

山区高速公路隧道工程断层破碎带地质勘察关键技术研究

文 / 宋马可 江苏省水文地质工程地质调查大队

摘要: 为了优化山区高速公路隧道工程的设计与施工, 确保隧道施工安全, 需要准确查明断裂破碎带走向、发育范围以及对隧道工程的影响, 本文首先在采用地表地质调查方法准确识别断层破碎带的基础上, 利用物探解译技术探明断裂的走向和影响范围, 然后合理布设钻孔揭露断层破碎带成功验证物探解译成果。通过岩石试验、声波测试和注水试验, 分析了断层破碎带的地质特征, 得出了破碎带具有岩体破碎、透水性强、稳定性差特点, 进一步论证了各技术方法的适用性, 并对工程安全性进行了评估。

关键词: 山区高速公路隧道; 断层破碎带; 地质勘察; 技术研究

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2025. 03. 065

引言

山区高速公路隧道工程建设通常受复杂地质环境影响, 尤其是断层破碎带的存在, 对工程的施工安全及长期稳定性提出了严峻挑战。断层破碎带区域岩体的破碎性、透水性及力学特性的不均匀性, 对隧道设计与施工提出了更高要求^[1]。在勘察工作中, 如何发现断裂带并开展针对性地质勘察工作, 运用地质调查、钻探取样、水文地质试验和物探解译等多种关键技术手段的综合勘察方法^[2], 详细查明断裂带发育特征, 并评价其对隧道工程建设的影响, 能够为隧道工程优化设计方案和减少施工风险提供科学的依据, 具有重要的实际应用意义。

一、工程概述

本文以某山区高速公路为例, 项目设计总长度45Km, 位于大别山区, 地质条件复杂, 桥隧比高达65%, 设计隧道工点共10个, 其中长隧道7座, 本文选择其中一条作为研究对象, 进行山区高速公路隧道工程断层破碎带地质勘察关键技术研究。隧道按照左右线分离设计, 右线全长2957米, 设计进口标高为228米, 最大埋深为288米; 左线全长2972米, 进口标高为228米, 最大埋深达到313米, 属于典型的长隧道工程。

二、高速公路隧道工程断层破碎带地质勘察技术

(一) 应用物探技术确定断裂位置

随着勘察技术的不断发展, 物探技术在勘察中的应

用越来越多, 其中高密度电法和大地电磁法技术逐渐成熟。高密度电法以阵列式电阻率测量为核心, 结合高密度布点技术, 对地层的电性特征进行二维剖面 and 纵向变化的综合测量。此方法将电剖面和电测深相结合, 可有效揭示地下某一深度水平及岩性纵向分布的变化情况, 数据处理精度显著提高。大地电磁法通过EH4系统, 将天然电磁场信号和人工电磁信号结合, 分别在10-1000Hz和500-100KHz频段下实现多频段信号的采集与处理。这一方法能够穿透厚度不同的覆盖层, 高精度反演地下0~1000m范围内的电性结构, 并通过连续测深点阵生成二维电阻率剖面, 甚至形成三维立体成像, 为破碎带的空间分布提供了翔实数据支持。

地表调查工作完成后, 对于发现的断层破碎带应进行进一步研究, 一般先开展钻探工作还是先开展物探工作应视调查阶段对破碎带研究的具体情况而定。由于本次调查发现的破碎带距离隧道线路较远, 无法通过出露地表的破碎带分析出断裂的具体走向和影响范围, 所以先进行了物探技术工作, 为探明断裂位置走向及与隧道的位置关系, 布置了物探三条横测线, 每条横测线长度1000米, 分别布置在进出口和洞身位置(见图1), 采用高密度电法与大地电磁法相结合的综合探测手段, 并对探测成果进行了解译, 结合地质资料推测断裂位置及其破碎带影响范围。

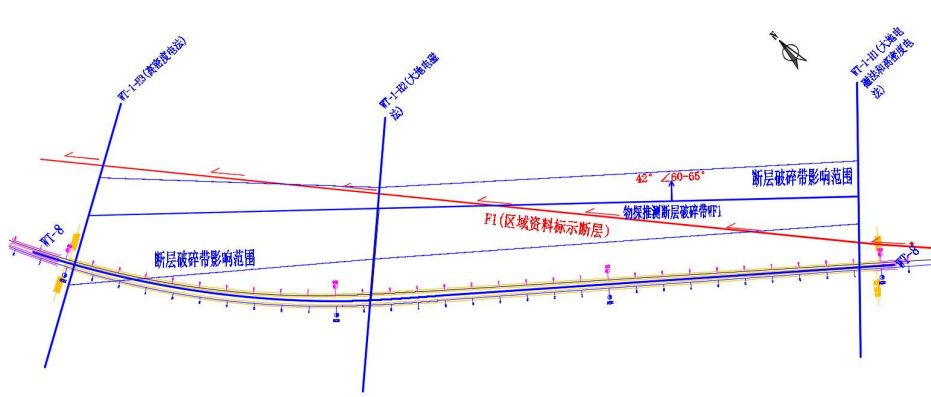


图1 物探线布设、区域标示及物探推测断层位置示意图

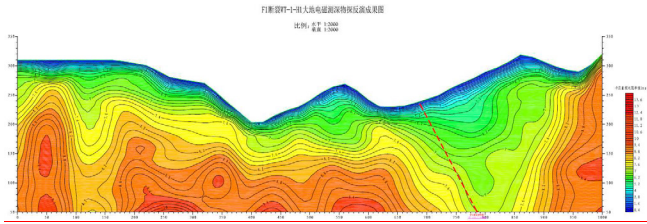


图2 F1断裂 WT-1-H1 大地电磁法物探反演成果图

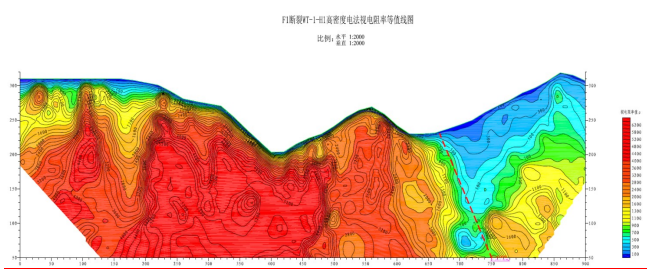


图3 F1断裂 WT-1-H1 高密度电法视电阻率等值线图

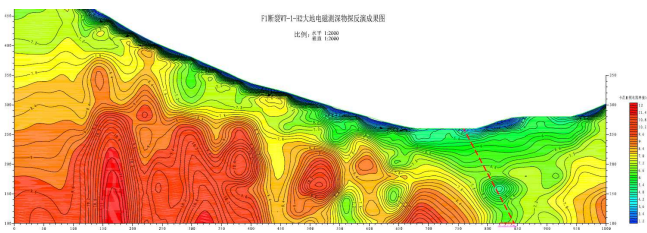


图4 F1断裂 WT-1-H2 大地电磁法物探反演成果图

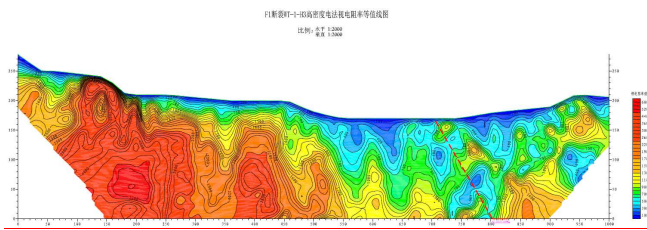


图5 F1断裂 WT-1-H3 高密度电法视电阻率等值线图

根据探测和解译成果，F1断裂距离隧道线位188-336米，距离较远，F1断裂破碎带推测宽度230-400m，靠近出口一带破碎带宽度变大，F1断裂破碎带波及隧道出口一带，影响到洞口段和浅埋段，建议该段按五类围岩进行分类。

(二) 利用钻探取样技术验证物探成果

在工程地质勘察中，地质钻探和物探解译成果相互验证，通常先通过钻孔钻取岩芯可以直观的看到地层分布情况，然而局限性在于仅能看到钻孔这一个点的地质情况，再通过孔内或者地面物探成果，两者相互比较和验证，可以实现由点到面的地层和构造推演，获取更大区域范围的地质情况。在本次断裂探测过程中，先利用物探技术探测断裂的走向和发育范围，然后在断裂穿越线路处布置钻孔，孔深以钻穿断层破碎带或者隧道底板以下10米控制。根据钻探成果验证物探解译成果的准确性。

通过钻探，在孔深35米处成功揭露断层破碎带，与物探解译成果基本吻合，岩芯对比见图6，取代表性岩芯进行岩石相关力学实验，孔内进行声波测试和注水试验。



图6 验证钻孔孔内正常岩芯与破碎带岩芯对比

通过合理的施工组织，在仅施工一个钻孔的情况下探测清楚了断裂的走向和发育范围，极大提高了施工效率，节约了人力和物力成本。

三、断层破碎带勘察成果分析

(一) 断层破碎带工程地质特征分析

断层破碎带作为山区高速公路隧道工程中的复杂地质单元，具有显著的不均匀性和弱化作用，其工程地质特征对隧道施工的安全性与稳定性具有决定性影响。通过多维度的地质勘察和测试，分析了断层破碎带的岩性分布、岩体结构及力学特性等重要指标，结合区域水文地质特征，对断层破碎带工程地质特征进行了全面研究。断层破碎带区域岩性呈现出强烈的破碎化特征，主要岩种包括花岗片麻岩和片理化程度较高的泥质岩，岩体普遍表现为中等至高碎裂度。表1显示了破碎带不同区域岩性特征及相应的力学参数测试结果，其中单轴抗压强度的分布范围为2.7~22.4MPa，弹性模量的分布范围为2.6~10.2GPa，泊松比则集中于0.24~0.35。这些参数的显著变化表明，断层带区域岩体整体呈现出较高的变形性和较低的稳定性，尤其在破碎带核心区，岩体的力学参数急剧下降，构成施工中的潜在崩塌风险。

表1 不同岩性区域力学参数测试结果

岩性类型	单轴抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比
花岗片麻岩	15.2 ~ 22.4	5.6 ~ 10.2	0.24 ~ 0.31
泥质岩	2.7 ~ 6.3	2.6 ~ 4.7	0.24 ~ 0.35

水文地质方面，断层破碎带表现出显著的透水性，水文条件复杂，水流主要沿裂隙和构造线分布^[3]。钻探取样与注水试验结果揭示，区域渗透系数范围为 $1.2 \times 10^{-6} \sim 3.5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，其中破碎带核心区的渗透性明显高于外围。试验中水头变化曲线表明，破碎带裂隙网络的发育程度直接决定了水文条件的空间分布特征。结合声波测试结果可见，断层带内岩体声速显著降低，完整性指数多数小于0.5，进一步佐证了其低稳定性。通过力学参数、水文地质与岩体完整性综合分析，断层破碎带的工程地质特征显现出强烈的异质性和高风险性。这些特征直接影响隧道施工中围岩的稳定性和支护结构的设计参数^[4]，为优化施工方案及风险控制策略提供了科学依据。

(二) 勘察技术适用性评价

山区高速公路隧道工程断层破碎带的地质勘察技术适用性直接决定了地质特征解析的精确性与施工风险评估的科学性。结合地表地质调查、物探及钻探取样技术的实际应用效果，综合分析其对断层破碎带复杂性特征的适配能力及对后续施工优化的贡献度。地表地质调查技术具有高精度与广覆盖的特点，其高分辨率无人机航测，能够快速定位地表破碎带区域，保证区域岩性和构造特征的初步解译结果与实际吻合。表2显示了地表调查与其他技术在岩石强度与构造分布识别中的精度对比，地表地质调查技术对断层破碎带的分布边界和主要岩性参数准确度达到85%以上，其空间位置识别能力为后续勘察提供了必要基础。

表2 勘察技术岩石参数识别精度对比

技术名称	空间分布精度 (%)	岩性辨识准确率 (%)	构造边界识别率 (%)
地表地质调查	85.2	87.6	84.5
高密度电法和大地电磁法	81.5	78.3	80.7
钻探取样	94.3	92.8	93.6

从表2的数据可以看出，不同勘察技术在岩性辨识、构造边界识别及空间分布解析方面的精度存在差异。地表地质调查技术在岩性辨识准确率上表现优异，达到了87.6%，在构造边界识别率和空间分布精度上分别为84.5%和85.2%，展现了在区域宏观地质特征勘察中的显著优势。高密度电法虽然在空间分布精度（81.5%）和构造边界识别率（80.7%）方面略低于地表地质调查技术，但其对于地下电性特征解析具有独特的优越性，特别是在复杂断层破碎带的精细探测中能有效弥补其他技术的局限性。相比之下，钻探取样技术在所有参数上均表现突出，尤其在空间分布精度（94.3%）及岩性辨识准确率（92.8%）方面表现卓越，能够提供最直接和翔实的地质参数数据。三种技术的综合应用既能保障宏观区域勘察的全面性，又能满足断层破碎带精细特征解析的需求，其各自的优劣势形成了良好的互补关系。

(三) 工程安全性评估

高速公路隧道工程的安全性与其断层破碎带的地质特性密切相关。通过地表地质调查、物探技术和钻探取样技术获取的数据，围绕围岩强度、岩体完整性、透水性及稳定性进行了系统性分析，为工程安全性提供了科学评估基础，如表3所示。

表3 岩体稳定性及水文地质参数评估

参数名称	最小值	最大值	平均值	标准偏差
岩体完整性指数	0.13	0.52	0.27	0.08
单轴抗压强度 (MPa)	2.7	22.4	16.6	5.2
渗透系数 (cm/s)	1.2×10^{-6}	3.5×10^{-5}	2.8×10^{-5}	0.8×10^{-5}
声波速度 (m/s)	1950	3500	2800	450

岩体完整性指数 (KV) 数据显示，断层破碎带岩体质量分布不均，完整性指数在0.13~0.52之间，平均值为0.27，反映出岩体稳定性差且局部区域破碎严重。单轴抗压强度试验结果揭示破碎带岩体的力学性能显著弱化，强度分布范围为2.7~22.4MPa，平均值为16.6MPa，标准偏差为5.2MPa，表明破碎带区域围岩承载能力显著低于整体隧道设计要求。渗透系数范围为 $1.2 \times 10^{-6} \sim 3.5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，表明破碎带透水性较高，水文条件复杂且裂隙网络发育，容易在施工过程中引发渗漏或突水问题。声波速度测试结果进一步证明岩体弹性模量偏低，平均值为2800m/s，明显低于稳定岩体的标准声速，进一步佐证岩体质量存在显著弱化。通过上述数据的量化分析，可以明确断层破碎带区域存在岩体破碎、透水性强、承载能力低等特性。

结论

山区高速公路隧道工程中的断层破碎带地质勘察技术在确保施工安全、优化设计方案及风险控制方面具有至关重要的作用。通过多种勘察手段的综合应用，精确掌握了断层破碎带的地质特性，为隧道工程的顺利实施提供了可靠依据。未来，随着勘察技术的不断发展，特别是在地质灾害预测与防治领域，勘察手段的精细化和智能化将进一步提升工程风险评估的精度与效率，有助于实现更高效、更安全的隧道建设。

参考文献

- [1] 廖秋林, 蒋坪临, 武福美, 等. 断层破碎带形态对隧道围岩变形影响研究[J]. 市政技术, 2024, 42(05): 92-103.
- [2] 吕超, 张鹏, 何俊澜, 等. 断层带综合地质勘察方法及隧洞围岩变形模拟研究[J]. 矿产勘查, 2022, 13(01): 122-129.
- [3] 资西阳. 断层破碎带隧道突涌水灾害风险等级评价研究[J]. 公路, 2021, 66(12): 410-416.
- [4] 邢军, 董小波, 贺晓宁. 断层破碎带内隧道施工围岩稳定性分析[J]. 灾害学, 2018, 33(S1): 164-168.