

瞬变电磁法在岩溶隧道超前地质预报中的应用

——以七家营隧道为例

陈玲霞¹, 张利民², 王志荣¹, 蒋博¹

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省煤田地质局 资源环境调查中心, 河南 郑州 450053)

摘要:针对隧道超前地质预报工作中岩溶问题的特殊性,运用瞬变电磁法探讨了溶洞、溶隙以及陷落柱等非层状体系的电阻率响应特征。现场试验表明,岩溶不发育的完整岩体质量较好, ρ_s 值可达100~250 Ω ;充满地下水的岩溶裂隙,其 ρ_s 值普遍低于背景值(5~10 Ω),约0~5 Ω ;而无水溶洞的 ρ_s 值则高于背景值,为15~20 Ω ;陷落柱的 ρ_s 值异常不明显,需采用其他物探手段探测。结合七家营隧道工程对上述成果进行了验证,为我国南方岩溶隧道的超前预报方法和电磁地质解译提供了范例。

关键词:七家营隧道;超前地质预报;瞬变电磁法;岩溶探测

中图分类号:P631.84

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)03-0020-05

The Application of Transient Electromagnetic Method in Karst Tunnel Geological Prediction

——Taking Qijiaying Tunnel as an Example

Chen Lingxia¹, Zhang Limin², Wang Zhirong¹, Jiang Bo¹

(1. School of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Resources and Environment Research Center, Henan Coalfield Geology Bureau, Zhengzhou, Henan 450053, China)

Abstract: Transient electromagnetic method (TEM) was experimented in the Qijiaying tunnel project as an example to explore the resistivity response characteristics of non-layered systems including cave, karst fissure, collapse columns and so on, in view of the special nature of karst in tunnel geological prediction. Field tests show that the quality of a complete rock mass without karst development is better, and the value of ρ_s is up to 100—250 Ω ; but the ρ_s value is generally lower than the background value of about 0—5 Ω in karst fissures which is full of groundwater; the ρ_s value of anhydrous cave is above the background value for the 15—20 Ω ; the subsided column is not obvious, so detection with other geophysical means is required. The research result helps with the forecasting methods of karst tunnel in south China and electromagnetic geological interpretation.

Key words: Qijiaying tunnel; geological prediction; transient electromagnetic method; karst detection

当前,我国铁路、公路、水利水电工程建设正处于热潮,其中新建隧道工程的规模越来越大。这些隧道工程往往具有洞径大、埋藏深且洞线长的特点,特别在地表地势险要、地下洞穴众多的岩溶地区,隧道施工经常遇到塌方、突水、碎屑流、有害气体等地质灾害^[1-2],因此做好隧道施工超前地质预报工作意义重大。

隧道超前地质预报理论与技术迅速发展^[3-5],前人应用瞬变电磁法探测地下空穴的报道较多,但主要基于介电电性差异来划分不同岩性地层、寻找含水层以及探测构造破碎带等层状地质体^[6-10]。实践证明,与地质雷达、地震反射等物探方法相比^[11-13],瞬变电磁法特别适用于探测界面性差、富含地下水且空间形态不规

收稿日期:2012-12-10

作者简介:陈玲霞(1963—),女,浙江东阳人,实验师,主要从事地质工程与测试方面的研究。

E-mail: wangzhirong513@sina.com

则的岩溶不良地质体。本研究采用瞬变电磁法对沪昆高铁七家营隧道工程的岩溶空穴等非层状体系探测进行了全新尝试,并提供了准确预报以指导不同类型地下施工,为同类工程提供参考。

1 瞬变电磁法

理论上讲,干燥岩石的电阻率值很大,而含水岩体特别是富水灰岩的电阻率值较小,并且电阻率随着岩石的湿度或者饱和度的增加而急剧下降。瞬变电磁法(transient electromagnetic method, TEM)就是根据上述原理有效预测岩溶水的地球物理方法。其探测原理是:在发送回线上提供电流脉冲方波,在方波后沿下降的瞬间,产生向回线法线方向传播的一次磁场,在一次磁场的激励下,地质体将产生涡流,其大小取决于地质体的导电程度,在一次磁场消失后,该涡流不会立即消失,而是一个过渡(衰减)过程。该过渡过程又产生衰减的二次磁场向掌子面传播,由接收回线接收二次磁场,该二次磁场的变化反映地质体的电性分布情况。如按不同的延迟时间 t 测量二次感生电动势 $V(t)$,就得到了二次磁场随时间衰减的特性曲线。如果没有良导体存在,将观测到快速衰减的过渡过程;当存在良导体时,由于电源切断瞬间,在导体内部产生涡流以维持一次场的切断,所观测到的过渡过程衰变速度变慢,从而发现导体的存在。

瞬变电磁探测一般采用重叠回线法,即发射线圈和接收线圈为同一线圈,测点为线圈中心点。仪器通过向发射线圈发送交变电流,利用接收线圈接收二次磁场信息,通过仪器处理,存储为计算机数据(图 1)。

隧道工程瞬变电磁超前探测一般按照“U”形观测系统布置,在隧道迎头布置测点,以隧道迎头立面中心为原点,沿隧道左帮、迎头和右帮左右 45° 范围内实施瞬变电磁法数据采集。每个数据点处观测 3 个方向,分别为 45° 顶板、顺层和 45° 底板。

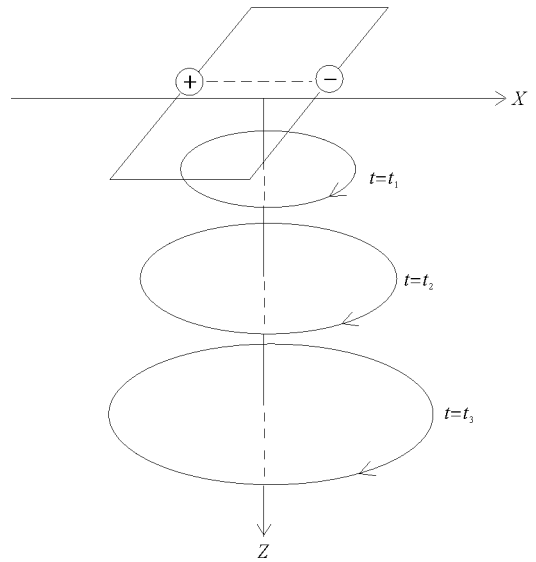


图 1 半空间中的等效电流环示意图

Fig. 1 The equivalent current loop of half space

2 瞬变电磁法应用实例

七家营隧道位于新建铁路长沙至昆明客运专线贵州段 12 标。隧道穿越一脊状山梁,相对高差 $50 \sim 150$ m,最大埋深约 138 m。自然坡度较陡,一般 $25^\circ \sim 30^\circ$ 。上部覆盖黏土,植被较发育,局部基岩裸露。根据现场地质编录与勘察,隧道区覆盖层为第四系全新统坡洪积层(Q_4^{dl+pl}),坡残积层(Q_4^{dl+el}),岩性为块石,有粘土充填。下伏基岩为三叠系中统关岭组一段(T_2g^1)及关岭组二段(T_2g^2),岩性为薄层石灰岩夹钙质泥岩,节理发育,岩体破碎,设计为 V 级围岩。

研究区地质构造较简单,岩层单斜,产状主要为 $N22^\circ \sim 38^\circ E/S25 \sim 28^\circ E$ 。节理发育,主要节理产状为 $N75^\circ \sim 80^\circ E/N60^\circ \sim 73^\circ W$ 及 $N27^\circ \sim 80^\circ W/S60^\circ \sim 62^\circ W$ 。节理较规则,呈共轭 X 型,以构造型为主,节理间距多数小于 0.40 m,多呈密闭型,部分为微张裂隙,少有充填物。

隧道洞身可溶岩分布达 60%。地表溶蚀形态多为溶沟溶槽,洞顶地形较平缓,有利于大气降雨入渗式或注入式补给。深部网络状岩溶裂隙、岩溶管道发育,地下水丰富且运移赋存空间复杂。

2.1 现场测试装置

当隧道施工至 HD1K0+284 处,掌子面即出现掉石与渗水等现象。为保障巷道安全掘进,应用瞬变电磁法进行超前地质探测,探明隧道前方岩溶赋水情况,为隧道掘进安全施工提供参考。

隧道瞬变电磁超前探测通常布置在隧道掌子面,利用多匝小线圈采用剖面装置方式进行发射和接收。本次探测使用澳大利亚 TERRA TEM 瞬变电磁仪,发射线圈和接收线圈框同线,为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的多匝线圈,线圈轴线指向目标体(图 2)。隧道超前探测的方向规定为掌子面正前方,即 $SW220^\circ$;在每个剖面图

中,0,10,20,30,40 号五个点在隧道掌子面均匀分布,测点布置见图 3。

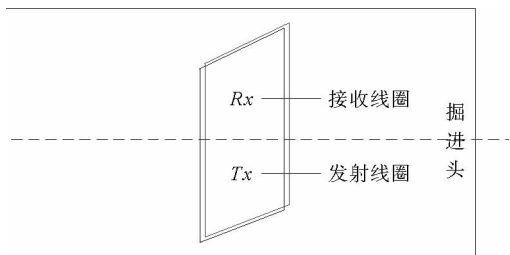


图 2 瞬变电磁法超前探测装置示意图

Fig. 2 The schematic of TEM on advanced detection devices

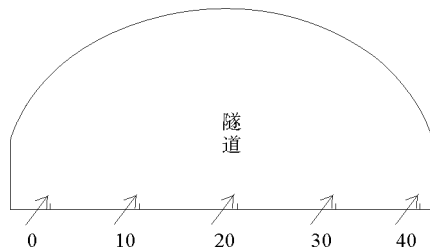


图 3 瞬变电磁法超前探测点布置示意图

Fig. 3 The schematic of TEM on detection points

2.2 资料解译分析

2.2.1 溶隙的电磁信息反馈

七家营隧道首次电磁异常出现在 HD1K0+284~HD1K0+254 的里程范围,超前地质预报的距离为 30 m。在 HD1K0+284~HD1K0+280 段,上、中、下三个剖面形态相似,围岩岩性无大的变化,掌子面底部仍然以石灰岩为主(5~10 Ω),间夹薄层泥层。

10 号点 60~100 m 范围,仰 45°方向视电阻率值相对周围较低(2 Ω),等值线形态呈封闭的串珠状向前延伸(图 4),通过原始数据分析,其线性异常较明显,推测为岩溶裂隙发育充水所致。而正前方和俯 45°方向,虽然似电阻率同样呈低异常(2 Ω),但相同地段剖面的电阻率等值线相互平行,梯度分布均匀,低阻区形状简单且分布较大,构成该掌子面背景值,推测为破碎含水岩体。

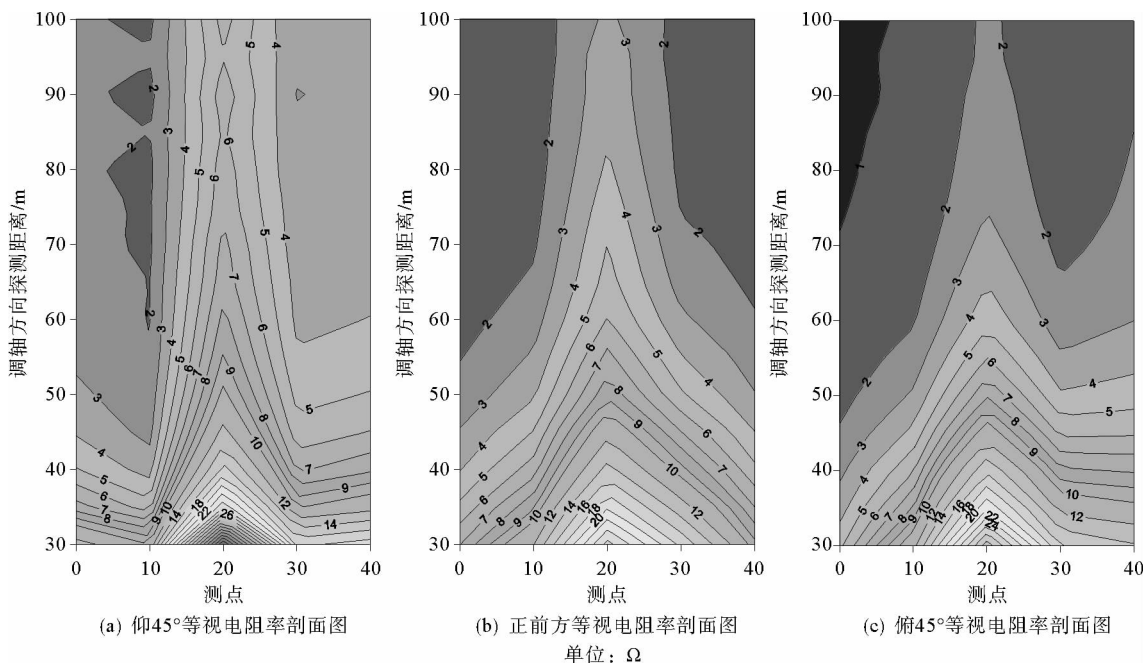


图 4 HD1K0+284 处等视电阻率剖面图

Fig. 4 The profiles of apparent resistivity in HD1K0 +284

据电磁场形成与传播正交最有效原理,该裂隙带实际展布范围较小,仅局限于掌子面前方(60~100 m)顶部,产状大致与仰 45°探测面垂直。建议施工方在该段加强支护,防治塌方和突水等不良地质现象。

2.2.2 溶洞的电磁信息反馈

而 D1K972+995 三个方向的异常情况正好相反,在测线正前方 4 m 左右的位置,岩体的视电阻率曲线为圆形高异常反应(20 Ω),且掌子面上方的异常明显大于下方,其值甚至超过了当地正常灰岩的试验值(5~10 Ω)(图 5),因此推测为直径大约 1 m 的干枯溶洞,并且向上延伸明显,向下逐渐消失。现场施工表明,已在隧道相应平面高 3 m 位置打出无水溶洞,证明了瞬变电磁探测的准确性。

2.2.3 岩溶风化带的电磁信息反馈

洞口是整个隧道工程的关键部位,也是地质灾害多发地段。因此,项目组在贵州段 12 标进口附近实施探测,于前方 8 m 处沿洞中轴线布设测线,点距 1.5 m,测线长 35 m。地质调查与探测结果表明,隧道进口周围的岩体质量较好,岩溶不发育,地下 60 m 范围内 ρ_s 值均显示 30~120 Ω 的高阻区(图 6)。而隧道洞顶岩体情况比较复杂,深部为薄层灰岩夹薄层泥岩,完整性较好, ρ_s 值普遍呈现高值,可达 100~250 Ω,是洞口施工的有利地质部位。但表层强风化岩厚 1~2 m,呈层状相对低异常展布, ρ_s 值仅为 50 Ω(图 7),推测为岩溶上层滞水带。从现场勘察情况来看,在测线 15 m 和 26 m 处尚有断裂破碎带出露地表,但 ρ_s 异常不显示,推测可能为小范围次生陷落柱,应采用其他勘探手段验证。

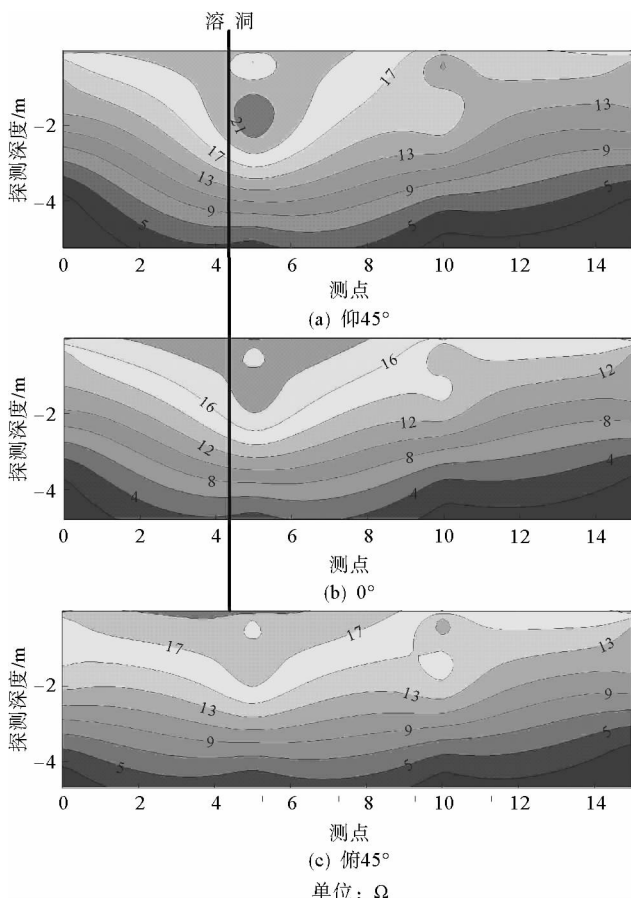


图 5 D1K972+995 处等视电阻率剖面图

Fig. 5 The profiles of apparent resistivity in D1K972 +995

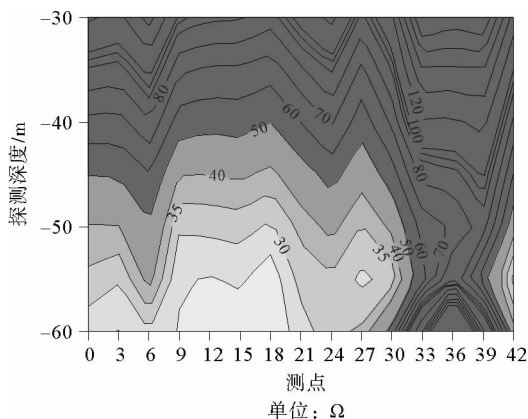


图 6 进口周围等视电阻率剖面图

Fig. 6 The profiles of apparent resistivity in entrance hole around

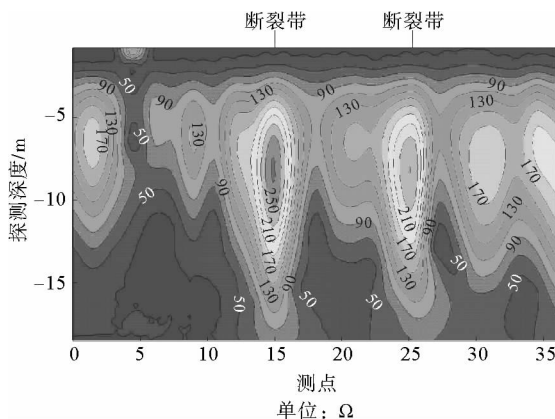


图 7 进口洞顶风化带等视电阻率剖面图

Fig. 7 The profiles of apparent resistivity in upper hole weathered zone

3 结论

七家营隧道工程实践表明,瞬变电磁法的等视电阻率平面图形象直观,能真实地反映地下岩溶体的空间几何特征。岩溶地区电磁信息反馈的数据具有一定规律性,即岩溶不发育的完整岩体质量较好, ρ_s 值可达

100~250 Ω ;岩溶裂隙水一般表现为电阻率低异常, ρ_s 值仅为 0~5 Ω ;无水溶洞表现为视电阻率高异常,为 15~20 Ω ;地表强风化岩厚度呈层状相对低异常展布, ρ_s 值仅为 50 Ω ;而陷落柱等线状体的视电阻率异常不明显,需要结合其他探测手段予以验证。

参考文献:

- [1]沈照理,刘光亚.水文地质学[M].北京:科学出版社,1985:1-5.
- [2]刘斌,李术才,李树忱,等.隧道含水构造直流电阻率法超前探测研究[J].岩土力学,2009,30(10):3093-3101.
Liu Bin, Li Shucai, Li Shuchen, et al. Study of advanced detection of water-bearing geological structures with DC resistivity method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3093-3101.
- [3]杨果林,杨立伟.隧道施工地质超前预报方法与探测技术研究[J].地下空间与工程学报,2006,2(4):627-630.
Yang Guolin, Yang Liwei. Detection techniques and methods of geological advanced prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(4): 627-630.
- [4]李天斌,孟陆波,朱劲,等.隧道超前地质预报综合分析方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2429-2436.
Li Tianbin, Meng Lubo, Zhu Jin, et al. Comprehensive analysis method for advanced forecast of geology in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2429-2436.
- [5]陈建峰.隧道施工地质超前预报技术比较[J].地下空间,2003,23(1):5-8.
Chen Jianfeng. Comparison of techniques for geological prediction of tunnels[J]. Underground Space, 2003, 23(1): 5-8.
- [6]陈志平,陈德玖,张照秀,等.高频大地电磁法在慈母山隧道勘察中的应用[J].地下空间与工程学报,2010,6(2):1726-1730.
Chen Zhiping, Chen Dejiu, Zhang Zhaoxiu, et al. Application of high frequency magneto telluric method in Chimushan tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(2): 1726-1730.
- [7]薛国强,李貅,底青云.瞬变电磁法正反演问题研究进展[J].地球物理学进展,2008,23(4):1165-1172.
Xue Guoqiang, Li Xiu, Di Qingyun. Research progress in TEM forward modeling and inversion calculation[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1165-1172.
- [8]李建平,李桐林,张辉,等.不规则回线源层状介质瞬变电磁场正反演研究及应用[J].吉林大学学报:地球科学版,2005,35(6):790-795.
Li Jianping, Li Tonglin, Zhang Hui, et al. Study and application of the TEM forward and inversion problem of irregular loop source over the layered medium[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(6): 790-795.
- [9]刘树才,刘志新,姜志海.瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用[J].中国矿业大学学报,2005,34(4):414-417.
Liu Shucai, Liu Zhixin, Jiang Zhihai. Application of TEM in hydrogeological prospecting of mining district[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4): 414-417.
- [10]李貅.瞬变电磁测深的理论与应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2002:5-8.
- [11]王梦恕.对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J].铁道勘察,2004(1):7-9.
Wang Mengshu. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district[J]. Railway Investigation and Surveying, 2004(1): 7-9.
- [12]邓居智,莫撼,刘庆成.探地雷达在岩溶探测中的应用[J].物探与化探,2001,25(6):474-476.
Deng Juzhi, Mo Han, Liu Qingcheng. The application of ground-penetrating radar to karst detection[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(6): 474-476.
- [13]李术才,李树忱,张庆松,等.岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):217-225.
Li Shucai, Li Shuchen, Zhang Qingsong, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 217-225.

(责任编辑:高丽华)