

高海拔复杂地质深长隧洞施工安全与风险智能预控方法

杨杉杉

青矩工程顾问有限公司西藏分公司，西藏拉萨，850000；

摘要：在国家基础设施建设不断深入的背景下，高海拔地区渐渐成为交通、水利和能源领域重大工程的主要实施区域。这些重点项目的重要部分就是深长隧洞，深长隧洞的建设规模和技术复杂度正在快速增大。高海拔环境下特有的低氧浓度、低气压状况以及高地应力这些不利地质条件，三者互相影响，一起加大了施工期间的安全风险。传统的风险管理手段在极端情况下无能为力，近几年由于防护措施不当造成的安全事故频繁发生，造成巨大的经济损失，而且严重威胁到作业人员的生命安全。在这种情况下，探究适合于高海拔复杂地质条件的深长隧洞智能化安全预警和动态控制技术就显得十分必要，它既有着重大的学术研究价值，又符合实际的应用要求。

关键词：高海拔复杂地质；深长隧洞；施工安全；风险智能预控

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.070

引言

深长隧洞工程是高海拔地区基础设施建设的重要环节，施工安全对整个项目的进度、质量起着决定性的作用，而且也关系到参与施工人员的生命和财产安全。传统的依靠人工巡检和经验决策的方式，在面对复杂的地质情况以及恶劣的自然环境的时候，存在着很多的缺陷，主要表现在信息传递的速度慢、准确率低、系统化处理能力差等各方面。在低氧环境下人体生理机能和工作效率都会下降，设备的运行稳定性也会受到影响，低压环境会增加岩爆等灾害发生的几率。高地应力分布、断层发育、突发性地质事件（涌水突泥）等又加大了施工过程中不确定性和危险性。近些年来有关研究显示，单个监测指标的滞后性已经成了高海拔深长隧洞安全生产的主要瓶颈之一。根据“智慧建造”的思想，把人工智能、物联网技术和大数据分析平台结合起来，创建一个以实时传感为依托、智能算法为支撑、预警预测为主要功能的施工安全风险控制体系，成为解决这类工程施工安全问题的有效途径。

1 高海拔复杂地质深长隧洞施工安全与风险管理的紧迫性

目前我国青藏高原、横断山脉等高海拔地区深长隧洞建设规模明显增大。这些地区普遍存在着地质条件复杂、工程量大、埋深大、地热效应强、承压水多等众多的技术难题。传统的以人工巡查、经验判断为主的管理模式，在应对施工过程中不断变化并且具有高度不确定性风险的时候，就表现出明显的不足。由于高海拔环境恶劣的自然条件给参建人员健康带来了严重的影响，进而影响到作业效率和安全保障水平，造成工期延误、安

全风险增大等问题越来越严重。极端地质环境下的各种自然灾害具有突发性、隐蔽性的特点，现有的监测手段在感知范围、信息采集速度、预警响应速度等各方面都存在着明显的不足，不能及时发现潜在的隐患并采取相应的干预措施。近些年来，由于缺少有效的风险防控体系，高海拔地区深长隧洞工程频频出现安全事故，造成严重的经济损失和社会影响。水电站引水隧洞发生岩爆事件、高原铁路隧道出现突水突泥险情等，都属于典型的岩爆和突水突泥险情。由此可以看出，传统的风险管理方式已经不能满足现代工程建设的需求，必须创建起以信息化、智能化为理念的技术体系，达到全方位的动态监测和精细化预测分析的目的。伴随着国家“新基建”战略的推进以及智慧城市创建理念的推行，未来此类工程的安全管理水平会慢慢改善，集多种数据融合分析并具备智能决策支撑的新型综合型风险管控平台的研发，将会成为推动行业发展的关键方向和必然走向。

2 高海拔复杂地质深长隧洞施工安全与风险特点分析

2.1 地质条件复杂性

高海拔地区修建深长隧洞工程时会遇到很多地质难题，地质问题的主要表现形式有如下几项。应力大，该地区由于地壳板块之间强烈的相互作用而产生巨大的主应力，造成岩体内部承受很大的压力。在这样的环境下，周围岩石容易产生突然的岩爆现象，伴随着大量的能量释放，不仅会破坏支护结构，还会给施工人员带来严重的危险，软岩大变形问题也比较明显，表现为围岩长时间的不稳定下沉和位移，对衬砌设计提出更高的要求，并且需要采取精细化的动态施工管理措施。二、

频繁的和复杂的构造活动。研究区有大量大小不等的正断层及有关破碎带,还有强烈的褶皱变形和大量的节理。这些地质单元稳定性差,容易引起局部或者大面积的岩土体失稳灾害,还会形成有效的地下水导流系统,从而造成突发性的突水突泥事故;复杂的节理结构又使岩石整体强度和剪切性能降低,在隧道开挖时大大增加了围岩稳定性的控制难度。三、多种不良地质体的空间共存。除了典型的断裂破碎带之外,还要考虑到高地温效应、岩溶地貌、煤层气体等各方面的影响。高地温明显加大了作业环境的恶劣程度,不但影响机械设备工作效率,而且危害施工人员健康;岩溶所形成洞穴体系、地下河网系统大大增加了潜在水害风险水平,也缩减了线路规划的空间范围;煤层气或者天然气存在,就直接造成矿井火灾、爆炸的安全隐患,给整个工程项目的安全性带来重大威胁。以上问题一起形成了高海拔地区深长隧道建设所遭遇的主要技术难题之一。

2.2 高海拔环境特殊性

高海拔地区施工的特殊性,就是指极端自然环境给人力资源配置、机械设备性能和技术方案执行带来的复杂影响。该区的主要特点就是低氧环境,海拔3000米以上时大气压强明显减小,氧气含量比平原地区低很多(大约为60%-70%)。它既给作业人员的生命安全和健康带来危险,又极大地降低劳动效率和操作失误率,并且还要花费更多的资源来保证防护措施的有效性,从而大大增加项目的成本。低气压条件下也需考虑,它改变介质的物理性质(水的沸点等),影响混凝土养护等主要工艺过程质量的稳定,增大设备由于内外压差异常而出现泄露的可能性,加大能耗的需求。

2.3 施工过程风险多样性

在高海拔复杂的地质条件下,深长隧洞施工风险是多样的、复合的、动态变化的。该种情况是由地质性质、极端天气状况和高强度的工程建设三者之间互相影响所造成的。根据风险分类,主要包含地质稳定性问题、技术难题挑战、人员安全保障需求、设备运行故障、管理体系薄弱等各方面。地质灾害防控中岩爆、围岩大规模变形比较突出,热害、突发性溶洞突水等特殊隐患也存在,技术层面风险主要表现在钻爆参数设计不合理(穿越断层破碎带时),造成掌子面局部坍塌的安全隐患上;健康影响主要是低氧环境对作业人员生理机能的影响,加重了传统隧道施工的隐患;设备性能受高海拔低气压环境影响,使内燃动力系统和电气设施可靠性降低,特种机械操作风险增大;管理协调难度增大,在多

工区协同作业时容易出现资源配置矛盾、协作效率降低等问题。风险要素之间存在着复杂的关系,事件发生的可能性增加、后果更严重。

3 高海拔复杂地质深长隧洞施工安全与风险智能预控方法

3.1 多源异构信息智能感知与融合技术

高海拔复杂的地质环境里开展深长隧道工程,因为工程的独特之处和可能存在的安全风险,急需创建起多层次、多维度的信息采集和监测体系。该体系应当具备全域覆盖、高精度测量、动态实时更新等要求,把各种先进的传感技术有机地结合在一起来满足复杂的地下环境条件。地质超前预报环节可以利用TSP技术、电磁波雷达检测、超前钻孔取芯等多种方式来准确地对掌子面前方可能出现的不良地质体分布、岩石力学性质变化、潜在灾害源的位置进行预测。施工期间还要重点对核心参数进行持续监测,即围岩应力应变状况、支护体系受力状况、掌子面地下水流量及压力水平、洞室内部空气质量(温度、湿度、含氧量、粉尘浓度、其他有毒有害气体成分)以及大型机械设备工作性能指标(掘进机推进速度、运输车辆载重状态等)。由于高海拔地区通信基础设施建设比较薄弱,所以应该采取有线加无线的方式,使用边缘计算技术来提高数据处理速度和传输的可靠性。

3.2 基于深度学习的动态风险评估与智能预警模型构建

依靠多源异构信息的智能感知和深度融合技术,创建起动态风险评价体系和智能化预警模型,就成了达成高海拔地区隧道工程风险精准掌控的关键所在。该模型要具有处理大量、多种类数据的功能,还要考虑到地质环境的复杂情况,准确找出施工期间存在的安全隐患并及时进行监测。对不同的灾害类型(岩爆、突水突泥等)开展风险管理时,要开发对应的评价模块,岩爆风险采用深度学习算法将融合数据解析出来,定量预估其出现的概率和影响范围,涌水突泥事件利用关键参数来创建预测模型,预测突发事件的发展趋向及其严重程度。在此基础上,对各个风险因素之间相互作用的关系以及随着时间推移而变化的规律进行综合分析,从而对整个生命周期的风险管理进行改进。采用多层次混合评价法将各种指标进行整合,从各方面综合评价项目的安全状况。在预警系统创建过程中加入注意力机制以及知识图谱技术,突出重点问题和薄弱环节,依靠历史案例数据库以及专业人员的经验来加强预测结论的可信度和实用

性,进而给科学决策赋予有力支撑。

3.3 基于风险智能预控的协同决策与动态调控机制构建

动态风险评估体系同智能预警技术相融合,给达成跨领域协同治理以及全流程风险控制赋予了新的解决办法。该框架依靠智能化综合管控平台把信息集成、预案制定、数据分析、实时监测等重要部分整合在一起,形成了完整的闭环管理结构。在预警环节,创建起高效的信息传递和分级响应机制,当风险检测模型发出警报的时候,系统依照事先设定好的规则自动判定事件的严重程度,再用多种方式(短信、邮件或者移动端推送)把重要的信息直接送到相关责任人手中。并且用可视化工具准确显示风险的空间分布情况,给决策者提供实时的危机变化趋势跟踪。对复杂的场景,根据专家知识库和历史案例数据库来产生初步的处置方案,支持交互式的优化来达到最佳执行路径的设计目的。在施工现场监控上,采用反馈调节的方式,即对操作指令的落实情况进行实时跟踪,一旦出现偏差或者没有完成任务的情况就会立刻启动应急响应程序,重新激活上述流程节点,保证整个作业流程的安全稳定。本设计重视多方协作效率,在重大突发事件(自然灾害救援等)中依靠统一指挥系统来整合资源并达成快速联动,从而明显改善了整个应急响应水平。

3.4 施工安全与风险智能预控系统的集成与应用验证

为了达到多源异构数据高效融合、动态风险评价、智能预警等功能目的,促进协同决策、实时控制等关键技术的应用和发展,急需做系统的综合研究和实践验证工作。从技术架构上讲要创建统一的多功能集成平台,打通感知层、传输层、存储层到应用层的数据通道,用模块化的设计思想,依靠标准化的接口实现各个模块之间的无缝衔接和协同工作。所选的硬件设备要达到工业级标准,具有较好的环境适应能力和可靠性,根据工程实际情况来制订科学合理的部署方案,从而保证数据采集的准确性以及系统长久稳定的运行。软件开发时主要对算法优化改进和用户交互界面友好性进行设计,使用户可以快速获得关键参数并作出合理的判断。在实际应

用时,选取典型的高海拔复杂地质条件下隧道工程为实验对象,对系统适用范围及执行效果进行全方位的评价。具体步骤有部署多种传感器网络,准确测量地表位移、地下水动态等各项指标,用高性能计算资源对海量原始数据进行预处理、特征提取和关联分析,根据潜在的安全风险等级制定出相应的应对措施,并且用虚拟仿真实验来验证其有效性。研究成果可以明显改善相关行业运行效率和安全保障水平,在同类项目建设过程中起到示范引领作用,并且为技术发展提供支持。

4 结语

研究高海拔复杂地质条件下深长隧道施工安全的关键问题,对高海拔复杂地质条件下深长隧道施工安全存在的突出问题和潜在风险提出以智能化为特征的风险控制技术体系。该体系包含多源异构数据整合和处理、深度学习驱动的风险评估和预警模型创建、协同决策体系设计以及实时控制策略制定等诸多部分,依靠系统集成达成工程实践检验的目的。技术路线把人工智能、物联网、大数据分析这些前沿信息技术融合起来,冲破了传统安全管理办法的束缚,达成对复杂地质条件施工全过程的全面监测,准确预警并快速处置。研究成果给提升这类重大基础设施建设项目安全管理水平赋予了理论根基和技术支撑,而且推动了“智慧建造”理念在地下空间开发方面的革新发展。

参考文献

- [1] 张社荣,尚超,王超. 基于 IAHP 扩展 TOPSIS 法引水隧洞实时风险识别[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 15-20.
- [2] 李强,李子阳,许林军,等. 引水隧洞盾构法施工风险源辨识与分析[J]. 人民黄河, 2023, 45(4): 121-125.
- [3] 郭新强. 超特长深埋引水隧洞安全管理风险与对策[J]. 人民黄河, 2023, 45(增刊 2): 146-147.
- [4] 郝俊锁. 复杂地质特长深埋水工隧洞智能化施工关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 188-196.
- [5] 汪小明. 浅谈婺源清华水电站引水隧洞加固及压力管道工程施工[J]. 陕西水利, 2020(4): 174-176.