

瞬变电磁法在安岚高速隧道超前地质预报中的应用

陈红林 汤续鹏

陕西高速公路工程试验检测有限公司 陕西 西安 710000

摘要：随着高速公路工程不断向山区推进，隧道建设也逐渐增多。为了避免隧道施工受到地下水的影响造成人员和财产损失，隧道地下水的识别和预测工作显得尤为重要。与电磁波法和TSP法相比，瞬变电磁法在地下水的预测中具有分辨率高、精确度高等特点。本文采用该方法对安岚高速2期隧道部分段落进行了超前地质预报。结果表明，瞬变电磁法的预测结果与后续隧道施工实际情况吻合良好，证明该方法对隧道地下水探测是行之有效的。

关键词：瞬变电磁法；隧道；超前地质预报；

引言

施工隧道在穿越不良地质发育复杂的地区时常常会遭遇突水突泥、塌方、冒顶等地质灾害，这些地质灾害会对施工人员以及施工设备造成损害，还会拖延施工进度，给工程带来巨大的损失。为了避免地质灾害对隧道施工产生不良影响，隧道超前地质预报工作便成为了隧道安全、高效施工中的重要一环。

瞬变电磁法是一种非常重要的地球物理勘探方法，被广泛的应用在矿产勘探、水资源勘探、地质构造研究等。公路隧道预报常常采用TSP、电磁波等方法进行不良地质体预测、预报，由于瞬变电磁对水的分辨率优于TSP、电磁波法，故此瞬变电磁在公路隧道中的应用有利于探测开挖面前方地下水的分布（规模、方位），更加准确的指导施工、确保施工安全。

本文采用瞬变电磁法对安岚高速2期项目隧道进行地下水预测，并在隧道施工过程中采取了相应的防治措施，从而避免了不良地质灾害的发生，同时也验证了瞬变电磁法在隧道超前地质预报中的实用性和有效性。

1 瞬变电磁法原理

瞬变电磁法（Transient Electromagnetic Methods），又称时间域电磁法（Time Domain Electromagnetic Methods）简称TEM或TDEM。是近年来发展很快的电法勘探分支方法，在国际上有人称作是电法的“二次革命”。

瞬变电磁法的测深原理又可以“烟圈”效应形象地加以阐明，如图1所示，地表接收的二次电磁场是地下感应涡流产生的，其涡流以等效电流环向下并向外扩散，形如“烟圈”。随着时间的推移，“烟圈”的传播与分布将受到地下介质的影响，这样从“烟圈效应”的观点看，可得早期瞬变电磁场是近地表感应电流产生的，反映浅部电性分布；晚期瞬变电磁场主要是由深部的感应

电流产生的，反映深部的电性分布。因此，观测和研究大地瞬变电磁场随时间的变化规律，可以探测大地电性的垂向变化。

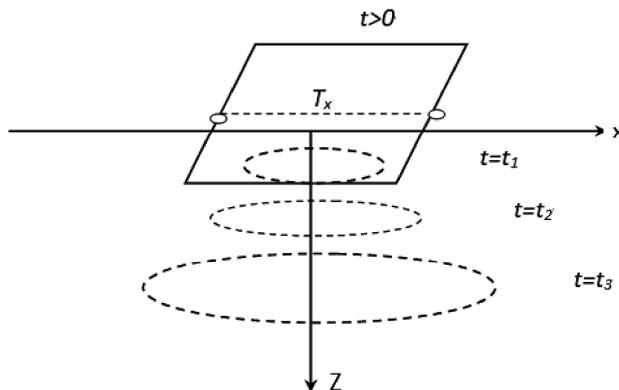


图1 瞬变电磁探测原理示意图

2 瞬变电磁法的实施

2.1 预报系统布置

测线布设应完整、连续、并应尽量避免电磁干扰源；采取措施尽量减小金属支护结构等低阻体、发射线圈和接收线圈的互感效应对探测结果的影响；组装线圈支撑框架，将发射线框和接收探头（线框）固定在线圈支撑框架上；准备工作就绪后，对掌子面进行探测。

（1）位置偏移法：一般情况下布置一条测线，掌子面要尽可能平整，确保框架与掌子面平行，从左到右紧贴掌子面移动框架，点测时每移动0.3m进行一次探测；若线测（连续测量）时，点距可为0.1m。

（2）角度偏移法：分别按不同角度朝多个方向进行探测并准确控制探测方位，在横向上分别朝左偏45°、左偏30°、左偏15°、掘进方向、右偏15°、右偏30°和右偏45°方向进行探测，在横向每个方向探测的基础上分别再进行上偏45°、上偏30°、上偏15°、水平方向、下偏15°、下偏30°和下偏45°等多个方向进行探测。

(3) 如遇围岩级别较低、钢架紧跟掌子面施做的情况, 可将左右边界测点远离边墙1m~2m探测, 以减小钢拱架等金属支护结构对探测结果的影响。

2.2 数据处理

YCS2000A矿用瞬变电磁仪数据处理的专用软件, 适用于巷道顶底板、工作面内及顶底板、掘进头超前探测瞬变电磁数据处理^[1]。该软件具有较好的人机交互界面, 自动化程度高, 便于进行操作, 处理结果精度高。该软件包采用模块式结构, 每个模块可以独立执行不同的功能, 对资料进行不同阶段处理。处理流程如^[2]:

(1) 数据读取及显示: 包括数据读取、曲线显示、测点编辑等功能, 在此模块可以检查曲线形态, 对曲线进行手动编辑等;

(2) 曲线圆滑: 主要是利用小波变换对曲线进行圆滑处理;

(3) 视电阻率计算: 利用编辑矫正后的数据计算得到其视电阻率值;

(4) 视深度计算: 利用前面模块的计算结果, 计算得到相应的视深度值;

(5) 坐标转换: 对超前探测结果进行坐标转换, 得到相应的扇形图;

(6) 自动常规处理: 此模块是对上面各种模块功能的集成, 利用此模块可以一次性完成上面的处理工作;

(7) 自动绘图: 自动链接内嵌的绘图软件, 绘制视电阻率等值线图。

按照上述处理方法对测量数据进行处理, 根据地层的电性特征, 设计表示视电阻率的色谱, 形成视电阻率色谱图件。

2.3 成果识别

瞬变电磁数据异常识别要素应包括视电阻率大小、异常形状、异常的纵向延伸、异常的连续性以及异常内部信息, 数据综合解释应结合工程地质与水文地质资料、掌子面的干扰, 剔除探测结果误差, 获取异常信息, 并应解释该异常信息, 瞬变电磁数据异常解释结果应包括断层、岩溶、裂隙发育带、地质情况变化等, 其异常识别可参照下列所述^[3]。

(1) 断层识别: 对于掌子面前方存在含水断层的情况, 视电阻率等值线基本呈直线, 且在断层区域较为密集, 视电阻率值随深度的增加而骤减。穿过断层后视电阻率等值线逐渐变稀疏, 视电阻率值随深度的增加继续均匀增大。

(2) 溶洞识别: 对于掌子面前方存在单一富水溶洞的情况, 视电阻率等值线会在溶洞所在区域发生弯曲甚

至闭合, 且该处视电阻率值较其它区域明显偏低。对于掌子面前方存在多个富水溶洞的情况, 剖面上多个溶洞对应区域都存在上述现象。

(3) 裂隙发育识别: 对于掌子面前方存在多处含水裂隙的情况, 视电阻率等值线会在对应区域发生小范围闭合, 且该处视电阻率值较低。

(4) 单一地质识别: 对掌子面前方不存在不良地质体的情况, 视电阻率等值线基本呈直线, 且视电阻率值随深度的增加而均匀变化。

3 应用实例

3.1 工程概况

岚皋至陕渝界高速公路(安岚2期)工程全线采用双向四车道高速公路技术标准, 其中岚皋至陕渝界段设计速度80公里/小时, 路基宽度25.5米。主线设置隧道21771.71m/17座, 其中特长隧道16382.04m/3座, 长隧道1046.81m/1座, 中隧道2055.65m/3座, 短隧道2287.22m/10座(连拱隧道3座), 其他均为分离式隧道。特长隧道凤树梁隧道和大巴山隧道作为控制工程, 先期开工。其中凤树梁隧道通过涌水量估算方法预测隧道涌水量, 本隧道建议左线涌水量为5371.960m³/d, 右线涌水量为5280.613m³/d。大巴山隧道通过涌水量估算方法预测右线涌水量为23897.16m³/d, 左线涌水量为24926.31m³/d, 整体隧道洞室估算涌水量为48823.47m³/d。

3.2 典型预报结果分析及验证

根据第三章的角度偏移法对安岚2期部分隧道开挖面进行了瞬变电磁预报, 通过软件处理得到水平、竖直电阻率在掘进方向的等值线图, 分析低电阻值分布区域判断地下水分布情况, 以较典型的三个探测段落为例, 对预报结果进行分析以及验证。

3.2.1 凤树梁隧道YK59+600~YK59+710段瞬变电磁预报结果分析及验证

对凤树梁隧道YK59+600~YK59+170段进行瞬变电磁预报, 采用角度偏移法进行测量, 得出了水平、竖直电阻率在掘进方向等值线图, 如图2、图3所示。

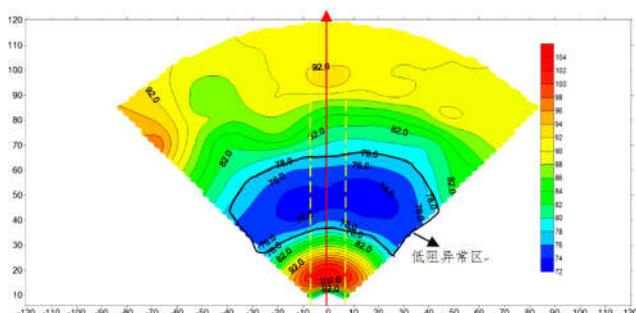


图2 水平方向(左45°至右45°)电阻率等值线图

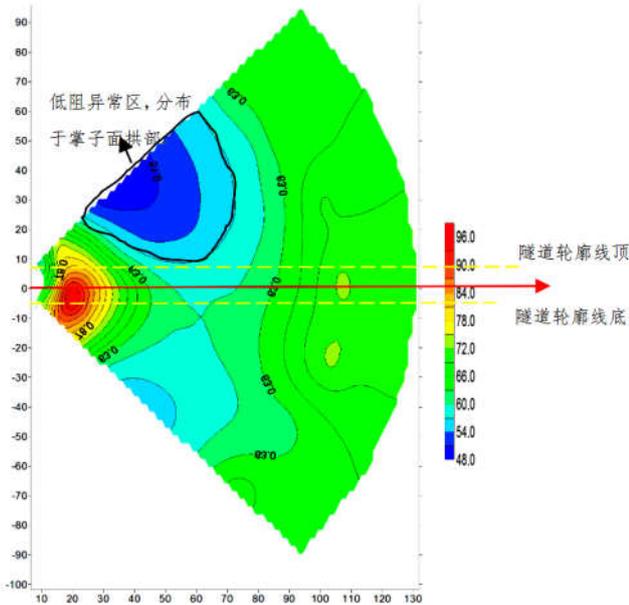


图3 竖直方向（上45°至下45°）电阻率等值线图

从水平探测方向（左45°至右45°）成果图可看出掌子面前方30~80m（YK59+630~YK59+680）范围存在大面积

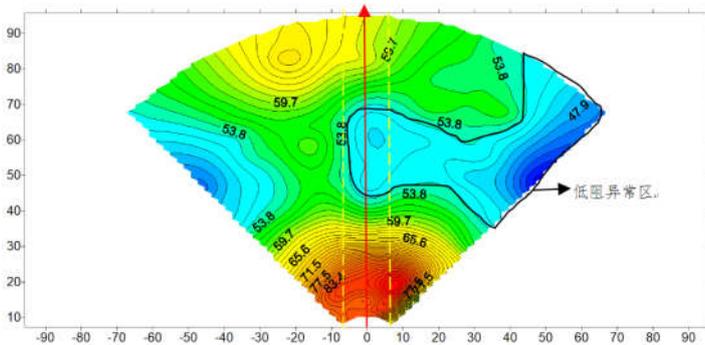


图4 水平方向（左45°至右45°）电阻率等值线图

从水平探测方向（左45°至右45°）成果图可看出掌子面前方40~70m（ZK84+630~ZK84+670）范围存在大面积低阻异常区，分布于掌子面正前方。

从竖直探测方向（上45°至下45°）成果图可看出掌子面前方30~70m（ZK59+620~ZK59+660）范围存在大面积低阻异常区，分布于掌子面正前方，以隧道中部、底部范围较为显著。

由此可推测出ZK84+590~ZK84+630段地下水较发

低阻异常区，分布于掌子面正前方。

从竖直探测方向（上45°至下45°）成果图可看出掌子面前方30~75m（YK59+630~YK59+675）范围存在大面积低阻异常区，分布于掌子面正前方，以隧道拱部上方10~20m范围较为显著。

由此可推测YK59+600~YK59+630段地下水较发育，洞室开挖会存在渗水、线状水；YK59+630~YK59+680段地下水发育，洞室开挖会存在线状水、股状水；YK59+680~YK59+710段地下水不发育。

在后续的施工过程中，掌子面开挖至YK59+600~YK59+650段掌子面存在线状水；YK59+650~YK59+685段掌子面存在股状水且分布于拱部；YK59+685~YK59+710段掌子面无水。

3.2.2 大巴山隧道ZK84+590~ZK84+690段瞬变电磁预报结果分析及验证

对大巴山隧道ZK59+590~ZK84+690段进行瞬变电磁预报，采用角度偏移法进行测量，得出了水平、竖直电阻率在掘进方向等值线图，如图4、图5所示。

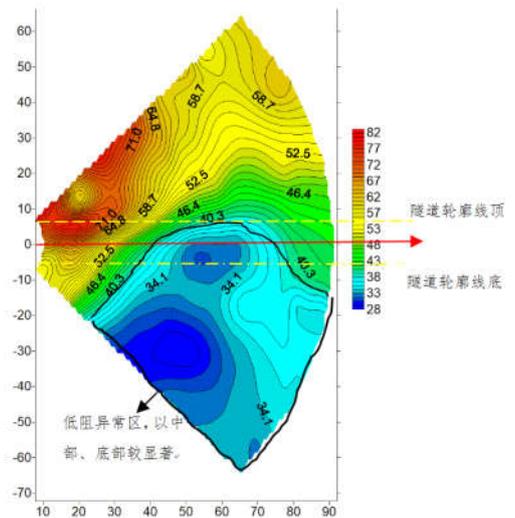


图5 竖直方向（上45°至下45°）电阻率等值线图

育，洞室开挖会存在渗水、线状水；ZK84+630~670段地下水发育，洞室开挖会存在股状水、突水；ZK84+670~ZK84+690段地下水较发育，洞室开挖会存在渗水、线状水。

在隧道施工过程中，掌子面开挖至ZK84+590~ZK84+650段掌子面存在线状水；ZK84+650~ZK84+670段掌子面存在股状水、突水且分布于掌子面底部；ZK84+670~ZK84+690段掌子面存在线状水。

3.3 电阻率与水文情况分析

为了更好地探究瞬变电磁预报中电阻率与围岩含水情况之间的关系，归纳统计了本项目16个被测段落电阻

率区间与围岩含水情况，如表1所示。统计表明，瞬变电磁法较好的满足了当前开挖面前方水文地质勘探的需求，为防止掌子面出现突、涌水现象提供有效依据。

表1 安岚项目瞬变电磁预报（电阻率）与围岩含水情况统计

| 预报段落 | 电阻率区间 ($\Omega \cdot m$) | 围岩含水情况 | 备注 |
|-------------------|----------------------------|--------------------------------------------|-------------|
| YK59+600~YK59+710 | 48~104 | 48~70 $\Omega \cdot m$ 区间存在股状水 | |
| ZK84+590~ZK84+690 | 28~94 | 28~56 $\Omega \cdot m$ 区间存在股状水 | |
| ZK84+650~ZK84+750 | 0~108 | 0~24 $\Omega \cdot m$ 区间存在股状水、突水（对着水源进行采集） | ZK84+650已出水 |
| ZK84+760~ZK84+860 | 50~115 | 50~70 $\Omega \cdot m$ 区间点滴状渗水 | |
| ZK84+905~ZK85+005 | 8~110 | 8~40 $\Omega \cdot m$ 区间存在股状水 | |
| ZK85+080~ZK85+180 | 62~115 | 62~70 $\Omega \cdot m$ 区间存在线状水 | |
| ZK85+288~ZK85+400 | 34~114 | 34~70 $\Omega \cdot m$ 区间存在线状、股状水 | |
| ZK85+402~ZK85+512 | 60~114 | 60~75 $\Omega \cdot m$ 区间存在线状水 | |
| YK84+595~YK84+695 | 45~111 | 45~63 $\Omega \cdot m$ 区间存在线状、股状水 | |
| YK84+666~YK84+766 | 15~95 | 15~35 $\Omega \cdot m$ 区间存在股状水 | YK84+666已出水 |
| YK84+755~YK84+865 | 75~113 | 未见水 | |
| YK84+920~YK85+020 | 30~114 | 30~55 $\Omega \cdot m$ 区间存在线状水 | |
| YK85+010~YK85+110 | 24~96 | 24~42 $\Omega \cdot m$ 存在线状、股状水 | |
| ZK87+040~ZK87+140 | 26~92 | 26~56 $\Omega \cdot m$ 区间存在线状、股状水 | |
| YK87+030~YK87+140 | 10~93 | 10~33 $\Omega \cdot m$ 区间存在线状、股状水 | |
| YK87+587~YK87+697 | 54~106 | 54~66 $\Omega \cdot m$ 区间存在渗水 | |

结论

1) 本文通过瞬变电磁法成功预报了安岚高速2期工程中的隧道地下水情况，为本项目在采用瞬变电磁法判断地下水提供参考，为隧道安全施工提供了保障，研究成果可供类似隧道施工参考。

2) 目前本项目采用瞬变电磁预报过程中，在灰岩与辉石岩中当电阻率处于20~40 $\Omega \cdot m$ 范围岩层中饱含水，在40~60 $\Omega \cdot m$ 范围岩层存在裂隙水，> 60 $\Omega \cdot m$ 范围时岩层含水可能性较小。

参考文献

- [1]吴章涛.侧帮采空区煤柱完整性瞬变电磁法探查评价[J].价值工程,2023,42(20):160-162.
- [2]古瑶,王施智,崔江伟等.矿井瞬变电磁超前探测技术在石墨矿中的应用[J].陕西煤炭,2019,38(01):171-173+170.
- [3]李学潜,韩德品,王程等.巷-孔瞬变电磁法在探测含水构造中的应用[J].中国煤炭地质,2019,31(03):77-82.
- [4]裴辉.基于瞬变电磁原理的资料处理及解释方法研究[J].华北自然资源,2021(06).