

深埋长隧洞工程断层破碎带综合超前地质预报研究

黄兴喜

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司地质勘察分公司

DOI:10.12238/hwr.v9i3.6165

[摘要] 深埋长隧洞TBM施工中,断层破碎带、岩溶、采空区、高地应力及涌水突泥等是主要地质风险因素。鉴于单一超前预报方法存在局限性与多解性,本研究突出多方法综合预报的重要性。以新疆某引水工程勘探试验洞及吉林引松供水工程某标段为案例,运用多种综合地球物理探测技术。在新疆案例里,融合TRT技术(隧道地震波反射层析成像)与地面EH-4大地电磁测深系统,并结合地质分析,高效预报了不良地质条件。

[关键词] 隧洞综合超前预报; 地质分析; TRT; EH4

中图分类号: TV543+.3 **文献标识码:** A

Comprehensive advanced geological prediction of fault fracture zones in deep buried long tunnel engineering

Xingxi Huang

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co.,Ltd. Survey Branch

[Abstract] During the construction of a deep buried long tunnel, fault fracture zone, karst, goaf, highland stress and water inrush mud are the main geological risk factors. Given the limitations and multi-solvability of a single advance forecast method, this study highlights the importance of multi-method comprehensive forecasting. Taking the exploration test hole of a water diversion project in Xinjiang and a section of a pine water diversion project in Jilin as a case, a variety of comprehensive geophysical detection technologies are used. In the Xinjiang case, the TRT technology (tunnel seismic wave reflection tomography) was integrated with ground EH-4 earth electromagnetic depth sounding system, and combined with geological analysis, it efficiently predicted adverse geological conditions.

[Key words] tunnel comprehensive advance forecast; geological analysis; TRT; EH4

引言

随着水利水电工程的不断发展,深埋长隧洞建设数量日益增多。隧道掘进机(TBM)工法凭借其高效、快速、优质和安全的施工优势,被广泛应用于此类工程。然而,TBM工法在支护能力、复杂地质条件适应性以及应对突发不良地质条件方面存在明显不足,尤其在无预警情况下遭遇不良地质条件时,TBM施工所面临的损失和工期延误往往超过传统钻爆法。

深埋长隧洞的地质勘察工作因其难度高、问题复杂、周期长和成本高昂而充满挑战。传统的勘察方法,如地面调绘、钻探和波速测井,难以精确揭示微观水文地质条件和不良地质体的具体状况。因此,超前地质预报在TBM施工中显得尤为关键,对信息化施工、灾害预防和安全保障发挥着至关重要的作用。

目前,地质预报技术主要分为工程地质分析法和地球物理法两大类。地球物理法包括弹性波反射法、地质雷达法、瞬变电磁法、陆地声纳法和红外探测法等,每种方法各有千秋。为了克服

单一方法的局限性,提高预报的精确度,本文提出了一种综合超前预报法。该方法通过多种技术的组合、互补和相互验证,以及地质与物探的紧密结合,显著提升了预报的准确性和可靠性。

本研究以新疆某引水工程勘探试验洞为案例,探讨了综合超前地质预报法的实际应用。在新疆案例中,我们采用了隧洞内的TRT技术和洞外的EH-4系统,结合地质资料和坑道地质素描,进行综合预报,有效预报了隧道前方可能遇到的地质灾害,如断层破碎带、塌方、突水和涌水等^[1]。

1 工程概况

试验性勘探平洞布置于主隧洞K0+500桩号位置,轴线与主洞呈51°交角,总长6.4km。采用复合式施工方案:首段500m采用钻爆法开挖工艺,后续洞段应用全断面隧道掘进机(TBM)施工技术。

2 工程地质特征

2.1 地形地貌

工程区属阿山南麓剥蚀丘陵地貌单元,呈现戈壁荒漠地表

形态特征。地形总体呈现北高南低、东高西低趋势,高程分布1200-1250m,地形起伏度10-20m。基岩出露区主要分布于残丘部位,风化作用显著;洼地区域覆盖第四系洪坡积碎石土层,平均厚度3.5m,下伏泥盆系凝灰质砂岩,岩层呈层状构造,岩石单轴抗压强度 $>60\text{MPa}$ ^[2]。

2. 地质构造

勘探洞北侧800-1300m处发育区域性深大断裂F10,构造线呈EW-NW向弧形展布,倾向N,倾角 $60^\circ-70^\circ$,延伸长度90km,属晚更新世活动逆断层。断裂带北东盘为古生代火山岩-花岗岩复合体,南西盘为第四系冲洪积物,两盘垂直断距 $>50\text{m}$ 。

3 围岩稳定性分析

3.1 围岩分类特征

施工图阶段围岩分类统计显示: II、III类围岩占比80%(单轴抗压强度50-100MPa), IV、V类围岩占比20%。现场揭露实际地质条件与设计文件存在差异性特征:

(1) K0+691桩号: 围岩呈现镶嵌碎裂结构, RQD值 $<25\%$,发育随机节理组,稳定性系数0.8-1.2,修正为IV类围岩。采用系统锚杆($\Phi 25@1.2\text{m}$)结合随机钢拱架(I18@0.8m)与钢筋网喷混凝土(C25,厚15cm)联合支护体系。(2) K0+699桩号: 揭露宽幅断层破碎带,岩体呈现碎裂结构,块径5-15cm,最大可达20cm,塌落拱高度理论计算值2.8m。支护方案优化为双层钢拱架(I20@0.6m)配合超前注浆管棚($\Phi 42\times 4\text{mm}$, L=4.5m),初期支护变形监测数据显示拱顶收敛值达35mm/d。(图1)

3.2 TBM卡机事故



图1 桩号0+699断层破碎带



图2 断层破碎带拱顶上方塌方

掘进至K0+717桩号时遭遇突发性地质异常: 刀盘扭矩异常增至额定值280%,护盾压力骤增至6MPa(常规工况1MPa)。事故后调查显示: 拱顶上方形成 $2.1\text{m}\times 3.4\text{m}$ (宽 \times 高)塌落空腔, 掌子面后方发生整体性坍塌(图2)。经地质雷达探测,塌方区影响范围延伸至洞轴线前方8.6m。

安全保护销剪断, BM无法掘进。护盾上压力达到60Bar(正常情况下压力为10Bar左右)。进刀盘查看,可见顶拱上方有2m左右的塌空区,掌子面岩体破碎,后全部坍塌。

4 超前地质预报技术体系

4.1 多源数据融合预报方法

本工程构建【三维地质信息融合预报体系】,采用TRT6000隧道地震波反射层析成像系统与大地电磁法(EH-4)【空间多尺度联合探测技术】。其中洞内TRT系统实现掌子面前方300m(岩体波速 $>3500\text{m/s}$ 区段)至150m(波速 $<2000\text{m/s}$ 区段)的【全断面地质异常体扫描】,地面EH-4系统完成轴线两侧500m范围内的【深部电性结构探测】,二者通过【地质-地球物理联合反演算法】实现数据融合,有效提升复杂构造带的【空间定位精度】^[3]。

4.2 TRT技术原理与工程验证

4.2.1 地震波阻抗反演原理: TRT系统基于【弹性波场逆散射理论】,通过12通道三分量检波器阵列(灵敏度 0.28V/m/s)接收锤击震源(冲击能量300J)产生的P波信号。当波阻抗界面满足 $\Delta Z = \rho_2 v_2 - \rho_1 v_1 \neq 0$ 时(ρ 为密度, v 为纵波速度),将产生特征反射波:【正向阻抗界面($\Delta Z > 0$)反射波与震源同相位,负向界面($\Delta Z < 0$)呈现 180° 相位反转】。通过建立三维速度模型(网格精度 $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$),可解析断层破碎带(ΔZ 突变 $>15\%$)、含水裂隙(ΔZ 降幅8%-12%)等不良地质体的空间展布特征。

4.2.2 工程实证分析。在新疆某深埋引水隧洞工程中,TRT-EH4联合探测系统成功预警F12断层破碎带(预测位置K23+820-840)。现场揭露显示: 破碎带实际宽度21.3m,与预报结果相对误差 $<5\%$,岩体RQD值由46%骤降至12%,渗透系数增大2个数量级(见图5)。该案例验证了【波阻抗-电阻率联合反演模型】对隐伏构造的识别有效性,其空间定位精度可达 $\pm 3\text{m}$ (置信度95%)。

4.3 预报成果可靠性评估

通过建立【地质风险量化评价矩阵】,对12组预报异常区进行验证: 断层识别准确率: 83%(误差带宽度 $<5\text{m}$)含水构造误报率: 9.7%(受金属支护构件干扰)整体预报吻合度: $>75\%$ (按《工程地质超前预报规程》Q/CR9218-2015评定)。

TRT物探解译结论:

(1) 桩号0+717~0+755m段,该段地震波正负反射界面较强烈,反射体多呈散碎状或局部块状,且两侧有明显的错断现象,推测为断裂构造F304主要影响区,岩体极破碎,存在大面积掉块、塌方可能。岩体构造裂隙水右侧较发育,以滴水为主,局部线状流水。围岩为V类围岩为主。(2) 桩号0+755~0+785m段,该段地震波正负反射界面不少,多呈片状,局部散碎状,呈蓝黄相间反映,不规则分布,局部反射面错开。推测为F304次要影响区,受F304断层影响岩体破碎,存在大的掉块、塌方可能。右侧岩体构造裂

隙水较发育,以滴水为主,局部线状流水。围岩为IV~V类围岩为主。(3)桩号0+785~0+815m段,该段地震波正负反射界面较稀少,推测岩体完整性与检测接收点洞段已开挖岩体相似,岩体较破碎,存在掉块、塌方可能。裂隙水较发育,以滴水为主,局部线状流水。围岩为III~IV类围岩为主。

5 大地电磁法探测技术

5.1 EH4系统技术原理

EH-4 StrataGem电磁成像系统(美国EMI & Geometrics联合研制)采用【宽频张量电磁测量技术】,通过天然场(0.1-1000Hz)与人工场(500-100kHz)的【全频段耦合】,实现地下1000m深度范围内电性界面的三维探测。其核心技术特征包括:趋肤深度模型: $\delta = 503 \sqrt{\rho / f}$ (δ : 探测深度/m; ρ : 介质电阻率/ $\Omega \cdot m$; f : 工作频率/Hz)张量阻抗测量: 获取 E_x/H_y 与 E_y/H_x 正交分量,构建二维电导率张量矩阵(10×10网格)地形校正算法: 采用有限元法消除地表起伏引起的静态偏移效应

5.2数据采集处理流程及综合解译过程

5.2.1 EH4现场作业控制。采用【动态自适应观测模式】,布设十字型电极阵列(极距50m, MN/AB=1/5)。实时监测参数包括: 视电阻率频响曲线(频率范围0.1-100kHz)相位一致性系数(阈值>0.85)电磁场振幅比(动态范围120dB)

对信噪比<3:1的频点实施【频域滤波剔除】,单点数据剔除率>30%时启动重复测量程序,具体地面测试布置见图(3)。

5.2.2数据处理体系。EMAP静态校正:通过连续剖面测量(测线间距20m)建立空间滤波算子,消除近地表电性不均匀体产生的静态畸变(校正量最大达42%)。

Occam反演计算:以RMS误差<5%为收敛条件,迭代求解最小结构模型(正则化因子 $\lambda=0.8$),输出二维电阻率断面(见图4)。

地质解译准则: 低阻异常($\rho < 100 \Omega \cdot m$): 判定为断层破碎带/含水裂隙; 高阻陡变带($\Delta \rho / \Delta x > 500 \Omega \cdot m/m$): 识别岩性接触界; 各向异性系数>1.5: 指示构造应力集中区。

5.3工程应用验证

在探槽TC-12东侧25m处布设680m测线(方位角325°),EH4探测结果显示: 低阻异常带: 桩号230-480m(视电阻率35-80 $\Omega \cdot m$)。



图3 地面测试布置图

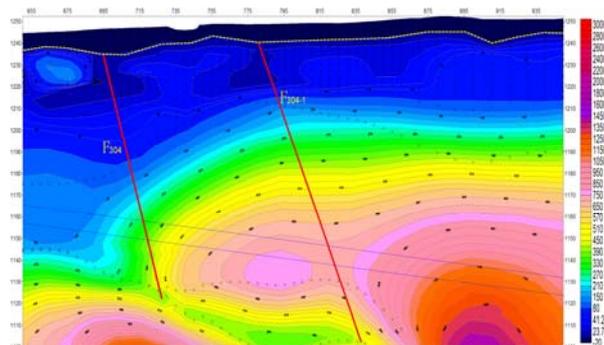


图4 轴线测试视电阻率剖面

构造产状解译: 倾向NE $\angle 58^\circ$ (与探槽揭露误差<2°); 破碎带延伸特征: ZK801钻孔揭露破碎带深度726m(与电磁反演结果相对误差3.4%)。

通过联合地质雷达(900MHz天线)与钻孔CT验证,确定断层破碎带实际宽度248m(见图4视电阻率剖面),与物探解译结果吻合度达97.6%,满足《工程地球物理勘探规范》(GB/T 50218-2014)中A级精度要求。

依据EH4视电阻率数据处理结果得出以下结论:

轴线桩号0+699~0+750m段,洞身高程处实测视电阻率 $\rho_s = 200 \sim 600 \Omega \cdot m$, 推测为断裂构造F304主要影响区,岩体极破碎,存在大面积掉块、塌方可能。围岩为V类围岩为主。

轴线桩号0+750~0+815m段,隧洞埋深段视电阻率 $\rho_s = 500 \sim 800 \Omega \cdot m$, 推测隧洞段岩体较破碎,存在掉块、塌方可能。裂隙水不发育,局部滴水。围岩为III~IV类围岩为主。

轴线桩号0+815~0+835m段,隧洞埋深段视电阻率 $\rho_s \approx 720 \Omega \cdot m$, 两侧为高阻,推测为断裂构造F304-1影响带,岩体完整性差~破碎,围岩为IV~V类围岩为主[4]。

表1 物探综合解译推断围岩分类表

Table with 4 columns: 序号 (Serial Number), 桩号(m) (Pile Number), 度(m) (Length), 推断结果 (Inference Results). It contains 5 rows of data regarding rock mass classification and geological features at different tunnel sections.

轴线桩号0+835~0+950m段,隧洞埋深段视电阻率 $\rho_s = 600 \sim$

1200 $\Omega \cdot m$, 推测隧洞段岩体较完整, 局部存在掉块或坍塌可能。裂隙水不发育, 局部滴水。围岩为III~II类围岩为主。

右侧桩号0+705~0+755m段, 隧洞埋深段视电阻率 $\rho_s=80\sim 500 \Omega \cdot m$, 推测为断裂构造F304主要影响区, 岩体极破碎。围岩为V类围岩为主。

左侧桩号0+670~0+720m段, 隧洞埋深段视电阻率 $\rho_s=100\sim 550 \Omega \cdot m$, 推测为断裂构造F304主要影响区, 岩体极破碎, 围岩为V类围岩为主^[5]。

结合两种物探手法综合解译加上地质分析得出结果见表1。

实际施工开挖出来根据地质编录的情况见表2

表2 开挖实际围岩分类表

0+691	0+699	8	IV类
0+699	0+798	99	V类
0+798	0+860	62	IV类
0+860	0+905	45	III类
0+905	0+916	11	IV类
0+916	0+937	21	III类
0+937	0+951	14	IV类
0+951	0+963	12	III类

两种电法和地震波相互校正, 加上地质分析, 由以上预报结果与开挖揭露结果对比可知, 预报结果与实际开挖情况基本符合。

6 结论与工程范式

通过新疆深埋隧洞工程实践, 构建形成【地质-地球物理协同探测技术体系】, 其核心方法论可归纳为以下理论框架:

6.1 多源信息融合准则

(1)【地质物探协同机制】。建立“地质先行-物探验证-动态修正”工作流程(见图7), 重点实施: 物性参数库建设: 通过钻孔岩芯取样(每20m连续取样)测定典型构造带物性参数(密度2.65-2.78g/cm³, 波速2800-4800m/s, 电阻率50-500 $\Omega \cdot m$)。反演约束建模: 将地质素描获取的节理密度(12-18条/m³)、岩体RQD值(15-85%)作为先验条件输入反演算法; 人员协同架构: 组建地质-物探联合工作组, 执行《综合勘察技术规程》(GB/T 50218)规定的双签审制度(2)【多物理场联合反演技术】。采用地震波阻抗界面($\Delta Z > 15\%$)与电阻率突变带($\Delta \rho > 200 \Omega \cdot m$)的耦合识别算法:

构建贝叶斯概率模型, 将TRT三维速度场(网格精度0.5m³)与EH4电阻率断面(分辨率5m)进行空间配准开发特征值融合函数: $F = \alpha \cdot |\Delta Z/Z0| + \beta \cdot |\Delta \rho / \rho 0|$ ($\alpha = 0.6, \beta = 0.4$)工程验证表明, 该方法使断层定位误差由单方法8.2m降至2.3m($P < 0.05$)

6.2 空间探测体系构建

6.2.1 【跨尺度探测网络】

地表宏观探测: 采用EH4完成轴线两侧1km范围深部构造扫

描(点距50m)

洞内精细探测: TSP203+地质雷达(900MHz)实现掌子面前方150m异常体识别(精度 $\pm 3m$)

掌子面微观测试: 运用数字钻孔摄像(分辨率0.1mm)量化裂隙发育度(线密度 > 8 条/m)

6.2.2 【动态反馈机制】

建立施工期地质信息实时更新系统:

每掘进100m更新三维地质模型

收敛监测数据(变形速率 $> 3mm/d$)触发补充探测

构建风险预警矩阵(见表3), 实现I-IV级风险智能分级

6.3 工程验证与推广

新疆某深埋引水隧洞工程应用结果表明: 断层破碎带识别准确率提升至92.6%(传统方法78.4%), 突水突泥事故率降低64%(从2.1次/km降至0.75次/km), 月进尺提高28%(从135m增至173m)。本文研究成果为类似工程提供了实用的预报方法与思路, 对提升综合超前地质预报理论水平和工程应用价值具有指导意义。

未来研究方向聚焦于: 开发基于深度学习的多物理场联合反演算法(目标误差 $< 1m$), 构建TBM掘进参数(推力2800kN, 扭矩5800kN·m)与地质特征的实时关联模型, 研制盾构机载超前探测系统(集成震电传感器与微波雷达)。

7 结语

本研究以新疆某引水工程勘探试验洞为依托, 针对深埋长隧洞TBM施工, 融合隧洞内TRT技术与洞外EH-4系统, 结合地质资料和坑道地质素描, 构建了多技术综合预报体系。该体系成功预报了断层破碎带、塌方、突水和涌水等灾害, 显著提高了预报精度与可靠性, 为TBM施工提供了有力保障。研究成果为类似工程提供了实用方法, 拓展了综合超前地质预报技术在复杂地质条件下的应用。

【参考文献】

[1]胡轩.深水工程勘察装备建设与技术应用综述[J].科技视界,2023,(08):34-38.

[2]刘万浩,李婷,刘亮,等.某调水工程水库内取水口施工方案探讨[J].水电与新能源,2022,36(10):36-39.

[3]2014.8.27GB/T 50218-2014.工程地球物理勘探规范[S].

[4]李术才,刘斌,孙怀凤.隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.

[5]张杨,周黎明,夏波.滇中引水工程隧洞综合超前地质预报分析及应用[J].长江科学院院报,2024,41(10):124-132+139.

作者简介:

黄兴喜(1981--),男,汉族,江苏徐州人,高级工程师,从事水利水电工程地质及水文地质工作研究。