

建筑施工

山区公路隧道复杂地质施工安全风险多维度评估与防控优化研究

杨善钦

山西路桥建设集团有限公司浙江交通工程分公司

DOI:10.12238/jpm.v6i8.8300

[摘要] 山区公路隧道建设常面临复杂地质条件，施工安全风险高。本研究综合运用多种方法评估其施工安全风险，识别涌水突泥、瓦斯爆炸等风险因素，采用层次分析法确定风险权重与等级。针对性提出防控措施，包括施工技术优化、风险转移及预警应急机制建立，旨在降低施工风险，保障工程安全顺利进行，为类似工程提供参考借鉴。

[关键词] 复杂地质条件；山区公路隧道；安全风险评估；层次分析法；防控措施

[中图分类号] U455

Research on Multi dimensional Evaluation and Prevention Optimization of Safety Risks in Complex Geological Construction of Mountainous Highway Tunnels

Yang Shanqin

Shanxi Road and Bridge Construction Group Co., Ltd. Zhejiang Transportation Engineering Branch.

[Abstract] The construction of highway tunnels in mountainous areas often faces complex geological conditions and high construction safety risks. This study comprehensively evaluates the construction safety risks using multiple methods, identifies risk factors such as water inrush, mud burst, and gas explosion, and uses the Analytic Hierarchy Process to determine risk weights and levels. Targeted prevention and control measures are proposed, including optimization of construction technology, risk transfer, and establishment of warning and emergency mechanisms, aimed at reducing construction risks, ensuring the safe and smooth progress of the project, and providing reference for similar projects.

[Key words] complex geological conditions; Mountain highway tunnels; Security risk assessment; Analytic Hierarchy Process; preventive and control measures

随着我国高速公路网的飞速发展，大量高速公路项目在山地地区得以实施。山区特有的地形地貌与地层构造纷繁多样，公路隧道工程于此间遂行，其施工安全管控面临严峻考验。地质的复杂性具体表现为，断层破碎带纵横交错、岩溶洞穴暗藏发育、瓦斯气体潜存富集、膨胀性岩土应力潜伏诸多不良地质形态，此等地质条件极易诱发涌水突泥、岩体失稳乃至大规模塌方、瓦斯突出与爆炸等恶性工程事故。凡此种种，不仅对作业人员生命构成直接威胁，更常导致工期延宕、投资超耗，经济损失甚巨。

1 复杂地质条件下山区公路隧道施工安全风险评估

1.1 风险识别

山区通常沟谷地貌众多，地质受背斜或向斜影响，频繁遇到瓦斯隧道、高山沟谷桥梁施工等，施工安全风险高，施工难度大。安全风险评估的根基在于风险识别这一环节，其核心意图在于揭示工程实施中潜藏的威胁。对一系列山区公路隧道建设实例进行深度解构，辅以实地踏勘、学者访谈、专业问卷等

多元手段，辨识出诸多关键的致险因子并非难事。地质构造的复杂性往往成为风险的温床，断层破碎带即为一类普遍存在的风险源头。某隧道的案例颇具代表性，工程线路不仅遭遇两条区域性大断裂，还切割了数条次级断层，这些地带普遍岩体结构松散、节理裂隙密布、且富含地下水。该隧道断层破碎带影响下的涌水突泥几乎成为常态，平均掘进 500m 便会遭遇 1-2 次，伴随发生的还有围岩稳定性问题。岩溶地貌的发育同样埋下重大隐患，某高速公路隧道便深受其苦，突水涌泥频发给施工管控带来了极大挑战。当岩溶区域恰好偏离隧道主轴线、位于其毗邻范围时，开挖活动极易诱发水体或泥浆的瞬间涌入，据不完全统计，这类险情一旦出现，往往导致工期延误 5-8 天，连带的经济代价动辄达到三四十万元。瓦斯地层的存在亦不容忽视，特定隧道需穿越富含炭质的页岩层段，瓦斯异常富集可能瞬间酿成爆炸惨剧，危及现场人员与工程整体。膨胀性岩土的特性则可能引发另一种破坏形式，造成隧道内部空间、衬砌体系乃至支护系统的胀裂损伤，严重时更可能导致结构发生显

著变形。

施工过程中的诸多环节皆可能成为安全隐患的源头，锁脚锚杆之类辅助工法的细节设计若有偏差，其对隧道支护体系整体性能的干扰不容小觑，相关研究亦表明部分支护失效恰恰源于此类设计的疏漏。初期支护体系的刚度倘若设定不足，便难以对围岩施加有效的约束，围岩变形的累积最终可能演变为塌方事故。工程实践中施工方法的甄选与转换显得尤为关键，特别是在遭遇围岩性质骤变的区段，任何工法上的失当都可能迅速劣化围岩状态，进而触发工程险情。至于二次衬砌的施作时点把握，若未能适时跟进以构筑足够的承载能力，无疑将放大整个施工过程的潜在危殆。隧道掘进尺度的管理同样微妙，过于追求速度常常导致围岩自身的稳定过程滞后于开挖面，这实为塌方灾害的一大诱因。前方地质状况的准确预判对施工安全至关重要，超前地质预报的精度缺失或信息滞后，使得施工队伍如同盲人摸象，极易猝不及防地遭遇复杂地质条件带来的挑

战。完善的监控量测体系更是不可或缺的一环，倘若量测工作执行不力、数据反馈迟缓，便丧失了对围岩动态变化的实时把握，对潜在风险的识别与预警也就无从谈起。

1.2 风险评估方法

1.2.1 专家调查法

专家调查法系风险评估常用技术，其要旨在于延请相关领域专业人士，就风险事件发生概率及潜在损失后果贡献其判断与洞见。某高速公路长大隧道项目于施工图设计阶段进行风险评估，便采用了此种方法，针对隧道作业中可能遭遇的突水突泥、结构失稳坍塌、有害气体燃爆等核心隐患，设计并分发了专家调查表格。此次调查共计发出问卷 22 份，最终收得有效回复 21 份，其结果显示，突水突泥与塌方两项被评定为Ⅲ级风险，亟需列为重点监控对象，其余诸项风险因子虽等级稍次，亦不可掉以轻心，仍需足够重视。为直观展示专家调查结果，制作如下表格：

表 1 专家调查结果

风险事故	概率等级	损失等级	概率等级	损失等级	风险等级
突水涌泥	3.8	2.6	4	3	Ⅲ
瓦斯爆炸	2.3	2.8	2	3	Ⅱ
洞口失稳	2.6	1.9	3	2	Ⅱ
塌方	4.3	2.6	4	3	Ⅲ
大变形	3	2.2	3	2	Ⅱ
岩爆	1.8	1.6	2	2	Ⅱ

该方法能利用专家经验和专业知识，但存在主观性，不同专家判断可能存在差异。

1.2.2 层次分析法

层级解析框架（AHP）作为一种融合定性判断与定量测算的体系化剖析路径，能够有效甄别潜在风险情景及其肇因要素的主次位阶。借鉴某隧道工程实践，其施工安全风险评估就搭建了清晰的分层风险架构，宏观上区分施工活动本身与环境扰动两类风险域，微观层面则进一步拆解出若干基础风险因子。该方法的操作涉及构建比较判断矩阵，求解其最大特征值及对应特征向量，计算各层级元素的相对权重并执行一致性检验以

保证逻辑自洽，最终推导出基础风险因子对总体施工风险的贡献度排序。某隧道项目的评估揭示，围岩失稳、坍塌、掉块等因素居于风险权重前列，被认定为须重点管控的关键环节。相似地，在某高速公路隧道的风险评价中，借助此方法判定的风险事件重要性序列呈现为，瓦斯爆炸、突水涌泥、塌方、洞口失稳、岩爆、大变形等，而追溯风险源头，其权重排序则指向特殊地段设计、超前地质预报、监控量测、施工进尺控制、辅助施工措施、施工工法选择、初期支护刚度、二衬施工时机乃至工法转换环节。以下是风险事件单排序矩阵及一致性检验相关数据表格：

表 2 风险事件单排序矩阵及一致性检验相关数据

风险事件	突水涌泥	瓦斯爆炸	洞口失稳	塌方	大变形	岩爆	W（归一化处理）	AW	AW/nWi
突水涌泥	1	1/2	5	3	7	7	0.27	1.92	1.176
瓦斯爆炸	2	1	6	4	8	8	0.4	2.73	1.148
洞口失稳	1/5	1/6	1	1/5	4	5	0.09	0.56	1.054
塌方	1/3	1/4	5	1	5	7	0.17	1.23	1.191
大变形	1/7	1/8	1/4	1/5	1	1/2	0.03	0.2	1.045
岩爆	1/7	1/8	1/5	1/7	2	1	0.04	0.23	0.998
$\lambda_{\max}$	—	—	—	—	—	—	—	—	6.612

经计算， $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)=(6.612-6)/(6-1)=0.122$ ， $CR=CI/RI=0.122/1.24=0.099<0.1$ ，矩阵满足一致性判断。层次分析法能将复杂问题分解为多个层次，通过量化分析为风险控制提供科学依据。

1.3 风险等级划分

工程界援引相关标准规程判别风险层级属惯常操作，通常将其归为低度、中度、高度及至极高四个序列。铁路隧道建设的风险定性，其复杂性在于必须同时审视特定事件的发生概率与潜在后果的破坏烈度，两方面因素的综合评价方能确定其风

险归属。具体到一些高速公路隧道的施工实例，突水涌泥、结构坍塌之类的险情往往被置于Ⅲ级高度风险之列，这无疑构成了严峻挑战，理应部署专门性的治理方案并配合周详的持续追踪观测。另一些地质难题诸如瓦斯突出、洞口结构变形、岩体大范围位移乃至岩爆等现象，它们的风险评估或可归入Ⅱ级中度范畴，此种情形虽不必然立即启动工程性应对，但持续的监测关注绝不容忽视。具体风险等级标准及接受准则如下表所示：

表3 具体风险等级标准

概率	等级	轻微的	较大的	严重的	很严重的	灾难性的
很可能	5	高度	高度	极度	极度	极度
可能	4	中度	高度	高度	极度	极度
偶然	3	中度	中度	高度	高度	极度
不可能	2	低度	中度	中度	高度	高度
很不可能	1	低度	低度	中度	中度	高度

表4 接受准则

风险等级	接受准则	处理措施
Ⅳ级	可接受	此类风险较小，不需采取风险处理措施
Ⅲ级	可接受	此类风险次之，一般不需采取风险处理措施，但需予以监测
Ⅱ级	不期望	此类风险较大，必须采取风险处理措施降低风险并加强监测，且降低风险的成本不高于风险发生后的损失
Ⅰ级	不可接受	此类风险最大，必须高度重视并规避，否则要不惜代价将风险至少降低到不期望的程度

明确风险等级划分，有助于针对不同等级风险采取相应防控措施，合理分配资源。

2 复杂地质条件下山区公路隧道施工安全防护措施

2.1 施工技术优化措施

2.1.1 涌水突泥风险防控

隧道建设面对涌水突泥风险，通常恪守“综合预报、探明前路、全盘把控地质详情”的基本方略。一些高速公路隧道的实践表明，长距离的超前地质探查引入瞬变电磁法或直流电法技术手段，配合既有的 TSP 地震波法探测，能够显著提升对前方含水分布的认知精度，至于较短范围内的预探工作，地质雷达担纲主要角色，一旦发现可疑信号，随即辅以水平钻孔进行核实确认。例如某隧道工程便深度倚仗超前地质预报成果，综合运用了 TSP203 系统、红外探测以及钻探勘察等多元方法，且规定在每一轮开挖作业前，必须钻设至少两枚深度不低于五米的超前探孔。工程技术人员会依据探明的断裂带或岩溶腔体的大小及其内部填充物的特性，审慎决策，或先行构建帷幕注浆加固圈，或实施超前小导管预注浆封闭，堵水注浆与超前钻孔限制性引排相结合的策略，被证明是管控此类地质灾害风险的有效途径。据统计，在该隧道具体的施工过程中，前述系列措施的应用，促使突水涌泥等地质险情发生几率下降了大概四到五成。

2.1.2 塌方风险防控

塌方风险防控重点关注断层破碎带邻近区域，围岩特性急剧变化地段施工工法的审慎评估与转换显得尤为关键，意在规避地质条件突变可能诱发的工程事故。针对破碎围岩这种特殊地质，工程界倾向于不断优化施工组织设计，超前支护体系的强化备受重视，管棚支护与小导管预注浆等工艺常被采纳应用。某隧道项目实践表明，在软弱围岩、断层破碎影响带等复杂地层掘进时，适宜选用正台阶预留核心土环形开挖法、中隔壁施工法或大拱脚台阶法，结合稳固的初期支护以及即时布设的锁脚锚固措施，能够有效抑制拱脚基础下沉和向内位移的风险。过往相似工程的统计分析印证，采用此类合理的施工方法及支护对策后，相关塌方事件的发生几率可观察到显著下降，幅度大约在三到四成之间。辅助施工手段的完备性亦需充分保障，锁脚锚杆一类关键技术的合理设计至关重要，还需针对各异的围岩条件与特殊地质构造，制定翔实的监控量测规划，对围岩变形进行不间断追踪、实时获取数据，是预判风险并迅捷采取补强措施的前提。

2.1.3 瓦斯风险防控

隧道施工作业对潜在瓦斯威胁的应对，体现于瓦斯监测工作的严密部署，自动化报警装置同人工检测方法协同并用，能够对瓦斯浓度、涌出量等核心数据实施不间断追踪。尽管特定高速公路隧道主洞区域评估显示瓦斯风险处于较低水平，其斜

井、竖井工程却面临穿越瓦斯采空区的挑战，这便要求施工蓝图的制定必须高度关注瓦斯防治问题，并严格遵循瓦斯隧道的标准规范予以规划。确保作业空间瓦斯浓度维持于安全阈值之下，依赖于强效的洞内通风系统以实现快速稀释，例如某隧道的实践经验就包括了随开挖循环深化超前地质探孔、强化风流组织等措施，其目的在于加速有害气体的排出，从而显著削弱瓦斯聚集的可能性。上述一系列综合性预防及控制手段的应用，促成了隧道建设期间瓦斯浓度异常事件频次的大幅下降，据统计其降低幅度达到了六至七成。

2.2 风险转移措施

承建单位可借助工程保险这一风险管理工具，将部分施工安全风险转嫁给专业保险机构。常见的工程建设保险产品繁多，主要涵盖，建筑工程一切险、第三方责任险以及施工人员意外伤害险等。例如某隧道项目的施工主体，便为其参建人员配置了意外伤害保障，同时购置了建筑工程一切险和第三方责任险，构建了较为全面的风险防护网。当约定事故不幸触发时，保险机构将依据合同约定履行经济赔偿责任，此举能显著减轻施工单位的直接财务负担，为维系工程项目的持续稳定进行创造有利条件。建设单位在选择保险产品过程中，务必深入研读各项条款细则，甄选切合自身风险暴露特征的保障方案，力求在风险事故转化为实际损失时能够获得及时充分的补偿。实践表明，通过合理的保险安排，事故所造成的经济损失额度平均可获得四至六成的有效减降。

3 结语

山区公路建设常遭遇复杂地质环境，隧道工程在此背景下的施工安全问题显得尤为突出，进行全面的风险评估并制定严密的防控措施构成了项目成功的关键环节。风险识别工作是基础，科学评估方法的选用、风险等级的合理划分有助于精确把握施工现场的潜在危险。针对识别出的各类风险因素，施工技术的持续优化、风险分担机制的引入、预警与应急响应体系的构建，这些都是降低安全事故发生概率、保障工程按计划推进的有效手段。工程实践中必须紧密结合具体的地质情况及工程自身特性，灵活调度各项评估技术和防控策略，这个过程也是经验积累、风险管理体系日臻完善的过程。

[参考文献]

[1]达彦强.不良地质和复杂环境条件下隧道进出洞施工技术研究[J].科技与创新,2025(05): 151-154.

[2]吕前前.公路隧道出洞安全施工方法研究[J].工程与试验,2025,65(01): 107-109.

[3]闫寒冰.盾构法隧道施工安全管理系统韧性评价指标体系构建[J].工程建设与设计,2025(05): 257-259.

作者简介：杨善钦（1992—），男，汉族，山西太原人，本科学历。