

科技创新

断裂带地球物理综合勘探方法应用分析

胡天明

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300251)

摘要: 断层破碎带对隧道施工进度以及施工安全会产生极大影响,施工前探明断裂带具体位置与岩性信息十分重要。为保证隧道顺利开挖与掘进,采用钻探取芯、天然源面波法以及综合测井多种手段相结合的勘探方法,探明复杂的地质条件下断裂带具体特性,并对其岩石特性进行试验分析。结果表明:在大范围探测条件下,天然源面波法可整体勘测断裂带的特征,根据波速变化特性可进行断层初步定位;而综合测井法则根据电阻率、自然电位等参数较为准确地探明了断层的具体分布,对断裂带的位置、宽度、产状、断裂带组成物质、胶结程度及含水情况给出定量分析,多种方法相结合提高了断层破碎带探测精确度。

关键词: 断层破碎带;综合测井;天然源面波法

中图分类号: P631; N19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)09-0001-06

地质勘探是建设工程施工前必不可少的步骤,勘探结果的准确性保障施工安全,尤其在地铁隧道的施工前进行勘探可确保复杂地质条件下掘进顺利进行,因此勘探方式与精确度十分重要。

近些年,面波勘探、电磁勘探、测井勘探等物理勘探方法因便利性与准确性的提升已在实际工程中应用广泛^[1]。其中综合测井技术在隧道勘察中已有较多应用,测井技术应用电阻率、波速、井温等参数特征探测地层性质^[2]。常见测井技术包括套管井测井、随钻测井、射孔取芯测试^[3]。在隧道建设前期勘探过程中可确定孔内岩层结构、破碎程度等信息;同时也可凭借三侧向电阻率、自然伽马、波速等一系列参数分析孔内的具体岩性状况^[4-5],可对测井附近的地质信息进行精确测量,整体区域的地质信息仍存在不确定性。

为探测整体区域地下特征,经过数年发展,面波勘探在岩土工程中应用广泛,根据现场施工条件在实际工程中多采用人工源或天然源面波法等技术判断整体区域地质信息。根据接收到的瑞利波反演得到波速,确定该地层厚度以及岩性^[6]。在大型区域探测中采用人工震源或自然背景波动信号,沿测线布置检波器从中提取面波频散信息探测地下结构^[7-8]。

单一勘探方法针对性强,在特定条件下使用性

好。综合勘探则取长补短,综合各种勘探方法的优点提高探测精度。目前多数工程采用物探与钻探相结合的综合方法可降低勘探量,借助不同类型的地球物理手段降低误判率^[9-11]。此外在破碎带的探测中通过面波、综合测井等方法测量电阻率、波速、伽马常数等,可准确判断分界面与岩性以及破碎程度等信息,为实际施工提供精确指导^[12-15]。

结合现有研究,为探明工程内断裂带精确信息,采用综合物理勘探方法探测隧道施工区域断裂带的位置、宽度、产状、断裂带组成物,对断层作出定性、定量评价,保证隧道安全施工,借助综合测井与天然源面波法的探测数据进行综合分析,并结合岩芯样本,确定断层的具体信息,以期为后续类似工程提供借鉴。

1 工程概况

勘探区位于珠江三角洲冲洪积平原夹丘陵缓坡,线路地面标高为 4.0~25.22 m,地形相对高差 21.22 m,地势低平,地形稍有起伏,在此区域内(图 1)进行隧道施工。

线路区的一级构造单元为南加里东褶皱带,二级构造单元为粤北、粤东北-粤中拗陷带,三级单元为粤中拗陷,进一步划分线路位于花县凹褶断束内。区域内主要断裂有石碣断裂、蟠岗断裂、广从断裂、瘦狗岭断裂、广三断裂带、珠江口断裂带、白坭-

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题(2022B0203264009)

作者简介: 胡天明(1994—),男,河北唐山人,硕士,工程师,研究方向为岩土工程。



图 1 施工区域线路示意图

沙湾断裂、北江断裂、西江断裂带、顺德断裂、苍城-海陵断裂带和鹤城-金鸡断裂带。本工程主要涉及广三断裂。断裂东起广州南部,往西经三水盆地向西延伸至高要东北的广利一带,总体走向北西西至近东西向,全长 120 km。断裂可分为东段、中段及西段,该工程穿越本断裂的中段。断裂带分布如图 2 所示。

2 勘探准备

隧道施工需提供准确的信息,提高勘探精度。综合各种勘探方法的优点,采用综合测井、天然源面波勘探方法探明断裂段内具体岩性、分布情况等信息,对施工区域地层特性进行详细探测。

2.1 天然源面波法

天然源面波法可在不破坏地层条件下通过采集反射波信号,从中提取面波信息,获取地下波速的数据,根据横波在不同物体中的速度差异分析岩性,可初步探测断层位置。根据断裂带整体走向,在本次勘探中采用 Mole3D 地震仪,39 台地震仪呈线性台阵布置,道间距为 10 m,其频段范围为 0.02~230 Hz,采用全球定位系统(global position system,GPS)授时,其授时精度优于 1 ms,保证了不同仪器记录的同步性,采样间隔为 1 ms。布置 WD-1,WD-2 条天然源面波物探测线,野外共采集 110 个点,检查点为 11 个,形成物性分层综合成果断面图,依据天然源面波探测结果,综合分析得出断层发育区。测线布置如图 3 所示,呈垂直分布。

2.2 综合测井法

钻探通过钻芯取样,可对综合测井以及天然源

面波法的探测结果进行验证,明确钻孔处岩性。受场地条件限制无法直接在探测区上方钻探,选择斜孔钻探方法避开障碍区域。施工中选用 MD-550 型探矿钻机-600 m 全液压探矿钻机进行钻探作业,并配套相应的钻具。现场斜孔钻探采用套管和泥浆护壁,回转钻进方法全取芯钻探工艺,使用敞口活塞厚壁取土器和敞口薄壁取土器取土。

利用斜孔钻机作为动力进行综合测井试验。本次测井工作采用声波测井、自然电位测井、三侧向电阻率测井、井温测井、井斜测井、自然伽马测井来完成。使用 RD6700 型水平存储测井仪采集数据。在仪器使用前,严格按照执行规范及规定对所使用的各种测井方法仪器进行刻度、标定,保证测井数据的准确性和可靠性;采样间隔为 5 cm;测量方式为由钻具推送完成采集;测速为 5~10 m/min。该孔设计深度 86.0 m,实际深度为 120.40 m,测井深度为 97.85 m。测井工况如图 4、图 5 所示。

3 勘探结果分析

3.1 天然源面波法数据分析

图 6 为 WD-1 测线 S 波波速剖面图。由图 6 可知,其 S 波随着深度增大而不断增大。在浅层处由于多为第四纪沉积物,所以其波速较低。同时随着深度逐渐增加,在 50~70 m 位置处,波速范围为 1 300~1 500 m/s,显示为深蓝色区域,换算成纵波波速为 2 100~2 500 m/s,根据地质剖面图此处应为砂岩,波速与该处岩性特征相符合。由图 6 可知,此浅层区域无波速封闭区,表明除去断层区域,其余地层分布较好,无大面积岩溶空洞。而在波速 1 300~

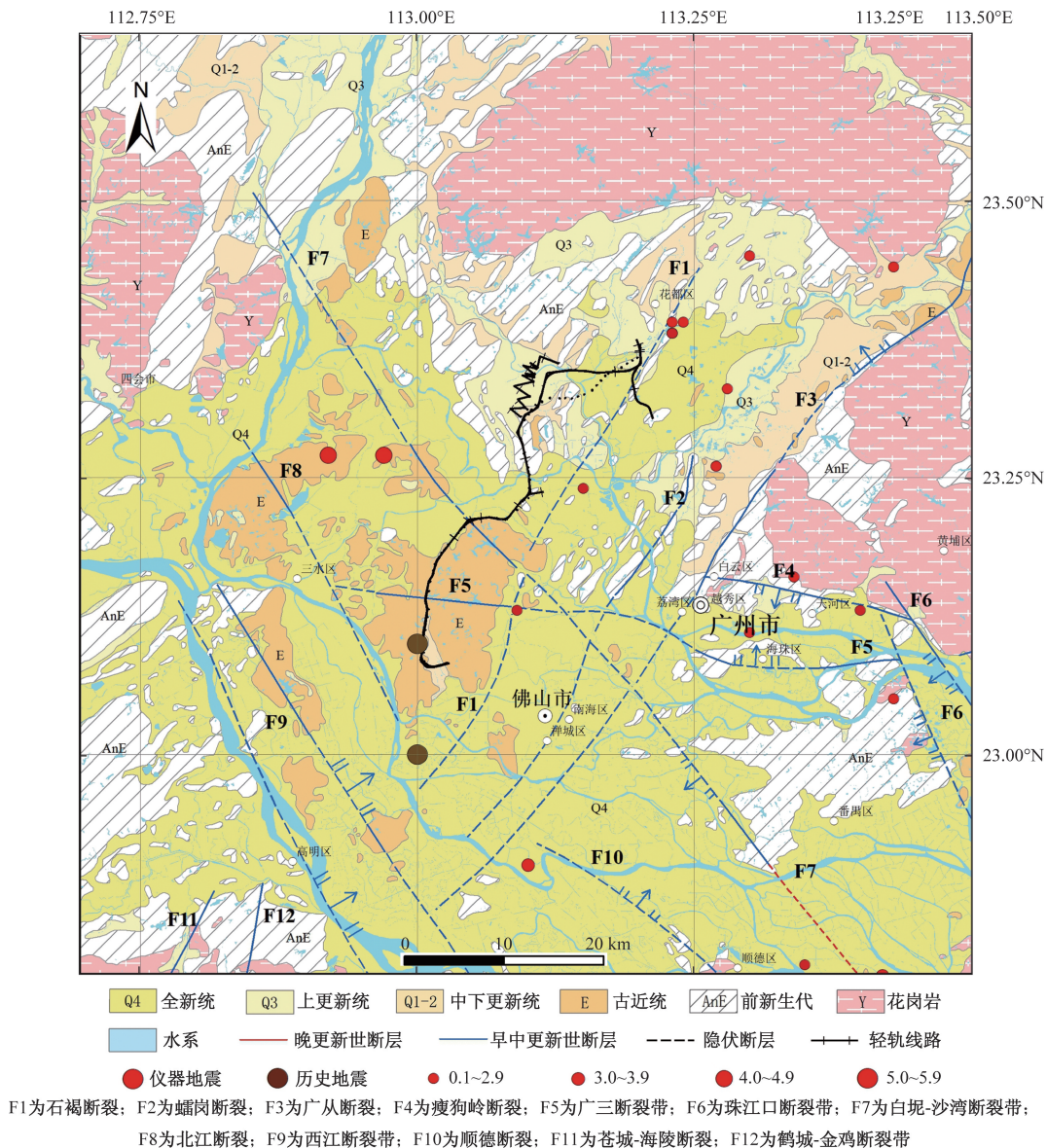


图 3 天然源面波法台阵布置

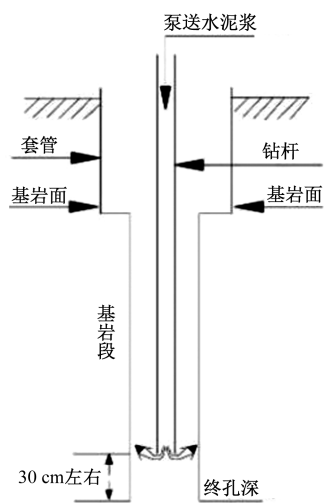


图 4 钻孔示意图

1 500 m/s 这一范围内,波速曲线并未呈现水平趋势变化,中间波速低,两侧波速高。在断层区域由于其岩石完整性差,较为破碎,中部区域岩性发生了明显变化,所以波速在断层处会出现显著降低现象。因此判断波速异常变化处存在断层,其边界线为 F1-F1'。

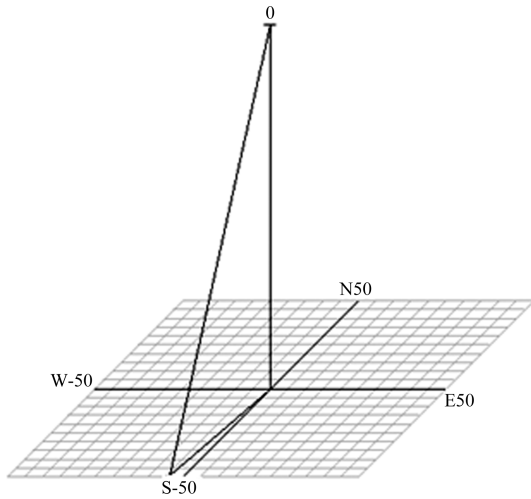


图 5 斜钻立体轨迹

图 7 为 WD-2 测线 S 波速度剖面图,其 S 波变化趋势与图 6 基本相同。在浅层区域波速较低且分布平缓,表明地层分布较为平整。在地下 50~90 m 高程处,出现 1 100 m/s 较高的波速封闭区,显示为淡蓝色区域,此处与泥质粉砂岩的波速特性相吻合。在 3 个波速较高区域之间出现低速区,根据断层特性判断在此位置处存在断层,且其分布范围较大。其边界线为 F2-F2'、F3-F3'。由上述两条测线的波速剖面可知,天然源面波法可较好地反映出波速异常的区域,根据波速变化判断出可能存在的断层与空洞区,在大尺度探测中适用性较好。

3.2 综合测井数据分析

因斜孔钻探 23-ZDDX-GSDL-002 孔揭露受断层岩性较多,选取该斜孔作为分析对象。斜孔深度 90.0 m,测井深度 74.55 m,基岩主要为泥质粉砂岩、砂岩。该孔综合测井测试深度从孔口开始测试至孔深 97.85 m 处,地下水水位位于孔口以下 14.80 m 处,均以沿斜孔方向为基准。

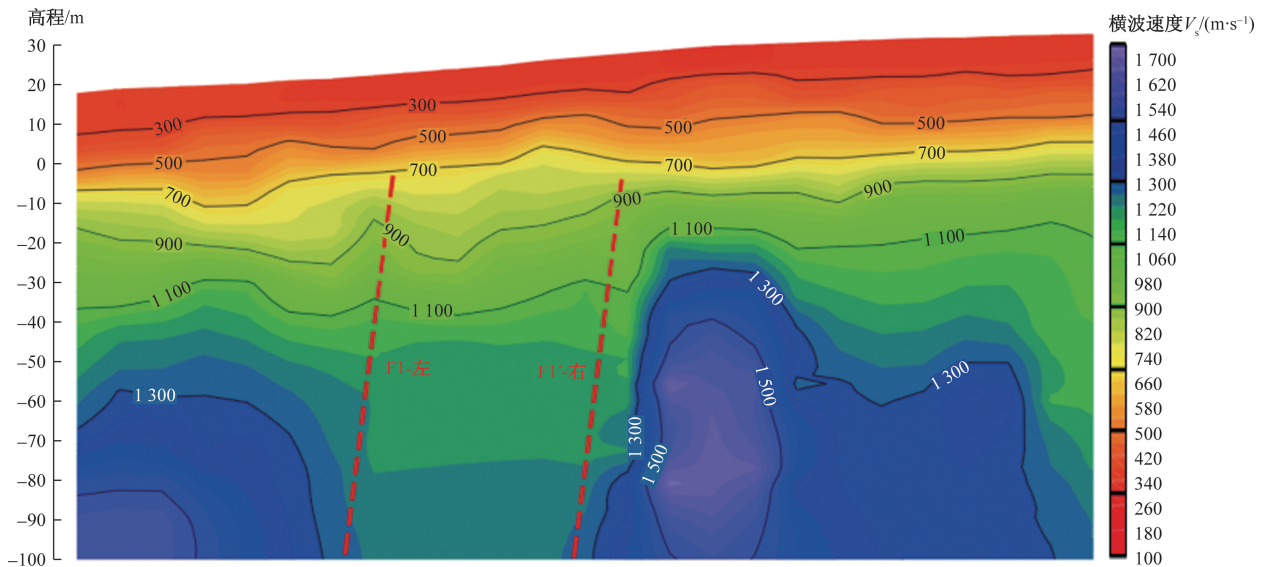


图 6 WD-1 测线 S 波波速剖面图

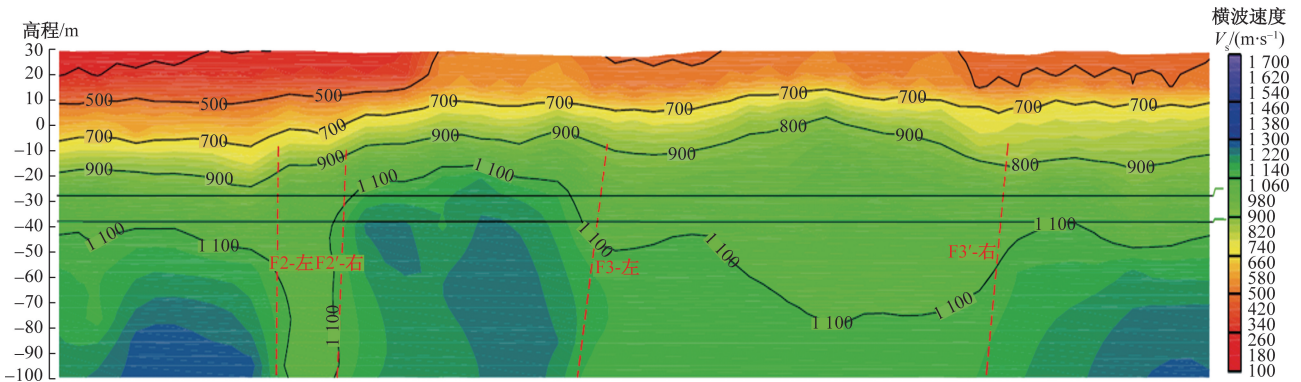


图 7 WD-2 测线 S 波波速剖面图

图 8 为综合测井成果图。整体分析试验数据结果,含水层段相对高阻围岩在视电阻率数据上呈现低阻异常和高阻异常,孔隙含水层自然电位数据上自然电位幅值大,数据偏离基线(零线)急剧上升或下降,在 44.10~45.60 m 段、54.20~59.50 m 段各测井数据均出现明显异常波动,表现为复合异常现象,表明在此段区域内存在含水率的异常变动,其原因在于此部位岩性较为破碎,裂隙中含水不均,自然电位波动明显规律。

由三侧向电阻率曲线图可知,在 41.70~44.0 m 段三侧向电阻率为 24.53 $\Omega \cdot m$,电阻率值处于相对低点,表明此处含水率较高;自然电位为

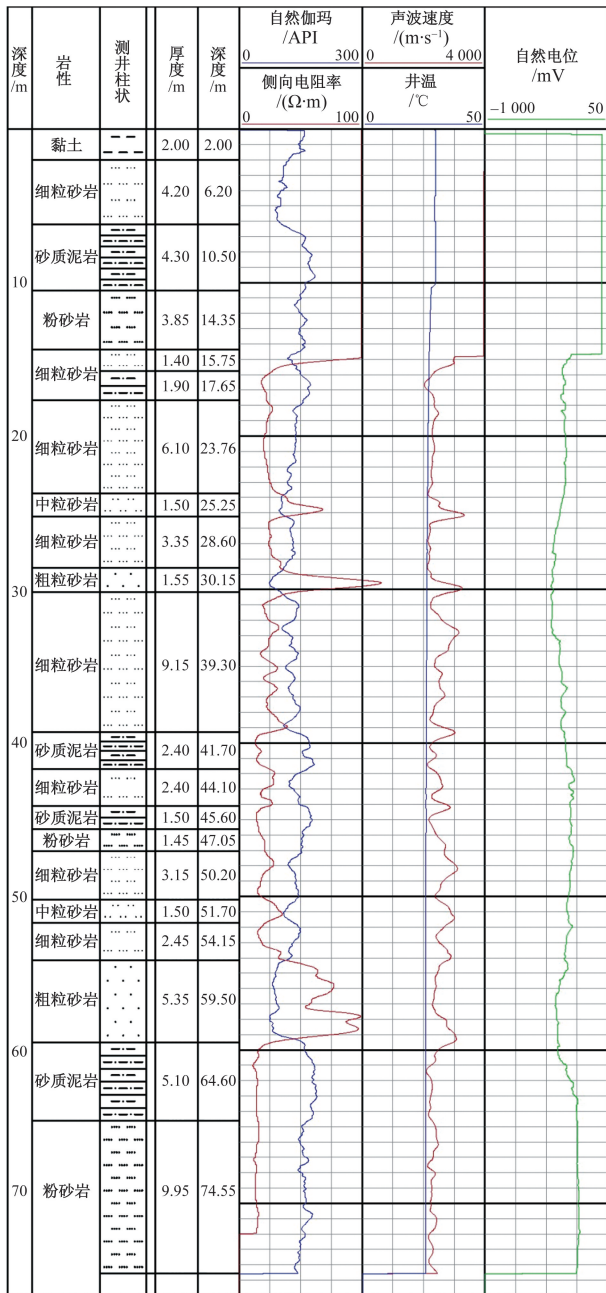


图 8 综合测井成果

-257.75 mV,该段自然电位数变化正常;声波速度为 2 480.12 m/s,对应岩性为砂岩,同时该段声速曲线呈锯齿状,表明岩性变化剧烈,可能原因是岩性较为破碎;54.20~9.50 m 段三侧向电阻率为 69.93 $\Omega \cdot m$,电阻率值处于相对高点;自然电位为 -407.28 mV,该段自然电位相对低值;声波速度为 2 556.80 m/s,该段声速曲线也呈现锯齿状,表明此处也可能存在破碎带。

根据图 8 中井温数据曲线可知,该孔井口温度 29.90 $^{\circ}C$,孔底 74.00 m 处温度 25.8 $^{\circ}C$,井温梯度变化相对整孔温度变化梯度值在局部偏小或偏大,随深度无明显变化,井温数据变化符合正常的地温规律,未发现明显的地温异常。测井整体井温数据出现符合区域正常地温增长规律,井温梯度变化相对整孔温度变化梯度值偏小或偏大,随深度无明显变化。

断裂带含水地层往往较破碎,综合测井异常表现为多个综合测井参数的复合异常,声波速度数据呈锯齿状、声速明显降低;视电阻率出现相对低阻异常;自然电位数据偏离背景值上升或下降,出现相对高值或低值异常;自然伽马、共液电阻率数据在含水层界面上会产生明显的突变异常,出现相对高值或低值异常。通过对综合测井数据的分析,钻探成果与物探成果大致吻合。根据试验数据,综合判断 44.10~45.60 m 段、54.20~59.50 m 段为断层破碎带。

3.3 钻芯数据分析

对 23-ZDDX-GSDL-002 孔进行分析,完成进尺 90.0 m,揭露地层有素填土、始新统华涌组全风化泥质粉砂岩、强风化泥质粉砂岩、弱风化泥质粉砂岩、强风化砂岩、弱风化砂岩,以及蚀变砂岩。钻孔距离据左线隧道右偏 79.43 m,据右线隧道右偏 62.56 m,钻进路径为南偏西 4 $^{\circ}$,钻进角度为 50.1 $^{\circ}$,从孔口到隧道顶板垂深约 34.31 m(顶板标高 -14.20 m),从孔口到隧道底板垂深约 43.11 m(标高 -23.00 m)。斜孔钻进至 46.45 m 处,即对应里程 DK9+440.93 m 处进入隧道结构同等深度范围内。

图 9 为不同深度处的岩芯取样。根据岩芯状态可判断,广三断裂影响范围始于钻孔深度 42.2 m 处,该孔揭露四处受断层影响。其中 42.2~44.8 m 处揭露岩层为柱状粉砂岩,具有明显擦痕,且部分岩芯柱开始呈现破碎装,说明断层在此处开始发育;58.1~60.0 m 处揭露岩层为柱状细砂岩,具有明显擦痕,此处岩性较为完整,判断为发育终点;75.0~80.0 m 处,揭露岩层为碎块状砂岩,此处岩石风化较为严重;84.0~89.0 m 处,揭露岩层为碎块状砂岩。根据岩

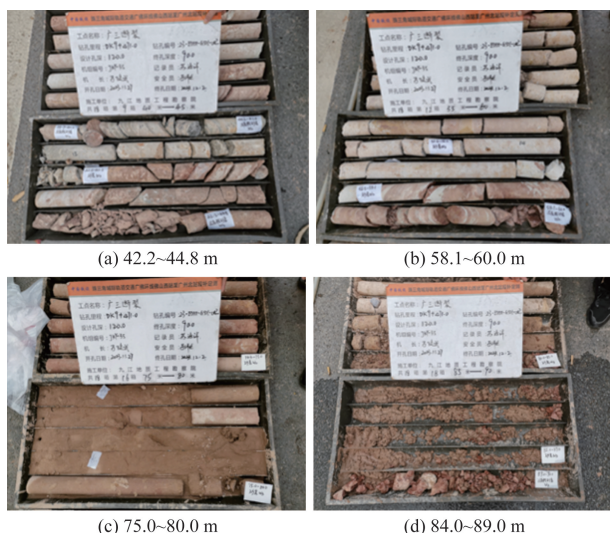


图 9 不同深度处的岩心样本

芯可知 60 m 深度以下由于风化严重,岩性完整性差。44~60 m 为断层分布区域。

综合以上分析,主断裂带主要分布在砂岩及泥质粉砂岩地层中,受构造应力明显,岩芯破碎,擦痕明显。综合判定隧道范围内断层产状为 $NW83^\circ/NE\angle 68^\circ$,断层宽度为 1.73~4.55 m,断层的影响范围为 71.60 m。

4 结论

(1)天然源面波法在大范围内具有较好的适用性,可通过波速的异常变化对地层特性做出整体判断。在波速突变处则可初步判断存在断层破碎带。

(2)综合测井方法可较为全面地判断出地层信息。通过对自然电位、侧向电阻率、纵波波速、自然伽马等数据分析,结合其参数变化特点,可得到较为准确的岩性信息,包括分界面、断层破碎区等。

(3)通过钻孔取芯、天然源面波法、综合测井方法

的综合应用,从整体趋势到局部特征都可精确地反映出来。多种方法的综合应用提高了勘探的精度,减少了误判率,为工程施工提供了很大的借鉴作用。

参考文献

- [1] 黄国松. 地球物理勘探在工程地质勘察中的应用分析[J]. 中国设备工程, 2024(10): 251-253.
- [2] 原宏壮, 陆大卫, 张辛耘, 等. 测井技术新进展综述[J]. 地球物理学进展, 2005(3): 786-795.
- [3] 王力, 袁安民. 综合地球物理测井在隧道建设前期勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(6): 733-736.
- [4] 张伟. 综合物探测井技术的运用探析[J]. 华北自然资源, 2023(2): 57-59.
- [5] 陈宜凝, 韩复兴, 高正辉, 等. 面波勘探技术研究进展[J]. CT理论与应用研究, 2023, 32(6): 815-835.
- [6] 殷成, 柴绪令. 综合面波法在岩土工程中的应用[J]. 东北水利水电, 2022, 40(10): 43-45, 48.
- [7] 陈承申. 天然源面波法及地震映像法在采空区勘察中的综合应用[J]. 铁道勘察, 2017, 43(5): 32-35.
- [8] 高彩燕, 王克翠, 刘丽君, 等. 瑞雷波在地质勘探中的应用[J]. 科学技术创新, 2021(17): 52-53.
- [9] 沈东东. 钻探面波法在地质勘探中的应用探讨[J]. 世界有色金属, 2017(10): 226, 228.
- [10] 王刚刚. 综合勘察技术在高速铁路活动断裂勘察中的应用[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(6): 26-31.
- [11] 王洪涛. 柴家沟铜矿复杂地层岩心钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(8): 37-40.
- [12] 袁伟, 朱永珠, 幸大军, 等. 综合地球物理勘察技术在铁山坪隧道勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(3): 334-340.
- [13] 何盼情. 综合物探方法在隧道地质超前预报中的应用[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(20): 123-125.
- [14] 梁军, 占样烈. 某长大隧道综合地质勘察方法的应用与研究[J]. 土工基础, 2022, 36(5): 696-700.
- [15] 李明星. 综合物探在大型断层破碎带探测中的应用[J]. 中国煤炭, 2018, 44(8): 53-57.

Application Analysis of Geophysical Comprehensive Exploration Method in Fault Zone

HU Tianming

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300251, China)

Abstract: The fault fracture zone has a significant impact on the progress and safety of tunnel construction, and it is necessary to determine the specific location and lithology information of the fault zone before construction. In order to ensure the smooth excavation and excavation of tunnels in the project, a combination of drilling and coring, natural source surface wave method, and comprehensive logging exploration methods were used to explore the specific characteristics of fault zones under complex geological conditions, and to conduct experimental analysis on their rock properties. The results indicate that under large-scale detection conditions, the natural source surface wave method can comprehensively survey the approximate characteristics of fault zones, and preliminary fault localization can be carried out based on the characteristics of wave velocity changes. The comprehensive logging method accurately identifies the specific location and distribution of faults based on parameters such as resistivity and natural potential, and provides quantitative analysis of the position, width, attitude, composition, cementation degree, and water content of fault zones. The combination of multiple methods improves the accuracy of fault fracture zone detection.

Keywords: fault fracture zone; comprehensive logging; natural source surface wave method