

Analysis of the measures to strengthen the safety management of tunnel construction

Yaozu Yang

CCCC No.5 Engineering Co., Ltd., Fuzhou, Fujian, 350026, China

Abstract

In view of the actual deviation of the safety technical scheme, the imperfect risk assessment and the inadequate surrounding rock monitoring, a new safety management optimization algorithm of tunnel construction is proposed. Through the establishment of "geology-design-construction" three-dimensional coordination mechanism, dynamic optimization of safety technology scheme, and the introduction of intelligent monitoring system, the problems of inaccurate construction risk identification and distorted monitoring data are solved. Based on the practical engineering application, the research results show that the algorithm can not only significantly reduce the construction risk, but also accurately control the surrounding rock deformation and improve the construction efficiency. For example, in the V surrounding rock section, the circulating footage is increased from 0.8m to 1.2m, and the overexcavation is controlled within 5cm. The results can be applied to the safety management of tunnel construction under complex geological conditions to provide theoretical support and practical guidance for similar projects.

Keywords

volcanic tunnel; construction safety management; measures

加强隧道施工安全管理的措施分析

杨耀祖

中交四航局第五工程有限公司, 中国·福建 福州 350026

摘要

针对火山隧道施工中安全技术方案与实际背离、风险评估不完善及围岩监控不到位等问题,提出了一种新的隧道施工安全管理优化算法。通过建立“地质-设计-施工”三维协同机制,动态优化安全技术方案,并引入智能化监控系统,解决了施工风险识别不准确、监控数据失真等问题。基于实际工程应用,研究结果表明,该算法不仅能够显著降低施工风险,还能够精准控制围岩变形,提高施工效率,如V级围岩段,循环进尺从0.8m提升至1.2m,超挖量控制在5cm以内。研究结果可应用于复杂地质条件下的隧道施工安全管理,为类似工程提供理论支持和实践指导。

关键词

火山隧道; 施工安全管理; 措施

1 引言

隧道工程作为现代交通基础设施建设的重要组成部分,其施工环境复杂、技术难度高、安全风险大,尤其是在地质条件复杂的区域,施工安全管理面临严峻挑战。近年来,随着我国基础设施建设的快速发展,隧道工程数量和规模不断扩大,但施工安全事故频发,暴露出安全管理中的诸多问题,如安全技术方案与实际施工条件脱节、风险评估机制不完善、围岩监控不到位以及施工人员安全意识薄弱等,这些问题严重影响了隧道施工的顺利进行和工程质量的保障。加强隧道施工安全管理不仅是保障工程顺利推进的关键,也是

实现安全生产目标的重要举措,通过科学的风险评估、动态优化施工方案、强化围岩监控以及提升施工人员安全意识,可以有效降低施工风险,提高施工效率和质量。本文以火山隧道为例,系统分析隧道施工安全管理中存在的问题,并提出针对性的优化措施,以期为类似工程提供理论支持和实践指导,推动隧道施工安全管理的持续改进与创新。

2 工程概况

火山隧道位于凉山州攀枝花市,地处复杂地形区域,相对高差达 510.1m,地形起伏显著,最大埋深为 466.9m,一般埋深为 300m。隧道分为左洞和右洞,右洞净空宽度为 11m,高度为 5m,全长 3675m,左洞结构与右洞类似,均采用端墙式洞门结构。隧道进出口曲线半径分别为 1800m、2000m (进口端) 和 1200m、1100m (出口端),洞口超高分别为 -2%、+2% (进口端) 和 +3%、-3% (出

【作者简介】杨耀祖 (1989-), 男, 中国江苏扬州人, 本科, 助理工程师, 从事聚焦于复杂施工场景下的系统性安全风险防控与技术创新研究。

口端)，测量线间距最大为 30m，最小为 23.81m，纵坡设计为 0.5%/2735m 和 -1.9%/4410m（左线），0.5%/2772m 和 -1.9%/4425m（右线）。火山隧道施工环境复杂，地形高差大、埋深较深，且进出口曲线半径和超高设计对施工精度提出了较高要求，纵坡设计对施工机械选型也提出了挑战，这些因素共同决定了隧道施工过程中安全管理的复杂性和重要性。为了确保工程施工的安全性，工作人员要针对地形、埋深、曲线半径及纵坡等特点，制定科学的安全管理措施，以应对潜在的地质风险、机械操作风险及施工组织风险。

3 隧道施工分析

3.1 隧道施工安全技术方案与实际背离

高速公路隧道施工流程复杂，施工前要进行隧道沿线现场踏勘，搜集地质、水文等资料，并辨识各类安全风险，这些前期工作是确保施工安全的基础，但若准备不充分，极易导致洞身开挖方法选择不当、一次性开挖进尺过大等问题。例如：在火山隧道施工中，由于地形起伏大、埋深较深，若未充分了解地质条件，可能选择不适合的开挖方法，如全断面开挖法在软弱围岩中应用，会引发塌方风险。此外，一次性开挖进尺过大可能导致围岩失稳，无形中增加施工难度和安全风险。为了解决上述问题，工作人员要在施工前进行详细的地质勘探和风险评估，制定科学合理的开挖方案，如采用分步开挖法或预留核心土法，根据围岩条件动态调整开挖进尺，促进了工程施工的安全性^[1]。

3.2 施工安全风险评估有待完善

在火山隧道施工中，安全风险评估及管理存在显著问题。一方面，安全风险评估工作停留在施工设计阶段，缺乏动态性和针对性，很多项目仅通过对上一个项目的风险评估报告进行简单修改，未能结合本隧道施工的实际情况，导致报告内容与实际风险脱节。这种形式化的评估报告主要用于应付检查，难以有效指导实际施工，严重限制了其应有的作用。例如：在火山隧道施工中，由于地形起伏大、地质条件复杂，若未进行详细的风险评估，可能导致施工过程中出现塌方、涌水等安全事故。另一方面，从事安全风险评估的工作人员技术能力不足，进一步降低了风险评估的准确性。部分人员缺乏专业知识，无法全面识别潜在风险，制定的风险管控措施存在漏洞，如在火山隧道施工中，若未充分考虑围岩稳定性、地下水分布等因素，造成制定出不符合实际的风险管控方案，无形中增加施工风险。

3.3 隧道围岩及周边监控测量不到位

在火山隧道施工中，围岩及周边监控测量是确保施工安全的关键环节，而在实际操作中监控量测方案不合理、点位布设不当、测量点间距和时间间隔无法满足要求等问题，显著增加施工风险。若监控量测点位布设过于稀疏或测量时间间隔过长，无法及时捕捉围岩变形或应力变化，从而错过最佳处理时机，引发塌方、涌水等安全事故。部分工作人员

因懒惰或责任心不足，伪造监控数据，特别是大变形监控数据未被及时发现，进一步加剧了施工风险。如在火山隧道施工中，若围岩大变形未被及时监测和处理，可能导致隧道结构失稳，甚至引发严重事故^[2]。

量测点被隧道施工机械设备破坏且未及时修复，也是影响监控测量结果的重要因素，在施工过程中若量测点因机械操作不慎被破坏，且未及时修复或重新布设，将导致监测数据缺失或失真。为解决这一问题，工作人员应优化监控量测方案，合理布设点位，缩短测量时间间隔，并加强工作人员的责任意识和技术培训，确保监控数据的真实性和准确性。同时，建立量测点保护机制，及时修复被破坏的点位，增强监测工作的连续性，显著降低施工风险，保障隧道工程安全顺利推进^[3]。

4 隧道施工安全管理优化措施

4.1 全面落实项目部安全风险分析及安全管理责任

安全管理体系重构。火山隧道项目安全管理需构建“决策层-执行层-操作层”三级联动机制，安全领导小组由项目经理任组长，配备注册安全工程师 2 名、地质超前预报专家 1 名，建立包含 23 项专项预案的《火山隧道安全管控手册》（参照《公路隧道施工技术规范》JTG/T 3660-2020）。实施全员安全责任矩阵管理，将 42 个关键工序分解为 178 项具体责任条目，通过智能安全帽实时追踪履职情况。每周组织“三维场景模拟+VR 实景体验”式安全培训，重点演练硫气喷发应急撤离程序，培训考核合格率须达 100% 方能上岗。建立“红黄牌”追责制度，对违规行为实施熔断机制，累计 3 次黄牌警告的班组需停工整改 72 小时。

风险动态辨识技术。采用 BIM+GIS 融合技术构建地质风险数字孪生体，通过 TSP303 超前地质预报系统与三维地应力反演实时更新风险数据库。针对火山角砾岩段开发 LEC 风险量化评价模型：将坍塌风险（ $L=0.5$ ）、岩爆风险（ $E=6$ ）、气体中毒风险（ $C=15$ ）组合计算得出 $D=45$ ，判定为 II 级风险。编制《四级风险管控清单》，明确 21 项强制性管控措施，如 V 级围岩段必须采用 $\Phi 25$ 自进式锚杆配合 $\Phi 8@150 \times 150\text{mm}$ 双层钢筋网，建立风险可视化预警平台，当监测到拱顶沉降速率超过 2mm/h 时自动触发声光报警，同步推送处置方案至现场智能终端^[4]。

爆破精准控制实践。针对 V 级围岩占比 33% 的工程特性，创新应用“数码电子雷管+水压爆破”组合技术，爆破设计参数动态调整，孔距从 0.6m 压缩至 0.4m，单孔装药量降至 0.35kg/m^3 ，段间时差增至 75ms。同时，实施三阶段控制法，钻孔阶段采用全站仪放样，装药阶段使用装药密度传感器，起爆后通过微震监测系统评估振动速度，控制值小于 2.5cm/s 。某标段实践表明，该技术使超挖量从 18cm 降至 5cm，循环进尺提升至 1.8m/次，围岩扰动深度减少 42%。同步建立爆破效果量化评价体系，将半孔率、裂缝发育指数

纳入班组绩效考核,实现质量安全双控目标^[5]。

4.2 编制施工安全技术方案,强化现场施工执行

一方面,施工安全技术方案动态优化。火山隧道施工安全技术方案编制需建立“地质-设计-施工”三维协同机制,项目初期组建由注册岩土工程师、隧道专业高级工程师及 BIM 建模师构成的技术团队,对设计图纸进行“三审三校”:初审围岩分级合理性,采用 Q 系统与 RMR 法双验证,二审支护参数匹配度锚杆长度误差小于 5%,三审施工缝预留科学性,错台量控制 $\leq 10\text{mm}$ 。针对 V 级围岩浅埋段,制定台阶法+预留核心土组合工法,设置 $\Phi 108$ 大管棚超前支护,注浆压力动态控制在 $0.8\text{--}1.2\text{MPa}$ 范围。开发基于三维地质模型的施工模拟系统,对全断面法施工的 III 级围岩段进行掌子面稳定性验算,实时优化爆破参数,孔距从 0.8m 调整至 0.6m 。技术交底采用 AR 可视化系统,将支护结构三维模型与实景叠加显示,确保作业人员精确掌握每根钢架的安装定位公差。

另一方面,机械化施工与智能监控融合。现场执行环节构建“人-机-环”智能管控体系,引进三臂凿岩台车实施精准钻孔,通过 MWD (Measurement While Drilling) 系统实时采集钻进速率、冲击压力等 16 项参数,自动生成岩体完整性指数。开发爆破参数自学习算法,根据掌子面岩体波速动态优化孔网参数, $\geq 3500\text{m/s}$ 时调整装药密度至 $0.45\text{kg}/\text{m}^3$,电子雷管起爆时差精度达 0.1ms 级。安全步距管控采用 UWB 定位技术,实时监测开挖与二衬作业面间距,阈值设定为 V 级围岩 70m 、IV 级围岩 90m ,超限时自动切断台车电源。某火山隧道工程应用该体系后,V 级围岩段循环进尺从 0.8m 提升至 1.2m ,超挖量控制在 5cm 以内,喷射混凝土回弹率降至 15% 以下。同步建立施工质量追溯系统,将每循环的钻孔轨迹、支护应力等 300 余项参数加密上链,实现全生命周期数据可溯^[6]。

4.3 强化隧道围岩监控测量管理水平

火山隧道围岩监控实施“第三方+自检”双轨制监测体系,构建全生命周期数据溯源链。第三方监测单位须具备 CMA 资质,采用 Leica TS60 高精度全站仪布设三维变形监测网,基线长度 $\leq 200\text{m}$,在 V 级围岩段按 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 网格加密监测点。项目部自检团队同步采用 Trimble S7 全站仪进行独立复测,数据经 BQ-ADMS 系统比对,差异值超过允许误差时启动三级复核程序,水平位移 $\pm 3\text{mm}$,沉降 $\pm 2\text{mm}$ 。建立监测数据区块链存证平台,每日 18 时前上传原始观测记录,形成不可篡改的电子档案链。开发围岩变形速率-时间(V-T)耦合分析模型,设定三级响应阈值:当变形速率 $> 5\text{mm}/\text{d}$ 时,触发红色预警,系统自动冻结施工

许可审批流程,启动应急支护决策树——优先采用 I18 临时钢支撑配合 $\Phi 32$ 自进式锚杆实施补强,长度 4m ,注浆压力 1.5MPa 。在 $1\text{--}5\text{mm}/\text{d}$ 黄色预警区间,启用三维激光扫描仪,扫描频率 1 次/4h,捕捉围岩裂隙扩展特征,结合无人机热成像检测地表渗水异常。某工程案例显示,V 级围岩段实施该机制后,最大变形速率从 $7.2\text{mm}/\text{d}$ 降至 $0.8\text{mm}/\text{d}$,初支混凝土开裂率降低 62%^[7]。

建立监测-设计-施工数据闭环系统,将变形数据反馈至 FLAC3D 数值模型,采用 Hoek-Brown 准则,动态修正支护参数。当变形速率 $< 1\text{mm}/\text{d}$ 达持续 5 个监测周期时,启动支护优化程序:如将系统锚杆长度从 3m 调至 2.5m ,喷射混凝土厚度从 28cm 减至 25cm 。开发智能预警推送平台,当拱顶沉降累计值超过预留变形量的 80% 时,自动生成支护增强方案,PDFI 指数 > 2.5 需增设格栅钢架。该体系在某火山隧道应用中,减少临时支护材料用量 23%,缩短工期 15 天,监测数据与设计模型吻合度提升至 92%^[8]。

5 结语

综上所述,本文以火山隧道为例,系统分析了隧道施工安全管理中存在的 key 问题,包括安全技术方案与实际施工条件脱节、风险评估机制不完善以及围岩监控测量不到位等。针对这些问题,提出了基于三维协同机制和智能化监控系统的安全管理优化算法,通过动态优化施工方案、强化风险评估和围岩监控,显著提升了施工安全性和效率。研究结果表明,该算法在复杂地质条件下具有较高的适用性和有效性,能够有效降低施工风险,保障工程顺利推进。

参考文献

- [1] 刘标永,彭世康,李冠霖. 隧道施工安全管理智能装备关键技术研究与应用[J]. 装备制造技术,2024(8):121-124.
- [2] 郑孟林. 加强公路隧道施工安全管理的具体措施分析[J]. 散装水泥,2024(6):158-160.
- [3] 王虎良,武玉清. 岩溶、岩堆体山岭公路隧道施工安全管理研究[J]. 工程设计与设计,2024(1):229-231.
- [4] 杨明华. 基于风险的不良地质铁路山岭隧道施工安全管理研究[J]. 现代城市轨道交通,2024(1):101-105.
- [5] 杨刚. 岩溶地段隧道施工安全管理关键措施研究[J]. 价值工程,2022,41(32):28-30.
- [6] 张天林. 小断面输水隧道施工安全管理存在不足点及对策[J]. 甘肃科技,2021,37(3):86-87,62.
- [7] 张梓怡. 矿建工程隧道施工安全管理及风险控制策略研究[J]. 中国房地产业,2024(34):202-205.
- [8] 梁鹏. 铁路隧道施工安全管理及风险预警技术应用研究[J]. 城镇建设,2024(12):136-138.