

水利工程输水深埋长隧洞勘察难点和方法探讨

汪勇

长江岩土工程有限公司, 湖北武汉, 340010;

摘要: 随着我国水资源配置、水力发电和跨流域调水等战略工程的推进, 深埋长隧洞已成为水利工程建设中的关键性工程。这类隧洞具有埋深大、洞线长、地质环境复杂、水文地质条件多变等特点, 给工程勘察工作带来了前所未有的挑战。勘察成果的准确性直接关系到隧洞线路的选择、结构设计、施工安全、工程投资及长期运行稳定性。本文系统梳理了深埋长隧洞勘察的主要技术难点, 包括地质构造探查精度不足、水文地质条件预测困难、高地应力与岩爆风险、高地温以及勘察技术的局限性。在此基础上, 详细论述了现阶段采用的综合勘察技术体系, 涵盖遥感与地质调查、综合物探、钻探与综合测井, 以及施工期超前地质预报等关键方法。进一步, 针对勘察中可能揭示的断层破碎带、高压涌水、流砂涌泥和高地温等典型不良地质问题, 探讨了相应的工程处理原则与措施。最后, 对未来勘察技术的发展方向进行了展望, 提出构建“空-天-地-洞”一体化智能勘察与预警系统是未来的重要趋势。

关键词: 水利工程; 深埋长隧洞; 工程勘察; 综合物探; 超前地质预报; 不良地质问题

DOI: 10.69979/3060-8767.26.03.035

引言

输水深埋长隧洞作为解决区域水资源短缺、实现能源开发和水资源优化配置的重要手段, 在我国“十四五”规划及后续的水利建设中占据着举足轻重的地位。相较于浅埋或短距离隧洞, 深埋长隧洞通常穿越山岭, 埋深可达数百米至上千米, 洞线延伸数公里至数十公里。其所穿越的地层往往经历了复杂的构造运动, 地质结构多变, 岩性复杂, 地应力水平高, 水文地质条件隐蔽且具强不确定性。这些特点使得前期勘察工作难以全面、精确地揭示沿线所有地质细节, 导致施工中常遭遇突发性地质灾害, 如大规模涌水、突泥、岩爆、围岩大变形等, 严重威胁施工安全、延误工期并大幅增加工程造价。

因此, 如何突破传统勘察技术的局限, 构建一套适用于深埋长隧洞特点的、多层次、多手段的综合勘察技术体系, 实现对不良地质体的精准探测与风险预判, 已成为水利工程领域亟待解决的关键技术问题。本文旨在结合工程实践与研究进展, 系统分析深埋长隧洞的勘察难点, 探讨有效的勘察方法组合, 并对主要不良地质问题的应对策略进行总结, 以期类似工程的勘察设计与施工提供参考。

1 工程勘察的难点

深埋长隧洞的工程勘察面临着一系列由“深”、“长”、“隐”等特点衍生的独特挑战:

1.1 地质构造探查精度不足

深埋隧洞穿越区域的地质构造, 如断层、裂隙密集

带、软弱夹层等, 是影响围岩稳定和控制工程地质条件的关键因素。受埋深和地表地形限制, 常规地面地质调查难以准确判断这些构造的深部延伸形态、规模、破碎程度及充填物特性。特别是区域性大断裂的次级构造和隐伏构造, 在勘察阶段极易被遗漏或误判, 成为施工中的重大隐患。

1.2 水文地质条件预测困难

深部岩体的含水层分布、富水性、水压(头)以及不同含水系统之间的水力联系极其复杂。深部承压水可能具有极高的压力, 且补给源和径流路径遥远。勘察阶段的少量钻孔难以控制整个洞线水文地质单元, 对涌水点位置、涌水量和水压的预测存在很大不确定性。高压涌水不仅直接危害施工安全, 还可能引起围岩渗透破坏和地表水环境变化。

1.3 高地应力与岩爆风险评估复杂

随着埋深增加, 地应力值显著增高, 且应力状态(大小、方向)受地形和构造影响剧烈。准确获取工程区地应力场分布是评估岩爆、软岩大变形等灾害的前提。然而, 地应力测试成本高、点位有限, 通过有限点数据反演区域应力场存在多解性和外推风险。对岩爆倾向性岩体的识别和潜在岩爆等级、部位的预测是世界性难题。

1.4 高地温问题突出

在某些地热异常区或深埋段, 洞室开挖可能遇到高地温环境。高地温不仅恶化施工条件, 影响机械效率和人员健康, 还会改变围岩的物理力学性质(如强度降低、

蠕变增加)。勘察阶段对地温梯度和热源分布的预测缺乏有效手段^[1]。

1.5 勘察技术的局限性与经济性矛盾

任何单一的勘察技术都有其适用条件和分辨率极限。钻探虽然直观可靠,但成本高昂、周期长,且“一孔之见”难以覆盖长距离洞线。物探方法覆盖面广,但解译存在多解性,精度受地形、场地条件及深部干扰影响。如何在有限的投资和时间内,优化组合各种勘察手段,获取最大信息量,是勘察设计面临的现实难题。

2 采用的勘察方法

针对上述难点,必须采用“由面到点、层层递进、天地结合、钻探验证、动态反馈”的综合勘察方法论。

2.1 遥感地质和地质调查

这是最基础也是首要的勘察阶段。利用高分辨率卫星影像、航空照片进行区域地质解译,宏观把握工程区的构造格架、地层岩性分布、地貌水系特征和不良地质现象。结合大范围、高精度的地面地质测绘,核实遥感解译成果,详细查证断层、褶皱、岩体风化卸荷带、危岩体、泥石流沟等的分布与特征,为隧洞选线和后续勘察工作部署提供地质依据。

2.2 综合物探法

在前期地质分析基础上,针对重点地段和重大地质问题,选用多种物探方法进行剖面性探查。

电法勘探(如高密度电法、大地电磁法):主要用于探测覆盖层厚度、基岩面起伏、含水带、断层破碎带(通常表现为低阻异常)等。

地震勘探(如反射波法、折射波法):是探测深部地层结构、构造界面(如断层、岩性分界面)的有效手段,能提供波速信息,间接反映岩体完整程度。

重力与磁法勘探:辅助判断深部岩性差异、大型构造和隐伏岩体边界。

综合物探的关键在于方法的有效组合与联合解译。例如,“地震定位、电法定性”,利用地震剖面确定异常体的空间位置,用电法资料判断其含水性,相互印证,减少多解性^[2]。

2.3 钻孔及综合测井法

钻探是获得深部地质信息最直接、最可靠的方法。在物探异常区和地质关键部位(如推测断层、进出口、过沟段)布置控制性钻孔。深孔钻探不仅获取岩芯,进行编录和室内试验,确定岩土体物理力学参数,还需进行一系列原位测试和综合测井:

水文地质试验:钻孔压(抽)水试验,获取含水层渗透系数、涌水量估算参数。

地应力测试:采用水压致裂法或应力解除法,测量钻孔深部的地应力大小和方向。

综合测井:包括声波测井(获取波速,评价完整性)、电阻率测井(划分岩性、判断含水性)、自然伽马测井(划分岩层)、井中电视(直观观察孔壁裂隙、破碎带)等,极大地丰富单孔信息量,实现“一孔多用”。

2.4 施工期超前地质预测与预报

鉴于前期勘察的局限性,施工期的超前地质预报是保障安全掘进的最后一道,也是至关重要的一道防线。它属于动态勘察的范畴,直接服务于施工决策。

2.4.1 超前水平钻孔法

这种方法被公认为是实现长距离超前预报时最直接且最为精确的一种方式。具体而言,它主要是借助钻机设备,在隧道掌子面处进行施工操作,钻出数十米甚至达到上百米的水平钻孔。而后,通过多种手段对这些钻孔展开深入分析与探测,例如对岩芯或者岩粉进行细致的分析研究,运用钻孔成像技术、钻孔电视观测技术以及随钻测量技术等。凭借这些方式,能够直接地呈现出隧道前方的地质状况,并且在此基础上,还可以进一步实施超前泄压操作、注浆处理等一系列预处理工作。然而,不得不提的是,这一方法在实际应用过程中存在着明显的弊端,它会对正常的施工进度造成较大的干扰影响,而且所需投入的费用相对较高,整个操作周期也比较漫长^[3]。

2.4.2 地震波反射法

这种方法目前属于物探领域中超前预报的主流技术,被广泛应用于隧道施工和地质探测中。其基本原理是在隧洞的边墙或者掌子面上布置激发点与接收点,通过人工激发地震波并采集相应的地震波信号。当隧洞前方存在波阻抗差异界面时,例如断层破碎带、岩性变化区域或含水构造等,这些界面会对地震波产生反射作用,从而形成反射波。通过对反射波的传播时间、振幅、频率等特征进行详细分析,可以进一步推断出隧洞前方不良地质体的具体位置、规模大小以及性质特点。其中,TRT(隧洞反射层析成像)技术作为一种先进的探测手段,具备三维成像能力,能够更加直观地展现地质结构的分布情况,同时其定位精度相对较高,为隧洞施工安全提供了重要的技术支持。

2.4.3 地质雷达

适用于短距离(通常<30米)高精度预报,对掌子面前方溶洞、充水裂隙、夹层等反应灵敏。但其探测深

度受岩体电性影响大,在富水或粘土层中衰减快。

实践中的有效模式是“长短结合、物钻结合”:即以地震波反射法等物探方法进行长距离(100-150米)扫描和预警,发现重大异常后,立即采用超前水平钻进行精确定位和验证,形成预报闭环。

3 不良地质问题及处理措施

基于勘察和预报成果,针对常见不良地质问题,需制定预案并采取有效措施。

3.1 断层带围岩破碎

问题特征:岩体破碎,自稳能力极差,易坍塌;常与富水带伴生。

处理措施:遵循“先支护、后开挖、快封闭、勤量测”原则。采用超前小导管或管棚进行预支护,必要时进行超前注浆加固。开挖后立即施作强初期支护(如型钢拱架、喷钢纤维混凝土),并尽快完成仰拱封闭成环。采用径向注浆或背后回填注浆填充空洞。加强监控量测。

3.2 出现高压涌水

问题特征:突发大量涌水,淹没坑道,冲刷围岩,可能引发突泥。

处理措施:贯彻“以堵为主,堵排结合,限量排放”的原则。通过超前预报探明水源和水压。采用超前帷幕注浆或周边径向注浆形成止水圈,封堵主要涌水通道。对于非可溶岩地段的高压水,也可采用超前钻孔进行有控泄压。同时,做好强排水系统(多级泵站、大容量水仓)的应急准备。需评估排水对区域地下水环境的影响^[4]。

3.3 出现流砂涌泥

问题特征:常见于深部风化囊、断层泥或未胶结的松散地层,在富水或扰动下呈流塑状涌出,极易导致掌子面失稳和地表沉降。

处理措施:关键在于“超前加固、固结止水”。采用超前深孔高压劈裂注浆或化学注浆,对流塑体进行全断面加固,提高其强度和自稳性,并形成止水帷幕。开挖时采用环形开挖预留核心土法,分部开挖,快速封闭。必要时采用冻结法等特殊工法。

3.4 出现高地温段

问题特征:洞内环境温度超过施工规范允许值,影响人员、设备。

处理措施:采取综合降温措施。通风降温:加大通风量,采用制冷机组对送入空气进行强制冷却。个体防

护:为作业人员配备冷却背心等防护装备。喷淋降温:对岩壁和洞内空气进行水雾喷淋。热源隔离:对高温岩壁施作隔热层。同时,合理安排高温时段作业时间,保障人员健康。

4 结语

深埋长隧洞的工程勘察是一项贯穿于规划设计到施工全过程的系统工程,其复杂性和挑战性要求我们必须打破传统勘察思维的局限。通过本文探讨,可以得出以下结论:

(1)必须正视深埋长隧洞勘察的固有难点,其核心是地质信息的不确定性和勘察手段的局限性。

(2)解决之道在于构建并严格执行“阶段递进、天地结合、综合物探、钻探验证、动态预报”的一体化综合勘察技术体系。各阶段、各方法之间应形成有效的信息传递与反馈机制^[5]。

(3)施工期超前地质预报是弥补前期勘察不足、实现风险预控的关键环节,应建立制度化的预报流程和“物探长探、钻探精查”的联动模式。

(4)针对不同不良地质问题,处理措施需有针对性,且往往需要多种工法组合应用,其基础均来源于准确可靠的勘察预报信息。

展望未来,随着信息技术、地球物理技术、钻探技术和人工智能技术的飞速发展,深埋长隧洞勘察将向着智能化、精细化、实时化方向迈进。基于物联网的“空-天-地-洞”一体化智能感知网络、大数据与机器学习驱动的多源地质信息融合与智能解译平台、具备自主感知与决策能力的智能勘探机器人等,有望从根本上提升我们对深部地质环境的认知能力和灾害预警水平,为复杂条件下深埋长隧洞的安全、经济和高效建设提供更强有力的技术支撑。

参考文献

- [1]杜丽珍.水利工程输水深埋长隧洞勘察难点和方法探讨[J].河北水利,2024,(04):41-43.
- [2]段庭森.水利工程输水隧洞及渠系建筑物测量放样[J].大众标准化,2023,(13):43-45.
- [3]解红.基于层次分析法的输水隧洞风险评估方法的应用[J].水利技术监督,2023,(06):223-228.
- [4]王广巍,姚蒲.天星坝水库输水隧洞涌水分析[J].水电站设计,2022,38(04):50-53.
- [5]蒋汉华,于方.花中输水隧洞工程地质分析及围岩支护类型判定[J].四川建材,2021,47(05):72-73+79.