

复杂地质条件下隧道施工超前地质预报技术应用与优化

唐 亮

中交路桥华北工程有限公司 北京 101100

摘 要：复杂地质条件下隧道施工面临诸多挑战，超前地质预报技术成为保障施工安全、提高施工效率的重要手段。本文探讨了超前地质预报技术在复杂地质条件隧道施工中的应用，分析了现有技术的优缺点，并提出了优化策略。通过综合应用地质调查法、物探法、钻探法等多种方法，结合信息化管理和技术创新，超前地质预报技术能够更准确地预测地质条件，为隧道施工提供科学依据，有效预防地质灾害，降低施工风险。

关键词：隧道施工；超前地质预报；复杂地质条件；技术应用与优化

引言

隧道工程作为交通基础设施建设的关键组成部分，在山区、丘陵地带发挥着不可替代的作用，能够有效缩短线路长度，提升交通效率。然而，复杂地质条件下的隧道施工犹如在“地质迷宫”中穿行，面临着岩溶、断层、软弱围岩、富水区等诸多不良地质现象的挑战。这些不良地质情况随时可能引发突水、突泥、坍塌等灾害，严重威胁着施工人员的生命安全和工程进度。超前地质预报技术就像隧道施工的“导航仪”，能够在开挖前对隧道掌子面前方的地质条件进行探测和分析，为施工安全提供有力保障。因此，深入探讨复杂地质条件下隧道施工超前地质预报技术的应用与优化具有重要的现实意义。

1 超前地质预报技术概述

1.1 定义与目的

超前地质预报是指在隧道开挖前，运用地质调查、物探、钻探等多种手段，对隧道掌子面前方的地质条件进行全面、细致的探测和分析，以准确预测可能出现的地质灾害。其目的在于提前掌握隧道开挖面前方的地质信息，如岩性、断层、岩溶、地下水等，从而有针对性地优化支护设计、调整施工方案，有效预防突水、突泥、坍塌等灾害，确保隧道施工的安全与高效进行。

1.2 主要内容

超前地质预报的主要内容包括不良地质预报、水文地质预报和围岩分级。不良地质预报聚焦于识别断层、岩溶、破碎带等潜在的地质隐患，为施工提前敲响警钟；水文地质预报着重评估突水风险及涌水量，帮助施工单位做好防水排水准备；围岩分级则结合信息化技术，对围岩类别进行更细致的划分，为支护设计提供科学依据，确保支护结构的合理性和有效性。

2 复杂地质条件下隧道施工超前地质预报技术的应用

2.1 地质调查法

地质调查法是目前隧道施工超前地质预报中应用最为广泛的基础方法之一。它依托隧道已有的勘察资料、地表补充地质调查资料以及隧道内地质素描，综合运用地层层序对比、地层分界线及构造线地下与地表的相关性分析、断层要素与隧道几何参数的相关性分析，以及对临近隧道内不良地质体的前兆分析等手段，结合常规地质理论、地质作图和趋势分析等技术，对开挖工作面前方可能揭示的地质情况进行科学推测。例如，通过对地层岩性的观察和分析，可以判断前方是否存在软弱夹层；根据构造线的走向和倾向，可以推测断层的可能位置和规模。地质调查法的优点显著，它不占用开挖工作面的施工时间，对施工进度无干扰，是隧道超前地质预报的基石^[1]。它不仅用于地质预报，还能补充和完善隧道设计地质资料，为施工与设计资料的对比提供重要依据，同时助力积累经验和隧道运营阶段的病害整治。然而，该方法也存在一定的局限性。它高度依赖于操作人员的经验和专业知识水平，对于构造复杂、埋深较大的隧道，由于地质信息的获取难度较大，预报的准确性可能较差。而且，地质调查法往往只能获取宏观的地质信息，对于微观的地质结构和变化难以精确把握。

2.2 物探法

2.2.1 地震波反射法（TSP/TGP）

地震波反射法是以人工激发弹性波，弹性波以球面波的形式在岩体中传播。当遇到波阻抗差异界面时，弹性波就会产生回波。通过在地表或隧道内设置接收装置，接收和分析这些回波信号，根据回波的时间、幅度、频率等特征，可以推断出隧道掌子面前方的地质结构。在软弱破碎地层或岩溶发育区，由于岩体的完整性较差，弹性波的传播和反射较为复杂，该方法每次预报的距离大约为100米；而在岩体完整的硬质岩石地层，弹性波的传播相对较为稳定，预报距离可达到约150米。

地震波反射法的优点突出,预报距离远、适用范围广,能够有效探测断层、破碎带等面状结构。然而,该方法也存在一定的局限性。探测结果受施工机械噪声干扰较大,在隧道施工过程中,各种机械设备产生的振动和噪声会干扰弹性波的接收和分析,影响预报的准确性。而且,对于某些复杂地质结构,如多层溶洞、交错断层等,可能存在多解性,需要结合其他方法进行综合判断。在某高速公路隧道施工中,采用TSP地震波反射法对隧道掌子面前方的地质条件进行了探测。技术人员在隧道内设置了多个接收点,通过人工激发弹性波,接收回波信号。经过对回波信号的详细分析,发现掌子面前方存在一处断层破碎带,并准确预测了其位置和规模。根据预报结果,施工单位及时调整了施工方案,采取了加强支护等措施,确保了施工的安全进行。

2.2.2 地质雷达(GPR)

地质雷达的原理是基于高频电磁波理论,使用的是时间域脉冲雷达。雷达系统首先会向被测的物体发射高频电磁波脉冲,因为不同的物体介质不同,脉冲在不同介质的界面被反射回来也是不同的。根据电磁波从发射到反射回来双程走时的长短差别,通过计算分析来确定探测目标的形态和属性,并结合工程地质理论来分析,得到对埋藏目标的探测与判断。在完整的灰岩地区,由于岩体的电磁特性相对稳定,地质雷达的有效探测距离通常限制在30米以内。地质雷达的优点显著,分辨率高、无损、操作简便、抗干扰能力强,适用于各种环境条件,特别适用于岩溶、采空区等短距离探测。然而,该方法也存在一定的局限性。其探测距离相对较短,对于长距离的地质结构探测能力有限。而且,对于洞内钢拱架、锚杆等金属构件的影响较大,金属构件会反射电磁波,干扰探测结果,可能导致探测结果不准确。在某铁路隧道施工中,采用地质雷达对隧道掌子面前方的岩溶发育情况进行了探测^[2]。技术人员布置了多条横向和垂向测线,对探测范围进行了全面覆盖。在探测过程中,发现洞内钢拱架对探测结果产生了一定的干扰,技术人员通过调整测线位置和参数设置,尽量减少干扰。结果发现掌子面前方存在一处小型溶洞,并及时采取了注浆加固等措施,避免了施工过程中的突水事故。

2.2.3 瞬变电磁法

瞬变电磁法是通过电磁场变化识别含水地质体的一种方法。它利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲场,在一次脉冲场间歇期间利用线圈或接地电极观测由地下介质产生的二次感应电磁场。由于不同地质体的电性差异会导致二次感应电磁场的变化不同,通过

分析二次场衰减曲线的特征,可以识别不同地质体的电性差异,从而达到探测地下地质体的目的。瞬变电磁法的优点是对水反应敏感,常用于富水破碎带的探测。然而,该方法的探测距离相对较短,且对于复杂地质结构的分辨率较低。在地质结构较为复杂的情况下,难以准确区分不同地质体的电性差异,可能导致探测结果不准确。在某水利水电工程隧道施工中,采用瞬变电磁法对隧道掌子面前方的富水区进行了探测。技术人员在隧道内设置了发射和接收装置,通过发送脉冲场并观测二次感应电磁场,分析二次场衰减曲线的特征。准确预测了富水区的位置和规模,为施工单位制定防水措施提供了重要依据。

2.2.4 红外探测法

红外探测法是利用岩体热差异识别隐伏地质异常的一种方法。隧道中岩体的红外辐射场强度受地下水影响较大,地下水的存在会导致岩体温度变化,从而影响红外辐射强度。利用红外探水设备接收和分析隧道岩体的红外辐射强度,根据岩体的红外辐射场强度的变化情况勘探、预报隧道前方的不良地质条件。红外探测法的优点是操作简便、快速直观,特别适用于含水地质体的探测。然而,该方法的探测距离较短,且对于非含水地质体的探测效果不佳。在干燥的地质环境中,岩体的红外辐射强度变化较小,难以准确探测地质异常。在某矿山隧道施工中,采用红外探测法对隧道掌子面前方的地下水情况进行了探测。技术人员手持红外探水设备,对隧道掌子面前方的岩体进行扫描。通过分析红外辐射强度的变化情况,发现掌子面前方存在一处隐伏的含水层,并及时采取了排水措施,确保了施工的安全进行。

2.3 钻探法

钻探法是通过在隧道开挖工作面使用钻机进行钻探,直接获取岩芯样本,以验证物探结果并获取关键地质信息的一种方法。该方法适用于各种复杂地质条件,特别是在富水软弱断层破碎带、富水岩溶发育区、煤层瓦斯发育区以及重大物探异常区等地段,其预报效果尤为显著。针对断层、节理密集带或其他破碎富水地层,通常每循环钻探1-3个孔;而在富水岩溶发育区,则需每循环钻探3-5个孔。为确保连续预报的准确性,前后两循环钻孔应保持5-8米的重叠。钻探过程中,应合理搭配使用冲击钻和回转取芯钻,冲击钻适用于坚硬岩层的钻进,回转取芯钻则能够获取完整的岩芯样本,以提高预报准确率和钻进效率,同时减少对开挖工作面的占用时间。钻探法的优点是直观性强、确定性高,能够直接获取岩芯样本,对地质条件的判断更为准确。通过对岩芯

样本的观察和分析,可以准确了解岩层的岩性、结构、构造等情况,为施工提供可靠的地质依据。然而,该方法也存在一定的局限性。钻探过程耗时较长,需要专业的设备和操作人员,可能影响施工进度。而且,对于某些层面状构造可能无法完全揭示,特别是对于溶洞的探测,由于溶洞的形状和分布不规则,钻探孔可能无法准确命中溶洞,存在漏报的风险。

3 复杂地质条件下隧道施工超前地质预报技术的优化策略

3.1 综合应用多种方法

由于单一的超前地质预报方法存在一定的局限性,因此在实际施工中应综合应用多种方法,以提高预报的准确性和可靠性。例如,可以采用地质调查法作为初步手段,对隧道掌子面前方的地质条件进行初步判断,了解宏观的地质情况;然后采用物探方法进行长距离探测,获取更详细的地质信息,如断层、溶洞的位置和规模等;最后采用钻探方法进行短距离验证,确保预报结果的准确性。通过多种方法的相互补充和验证,能够有效提高超前地质预报的可靠性。

3.2 加强信息化管理

随着信息技术的不断发展,信息化管理在隧道施工超前地质预报中的应用越来越广泛。通过建立地质预报信息化管理系统,可以实现对地质数据的实时采集、传输、处理和分析。在隧道施工过程中,各种探测设备获取的地质数据可以及时传输到信息化管理系统中,系统通过专业的软件对数据进行处理,生成直观的地质预报报告^[3]。同时,还可以利用信息化管理系统对预报结果进行可视化展示和动态更新,为施工单位提供更直观、更便捷的地质信息服务。施工单位可以根据实时更新的地质信息,及时调整施工方案,确保施工安全。

3.3 技术创新与发展

为了进一步提高超前地质预报技术的准确性和可靠性,应不断加强技术创新与发展。例如,可以研发更先进的物探设备和技术,提高探测的分辨率和探测距离。采用更先进的传感器和信号处理技术,能够更准确地接收和分析地质信号,提高物探结果的准确性。可以研究更高效的钻探方法和工艺,减少钻探过程对施工进度的影响。研发新型的钻头和钻进工艺,提高钻进效率,缩短钻

探时间。还可以探索将物联网、大数据、人工智能等新技术应用于超前地质预报领域,实现地质数据的智能分析和预警。通过物联网技术实现探测设备的互联互通,实时获取地质数据;利用大数据技术对大量的地质数据进行分析 and 挖掘,发现潜在的地质规律;借助人工智能算法实现地质灾害的智能预警,提前采取防范措施。

3.4 提高人员素质与培训

超前地质预报技术的应用效果在很大程度上取决于操作人员的专业素质和经验水平。因此,应加强对操作人员的培训和教育,提高其专业素质和操作技能。定期组织操作人员参加专业培训课程,学习最新的超前地质预报技术和方法,了解行业的前沿动态^[4]。同时,还应建立完善的考核机制和质量保证体系,对操作人员的工作进行定期考核和评价,确保其工作质量和效果。通过培训和考核,使操作人员能够熟练掌握各种超前地质预报方法和技术,准确判断地质情况,为隧道施工的安全进行提供有力保障。

结语

复杂地质条件下隧道施工超前地质预报技术的应用与优化对于保障施工安全、提高施工效率具有重要意义。通过综合应用地质调查法、物探法、钻探法等多种方法,结合信息化管理和技术创新,可以更有效地预测隧道掌子面前方的地质条件,为施工单位提供科学依据。同时,还应加强操作人员的培训和教育,提高其专业素质和操作技能,确保超前地质预报工作的质量和效果。在未来的隧道施工中,应继续加强超前地质预报技术的研究与应用,推动隧道工程的安全、高效发展。

参考文献

- [1]许锦权,杨国恒,康元茂,等.超前地质预报技术在隧道施工安全风险识别与防范中的应用[J].交通节能与环保,2024,20(S2):211-214.
- [2]黄龙,王智.隧道施工超前地质预报技术及应用探讨[J].交通科技与管理,2024,5(11):138-140.
- [3]喻海军.两种不同超前地质预报技术在隧道施工中的应用分析[J].内蒙古公路与运输,2022,(01):6-10.
- [4]唐志杰.综合超前地质预报技术在岩溶隧道施工中的应用[J].中国高新科技,2020,(23):85-86.