山区复杂地形路桥工程项目安全管理体系构建研究

文 / 高建秀　深圳市交通公用设施建设中心

摘　要：山区复杂地形路桥工程安全管理体系构建需要综合考虑工程特点与风险特征，然后通过分析坪盐通道工程实践经验，深入研究山区工程面临的风险，并且以科学性、系统性、适用性和前瞻性为原则，构建了全生命周期安全管理网络。坪盐通道工程应用的装配式桥梁技术、反井法与滑模工艺、智能监测预警等创新做法，为复杂地形路桥工程安全管理提供了宝贵借鉴，对提升国家交通基础设施建设安全水平具有重要实践价值。

关键词：山区工程；复杂地形；路桥工程；安全管理体系；风险管控

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.118

引言

随着我国交通基础设施建设的快速发展，山区复杂地形路桥工程项目不断增多，这类工程通常地质条件复杂、地形起伏大、施工难度高、安全风险突出，给工程安全管理带来极大挑战。据统计，我国山区占国土面积约 70%，大量交通基础设施需穿越山区复杂地形，这类项目的安全管理问题已成为工程建设领域亟需解决的重要课题。通过研究山区复杂地形路桥工程项目安全管理体系构建，不仅能提高此类工程的安全管理水平，也能为国家交通基础设施建设提供安全保障，具有重要的理论意义和实践价值。

一、工程概况

坪盐通道工程作为深圳市规划干线路网的重要组成部分，既是坪山区南向重要对外通道，又是其与市中心区、盐田区之间的快速连接通道（如图 1 所示），位于深圳市东部地区，北起坪山区的坪山大道，南至盐田区的盐坝高速，全长 11.252 公里，按城市快速路标准设计，设计速度 80 公里 / 小时且双向六车道，全线设有 2 座大型互通立交（锦龙立交、盐港东立交）及 1 座特长隧道（马峦山隧道），其中马峦山隧道为分离式独立双洞隧道，右线长 7.904 公里，左线长 7.899 公里，乃广东省乃至全国最长的城市交通隧道，最大埋深 337 米且穿越 17 处断层，通风竖井是国内市政交通隧道规模最大最深的，开挖直径最大达 17.4 米，深度 194 米，开挖量 4.6 万立方米，在实施过程中面临征地拆迁协调难度大、特长隧道施工难点多、通风竖井施工难度大等诸多挑战，凭借创新施工工艺和安全管理措施得以成功保障工程安全顺利实施并如期通车。

图 1 坪盐通道马峦山隧道口

二、山区复杂地形路桥工程特点及安全风险分析

（一）山区复杂地形路桥工程特点

山区复杂地形路桥工程区别于平原地区工程，具有明显的特殊性和复杂性。首先，此类工程地形地质条件复杂多变，多穿越山体、跨越河谷，地质构造复杂，岩层破碎带、断层、溶洞、暗河等地质缺陷分布广泛，地质灾害易发多发；其次，施工技术难度高、专业性强，常需采用隧道穿越、桥梁跨越等方式克服地形障碍，涉及高边坡开挖、深基坑支护、特长隧道掘进、高墩大跨桥梁施工等高风险工艺，对技术和管理水平要求极高；第三，工程规模大、建设周期长、参建单位多，组织协调复杂，典型工程如坪盐通道马峦山隧道长达 7.9 公里，涉及诸多施工工序和专业交叉作业，安全管理难度大；第四，施工环境恶劣，山区气候变化大，易受雨水、高温、低温等自然因素影响，施工场地狭窄，作业空间受限，材料运输和设备安装困难；第五，安全风险点多面广，包括地质灾害风险、高处坠落风险、坍塌风险、设备事故风险、火灾爆炸风险等，风险类型多样，安全管理难度大。这些特点决定了山区复杂地形路桥工程安全管理的特殊性和重要性 [1]。

（二）山区复杂地形路桥工程安全风险分析

1. 地质灾害风险：不可预见性与破坏性并存

山区复杂地形路桥工程面临的首要安全风险是地质灾害风险，一方面山区地质条件复杂，存在断层、破碎带、岩溶等不良地质现象，施工过程可能诱发滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害。如图 2 所示。以坪盐通道马峦山隧道为例，全长约 7.9 公里，最大埋深 337 米，穿越 17 处断层，在施工过程中遭遇涌水等地质问题 [2]。地质灾害具有突发性和不可预见性，一旦发生，不仅威胁施工人员生命安全，还可能导致工程延期、成本增加等后果。另一方面季节性气候变化加剧地质灾害风险，特别是在雨季，降雨可能导致地下水位上升，引发边坡失稳、隧道突涌水等灾害。同时，山区地形高差大，排水系统不完善，极易形成汇水区域，增加工程区域水文地质安全风险。地质勘察信息不足也是一个重要因素，限于技术条件和勘察手段，前期地质勘察往往难以全面精确掌握地质情况，施工中常遇到〞勘察报告外〞的地质问题，给安全管理带来挑战。

图 2 山区复杂地形—滑坡

2. 施工工艺风险：技术复杂与作业危险交织

山区复杂地形路桥工程施工工艺风险主要体现于以下方面：特长隧道施工风险凸显，像马峦山隧道，其断面大、埋深大且长度长，施工时面临通风困难、供电电压压降、工效降低等状况，还有瓦斯、有害气体、突水等风险；山区桥梁因多需建高墩，如坪盐通道的互通立交桥，致使施工人员高空作业存在高处坠落风险，高空作业风险颇高；山区工程常开展爆破作业，像隧道开挖、边坡处理等，爆破中存在飞石、震动、粉尘等安全隐患，爆破施工有风险；特殊结构施工亦有风险，如坪盐通道工程的通风竖井，开挖直径达 17 米、深度 194 米，爆破开挖、出渣及二衬材料吊装均为重要风险源。

3. 环境条件风险：自然因素与人为影响双重压力

环境条件风险为山区复杂地形路桥工程带来自然因素与人为影响的双重压力，主要涵盖自然环境与施工环境两大方面。山区气象条件变化剧烈，极端天气频发，强降雨、雷电、高温等自然因素直接影响施工安全状况。雨季施工面临边坡失稳、基坑积水、隧道涌水等多重风险；雷电天气显著增加电气设备故障和爆破作业危险；高温环境则加剧工人中暑风险和材料自燃风险。施工环境风险首先体现为作业空间受限，山区地形狭窄使施工场地有限，人员、设备、材料高度集中，增加了相互干扰和事故发生概率。其次，山区道路条件普遍较差且运输距离长，材料和设备运输安全风险大幅提高[3]。

三、山区复杂地形路桥工程项目安全管理体系构建原则

构建山区复杂地形路桥工程项目安全管理体系需遵循科学性、系统性、适用性及前瞻性原则，以建立覆盖全生命周期、多层次、多维度的安全管理网络，首先应坚持全生命周期安全管理原则，于规划设计阶段、施工建设阶段直至运营维护阶段建立贯穿始终的安全管理机制来实现安全风险的早识别、早预防、早控制[4]；其次要坚持标准化与智能化相结合原则，一方面建立标准化的安全管理制度、流程及规范保障安全管理工作有章可循、有据可依，另一方面引入物联网、大数据、人工智能等先进的智能化技术手段提升安全监测、预警及管控能力[4]。第三，坚持风险管控与应急处置相结合原则，强化事前风险分级管控，建立健全风险识别、评估、分级和控制体系；同时完善应急预案和救援体系，提高突发事件应对能力。第四，坚持源头治理与过程控制相结合原则，从设计源头消除或降低安全风险，在施工过程中实施全方位、多层次的安全控制措施。第五，坚持主体责任与监督管理相结合原则，明确各参建单位安全责任，强化业主、监理、施工单位的安全主体责任，同时加强政府部门和社会的监督管理。此外，还应坚持经验总结与创新发展相结合，不断吸收国内外先进安全管理理念和技术，结合工程实际情况，创新安全管理方法和手段，持续提升安全管理水平，为山区复杂地形路桥工程建设提供坚实的安全保障。

四、山区复杂地形路桥工程项目安全管理体系构建策略

（一）构筑多维协同的安全组织保障体系

山区复杂地形路桥工程项目安全管理体系的构建首先需要着力于多维协同的安全组织保障体系的构筑，这种体系应当形成多层次立体化的安全管理网络，涵盖从业主单位到各参建单位的全方位合作机制，确保安全管理工作无死角无遗漏[5]。项目安全管理领导小组作为核心组织，由业主单位主导并纳入设计、监理、施工等各方负责人，定期召开协调会议解决重大安全问题，其中针对隧道装饰等特殊工程环节，需吸纳装饰设计单位、材料供应商及施工团队代表参与专项协调，确保透光砼装饰、照明系统优化等设计方案的安全可行性，如图 3、图 4 所示。项目还应建立完善的三级安全管理网络，从总部安全管理部门到专业分部再到施工队伍安全管理员，形成严密的安全管理链条。坪盐通道工程的马峦山隧道施工便采用了这种模式，设置专门的隧道安全管理小组进行 24 小时驻场监督。除常规架构外，专项安全技术支持团队的建立同样重要，通过聘请地质、隧道、桥梁、爆破等领域专家组成技术咨询委员会，对重大风险进行专业评估。全员安全责任制是这一体系的核心，通过层层签订责任书，明确各级人员职责，落实“管生产必须管安全”的原则，并将安全管理绩效与经济利益挂钩，激励各方重视安全工作。

图 3 隧道口景观设计

图 4 隧道照明灯带

（二）建立精准高效的安全风险分级管控机制

精准高效的安全风险分级管控机制作为山区复杂地形路桥工程安全管理体系的关键环节，需要采用系统工程方法对工程全过程、全要素进行风险辨识并形成风险清单，同时运用定性与定量相结合的评估方法确定风险等级，这些都是构建科学风险管控体系的基础工作。坪盐通道马峦山隧道施工中采用的超前钻孔与地质雷达预报技术便是精准识别地质风险的典型案例。风险分级分类管控是另一项重要措施，将安全风险分为四个等级并实施差异化管控，对重大风险如特长隧道施工实施特级管控，对较大风险如高空作业实施一级管控，而一般和低风险则由分部和班组负责常规管控。信息化手段的运用可建立动态风险管控平台，实现风险信息的实时更新与共享，如坪盐通道工程建立的隧道施工风险预警系统。重点部位、关键工序和特殊时段的风险管控尤为重要，对隧道掘进面等重点部位制定专项安全措施，对爆破等关键工序实施作业许可制，对雨季等特殊时段加强监测预警。风险管控闭环机制通过 PDCA 循环确保管控措施落实并持续优化，坪盐通道工程定期组织的风险管控措施评估就是很好的实践。

（三）打造数字赋能的智慧安全监管平台

数字赋能下智慧安全监管平台的建设，对于提升山区复杂地形路桥工程安全管理水平意义重大，应整合传感器监测、视频监控、人员定位等多种技术手段来构建全方位监测感知网络，以实现工程状态和环境参数的实时监测，为安全管理决策提供数据支撑；坪盐通道马峦山隧道施工中安装的围岩变形监测、地下水位监测及有害气体监测系统形成了完整立体监测网络；通过建立大数据分析和预警平台，使工程可深度挖掘监测数据，识别异常情况与潜在风险，并借助设定科学的预警阈值实现多级预警；智能化安全管理系统的开发涵盖安全检查、隐患管理、教育培训、应急管理等诸多模块，比如利用移动终端进行现场检查并形成隐患闭环管理，以及利用 VR/AR 技术开展沉浸式安全培训；BIM 技术、人工智能、无人机、物联网等先进技术的应用进一步提升了安全管理水平，坪盐通道工程应用的三维激光扫描技术更是将隧道变形监测精度提高到毫米级；协同联动机制的建立确保了智慧安全监管平台与各参建单位、政府部门及应急救援机构之间的信息共享与协同应对。

（四）完善科学高效的应急管理系统

科学高效的应急管理系统作为山区复杂地形路桥工程安全管理体系的重要保障，需要构建包含综合应急预案、专项应急预案和现场处置方案三个层次的多层次应急预案体系，这种体系能够从不同层面对突发事件的应对措施进行详细规定，确保各类事件有预案可循。坪盐通道工程针对马峦山隧道施工制定的突水、坍塌、火灾和有毒气体等多个专项应急预案就是很好的实践。专业化应急救援队伍的建立是应急管理系统的核心，这些队伍由安全管理人员、技术人员和施工骨干组成，配备专业救援装备并定期训练，坪盐通道工程成立的隧道专业救援队便配备了救援车辆、通信设备等专业装备。先进应急救援设备和物资的配置为应急处置提供了物质保障，马峦山隧道内每隔一定距离设置的应急物资点确保了紧急情况下救援物资的可及性。快速反应机制的建立包括明确的应急响应程序、分级响应机制和 24 小时应急值守制度，确保突发事件发生时能够第一时间响应。定期组织不同类型、不同规模的应急演练，对演练过程和效果进行评估并持续改进，是提高应急处置能力的有效途径，坪盐通道工程每季度组织的综合性应急演练和每月的专项演练便有效检验了应急预案的可行性。

结语

山区复杂地形路桥工程安全管理是一项系统工程，需要工程建设各方协同配合、持续创新。随着信息技术与工程技术融合发展，安全管理正向数字化、智能化、精准化方向演进。坪盐通道工程的成功实践表明，构建科学完善的安全管理体系，可有效应对山区复杂地形带来的多重安全挑战。未来应进一步加强新技术应用，深化风险预测预警研究，完善协同联动机制，推动安全管理标准化建设。

参考文献

[1] 王白玉．路桥工程造价成本的影响因素及控制对策研究 [J]. 交通建设与管理，2024，(05):171-173.

[2] 林水淼．城市路桥工程施工项目现场管理策略 [J]. 运输经理世界，2024，(29):106-108.

[3] 庞哲．试论路桥施工管理过程的创新管理 [J]. 四川建材，2024，50(10):215-216+219.

[4] 李朋飞．绿色环保理念下的路桥工程施工安全管理 [J]. 四川建材，2024，50(07):45-46+62.

[5] 任秀丽．路桥工程安全监理的难点与完善对策 [J]. 汽车周刊，2024，(07):161-163.

作者简介：高建秀，1989 年 12 月，女，汉族，山西省朔州市人，本科，工程师，研究方向：市政工程项目管理。