

瞬变电磁法超前地质预报技术在明月峡隧道中的应用

余东俊 黄磊 张玮

(成都理工大学 成都市 610059)

提 要 该文介绍了瞬变电磁法的原理及方法,并以瞬变电磁法在广陕高速公路明月峡隧道中的应用为例,结合TSP超前地质预报方法和开挖实际情况进行对比分析,初步评价了瞬变电磁法在超前地质预报中的适用性。

关键词 瞬变电磁法 超前地质预报 隧道

Application of Transient Electromagnetic Method in Advance Geologic Prediction Technique of Mingyuexia Tunnel

Yu Dongjun Huang Lei Zhang Wei

(Chengdu University of Technology)

Abstract The principle and method of transient electromagnetic are introduced, taking the application of TEM at Mingyuexia tunnel as an example, combining with TSP advance geologic prediction method, also the actual excavation situation is made for comparative analysis, then the applicability of TEM in advance geologic prediction is preliminarily evaluated.

Keywords transient electromagnetic method (TEM); advance geologic prediction; tunnel

1 引言

在隧道施工中,为了避免灾害事故的发生,开挖前必须对掌子面前方的地质情况有一个较好的了解。近年来,超前地质预报技术在中国的隧道施工中已经发挥了重要作用。隧道超前地质预报是指对隧道开挖掌子面前方的地质情况及不良地质体的工程性质及位置、产状进行探测、分析解释及预报。目前,我国用于隧道地质超前预报的方法很多,主要有隧道地震超前预报系统(TSP)、探地雷达法(GPR)、超前钻孔法和瞬变电磁法(TEM)几种。瞬变电磁法(时间域电磁法),简称为TEM,在我国已成功应用到地矿、水利水电系统的找矿、找水、岩溶勘探等工程中。近年来,在交通系统已逐步引进并得到推广,主要用于路基勘察、隧道施工的超前预报,但用于隧道的TEM勘察技术报道不多,目前尚属起步阶段。复杂地质条件下的隧道施工,一直是公路工程地质勘察的难点。瞬变电磁法与地质雷达、地质反射波法等物探方法相比有其自身的优势。本文通过对广陕高速公路明月峡隧道的超前地质预报工作,

结合实际施工情况,初步介绍了瞬变电磁法在明月峡隧道超前预报中的应用情况,并为以后的应用提出了建议。

2 瞬变电磁法超前地质预报的原理及方法

2.1 瞬变电磁法的基本原理

瞬变电磁法是一种利用电磁感应原理预测地质情况的地球物理方法。采用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲电磁场,地下的导电地质体在一次脉冲磁场的激发下,被感应出涡流,由于良导电介质内感应电流的热损耗,在空间形成二次瞬变磁场,且大致按指数规律随时间衰减,由于瞬变磁场的强度及延迟时间与地下地质目标体的电性、规模及产状等参数有关,通过接收回线观测二次场,对所观测的数据进行分析和处理,从而解释地下地质情况。

2.2 野外工作方法

本次在明月峡隧道超前预报中采用的瞬变电磁仪为WTEM-1Q/GPS瞬变电磁仪。该仪器由重庆奔腾数控技术研究所研制。

根据隧道工作特点及工作要求,我们选用3m×3m八匝发射线框,2m×2m十匝接收线框的中心回

线工作装置。该方式的优点是:与目的物耦合较好;发射线圈逐测点移动,不会有激发盲区;发射磁矩和接收磁矩较大;适合场地要求。

具体工作方法是首先进行支撑框架组装;然后将支撑框架尽量平行贴近掌子面,进行探测。一般先布置一条测线,以0.5m点距(或1m)自左向右逐点移动线框并进行数据采集,完成数据采集后进行数据存储,结束现场测试。如遇到隧道内钢拱架(或格栅拱架)紧跟掌子面施工的情况,可将左右边界测点远离边墙1~2m探测,以减少钢拱架(或格栅拱架)等金属支护结构对探测结果的影响,或将其退离掌子面至少10m以外。

2.3 数据处理方法

2.3.1 数据校正及滤波

1) 剔除强干扰信号

瞬变电磁数据在时间-感应电动势双对数坐标中随时间增加而不断衰减,且是相对连续的。若某测道的衰减趋势与其前后测道相比出现急剧变化,则该测道即为强干扰道。对此强干扰信号如果先作圆滑处理则会将该干扰扩散到前后各测道中,并未消除干扰,此时应先剔除强干扰信号。

在时间-感应电动势双对数坐标中,首先计算衰减曲线在各测点、各测道的斜率,并进行统计,计算出平均值及方差,并对斜率超差的测道进行校正。即当某测点第*i*道超差时,以其前一道斜率为基础,综合考虑第*i*道前后各测道的斜率,加权归一得到斜率值 k_1 ,同时计算邻近测点在该测道的加权斜率值 k_2 。

则有:

$$\begin{aligned} k &= C_1 \square k_1 + (1 - C_1) \square k_2 \\ e &= \log V_{i-1} + [\log t_i - \log t_{i-1}] \square k \\ V_i &= 10^e \end{aligned}$$

其中: $C_1 = C_0/100$ (C_0 为0~100之间的可调常数); t_i 为第*i*道的采样延时; V_i 为求得的第*i*道的感应电动势。

2) 测道圆滑

在瞬变电磁探测中,如果感应电动势衰减曲线不是相对连续的变化曲线,则视为干扰,作测道圆滑处理:

$$\begin{aligned} r_1 &= 1/[\log t_i - \log t_{i-1}]^2 \\ r_2 &= 1/[\log t_{i+1} - \log t_i]^2 \\ e &= (1 - C_1) \square \log(V_i) + \end{aligned}$$

$$C_1 \square \left[\frac{r_1}{r_1 + r_2} \square \log V_{i-1} + \frac{r_2}{r_1 + r_2} \square \log V_{i+1} \right]$$

$$V_i = 10^e$$

3) 测点圆滑

若测点距不太大时,其感应电动势在沿测线方向上亦应相对连贯,很少表现为单点异常。如连贯性太差,可进行测点圆滑:

$$e = (1 - C_1) \square \log V_j +$$

$$C_1 \square \left[\frac{r_1^2}{r_1^2 + r_2^2} \log V_{j-1} + \frac{r_2^2}{r_1^2 + r_2^2} \square \log V_{j+1} \right]$$

$$V_j = 10^e$$

其中: r_1 为第*j*-1与第*j*测点间距离; r_2 为第*j*与第*j*+1测点间距离。

2.3.2 视电阻率及视深度计算

1) 视电阻率计算

不同工作方式的实测数据可以通过数值逼近或反演迭代技术求解。本次隧道超前地质预报采用的是中心回线工作方式的视电阻率计算方法。

在阶跃脉冲电流的激发下,均匀半空间地表处的感应电动势为:

$$\epsilon(t) = \frac{I}{\sigma a^3} \left[3\text{erf}(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} (3 + 2\mu^2) e^{-\mu^2} \right]$$

其中: a 为发射回线半径; σ 为均匀半空间导电率; t 为供电电流关断的延迟时间; $\epsilon(t)$ 为中心回线方式感应电动势。误差函数:

$$\begin{aligned} \text{erf}(u) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt \\ \mu &= \left(\frac{\mu_0 \sigma a^2}{4t} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

整理:

$$\begin{aligned} F(\mu) &= 3\text{erf}(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} (3\mu + 2\mu^3) e^{-\mu^2} - \\ &\frac{4\mu^2 at}{\mu_0} \frac{\epsilon(t)}{I} = 0 \end{aligned}$$

根据上式可得到视电阻率表达式:

$$\rho(t_i) = \frac{\mu_0 a^2}{4t_i \mu^2}$$

其中: μ_0 为导磁率。

2) 视深度计算

对某个延时 t_i 的观测视深度 h 按下式计算:

$$h(t) = a \square D(t_i)$$

其中: a 为经验系数,0.44; $D(t_i)$ 为穿透深度。

3 应用实例

明月峡隧道位于广元市朝天区以北约2km处。

隧道左线全长 2494m;右线全长 2523m。右线出口端 K26+570~K26+488 段的地质概况为:灰岩、炭质页岩夹煤层、铁铝质粘土岩,薄—中层状构造,弱风化;围岩节理裂隙发育,结构面结合程度一般—差;围岩受构造影响严重,岩层陡倾,岩体破碎,呈碎裂状结构;围岩岩溶发育,局部地段分布有岩溶管道,开挖时沿岩溶管道可能产生突泥、突水现象。

预报前,首先进行了实验,积累背景资料,以确定最佳参数。该次参考选择如下:控制延时为 $0.2\mu\text{s}$;接收天线延时为 $0.1\mu\text{s}$;阻尼系数为 650Ω ;叠加次数为 80。此参数设置为经验值,若遇特殊情况可进行调整。

本次对明月峡隧道右线出口端 K26+535~K26+490 段进行了瞬变电磁法超前地质预报。图 1 即为该段预报成果图。根据图 1 所示,图中 K26+535~K26+510 段,其视电阻率值变化较平缓,无甚异常;而 K26+510~K26+490 段视电阻率变化较大,其中 K26+496~K26+490 段附近中部出现视电阻率低阻异常,且与相邻的 K26+505~K26+496 段视电阻率差值较大,初步判定该处存在裂隙水。

表 1 为本次瞬变电磁法超前地质预报成果与 TSP 超前地质预报成果及实际开挖情况的对比。从表 1 中可以发现,瞬变电磁法超前地质预报对隧道岩溶水的探测有一定的效果,并且与实际开挖情况

比较符合。

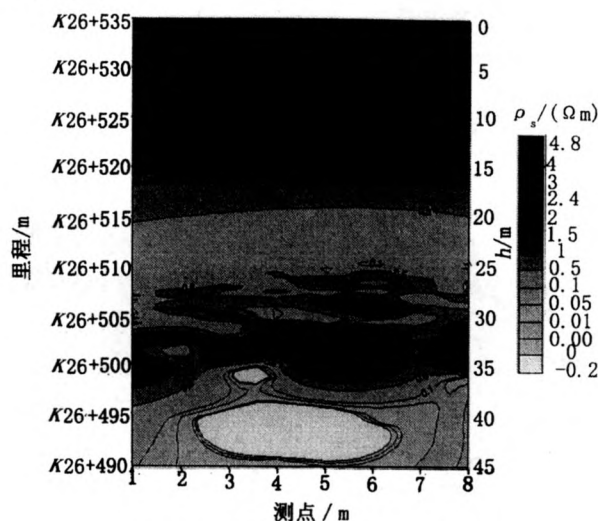


图 1 瞬变电磁法超前预报成果

瞬变电磁法预报结果与 TSP 方法预报结果较吻合,特别是对于低阻体如水夹泥等,前者非常敏感,成果图能比较清晰地显示;但对于高阻体,瞬变电磁法与 TSP 法结果有差异。另外,瞬变电磁法预报成果与实际开挖情况对比来看,一般相符;对于局部含水丰富层段,即电阻率较周围急剧降低层段,与实际开挖情况较好相符。但由于瞬变电磁探测法受金属支护结构影响较大(特别是高阻岩体部分),其预测结果与实际开挖情况存在较大差异。

表 1 瞬变电磁预报成果与 TSP 预报成果以及实际开挖情况的对照

里程	瞬变电磁法预报	TSP 预报	实际开挖情况
K26+535~K26+526	围岩较完整,岩溶弱发育	围岩破碎	岩体较破碎
K26+526~K26+510	围岩较完整,岩溶弱发育	围岩较破碎,岩溶弱发育	岩体较破碎,地下水呈潮湿—滴水状
K26+510~K26+502	围岩破碎,溶蚀裂隙强烈发育,裂隙强烈发育	围岩较破碎,岩溶弱发育	岩体较破碎,地下水呈潮湿—滴水状,局部呈线状
K26+502~K26+490	存在溶洞,注意突泥和裂隙涌水	存在溶洞,提请采用水平超前钻孔进行核实,注意突泥和涌水	存在小溶洞裂隙,存在突泥,地下水呈滴水状,局部呈线状。

4 结论

瞬变电磁法作为一种新的超前地质预报方法,对低阻体敏感,预报时间周期短,探测深度较大等优点。但是基于其本身的物理应用原理,瞬变电磁法只在偶尔出现大的岩性差异的洞段能够进行区分,差异小的地方几乎不能判断;也正是由于瞬变电磁法对低阻体敏感,隧道中的金属物包括台车、钢拱架、格栅拱架都会对预报结果产生较大影响。本次采用瞬变电磁法对明月峡隧道进行的超前地质预

报,取得了一定的效果,将得出的结果与地质资料和其他超前地质预报方法进行了综合分析,并将解释结果与掌子面地质素描、开挖记录等实际资料进行了对比,结果表明,应用瞬变电磁法进行超前地质预报,特别是应用于超前探水有广阔的应用前景。

参考文献

- 1 牛之琰.时间域电磁法原理.长沙:中南大学出版社,2007
- 2 蒋邦远.实用近区磁源瞬变电磁法勘探.北京:地质出版社,2000

(下转封三)

地质性质等,建立了一整套系统研究采空区地下形态分布及性质的手段和方法,系统的、全面的勘察工作作为后续采空区的稳定性研究工作奠定了基础。

参考文献

- 1 GB50021-2001 岩土工程勘察规范
- 2 岩土工程手册.中国建筑工程出版社,1994.

(上接第 50 页)

- 3 方文藻,等.瞬变电磁测探法原理.西北工业大学出版社,1992
- 4 杜庆丰,管志宁,何朝明.瞬变电磁数据预处理方法探讨.物探与化探,2006,30(1)
- 5 薛国强,宋建平,武军杰,等.瞬变电磁法探测公路隧道工程中的不良地质构造.长安大学学报(地球科学版),2003,25(4):73~75

(上接第 60 页)

灌前、灌后变形模量测试成果对比分析:岩体通过各序灌浆处理后,岩体变模平均值由灌前的 1.19GPa 提高至二序水泥灌浆后的 1.44GPa;化学灌浆后,岩体变模提高至 3.26~3.52GPa,较灌前提高 173.9%~195.8%,岩体变模值有较大改善。

4 结语

大量的测试工作及应用效果表明,综合运用多种地球物理检测方法是检测建基岩体的重要手段,

- 3 杨孝文.高速公路下伏煤矿采空区勘察与处治方法研究:[学位论文].西安:长安大学,2005
- 4 宗志刚.地震勘探方法在探测煤矿采空区中的应用研究:[学位论文].北京:中国地质大学(北京),2006
- 5 刘春香.高层建筑采空区场地稳定性及其治理技术研究:[学位论文].徐州:中国矿业大学,2009

- 6 黄鸿健,吴有信.瞬变电磁法在隧道工程中的应用.现代隧道技术,2008,45(2):53~57
- 7 段铮,李天斌,李育枢,等.瞬变电磁法超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用.现代隧道技术,2008,45(2):58~62
- 8 段铮.瞬变电磁法在隧道超前地质预报中的应用及解释分析.成都理工大学硕士学位论文,2008

是保证设计要求,确保坝体安全的重要措施。

参考文献

- 1 雷宛,肖宏跃.工程与环境物探教程.成都:地质出版社,2006
- 2 沙椿,宋正宗.工程岩体力学实验中的静动对比.工程物探,2003(1)
- 3 沙椿.钻孔变形实验在水电工程中的应用.工程物探论文集,243~250
- 4 胡德绥.弹性波动力学.成都理工大学,2003
- 5 DL/T5010-2005 水电水利工程规程

河北省评出首批工程勘察设计大师

2010年3月19日,省住房和城乡建设厅与省人力资源和社会保障厅授予梁金国等10人“河北省工程勘察设计大师”称号。这是我省首次评选工程勘察设计大师。

这10人分别是:河北建设勘察研究院有限公司总经理梁金国、河北水利水电勘测设计院院长顾辉、河北建设勘察研究院有限公司副总工程师聂庆科、中勘冶金勘察设计院总工程师杨书涛、北方勘察设计院总工程师王长科、北方勘察设计院副院长李宏义、河北省建筑科学研究院副总工程师张振拴、中冶沈勘秦皇岛工程技术公司经理王健、河北省交通规划设计院副总工程师王云平、唐山规划建筑设计院副院长宋泽华。

摘自《河北省城乡建设厅网站》