

文章编号: 1001-1749(2024)01-0111-07

地面物探技术在隧道掘进破碎带区段的应用

朱伟国, 何雄斌

(广东省地质物探工程勘察院, 广州 510800)

摘要: 广佛环大太区间在隧道施工过程中出现多次掉块及局部地段沉降等现象, 为查明掘进破碎带区上部的发育情况, 采用高密度电阻率法和瞬变电磁法两种地面物探技术进行综合探测, 结果表明: 高密度电阻率法具有快速、高效等优点, 能较好地反映出浅部的不良地质体; 瞬变电磁法具有灵活、探测深度大等优点, 对探测中深部的不良地质体有一定的效果。该组合物探技术由浅到深基本探明了隧道范围上方的地质变化情况, 解释了引起隧道掉块及局部沉降的原因, 为下一步的施工处理提供指导性意见。

关键词: 超前预报; 隧道施工; 瞬变电磁法; 高密度电阻率法

中图分类号: P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.01.13

0 引言

广佛东环城际珠三角城际轨道交通网是广佛同城化的骨干线路, 是推动和实现珠江三角洲区域经济一体化的重要交通基础设施, 对提高广州国际综合交通枢纽的地位, 促进各个区域经济一体化和提升整体竞争力有着十分重要的意义。全线长约 46.75 km, 途径广州市番禺区、海珠区、黄埔区、天河区和白云区, 共设大石、科学中心等 8 座车站。沿线需经过地面建筑物密集区、穿越已建成公路、铁路等交通线路, 线路经过的地质情况较为复杂, 隧道经过洞身地层变化较大, 局部呈软硬夹层状, 受区内地质构造影响, 岩石裂隙普遍发育, 局部漏水严重, 使得隧洞施工风险较大。为了保证隧道施工安全以及预防地质灾害的发生, 有必要开展超前地质预报的工作^[1-3]。

超前地质预报主要分为地质调查、地质钻探及物探技术等方式。其中物探技术作为地质预报的重要组成部分需要采用综合物探技术来提高资料解释的可靠性^[4-6]。物探技术依据与探测对象的空间位置不同, 可分为地面物探技术和隧洞物探技术。地

面物探技术依据探测地球物理场的不同, 分为浅层地震波法、电磁法及直流电法等几大类^[7]。

大太区间隧道在往小里程方向进行 TBM 掘进施工时, 在隧洞开挖至里程 K38+823 时, 掌子面顶部整体出现了塌方, 局部区域有大石块掉落现象发生, 地表出现了轻微塌陷, 对隧洞的施工进展产生了一定的影响。为了探明隧洞上方的不良地质体、断层以及破碎区等地质情况, 为隧洞进一步的施工挖掘提供了基础依据, 本次应用地面物探技术进行综合探测。针对此次隧道超前预报的地形条件、探测深度要求及周边的干扰情况等因素的考虑, 采用了高密度电阻率法和瞬变电磁法两种地面物探技术进行综合探测。实践证明: 高密度电法具有成本低、效率高等优点; 瞬变电磁法具有灵活、探测深度大等优点; 两者相结合能基本探测出地下不良地质体的分布情况, 是一种有效的地面物探技术组合。

1 地质概况及地球物理特征

1.1 工程地质概况

拟建大太隧道区间位于广州市白云区太和镇。

收稿日期: 2022-08-12

第一作者: 朱伟国(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地球物理勘查工作, E-mail: zwg0820@163.com。

场区以低山丘陵为主,地形局部陡峭,植被茂密。区内断层和褶皱均较发育,北东向的广从断裂构造组成了本区的主要构造,断裂生成于加里东运动,在海西—印支构造阶段控制着广花凹陷的形成。燕山晚期至喜马拉雅早期对龙归盆地的形成和演变起一定的控制作用,也是区域控岩、控热结构。早期多表现为逆断层,晚期多表现为正断层。由于广从断裂带在该区域与其它方向断裂交接切错^[8-9],受区内地质构造影响,使得该区域的岩性变化相对复杂,岩石裂隙普遍较发育。

工区地层岩性由新到老依次为:人工填土层(Q^{ml}):主要为素填土,呈灰色,灰褐色,欠压实,由粉质黏土及砂等组成;第四系冲洪积层(Q_4^{al+pl}):该层可分为冲积—洪积可塑状黏性土层和冲积—洪积中砂层两个亚层;残积土层(Q^d):残积土层原岩主要为震旦系片麻岩、板岩,结构已全部破坏,风化呈土状,呈黄褐色、灰黄色等,硬塑状,组成物为黏粒粉粒;基岩岩性为石炭系板岩和震旦系片麻岩,其中片麻岩呈灰色,片麻状构造;板岩呈深灰色,泥质结构,板状构造,岩质稍硬,节理、裂隙发育。

如图1为隧道地质断面图,从图上可知,隧道所在标高在-10 m~-20 m之间。测区位于石炭系板岩及震旦系片麻岩的转换区域,该区域岩性相对复杂,且岩性风化不均匀。隧洞上方为主要为中风

化板岩,前期钻孔揭露该地层由于受区内地质构造影响,岩石裂隙普遍较发育。

1.2 地球物理特征

根据场地收集的钻孔资料表明,测区内第四系冲积层厚度一般小于20 m,土层及岩石的电阻率变化见表1。第四系冲积层视电阻率为 $30 \Omega \cdot m \sim 100 \Omega \cdot m$;残积土层视电阻率为 $50 \Omega \cdot m \sim 300 \Omega \cdot m$;碳质板岩为相对中阻一般为 $300 \Omega \cdot m \sim 1\,000 \Omega \cdot m$;片麻岩视电阻率较高一般为 $1\,000 \Omega \cdot m \sim 8\,000 \Omega \cdot m$;不良地质体由于岩石破碎一般为 $70 \Omega \cdot m \sim 240 \Omega \cdot m$ 。可见,工区岩土层存在电性差异,为开展高密度电法勘探与瞬变电磁法提供了较好的物性基础。

表1 工区电阻率物性参数表

Tab.1 Parameter of resistivity for various media

介质类型	电阻率/ $\Omega \cdot m$
第四系冲积层	30~100
残积土层	50~300
碳质板岩	300~1 000
片麻岩	1 000~8 000
不良地质体	70~240

2 方法原理

2.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法是以地下被探测目标体与周围介质之间的电性差异为基础,不良地质体因岩性破碎一般表现为低阻,导电能力好,而完整岩石电阻率普遍高,导电能力差,应用人工在地下建立电场,观测和分析人工电场的地下分布规律,在断面上通过电阻率反映不同地质体的导电能力以达到了解岩土分层、基岩起伏形态以及地质构造、软弱夹层等不良地质体分布范围的一种地球物理勘探方法^[10-11]。高密度电阻率法实际上是一种快速高效的阵列勘探方法,野外工作时,将数十个电极一次性布设完毕,通过程控式多路电极转换器选择不同的电极组合方式,即可完成野外数据的快速采集^[12],见图2。

2.2 瞬变电磁法

瞬变电磁法是利用不接地回线等方式向地下发送脉冲式一次电磁场,用线圈或接地电极观测由该脉冲电磁场感应的地下涡流产生的二次电磁场的空间和时间分布,来解决有关地质问题的时间域电磁法。瞬变电磁法的探测深度取决于探测信号的采样时刻,早期信号反映了浅表地质异常,晚期信号携带

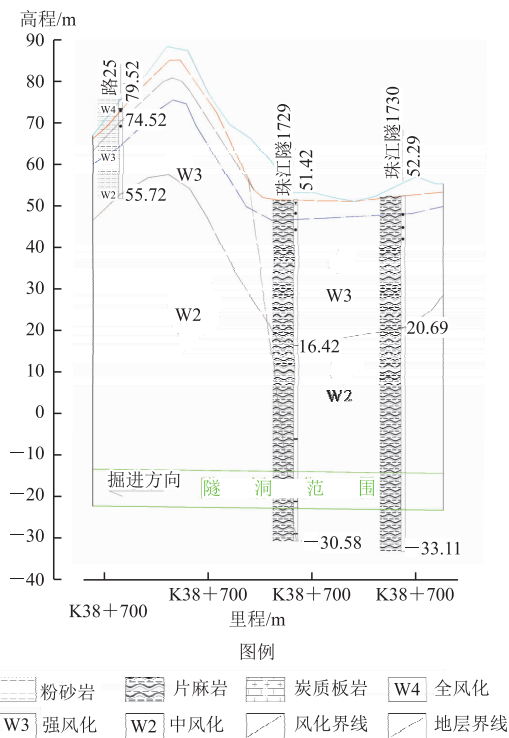


图1 隧道地质断面图

Fig.1 Geological section of tunnel

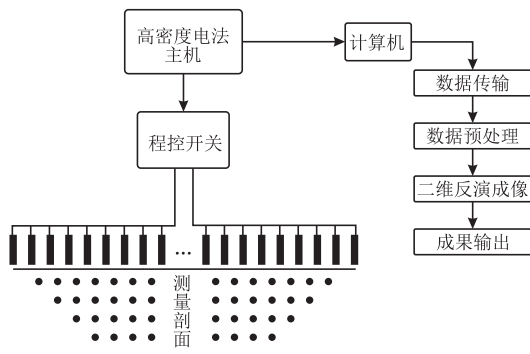


图 2 高密度电法野外工作原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of high-density resistivity method in the field

了深层地质信息。不同于频率域电磁法的全程采样方式,瞬变电磁法对数据的采集通常始于发射电流完全关断之后,理论上,瞬变电磁法的这种特性可以避免发射电流激发的一次场响应对目标体涡流产生的二次场响应的干扰,有利于缩小信号的动态范围,提高探测的分辨率^[13-14]。

本次采用重庆瑾陆探测技术有限公司生产的 FCTEM60-1 拖曳式高分辨瞬变电磁系统,由瞬变电磁主机、收发一体线圈、数据处理与成像软件组成。采用了“恒压钳位”高速线性关断和无损消互感技术,结合高密度高动态信号采集,具有极强的浅层和高分辨探测能力;拖曳式观测模式极大提高了工作效率;大磁矩发射增强了抗干扰能力,改善了深部探测效果;丰富的线圈配置提供了从浅表到深部,地面、水上、水下和隧道探测的灵活选择^[15-17]。

3 数据采集与处理方法

3.1 测线布置

为了探测出掘进位置上方的岩层地质情况,以当前掘进位置为中心,布置 2 条物探测线, L1 和 L2,由于线路区域经过陡峭边坡,无法做到与线路完全垂直布设,测线结合实际地形进行了调整,测线布置如图 3 所示。

3.2 参数选择

3.2.1 高密度电阻率法

本次高密度电阻率法采用重庆地质仪器厂生产的 DUK-2A 型高密度电法仪对场地进行探测,为了兼顾到有效深度和探测精度,选用四极温纳测深装置。本次勘查的参数选择如下:电极距 $a=3\text{ m}$,最小隔离系数 $n=1$,最大隔离系数 $n=20$,供电时间为

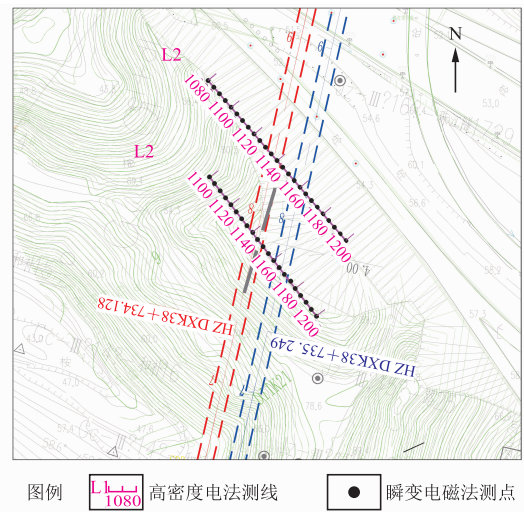


图 3 工区测线布置图
Fig. 3 Layout of geophysical prospecting lines in the work area

1 s。采用正负方波供电,最高供电电压 400 V。

3.2.2 瞬变电磁法

FCTEM60-1 拖曳式高分辨瞬变电磁系统是采用收发一体的重叠回线装置。经现场测试采用最优参数如下:测点距为 5 m,局部异常地段加密为 2.5 m,发送电流 60 A,发送频率 16 Hz。叠加次数的选择主要与当地的噪声水平有关,理论上叠加次数越大,采集到的衰减曲线信号信噪比越高,经对比试验,本次叠加次数选 200 次,并重复观测两次取信噪高的数据。

3.3 数据处理

3.3.1 高密度电阻率法

本次高密度电阻率法数据处理软件使用骄佳技术公司的高密度电法数据与极化率层析成像软件 Geogiga RTomo6.0。数据处理步骤为:数据格式转换→坏点数据剔除→数据滤波处理→测点高程输入→地形改正→最小二乘法反演→输出反演电阻率断面→物探解释→地质解释剖面输出→完成。

3.3.2 瞬变电磁法

本次瞬变电磁法资料处理采用 FCTEM 数据处理软件。将原始数据进行预处理后,导入处理软件进行反演。数据处理步骤:在数据处理之前,先建立新工区,输入工区名称,文件保存路径,对工区和测线情况进行简单描述,最后选择数据导入。数据导入成功后,左边显示每一点的衰减曲线,右边显示测线多测道图,如图 4。然后选择一维优化反演算法进行反演,先进行初始模型建立,选择高程数据和

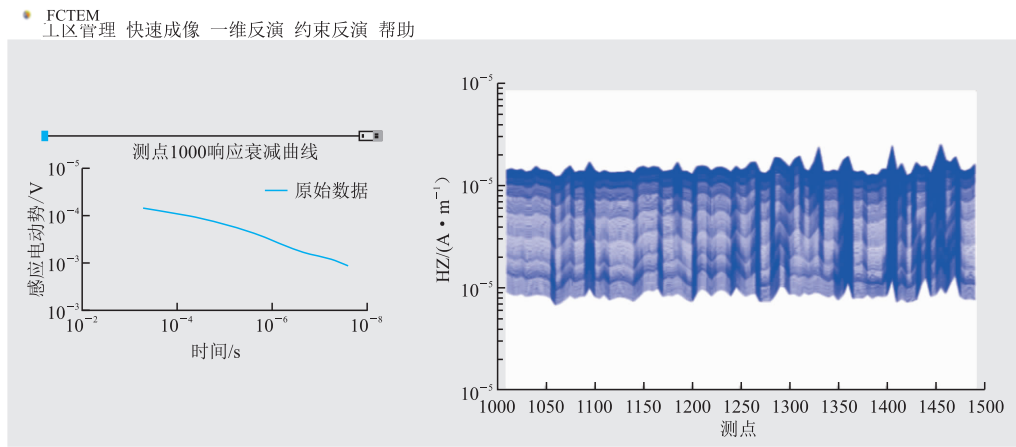


图 4 数据界面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of data interface

保存路径,建立初始模型和迭代次数,最后点击确定,进行反演计算。反演结束后,可以查看每个测点的曲线拟合情况,将反演结果导入相应的出图软件格式进行成图。

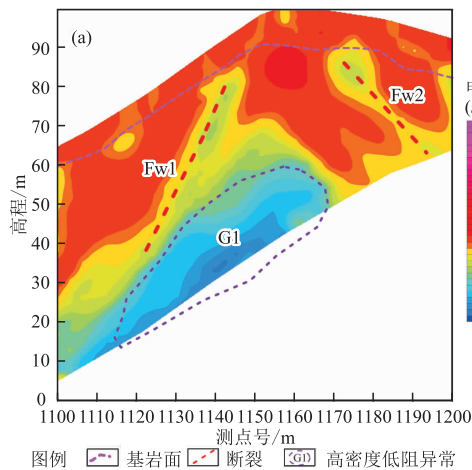
4 资料解释与讨论

4.1 L1 测线异常总体特征及解释

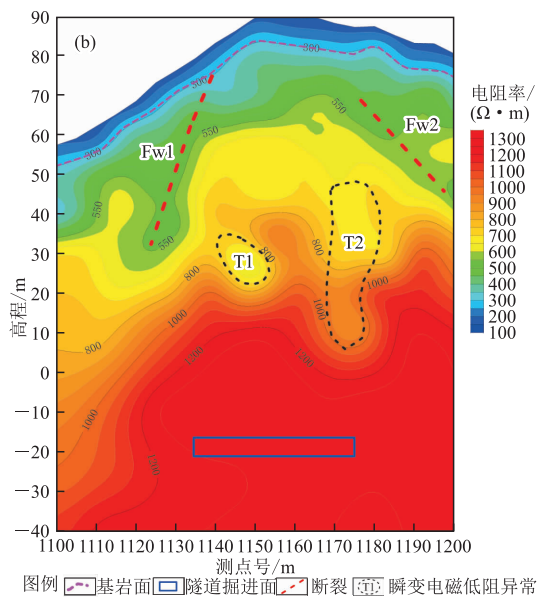
图 5(a)为 L1 线高密度电法二维反演解释剖面图,在点号 1 120~1 140 下部存在条带状低阻异常,视电阻率在 $200 \Omega \cdot m \sim 400 \Omega \cdot m$ 左右,异常两侧为相对高阻,电阻率在 $1\ 000 \Omega \cdot m$ 以上,推测该低阻

异常为断裂破碎带的反映,编号 Fw1;在点号 1 170~1 195 下部存在条带状低阻异常,视电阻率为 $200 \Omega \cdot m \sim 400 \Omega \cdot m$ 之间,两侧为相对高阻,电阻率均在 $1\ 000 \Omega \cdot m$ 以上,推测为断裂破碎带的反映,编号 Fw2;点号 1 110~1 170 下部分布低阻异常,视电阻率小于 $50 \Omega \cdot m$,推测该区域岩性相对破碎,为基岩风化不均所致。隧道经过位置在点号 1 137~1 172 之间,浅部为相对高阻,推测为该区域基岩埋深稍浅,上部岩性较完整,下部存在相对低阻,表明隧道上方的基岩岩性存在风化不均匀的现象。

图 5(b)为 L1 线瞬变电磁法反演剖面图,测线区域的岩性层状分布比较明显,可分为覆盖土层及强、



(a)L1 线高密度电法二维反演剖面图



(b)L1 线瞬变电磁反演剖面图

图 5 L1 线综合物探反演剖面图

Fig. 5 comprehensive geophysical inversion profile of line L1

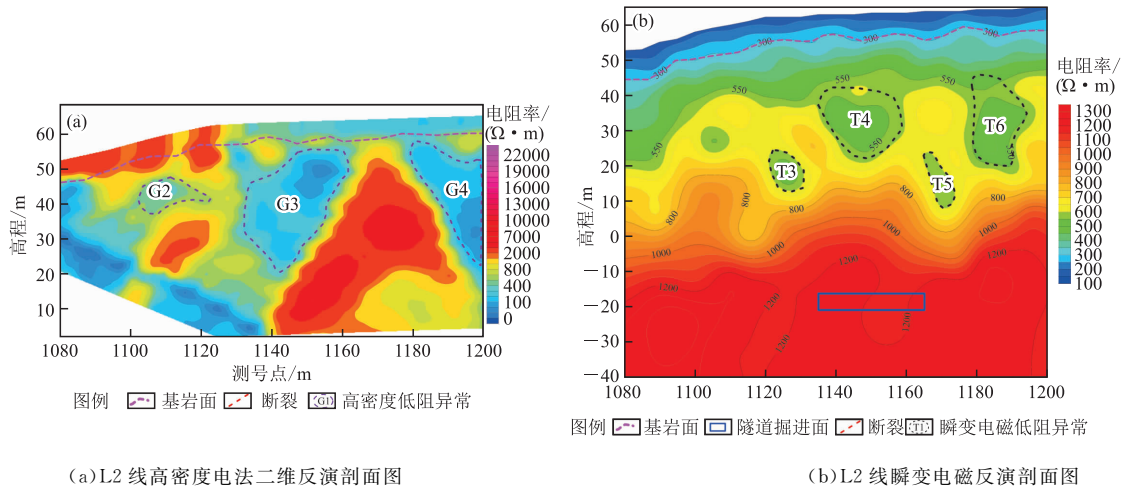


图 6 L2 线综合物探反演剖面图

Fig. 6 comprehensive geophysical inversion profile of line L2

中风化基岩层,表层电阻率在 $100 \Omega \cdot m \sim 300 \Omega \cdot m$,平均厚度约为 15 m,与前期钻孔揭露的情况基本一致。岩层电阻率在 $300 \Omega \cdot m \sim 1\ 100 \Omega \cdot m$,局部存在相对低阻,推测为断裂破碎及岩性不均匀的反映。在点号 1 120~1 350 段对应标高 75 m 的范围,电阻率相对较低,两侧电阻率表现为相对高阻,推断该区域受断裂影响,基岩较为破碎,编号为 Fw1;在点号 1170~1185 段对应标高 40 m~65 m 的范围,电阻率相对较低,两侧电阻率表现为相对高阻,推断该区域受断裂影响,基岩较为破碎,编号为 Fw2;隧道范围对应测点号 1 135~1 175 之间,上方的电阻率总体变化平缓,隧道上方电阻率显示较为完整,仅在点号 1 143~1 153 附近对应标高 22 m~34 m 之间、点号 1 167~1 178 附近对应标高 6 m~48 m 之间,存在相对低阻,推测为基岩破碎区域。

4.2 L2 测线异常总体特征及解释

如图 6(a)为 L2 线高密度电法二维反演剖面图,测线区域视电阻率高、低阻异常相间,等值线平缓变化,浅部视电阻率在 $50 \Omega \cdot m \sim 200 \Omega \cdot m$ 左右,主要反映覆盖土层,中深部电阻率大于 $1\ 000 \Omega \cdot m$,主要反映基岩。高低阻相间则反映岩石风化不均。设计隧道经过水平位置在 1 132~1 166 号点之间,浅部的电阻率相对低,反映风化土层,下部为相对高阻,反映岩石。从剖面图可知测线区域存在三个明显的等值线下凹或局部低阻异常区,推测为岩体塌陷或节理裂隙集中发育区。

如图 6(b)从瞬变电磁二维反演电阻率剖面图上看,表层电阻率在 $100 \Omega \cdot m \sim 300 \Omega \cdot m$,岩层电阻率在 $300 \Omega \cdot m \sim 1\ 100 \Omega \cdot m$ 。在测线范围标高在

10 m~40 m 之间电阻率变化比较大,推测该区域的岩性分布不均;隧道范围对应应在 L2 线的点号 1 135~1 165 之间,在点号 1 120~1 130 附近对应标高 13 m~23 m 之间、点号 1 164~1 175 附近对应标高 6 m~22 m 之间,存在相对低阻,推测为基岩破碎区域。由于基岩破碎区域距离隧道顶板较近,不排除由于隧道掘进过程中,震动引起该区域的破碎基岩产生掉块现象,因此对该区域的异常应予以重视。

4.3 物探异常综合解释与分析

通过高密度电阻率法及瞬变电磁法均可得到测线 L1、L2 地层结构、断裂破碎带、节理裂隙发育区的分布情况。从两种方法的反演剖面可知,高密度电阻率法和瞬变电磁法反映覆盖土层平均厚度基本一致,断裂破碎带的空间展布也能一一对应。

结合物探异常对应情况表可知,高密度电法异常 G1 与瞬变电磁法异常 T1、T2 对应、高密度电法异常 G2 与瞬变电磁法异常 T3 对应、高密度电法异常 G3 与瞬变电磁法异常 T4、T5 对应、高密度电法异常 G4 与瞬变电磁法异常 T7 对应。其中高密度

表 2 物探异常对应情况表

Tab. 2 Correspondence of geophysical anomalies

测线	高密度异常编号	瞬变电磁异常编号	对应关系
L1	G1	T1、T2	一致
L1	F1	F1	基本一致
L1	F2	F2	基本一致
L2	G2	T3	基本一致
L2	G3	T4、T5	一致
L2	G4	T7	基本一致

电法异常 G3、瞬变电磁法异常 T5 与已知塌陷区域水平位置相吻合,证明了两种方法均能较好反映出地面沉降区域。

从异常特征上看,高密度电法反映出来的低阻异常范围较大,且受场地限制的情况下无法外延,使得深部的地质情况存在缺失,而反映同一区域的瞬变电磁法异常则更为精细,且有效探测深度更大。所以瞬变电磁法能够弥补高密度电法探测深度不足的问题。

5 结论

本文利用高密度电阻率法及瞬变电磁法两种地面物探技术在隧道掘进破碎区段进行探测得出以下结论:

1) 高密度电阻率法具有快速、高效等优点,对浅部的不良地质体有较好的反映,但易受场地影响导致探测深度受限,无法达到理想深度;难以兼顾分辨率与探测深度的问题,导致物探异常分辨率稍低。

2) 瞬变电磁法具有灵活、适应性强、探测深度大等优点,能根据实际情况加密测点,提高分辨率且不影响探测深度。

3) 两种方法结合能由浅到深基本探明了隧道范围上方的地质变化情况;浅部由高密度电法、瞬变电磁共同圈定了工作地段的断裂破碎带及不良地质体;中深部由瞬变电磁法圈定了隧道范围上方的基岩破碎区域,为下一步的施工处理提供指导性的意见,也为开展地面超前预报提供了一种有效的组合地面物探技术。

参考文献:

[1] 王银,席振铎,蒋欢,等. 等值反磁通瞬变电磁法在探测岩溶病害中的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 360-363.
WANG Y, XI Z Z, JIANG H, et al. The application research on the detection of karst disease of airport runway based on OCTEM[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 360-363. (In Chinese)

[2] 舒森,王树栋,李广,等. 瞬变电磁法指导复杂地质隧道超前水平钻探应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1311-1316.
SHU S, WANG S D, LI G, et al. The application of TEM to guiding advance exploration drilling of complex geological tunnel[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1311-1316. (In Chinese)

[3] 李俊杰,张红纲,何建设,等. 综合物探技术在方解石溶洞段涌水预报中的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 737-744.
LI J J, ZHANG H G, HE J S, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting technology in prediction of water burst in a calcite tunnel[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(2): 737-744. (In Chinese)

[4] 刘杰,段炜,王俊,等. 等值反磁通瞬变电磁法在公路隧道塌陷区的探测应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1470-1475.
LIU J, DUAN W, WANG J, et al. The application of opposing coils transient electromagnetic method to the detection of underground collapse in highway tunnel under construction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1470-1475. (In Chinese)

[5] 刘伟,黄韬,王庭勇,等. 综合物探方法在城市隐伏断裂探测中的应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(4): 1077-1087.
LIU W, HUANG T, WANG T Y, et al. The application of integrated geophysical prospecting methods to the exploration of urban buried fault[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(4): 1077-1087. (In Chinese)

[6] 蔡盛. 张吉怀铁路隧道超前预报技术应用研究[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1275-1280.
CAI S. The research on the application of geological prediction technology to Zhangjihuai railway tunnel[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1275-1280. (In Chinese)

[7] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京:地质出版, 2005.
LI J M. Geoelectric field and electrical prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (In Chinese)

[8] 陈伟光,赵红梅,常郁. 广州地区活动断裂的特征及其与工程抗震的关系[J]. 华南地震, 2000(2): 47-56.
CHEN W G, ZHAO H M, CHANG Y. Features of active faults in Guangzhou region and relation to earthquake resistant engineering[J]. South China Journal of Seismology, 2000(2): 47-56. (In Chinese)

[9] 魏勇作,张伯友,宋刚. 广州市土壤氡区域背景值及其应用[J]. 广东土木与建筑, 2006(1): 49-52.
WEI Y Z, ZHANG B Y, SONG G. Regional background value of soil radon in Guangzhou and its application[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2006(1): 49-52. (In Chinese)

[10] 方易小锁,孟永东,田斌,等. 高密度电阻率法对不同电

- 极排列的分辨率响应研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2421—2428.
- FANGYI X S, MENG Y D, TIAN B, et al. Study on resolution response of different electrode arrangements by high density resistivity method[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6): 2421—2428. (In Chinese)
- [11] 葛如冰, 黄伟义, 张玉明. 高密度电阻率法在灰岩地区的应用研究[J]. 物探与化探, 1999, 23(1): 28—32.
- GE R B, HUANG W Y, ZHANG Y M. The study of the application of high density resistivity method to high density resistivity method in limestone area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 23(1): 28—32. (In Chinese)
- [12] 刘海飞. 高密度电阻率法数据处理方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- LIU H F. Research on data processing method of high density resistivity method [D]. Changsha: Central South University, 2004. (In Chinese)
- [13] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 1992.
- NIU Z L. Principle of time domain electromagnetic method [M]. Changsha: ZHONGNAN University Press, 1992. (In Chinese)
- [14] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007(04): 1195—1200.
- XUE G Q, LI X, DI Q Y. The progress of TEM in theory and application [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(04): 1195—1200. (In Chinese)
- [15] 王浩文. 瞬变电磁小回线探测技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- WANG H W. Research on transient electromagnetic small-loop detection technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (In Chinese)
- [16] 谢昭晖, 陈清, 吴牧阳, 等. FCTEM 小回线瞬变电磁法在铁路桥梁基础勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(5): 568—572.
- XIE Z H, CHEN Q, WU M Y, et al. Application of small loop transient electromagnetic method in geological survey of railway [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(5): 568—572. (In Chinese)
- [17] 徐正玉, 付志红, 廖先, 等. 基于小回线瞬变电磁法的病害体精细探测应用分析[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(2): 892—901.
- XU Z Y, FU Z H, LIAO X, et al. Application analysis of detailed detection of diseases based on small loop transient electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(02): 892—901. (In Chinese)

Application of high density resistivity method and transient electromagnetic method for Advanced Prediction in Tunnel

ZHU Weiguo, HE Xiongbin

(Geologic and Geophysical Engineering Exploration Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510800, China)

Abstract: During the tunnel construction in the Datai section, there were many falling blocks and settlements of local sections. In order to find out the geological conditions of the upper part of the excavation fracture zone, the ground geophysical exploration technology was used for detection. The combination of the high-density resistivity method and transient electromagnetic method shows that the high-density resistivity method has the advantages of fast and high efficiency and can better reflect the poor geological bodies in the shallow part. The Transient electromagnetic method has the advantages of flexibility and large detection depth, and it has specific effect on detecting medium and deep unfavorable geological bodies. The combined geophysical prospecting technology has proved the geological changes above the tunnel range from shallow to deep, explained the causes of the tunnel block falling and local settlement, and provided guiding opinions for the following construction treatment.

Keywords: advance forecast; tunnel construction; transient electromagnetic method; high density resistivity method