主要诱因,尤其在植被覆盖较差或地质松散区域,雨水迅速汇集可形成泥石流,冲毁临时工棚、施工便道乃至主体结构。冬季低温冰冻不仅影响混凝土早期强度发展和养护质量,还导致施工平台、脚手架及运输道路结冰,大幅增加滑倒、坠落和车辆侧翻的风险。雷暴天气在高海拔或开阔山脊地带尤为危险,高处作业人员若缺乏有效避雷设施,极易遭受雷击。此外,大雾天气能见度低,严重影响吊装、运输等关键工序的安全操作。这些气象与水文因素往往具有季节性和突发性,且与地形相互耦合,进一步放大了施工风险的复杂性。

1.3 施工技术与组织风险

山区公路工程的施工技术本身即蕴含较高风险。高填深挖路段若未严格执行“分级开挖、及时支护”的原则,极易因土体卸荷过快或排水不畅导致边坡失稳。桥梁工程普遍墩身高、跨度大,高空作业频繁,模板安装、钢筋绑扎、混凝土浇筑等环节均存在高处坠落隐患,而大型构件吊装过程中若风速突变或指挥失误,可能引发吊物摆动甚至倾覆。隧道施工则面临通风不良、有害气体积聚等

问题，尤其在瓦斯地层或封闭段落，一氧化碳、甲烷等气体浓度超标可迅速危及生命。同时，山区施工便道通常狭窄、弯急、坡陡，重型运输车辆通行困难，雨雪天气下制动距离延长，碰撞、翻车事故频发^[2]。更为复杂的是，多个专业队伍在同一区域交叉作业，如爆破与开挖、支护与衬砌同步进行，若协调机制缺失或工序安排不合理，极易产生作业冲突，形成连锁安全事故。

1.4 人员与管理风险

除自然与技术因素外，人为与管理层面的风险同样不容忽视。当前山区公路项目大量依赖劳务分包，部分一线作业人员安全意识淡薄，未经系统培训即上岗操作，违规作业、防护缺失等现象较为普遍。部分施工单位在工期压力下重进度、轻安全，安全投入不足，隐患排查流于形式，未能建立有效的风险闭环管理机制。安全管理制度虽有文本，但执行不到位，班前教育走过场，特种作业人员持证不全等问题屡见不鲜。此外，山区项目多位于偏远地带，通信信号覆盖差，医疗救援资源匮乏，一旦发生事故，应急响应迟缓，极易错过黄金救援时间。上述管理短板与人员素质问题，往往成为压垮安全防线的最后一根稻草。

2 山区公路施工安全风险评估模型构建

为实现对上述风险的量化评估，本文采用层次分析法（AHP）确定各风险指标权重，结合模糊综合评价法处理评价过程中的不确定性，构建AHP-模糊综合评价模型。

2.1 风险评估指标体系构建

基于风险源识别结果，建立三级评估指标体系：

目标层（A）：山区公路施工安全风险等级；

准则层（B）：地质地形风险（B₁）、气象水文风险（B₂）、施工技术风险（B₃）、人员管理风险（B₄）；

指标层（C）：共12项具体指标，如表1所示。

表1 山区公路施工安全风险评估指标体系

准则层	指标层（C）
B ₁ 地质地形风险	C ₁₁ : 边坡稳定性
	C ₁₂ : 隧道围岩等级
	C ₁₃ : 岩溶发育程度
B ₂ 气象水文风险	C ₂₁ : 年均降雨量及强度
	C ₂₂ : 极端天气频率
	C ₂₃ : 洪水/泥石流历史记录
B ₃ 施工技术风险	C ₃₁ : 高边坡高度与坡度
	C ₃₂ : 桥梁墩高与跨度
	C ₃₃ : 隧道长度与埋深
B ₄ 人员管理风险	C ₄₁ : 安全培训覆盖率
	C ₄₂ : 安全管理制度执行度
	C ₄₃ : 应急预案完备性

2.2 基于AHP的权重确定

邀请10位具有10年以上山区公路施工经验的专家，采用1-9标度法对各层级指标进行两两比较，构建判断矩阵。经一致性检验（CR < 0.1），得到各层权重如下：

准则层权重向量：W_B = [0.35, 0.20, 0.30, 0.15]

指标层权重（以B₁为例）：W_{C₁} = [0.45, 0.35, 0.20]

2.3 模糊综合评价

设定风险等级评语集V = {低风险（V₁），较低风险（V₂），中等风险（V₃），较高风险（V₄），高风险（V₅）}。

专家对各指标进行模糊打分，构建隶属度矩阵R。例如，对C₁₁（边坡稳定性）的评价可能为：R₁₁ = [0.1, 0.2, 0.4, 0.2, 0.1]。

通过模糊合成运算（采用M(∧, V)算子）：

$$S = W_c \circ R$$

最终得到各准则层的模糊评价向量，再与准则层权重合成，得综合评价向量S_A。

根据最大隶属度原则或加权平均法，确定最终风险等级。例如，若S_A = [0.08, 0.15, 0.30, 0.32, 0.15]，则判定为“较高风险”。

3 山区公路施工安全风险控制策略

3.1 技术防控措施

3.1.1 地质灾害主动防治技术

针对滑坡、突涌水、岩爆等地质风险，应推行“勘察—监测—防治”一体化技术路径。施工前利用无人机航测、InSAR遥感等手段精细识别隐患区域；施工中对高陡边坡采用预应力锚索与格构梁联合支护，并配套立体排水系统以降低水压影响。隧道工程须坚持超前地质预报，综合运用TSP、地质雷达等手段探明前方断层或富水带，及时采取注浆或管棚加固。在高地应力段，通过钻设应力释放孔、优化爆破参数及采用柔性初支结构，有效缓解岩爆风险。

3.1.2 施工工艺与装备优化

高边坡施工应遵循“分级开挖、随挖随支”原则，避免大断面一次性卸荷。桥梁高墩作业推广液爬模系统，减少高空脚手架搭拆频次；塔吊等设备加装风速感应与智能限位装置，6级以上大风自动停机^[3]。隧道掘进优先采用三臂凿岩台车、湿喷机械手等机械化配套作业，降低人员暴露风险。同时，对狭窄曲折的施工便道设置广角镜、防撞墩及反光标识，雨季实施限速与错峰运输，提升通行安全。

3.1.3 智能化安全监控系统建设

依托物联网与BIM+GIS技术构建智慧工地平台，实

现风险可视化与自动预警。通过AI视频分析识别未戴安全帽、未系安全带等违规行为；利用北斗或UWB定位技术实时追踪隧道内人员位置；在瓦斯或封闭区域布设多参数气体传感器，联动通风系统自动启停。三维风险地图可集成地质隐患、高危作业区与应急资源信息，辅助动态决策，推动安全管理从“人防”向“技防+智防”转型。

3.2 管理保障机制

3.2.1 安全责任体系与制度建设

严格落实建设、施工、监理、设计四方安全责任，推行“一岗双责”与风险清单管理。对深基坑、高墩、隧道穿越断层等高风险作业建立专项管控台账，明确责任人、措施与检查频次，确保风险全过程受控。同步完善安全技术交底、特种作业持证上岗等基础制度，夯实管理根基。

3.2.2 过程监督与第三方评估

项目部应建立“日巡查、周检查、月评估”常态化机制，由专职安全员每日全覆盖巡查，技术负责人每周组织专项检查，项目经理每月牵头综合评估。对危大工程，必须组织专家论证施工方案，并在实施中实行监理全程旁站。为进一步提升客观性，可引入具备资质的第三方安全评估机构，定期开展独立审计，重点核查隐患整改闭环、安全投入落实及应急预案有效性，打破内部自查局限，推动管理水平持续提升。

3.2.3 人员安全素质提升

针对山区项目劳务人员流动性大、安全意识薄弱的现状，应创新培训方式。建设VR安全体验馆，通过沉浸式模拟高处坠落、触电等事故场景，让工人直观感受违规后果；推行“师带徒”模式，由经验丰富的班组长一对一传授安全操作技能；设立安全积分奖励制度，对主动报告隐患、制止违章行为的员工给予物质激励，激发全员参与安全管理的积极性，逐步培育“我要安全、我会安全”的文化自觉^[4]。

3.3 应急响应体系建设

3.3.1 专项应急预案编制与演练

应根据风险评估结果，针对泥石流、隧道突涌水、边坡滑塌等典型场景编制专项应急预案，明确组织架构、响应流程、疏散路线与通讯方式。预案需充分考虑山区交通不便、信号弱等现实约束，预留多种联络备用方案。更重要的是，定期组织实战化演练——每季度开展一次综合演练，每半年对高风险工点进行专项演练，通过模拟真实险情检验预案可行性、磨合队伍协同能力，并依据评估结果持续优化，确保关键时刻“拉得出、用得上”。

出、用得上”。

3.3.2 应急资源储备与通信保障

应在隧道口、高边坡下方、桥梁平台等关键位置设置标准化应急物资点，配备救生衣、担架、急救包、应急照明、卫星电话等器材，并建立定期检查机制。针对无信号区域，部署北斗短报文终端作为主干应急通信手段，保障灾情信息上传下达；为关键岗位人员配发带SOS一键呼救功能的智能安全帽，自动发送位置信息，极大缩短搜救响应时间。

3.3.3 多方联动救援机制构建

单靠施工单位难以应对重大突发事件，必须构建政府主导、多方协同的应急联动机制。项目开工前应主动与属地应急管理、消防、医疗、气象等部门签订联动协议，明确职责分工。例如，与县医院建立伤员救治绿色通道，确保30分钟内送达；与气象局共享实时降雨预警，提前启动泥石流防范措施；联合地方救援队开展山地搜救训练。通过制度化协作，整合社会应急资源，形成“专业+属地+社会”三位一体的救援合力，全面提升山区公路工程的生命保障能力与抗灾韧性。

4 结语

本文系统剖析了山区复杂地形条件下公路工程施工所面临的多重安全风险，构建了融合AHP与模糊综合评价的风险评估模型，并提出了涵盖技术、管理、应急三个维度的系统化控制策略。研究表明，只有将风险识别、量化评估与精准防控有机结合，才能有效应对山区施工的高不确定性。工程实践进一步证明，该方法体系具有良好的可操作性与推广价值。未来研究可进一步融合大数据分析 with 人工智能算法，构建基于实时监测数据的动态风险预测模型，实现从“被动响应”向“主动预警”转变。同时，应将生态保护理念融入安全管理体系，探索绿色施工与安全生产协同发展的新范式，为山区交通基础设施的高质量、可持续建设提供更强支撑。

参考文献

- [1]肖娅.山区公路施工安全风险评估与防护策略[J].汽车周刊,2025,(09):143-145.
- [2]张耀元.山区公路施工安全风险评估及防护措施研究[J].交通科技与管理,2024,5(10):180-182.
- [3]杨盛颖.山区公路项目的施工风险及安全管理分析[J].交通科技与管理,2023,4(13):168-170.
- [4]韦佳富.山区高速公路施工安全管理的难点及完善措施探究[J].大众科技,2023,25(06):33-35+32.