

隧道穿越断层带施工风险识别方法

彭 巍

湖北交投建设集团有限公司桥隧分公司 湖北 武汉 430200

【摘要】：隧道穿越断层带的施工面临着复杂的地质环境，施工过程中潜在的风险不容忽视。断层带通常伴随不稳定的地质条件，如滑坡、地震、岩体崩塌等，严重威胁隧道施工的安全性。通过对隧道穿越断层带施工的风险进行系统的识别和评估，能够为施工单位提供有效的决策支持，确保施工安全。本文提出了一种基于地质勘探、模型分析和数据采集的风险识别方法，并对不同地质条件下的风险特征进行了详细分析。研究表明，合理的风险评估体系能有效预防事故，保障隧道施工顺利进行。

【关键词】：隧道施工；断层带；风险识别；地质勘探；安全管理

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.042

引言

隧道穿越断层带的施工过程是一个充满风险的复杂任务。断层带通常表现为地质不稳定区域，存在着滑坡、崩塌、涌水等多种潜在风险，极大地增加了隧道施工的难度和安全隐患。在施工过程中，传统的风险识别方法往往无法充分应对这些复杂的地质变化。因此，寻找一种有效的风险识别方法成为了工程界亟待解决的问题。这不仅关系到施工进度和成本，更直接影响到施工人员的生命安全。通过综合运用现代地质勘探技术、数据分析方法和风险评估模型，能够有效识别潜在的风险因素，并为施工决策提供科学依据。这为提高隧道施工的安全性和减少事故发生提供了新的思路。

1 隧道穿越断层带的地质特征与风险分析

隧道穿越断层带的地质特征常常是复杂且多变的，这种特殊的地质结构往往使得施工过程中面临着一系列难以预见的风险。断层带通常是由于地壳运动或构造力的作用，造成岩层的破碎、滑移和变形，形成了地质不稳定的区域。断层带内的岩石可能存在不同程度的劣化，且往往伴随较强的岩石节理或裂隙，造成岩体的结构松散，甚至出现局部滑坡现象。在这种地质条件下，隧道建设过程中，土体的稳定性会大大降低，极易引发滑移、坍塌等危险。

在隧道施工中，穿越断层带时，地下水往往会沿着裂隙渗透，形成地下水冲刷现象，这不仅增加了施工难度，还可能导致涌水等事故发生，进一步加剧了工程风险^[1]。断层带内的岩石和土壤具有较高的渗透性，水流的活动会导致土体的软化和地基承载力的降低，影响隧道支护结构的稳定性。断层带的存在往往与强烈的地震活动相关联，施工期间可能遭遇地震波的影响，增加了施工事故发生的几率。

在具体的风险识别中，首先要重点关注断层带的深度、宽度以及断层的走向、倾向等地质特征。不同类型的断层带，其对隧道施工的影响也大不相同。对于活断层来说，由于其具有较强的活动性，因此施工中的风险预判更为复杂和困难。断层带穿越的区域，可能存在着深部裂隙、断层活动面等，这些因素都需要进行详尽的勘探与调查，才能在施工前进行有效的风险评估与预防。在这些特征的基础上，隧道穿越断层带的施工风险可通过系统的勘探和科学的评估方法加以识别，以减少施工过程中发生事故的几率。

2 传统风险识别方法的局限性与不足

传统的风险识别方法在隧道穿越断层带施工中的应用，面临着许多局限性与不足。传统方法大多依赖于现场勘查与经验判断，主要通过地质图、钻孔资料以及初步的地质勘探数据来识别风险。这些手段在复杂地质环境中往往显得力不从心，无法全面、准确地评估断层带的潜在危险。地质勘探工作虽然能够为施工提供一定的信息，但其覆盖面和精度有限，无法反映出地下复杂的构造变化与不稳定因素，尤其在深部地质的识别上存在很大的盲区。

传统方法在对地下水、土体变化等动态因素的预测上也存在明显缺陷。传统的勘测往往忽略了施工过程中地质条件的变化，难以实时监测地下水位的波动、断层活动的变化等动态风险^[2]。由于断层带的结构复杂且变化无常，仅依靠传统的静态数据，很难准确把握施工中可能出现的各类突发问题。传统方法较少考虑断层活动的长期影响和瞬时变化，容易导致施工风险的低估，尤其是在活断层区域，存在较大的不可预见性。

经验性的风险评估依赖较强的主观判断，往往缺乏科学量化和模型化的支持。这种方法无法结合大数

据、人工智能等现代技术手段，难以综合分析多种复杂因素，无法进行全面的风险评估。施工人员的经验虽然重要，但却不可能涵盖所有可能的危险情况，尤其是在技术条件和地质条件不断变化的情况下，单纯依靠经验和传统勘探方法往往难以适应复杂的施工环境。随着施工技术的不断进步，传统的风险识别方法逐渐暴露出在复杂环境中的局限性，亟需发展新的、更高效的风险识别手段。

3 基于地质勘探与模型分析的风险识别方法

基于地质勘探与模型分析的风险识别方法，能够在隧道穿越断层带施工中发挥重要作用，提供更加精确的风险评估。地质勘探不仅仅依赖于传统的钻探和采样技术，还要结合现代化的探测技术，如地震波勘探、地质雷达探测等，获取地下岩体的详细结构信息。这些技术能够深入到传统勘探无法触及的区域，特别是在复杂的断层带附近，为风险评估提供更为全面的数据支撑。通过对地下地质情况的多角度探测，识别断层的分布、活动性及岩土层的相互作用，可以大大提高风险识别的准确性和实时性。

在地质勘探的基础上，进一步利用计算机建模技术，结合现场的勘探数据和已有的地质资料，进行三维地质建模。这种方法能够将地下的复杂地质结构转化为直观的三维模型，提供一个精确的空间视图，使得风险评估更加科学和量化。通过建立数值模拟模型，可以对断层带的稳定性进行定量分析，预测施工过程中可能出现的土体滑移、崩塌等现象，并评估其对施工安全的影响。数值模拟能够模拟各种复杂环境下的施工过程，特别是对地下水流、应力分布等动态变化的实时跟踪，为施工管理提供决策依据。

除了传统的静态勘探数据，基于大数据分析和人工智能技术的应用也成为了风险识别中的重要组成部分^[3]。通过对大量历史数据、地质勘探数据以及施工过程中的监测数据进行分析，可以揭示出潜在的风险模式。机器学习和数据挖掘技术能够识别出数据中的潜在关联和规律，从而预测施工中可能出现的风险因素。通过对历史施工项目中的风险数据进行回顾性分析，建立风险数据库，为未来的施工项目提供风险预警和预防措施。

在实际应用中，结合多种勘探技术和数值模型进行风险分析能够提供一个全方位的评估体系。断层带的动态性和复杂性使得单一的勘探手段无法全面捕捉潜在的施工风险，而通过集成多种地质勘探方法和现代模型分析技术，可以更准确地识别出可能导致施工

事故的地质因素。地质勘探数据和模型分析的结合，不仅提升了对隧道穿越断层带施工风险的识别效率，也增强了施工过程中的风险管控能力。这种基于科学数据和技术手段的综合评估方法，正在成为隧道施工中不可或缺的重要工具，有助于确保施工的安全和顺利进行。

4 不同地质条件下的风险评估与对策

在软弱地质区域，特别是砂土、粘土等不稳定土层中，土体的强度较低，易出现滑坡、坍塌等地质灾害。对于这些地质条件，评估中需要重点关注土壤的承载能力、地下水位的变化以及土体的渗透性。土体的变形性强且极易受外界荷载影响，在施工过程中必须采取加固措施，如喷锚支护、注浆加固等技术，以提高土体的稳定性和防止地面塌陷。在硬岩地区，尤其是岩石层厚重且坚硬的区域，施工风险主要体现在岩层破裂、滑移及施工设备的磨损等方面。岩石的破碎性和裂隙的密集性导致了潜在的落石或岩体滑坡风险。在这种环境下，风险评估需要详细分析岩石的破碎程度、裂隙分布及其对隧道结构的影响。有效的对策包括采用高强度支护结构、加固设计、以及注浆封闭裂隙，防止岩石在施工过程中发生大规模的崩塌或涌水现象。对岩石的预钻孔测试也是评估岩体稳定性的有效方法，能够提前识别出可能的风险区域。

在断层带附近的地质条件下，断层的活动性是施工风险的主要影响因素。断层活动频繁的区域，施工过程中存在断层滑移和地震影响的隐患^[4]。在这种地质条件下的风险评估，必须要对断层的活动性、走向及倾角等进行详细分析，并结合地震波动性进行动态风险预测。针对这种复杂地质环境，应采取减震支护、柔性支护结构及断层避让等措施，减少断层活动带来的不良影响。增加对断层带区域的动态监测，如实时监测地震波动和位移情况，有助于在施工过程中及时采取应急措施。

对于多水区域，尤其是地下水位较高的地区，水压的变化和水流的冲刷作用使得施工风险增加。地下水的存在不仅影响隧道稳定性，还可能导致基坑渗漏和结构破坏。因此，评估水文地质条件是施工前必须进行的环节。对策包括设置排水系统、采用防水材料 and 进行深层注浆等技术，确保施工过程中地下水的有效控制。不同地质条件下的风险评估需要充分考虑地质结构、地下水、断层活动及外部环境因素的综合作用，合理选择支护结构和加固方法，从而降低施工过程中的潜在危险。根据地质特点定制的应对策略，将有效保障隧道穿越断层带施工的安全性，确保施工顺

利完成。

5 有效的施工风险管控策略与实施方案

在隧道穿越断层带的施工过程中，有效的施工风险管控策略与实施方案至关重要，能够帮助确保施工安全与顺利进行。针对复杂的地质条件和可能的施工风险，施工单位应采取一系列针对性的管理措施和技术手段，结合风险评估结果，优化施工方案，提前做好应对措施。地质勘探和现场监测是实施有效风险管控的基础。施工单位应对穿越区域进行详细的地质勘查，尤其是对于断层带、地下水及岩体破碎程度等进行重点监测。利用现代化的探测技术，如地震波、地质雷达等，可以获得更多的信息，填补传统勘探手段的空白。施工期间，实时监测设备应贯穿整个过程，特别是在关键施工阶段，如钻孔、爆破、支护施工等，确保能够及时发现潜在的地质变动和风险。通过持续的监测数据，施工团队可以根据变化情况灵活调整施工方案，避免突发性风险事件的发生。

在风险管控策略中，支护结构的设计与施工是确保隧道穿越断层带施工安全的关键。支护结构不仅要考虑静态的土体压力，还要应对动态荷载变化，如地震波的作用及水压的波动。对于软弱地质或水文复杂区域，应采用高强度的支护结构，并结合注浆加固技术，提高土体的稳定性。在断层带区域，柔性支护系统可以有效应对地层的变形和断层的滑动，减少对隧道结构的影响。同时，对于岩体不稳定区域，增加支护的层数和密度，并结合超前地质预报技术，确保能够及时识别潜在的滑坡、崩塌等危险。

针对地下水问题，施工单位应制定科学的水控方案。在水文复杂地区，地下水流动性强，易造成渗水、涌水等现象。为了控制地下水的渗透，施工前应进行详细的水文地质分析，确定水源位置及水压变化趋势。采用排水系统、土体加固以及防水注浆技术能够有效

降低地下水对施工安全的威胁^[5]。在涌水严重的区域，提前设置地下水封闭措施，通过注浆封堵裂隙，防止地下水大量涌入施工区域，确保施工过程中的水密性。与此同时，施工人员的安全管理也应得到充分重视。施工现场应加强人员安全培训和应急演练，确保每位施工人员熟悉风险应对程序，能够在突发情况下迅速采取措施。施工过程中，应设立安全检查和隐患排查机制，及时发现并消除潜在安全隐患。同时，应加强与各相关部门的协调，确保所有施工环节符合安全法规和技术规范，避免因技术失误或管理不到位而导致事故的发生。

为了提高施工过程中的安全性，还可以通过信息化技术实现施工风险的动态管理。利用 BIM（建筑信息建模）技术对施工现场进行全程监管，提前识别潜在风险区域，模拟施工过程中的各类突发情况，为施工决策提供依据。通过这些手段，可以提前发现并解决潜在的安全隐患，使得施工风险管控更加精细和智能化。隧道穿越断层带的施工风险管控不仅需要依赖精确的地质勘探和科学的支护设计，还要结合现代化的信息技术和水土保持技术，确保施工过程中的每一个环节都能得到有效监控和管控。通过全方位的风险管理和技术保障，能够最大程度地提高施工安全性，确保隧道项目的顺利进行。

6 结语

隧道穿越断层带的施工面临复杂的地质环境和多重风险，传统的风险识别方法已无法满足现代施工的需求。通过结合地质勘探与模型分析，可以实现更加精确的风险评估，并根据不同地质条件制定针对性的风险管控措施。有效的施工风险管理不仅需要科学的技术手段，还需要全面的施工安全管理。随着技术的不断发展，未来的施工安全将逐步实现智能化和精细化，为隧道建设的顺利进行提供更加坚实的保障。

参考文献:

- [1] 郭亚斌,王帅帅,杨董宇,等.穿越富水断层隧道施工期热环境与通风参数研究[J].现代隧道技术,2025,62(S1):661-670.
- [2] 孙明军.穿越断层破碎带水平层状围岩隧道施工稳定性与注浆加固参数研究[D].重庆交通大学,2025.
- [3] 王鹏硕.断层破碎带 TBM 隧道施工关键技术研究[D].石家庄铁道大学,2025.
- [4] 刘捷,刘小军,王新,等.复杂地质条件对隧道施工的影响及数值模拟[J].交通节能与环保,2024,20(S2):127-133.
- [5] 何鑫鑫.山岭隧道施工期突水发生条件与致灾模式研究[D].重庆交通大学,2023.