

## 隧道工程地质风险识别与超前预报技术研究

覃自龙

武汉科铁人才发展有限公司, 湖北 武汉 430000

**[摘要]**隧道工程地质灾害由复杂地质条件引发, 突水突泥、塌方、岩爆等地质问题, 会对隧道施工安全与工期造成严重威胁。文章对隧道工程地质风险辨识理论和技术进行系统的梳理总结, 建立风险源分类体系以及风险源评估指标体系, 详细阐述了隧道断层破碎带、富水地层、岩爆、溶洞和软岩大变形等五大常见隧道地质风险发生的原因以及辨别特点。同时结合隧道地质超前预报技术体系的构建原则与组合方式, 对基于大数据的风险预警模型及信息化管理系统开展了探索性研究。研究成果显示多源信息集成的风险辨识方式以及联合超前预报技术体系是提高隧道工程地质灾害防范水平的有效途径, 可以为同类工程项目提供理论借鉴和技术指导。

**[关键词]**隧道工程; 地质风险识别; 超前预报

DOI: 10.33142/ec.v9i5.19660

中图分类号: U459.1

文献标识码: A

## Research on Geological Risk Identification and Advanced Forecasting Technology for Tunnel Engineering

QIN Zilong

Wuhan Ketic Talent Development Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

**Abstract:** Geological hazards in tunnel engineering are caused by complex geological conditions, such as sudden water and mud, landslides, rock bursts, etc., which can pose a serious threat to the safety and construction period of tunnel construction. The article systematically summarizes the theory and technology of geological risk identification in tunnel engineering, establishes a risk source classification system and a risk source assessment index system, and elaborates in detail on the causes and identification characteristics of five common geological risks in tunnels, including fault fracture zones, water rich strata, rock bursts, caves, and large deformations in soft rocks. At the same time, exploratory research was conducted on the risk warning model and information management system based on big data, combining the principles and combination methods of tunnel geological advance prediction technology system construction. The research results show that the risk identification method of multi-source information integration and the joint advance prediction technology system are effective ways to improve the level of geological disaster prevention in tunnel engineering, which can provide theoretical reference and technical guidance for similar engineering projects.

**Keywords:** tunnel engineering; geological risk identification; advanced forecast

### 引言

中国已经成为世界上修建隧道最多、最难的国家, 在2024年底时已经开通运营铁路隧道18997座、总长24246km; 公路隧道28724处、总长3259.66万延米, 2025年, 我国隧道建设再获突破, 总里程已超5万km, 居世界首位。随着交通路网进入深山峡谷, 隧道工程地质条件越来越恶劣, 断层破碎带、富水地层、高地应力等不良地质体造成的开挖风险越来越大。在进行隧道施工的过程中地质灾害发生的最主要原因是对方地质状况了解不够清楚。121起TBM卡机事故统计显示, 塌方、大面积变

形引发的事故占比最高, 分别为44%、30%, 突水突泥引发的卡机事故占16%。因此, 制定合理的地质灾害监测方式及先进的预报手段对保证隧道开挖的安全有着重要的意义。本文以地质灾害监测理论为基础, 对典型的地质灾害发生成因以及监测指标进行详细的解析, 搭建超前地质预报技术体系, 研究风险预警和信息化管理模式, 希望能给隧道工程地质灾害防治工作提供全面的技术支持。

### 1 隧道工程地质风险识别理论与方法

#### 1.1 风险源分类与识别流程构建

隧道工程地质危害因素泛指有可能导致地质灾害产

生的地质环境以及地质体。按地质成因和工程反应特性不同可以分为三大类,即:构造破碎类危害因素(断层、褶皱轴尖及节理密集带)、水系类危害因素(富水地层、导水构造、岩溶管道)、应力作用类危害因素(高地应力区、软岩地层),并补充考虑物理化学侵蚀与环境因素(膨胀性岩、有害气体如瓦斯、采空区、岩溶环境等)。三类危害因素常相互交织、相互转化,例如断层破碎带既属于构造破碎类危害因素,又是地下水运移通道,易引发突水突泥灾害,这类复合性危害因素的识别与评估是工程实施的核心难题。隧道不良地质识别的方法经历了由单一到多源信息融合的过程,在隧道施工对不良地质识别精确度需求越来越高的同时,人工智能的发展使得对不良地质进行多源信息融合实现智能化识别成为新的趋势。因此,在这样的情况下建立合理规范的风险辨识流程就显得很有必要了,风险辨识流程需遵循“由大到小、由粗到细”的原则构建。首先开展隧址区的工程地质调查和地质分析来确定可能存在不良地质的种类以及大概的分布情况;其次用地球物探的方法来对靶区进行找寻并圈定出可疑区段;最后通过超前钻探、超前导坑、检测测试等手段对可疑区段进行核实和完善。各阶段需制定配套的质量检测指标与信息反馈机制,确保各环节检测结论的连续性与统一性。其过程也是远距离探测与近距离探测相结合及物探与钻探相结合的综合识别思路的体现。

## 1.2 风险分级评价指标体系建立

风险分级评价是隧道工程风险管理量化的前提。评价指标设计需满足科学合理、整体性强、易于实施的要求,据此从地质因素、工程反应、环境效应三方面构建指标体系。其中关于地质因素指标主要由围岩级别、断层破碎带宽度以及地下水丰富程度和地应力大小等量化指标构成;工程反应指标主要是指掌子面稳定程度、渗漏情况以及微震记录等施工中的动态指标;而环境效应指标主要包括地表变形、地下水位变动等周围环境的反应。此外,风险分级评价还应综合考虑风险事件发生的概率、风险事件发生后果的严重程度,以及隧道施工开挖工法的影响,形成更为全面的综合评价体系。在长期数据预报与开挖验证的基础上,可构建地质调查法、物理勘探法(地震波反射法、电磁波反射法等)、掌子面超前钻探法、监测测试法相结合的综合解析方法,从而达到对多种信息进行共同解析的目的。风险度分级一般分为四个级别:低风险(可以忽视)、中风险(需要警觉)、高风险(应该防范)、极高风险(必须停工)。不同级别有相应的报警界限、处理方式,作为施工方案选择参考。

## 2 隧道施工典型地质风险分析

### 2.1 不良地质体(断层、破碎带)风险

断层破碎是隧道工程施工中经常出现的一种不良地质体,在这种环境条件下施工,由于岩石破碎,裂隙发育使得围岩稳定性较差。当隧道掘进暴露断层破碎体后容易造成掉块、崩塌,甚至发生较大范围的坍塌以及对TBM施工隧道造成刀盘卡机、盾构卡机等危害。数据显示因断层破碎体导致隧道施工出现坍塌和卡机事件占隧道工程地质灾害总量的较高比例,成为影响施工安全及进度的重要障碍。隧道内断层破碎体属于高风险类不良地质体,如何在施工过程中准确发现一直是隧道超前地质预测预报的难点所在。对于这个问题,综合运用弹性波反射法(长距离预报,发现可疑断层的范围,为后续确定提供先导条件)、地质雷达法(短距离预报,进一步确定可疑断层的范围)、瞬变电磁法(断层破碎带往往富水,适用于富水地段预报)以及超前钻探(通过钻探进尺速度、芯样或孔内成像直观观测断层,并可测量水压、提前导排部分断层水)进行分层探测,可以大大提高对断层破碎带位置及范围判定的准确性。对断层破碎带的认识要着重考虑断层产状和隧道轴线的交角大小、断层破碎带的宽度大小以及充填物成分还有地下水情况等要素。

表1 断层破碎带地质风险识别特征表

识别维度	主要特征	风险等级判定依据
地质构造	断层角砾岩、糜棱岩发育,岩体呈碎裂-散体结构	破碎带宽度>3m为高风险
地下水	断层导水性强,掌子面渗水-淋水状	出水流量>100m <sup>3</sup> /d为极高风险
施工响应	掘进速度骤降、岩渣呈碎块-粉末状、TBM推力异常	推力波动>30%为预警阈值
地球物理特征	地震波速显著降低、雷达反射信号杂乱	波速降低>30%需重点防范

### 2.2 富水地层与突水突泥风险

富水岩层主要有断层富水带、溶洞含水层、裂隙含水层以及松散孔隙含水层等几种结构,突水突泥事故的发生需同时满足水源供给、导水条件、能量来源三个条件,三者缺一不可、相互关联、相互制约。造成突水突泥的构造主要可以分为三大类共十一小种,其中有管道状、裂隙状和溶蚀裂隙状等。而在具体的工程项目当中,管道状的导水构造一般来讲都是比较突然而且水量大的,也是最难提前精准定位的一种情况。突水突泥隐患的判定应用瞬变电磁法、激发极化法等对地下水敏感的物探手段。其中瞬变电磁法对于低阻水体有很高的灵敏度,可以对富水构造进行快速查找;而激发极化的使用能查找出前方含水段的位

置和水量大小,通过判断二次电位衰减的情况可以得出含水层面积以及富水程度等。但激发极化法受施工电磁干扰严重,且在高阻地层中探测精度受限,因此需与瞬变电磁法联合使用,优势互补,提升富水构造检测的准确性与可靠性。除了上述方法以外,掌子面涌水量大小、水温变化、水化学成分等等都是很好的现场判断的参考因素。

### 2.3 岩爆与围岩失稳风险

岩爆是高应力区硬脆围岩中频发的动力破坏现象,本质是开挖卸荷导致围岩瞬间释放弹性变形能,引发岩体突发失稳破坏;岩爆具有显著的滞后性与突发性,常在爆破后数分钟至数十分钟发生,严重威胁现场施工人员安全。岩爆强度分为轻、中、重三种类型:轻度表现为少量岩石碎片掉落;中度表现为大块岩石飞出;重度表现为岩石剧烈飞溅。岩爆强度等级的不同对支护结构的要求也不同,轻度岩爆可以考虑挂网喷混凝土支护方式,而重度岩爆则必须采取设置吸能型锚杆及钢纤维喷混凝土等卸压支护形式。长大深埋隧道处于高应力、高温、高压复杂的高能量环境之中,对超前地质预报的精度以及反馈的速度要求极高。微震监测法可以进行实时的岩爆监控以及短期的提前告知。通过对微震事件空间分布密度以及能量释放率来判定发生岩爆的概率和大概方位。岩爆风险判别需要着重关注以下几个方面:埋深、岩石单轴抗压强度、地应力测量值、弹性应变能指数等参数,当围岩强度应力比低于4时容易出现岩爆现象。

### 2.4 溶洞及喀斯特地质风险

岩溶发育地区隧道开挖过程中具有溶洞坍塌以及突涌水两种危险性。溶洞发育程度受到岩石性质、结构面及地下水动力作用的影响,可分为大空洞型、充填型、管道流型三大类。地质雷达适合检测浅层溶洞,可达到厘米级别的精度;但是对于深层大的溶蚀带来说采用地震波法更合适。

### 2.5 软弱围岩大变形风险

软弱围岩大变形主要发生于软质岩、膨胀岩及高地应力区破碎岩体中,变形形式包括塑性流变、剪切滑动、膨胀软化。在进行大变形的风险评估时,要充分考虑围岩强度、地应力大小、支护强度、岩石的膨胀性、地下水作用以及施工开挖工法等多个重要因素的影响。塌陷与大变形是导致TBM卡机的两种主要的致灾方式,分别占到了44%、30%的比例。

## 3 超前地质预报技术体系构建

### 3.1 超前预报技术组合应用原则

超前地质勘探技术要符合有针对性、互为补充、经济

合理的原则。有针对性即是对于不同的岩土体采取相应的最合适的技术方法,互为补充就是多种方式相互配合取长补短解决单个技术难以解决的问题,经济合理就是在保证精度的基础上节约开支。集成式超前探查是目前的研究方向之一,集地面物探、地质雷达、TSP等超前探测技术为一体,在系统论基础上提出综合式的地质预探理论和技术思路。长短并用就是综合采用的主要方法:长程预报(地震波法,100~150m)用来掌握大构造骨架;中程预报(地质雷达,30~50m)用来锁定疑似目标区;近距离预报(超前钻进,15~30m)用来精确校核。

### 3.2 超前预报流程与技术体系构建

标准的超前预报工序有四步:地质准备阶段(获取本地区地质信息、进行地面勘查)、远距离勘探阶段(通过地震波方法确定异常区域)、近距离勘探阶段(使用地质雷达、瞬变电磁法进行准确定位点)以及核实阶段(进行超前钻探核实)。各环节需建立信息传递与修正机制,前一阶段预报结论为后一阶段探测方法选择提供依据,形成环环相扣、层层递进的预报体系。对于超高长隧洞施工来说,可以建立全面覆盖所有不良地质体的预报体系,也就是115超前地质预报系统,由1km千米级宏观地质预报、100m百米级远距离地质预报、50m十米级近距地质探测预报三个层面对应而成<sup>[1]</sup>。对于千米级的大范围预报方面,在区域地质资料及地质图的基础上利用遥感影像解译的方法大致找出区域性的主要断裂以及大型构造带的位置;而在百米级远距离预报层面上主要是以TSP、TGP等地震波探测手段为主,圈定掌子面前方约100~150m处的地质异常体边界,在十米级的详查方面主要是采取地质雷达、瞬变电磁法以及超前钻孔综合探测手段达到对异常目标区精确定位并对其性质特征做出判断的目的。这种层层深入式的预报框架很好地解决了长大隧道掘进过程中由于距离较远不良地质无法全部查明的问题,通过对多种信息来源的综合反演计算可以对掌子面前方的不良地质以及可能诱发的地质灾害类型作出预测预报。工程应用证明了这项技术系统能够很好地应用于断层破碎带探测,富水区探测以及岩溶探查上,其预测精度大大提升。

## 4 地质风险预警与信息化管理

### 4.1 基于大数据的风险预警模型

随着隧道施工数据的日渐丰富,利用大数据分析建立的风险预估模型日益受到重视。风险预警模型构建需历经数据采集、数据分析、模型搭建、结果输出等流程。其中输入变量有地质条件(围岩级别、断层发育程度、地下水状况)、施工因素(推进速率、推力大小、扭矩强度、贯

入深度等)<sup>[2]</sup>。根据全液压钻机现场获取的重要地质信息(钻压、扭矩、钻速)用支持向量机对这些信息实施处理与分类,以形成地质风险预估模型。人工神经网络也被用于超前地质预报资料的综合分析,在大量的工程实例的学习下建立起多元信息与不良地质类型的非线性对应关系。在三维雷达超前地质预报的基础上,结合实时综合超前预报技术,可以得到穿越断层隧道地质灾害的判定指标及判定标准。

#### 4.2 信息化平台构建与应用

信息化管理系统是开展地质风险全生命周期管理不可或缺的手段,在地质管理方面应该具有采集传送信息、数据可视化展现、风险自动化判断及报警等功能<sup>[3]</sup>。隧道超前地质预报系统可以对地质预报的数据进行上云存储及共享,同时能被手机、电脑等多种设备浏览查阅,方便各参与单位随时了解地质风险动态情况,系统的搭建要以统一标准接口、分块建设、灵活扩容的方式为主,方便各个项目的相互参照借鉴。运用信息化管理系统可以逐渐形成隧道工程地质风险知识库,为今后的工作进行智能危险源辨识积累素材。

#### 5 结语

隧道工程地质风险辨识以及超前预报是保证施工安全的重要技术手段。本文详细总结了风险辨识的相关理论

和技术,构建了包括风险源划分、辨识程序及等级评估在内的风险辨识技术体系;剖析了五种常见的地质灾害的风险成因及其辨识特点,指出了各类型的风险辨识重点;提出了一种结合多种超前预报技术的联合应用策略以及多层次的超前预报方式;研究了大数据背景下的信息化风险管理模式。应用多源信息集成辨识技术与逐级递进式综合超前预报系统,可有效提升隧道工程地质风险防控能力。随着人工智能技术的发展,基于多源信息融合的不良地质智能识别成为主流趋势,隧道地质风险识别将向高精度、智能化方向持续迈进。

#### [参考文献]

- [1]许振浩,邵瑞琦,林鹏,等.隧道不良地质识别:方法、现状及智能化发展方向[J].地球学报,2024,45(1):5-24.
- [2]杨国强.隧道断层破碎带三维综合超前预报应用研究[J].公路交通技术,2024,40(2):176-184.
- [3]刘阳飞,李天斌,孟陆波,等.基于BP神经网络的隧道超前地质预报资料综合解译技术研究[J].工程地球物理学报,2024,21(2):215-225.

作者简介:覃自龙(1988—),男,汉族,湖北随州人,工程师,毕业于中国地质大学(武汉)土木工程专业(工程地质方向),本科,现主要从事公路、市政道路相关地质工程勘察。