瞬变电磁法在祝源隧道勘察中的应用

陈侃福　张天宝　刘 健

（浙江省交通规划设计研究院，杭州　310006）

摘要： 在祝源隧道勘察过程中，应用瞬变电磁法进行勘探，较好地揭示了隧道区断层分布及在深部延伸状况，经过钻探及地表调查验证，效果良好，解决了工程中存在的实际问题。

关键词： 隧道；勘察；瞬变电磁法

1 前言

祝源隧道位于武夷山脉东南侧的中低山区。隧道长度4.02km，隧道沿线最高山岭的海拔高程为1047.86m，隧道最大埋深643.04m。隧道区围岩岩性主要为云母石英片岩和石英片岩，局部为变质花岗岩。祝源隧道处在邵武-河源深断裂与武夷山-武平大断裂之间的断块内，北西、北东向断裂构造发育，性质复杂，严重影响隧道围岩的稳定，探明隧道区构造的分布及在深部的延伸状况是进行准确评价隧道围岩稳定性的首要任务，为了较为准确地获取隧道区构造分布及在深部延伸状况，经认真分析，我们选择首先用瞬变电磁法勘察，而后辅以钻孔验证的方法。

2 瞬变电磁法探测原理

瞬变电磁法（Transient electromagnetic method，简称TEM法）是近年来发展很快的电法勘探分支方法。利用一定波形的脉冲激发，在一次场断电后，通过观测二次场随时间的衰减特性达到地质目标的一种时间域电磁法。鉴于TEM在时间和空间上的可分性，其具有以下特点：

①把频率域法的精确度问题转换成灵敏度问题，加大功率灵敏度可以增大信噪比，加大勘探深度；②高阻围岩地区不会产生地形起伏影响的假异常；在低阻围岩区，由于是多道观测，早期道的地形影响也较易分辨；③可以采用同点组合（同一回线，重叠回线，内一回线）进行观测，使与探测目标的耦合最紧，取得的异常响应强，形态简单，分层能力强；④线圈点位、方位或接发距要求相对不严格，测地工作简单，工效高；⑤有穿透低阻覆盖的能力，探测深度大；⑥剖面测量与测深工作同时完成，提供了更多有用信息，减少了多解性。

2.1 探测深度

电磁场在大地中主要以扩散形式传播，在这一过程中，电磁能量直接在导电介质中传播而消耗。由于趋肤效应，高频部分主要集中地表附近，且其分布范围是源的下面局部，较低频部分传播到深处，且分布范围逐渐扩大。

传播深度：$$d=\frac{4}{\sqrt{\pi}}\sqrt{t/\sigma\mu_0} \qquad (1)$$

传播速度：$$V_z=\frac{\partial d}{\partial t}=\frac{2}{\sqrt{\pi\rho\mu_0 t}} \qquad (2)$$

其中：t为传播时间；σ为介质电导率；μ_0为真空中磁导率。

由式（1）可得：$$t=2\pi*10^{-7}h^2/\rho \qquad (3)$$

作者简介： 陈侃福 （1964-），男，高级工程师，主要从事岩土工程勘察.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在中心回线下，时间与表层电阻率间的关系为

$$t=\mu_0\left(\frac{(M/\eta)^2}{400(\pi\rho_1)^3}\right)^{\frac{1}{5}} \qquad (4)$$

式中：M 为发送磁矩；ρ_1 为电阻率；η 为最小可分辨电压，大小与目标层几何参数、物理参数及观测时间段有关。

联立(3)(4)式，可得

$$h=0.55\left(\frac{M\rho_1}{\eta}\right)^{\frac{1}{5}} \qquad (5)$$

上式即为野外工作中计算探测深度的公式。

瞬变电磁的探测能力还包括对异常体的分辨能力。瞬变电磁的分辨的能力与目标层的大小、电性异常信号与地质噪声的分离程度、电磁噪声电平等因素有关。

2.2 正反演计算

2.2.1 正演方法

对于水平层状大地，在大回线发射谐变电流激发下，回线中心处频率域电磁响应：

$$V(\omega)=\frac{dB_z(\omega)}{dt}=-i\omega\mu_0 I_0\int_0^{\infty}\frac{\lambda Z^{(1)}}{Z^{(1)}+Z_0}J_1(\lambda\alpha)d\lambda \qquad (6)$$

式中：α 为回线半径；I 为发射电流；$J_1(\lambda\alpha)$ 为一阶贝塞尔函数。

$Z^{(1)}$ 由下列公式求得：

$$Z^{(1)}=Z_j\frac{Z^{(j+1)}+Z_j th(u_j H_j)}{Z_j+Z^{(j+1)}th(u_j H_j)}$$

其中 $Z^{(n)}=Z_n, Z_j=\frac{-i\omega\mu_0}{u_j}$，　$u_j=\sqrt{\lambda^2+k_j^2}, k_j^2=-i\omega\sigma_j\mu_0, j=1,2,3\cdots n$。

式中，σ_j 为电导率

根据频谱分析理论，由上式可得瞬变（时间域）电磁响应：

$$\frac{dB_z(t)}{dt}=\frac{4}{\pi\sigma\mu_0\alpha^2}\int_0^{\infty}R_e[H_z(b)]\cos(bT)d\lambda \qquad (7)$$

其中：$H_z(b)=I\alpha\int_0^{\infty}\frac{\lambda Z^{(1)}}{Z^{(1)}+Z_0}J_1(\lambda\alpha)d\lambda$，且 $b=\sigma_{\mu 0}\omega\alpha^2/2$，$T=2t/\sigma_1\mu_0\alpha^2$ 分别为归一化频率和归一化时间。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

然后利用晚期视电阻率定义式：$\rho_\tau(\frac{\partial B_Z(t)}{\partial t})=\frac{\mu_0}{4\pi t}\left(\frac{2\pi I\alpha^2\mu_0}{5t\frac{\partial B_Z(t)}{\partial t}}\right)^{\frac{2}{3}}$ 得到晚期视电阻率曲线。

2.2.2 反演方法

TEM 资料反演采用 Zonge 公司 Resix 反演软件

3 野外工作方法

本次野外工作选择美国 Zonge 公司生产的 GDP-32 II 电法工作站，采用同点装置。结合地质对象的特征，本次工作选用回线边长为 40*40 米，点距 50 米，局部加密。

在方法选择后，为确定和验证其信度和效度，进行了方法有效性试验，选在 ZKC1 孔附近，其探测结果见下图 1。

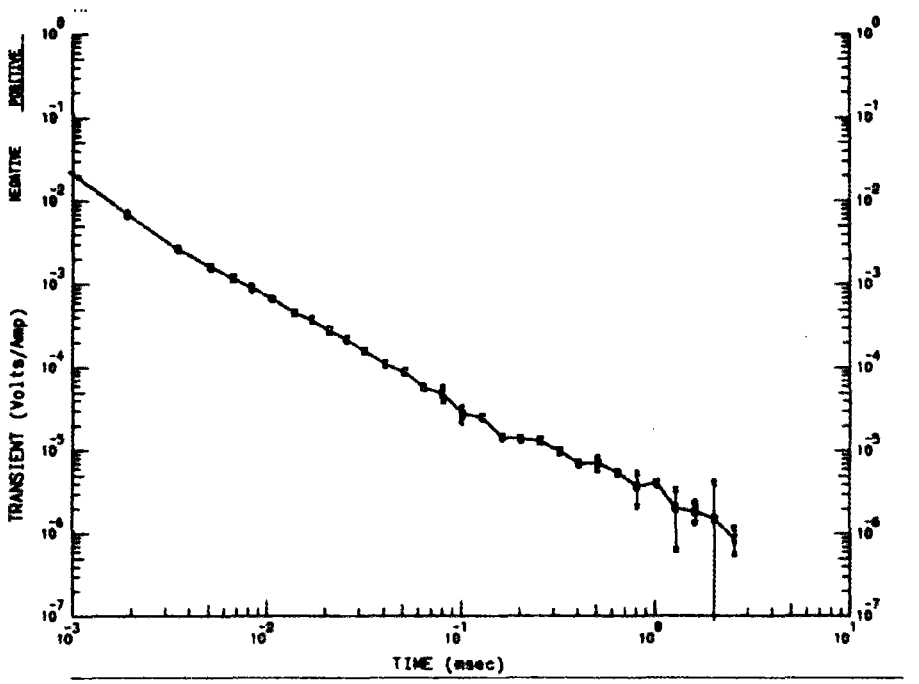

图 1 钻孔 ZKC1 有效性试验

其解释结果与钻孔相当一致，证明该方法的有效性。

4 数据处理

瞬变电磁法的资料解释工作，主要是根据瞬变电磁响应的时间特性和剖面曲线特征，以及工区的地质、地球物理特征，通过分析研究，分出背景专长及异常声，并从各类异常中确定与目标体有关的异常。

4.1 背景场的确定

物探工作中，正常场（或背景场）的正确选择与确定是划分与认识异常场的基础。选择确定背景场主要应考虑以下三个方面：

（1）择低阻覆盖层厚度均匀、下伏岩层断裂构造不发育、岩层无磁性（或弱磁性）的地段；

（2）选择人文设施噪声较小而且平稳的地区；

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（3）选择瞬变响应衰减迅速，并且在相当大的范围内变化不大、规律性好的地段。

4.2 资料的定性分析

瞬变电磁法中，异常值的数据必须可靠，应不少于噪声平的三倍以上且应是连续多测道及相邻近多个测点都有所显示。此次运用下述三种方法确定、对比：

（1） 多测道$V(t)$异常剖面曲线形态进行分析确定

（2）利用比值曲线进行分析确定：比值的计算公式为

$$Q(t_i)=V(t_i)/V_p(t_i)$$

式中，$V(\ t_i)$、$V_p(t_i)$分别为观测点、背景场区（正常场区）某个点上的感应电压值。由于各测点所处的地电条件不同，$Q(t)$将呈现了不同类型的曲线。

（3） 利用瞬变衰减曲线及衰减参数分析确定：在观测剖面上或在测区内，选择具有代表性的测点，作出各个测点的瞬变衰减曲线，可以一目了然地了解各种地电条件下的衰变曲线类型。衰变曲线特征与目标体的大小、埋深、覆盖层进取薄及围岩电阻率等有关。

5 资料解释及探测效果

结合区域地质资料，该区域主体岩性较单一，为石英云母片岩和石英片岩，隧道区地层物性资料为：地表覆盖层电阻率约 $170\Omega\cdot m$～$2000\Omega\cdot m$，全风化电阻率约为 $230\Omega\cdot m$～$1100\Omega\cdot m$，弱风化电阻率约为 $1200\Omega\cdot m$～$3500\Omega\cdot m$，微风化电阻率>$3500\Omega\cdot m$。一般情况下，断裂带电阻率低于完整岩体，含水断裂带电阻率更低。

经数据处理将探测数据结合钻孔剖面，经反演得到隧道区视电阻率断面图（图 2）。

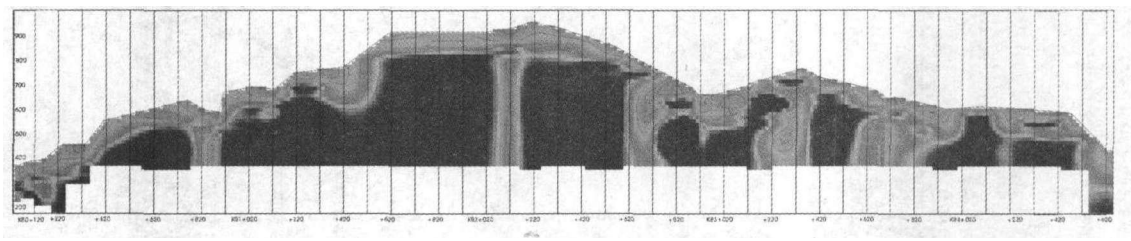

图 2　祝源隧道瞬变电磁数据影像图

根据区域物性资料推断对隧道洞体有较大影响的构造有 5 条（图 2、表 1）。随后根据物探解释资料，结合区域地质资料进行钻孔验证，证明效果良好。

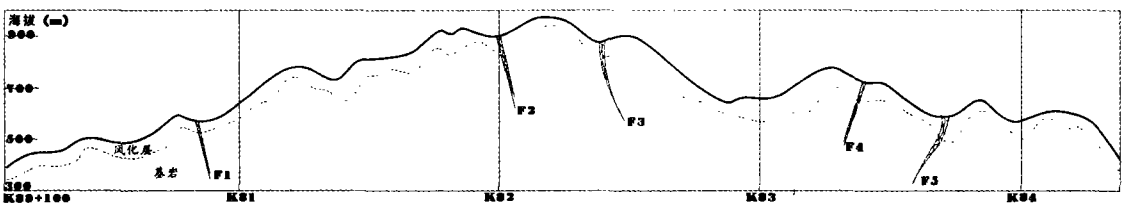

图 3　祝源隧道瞬变电磁数据地质解释图

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 祝源隧道主要构造特征表

隧道名称	构造编号	位置	产 状	规 模
祝源隧道	F1	K80+830	315° ∠80°	规模较大，为一构造破碎带，向下延伸至隧道洞身。
	F2	K81+990	294° ∠87°	规模较大，为一构造破碎带，向下延伸至隧道洞身。
	F3	K82+390	252° ∠70°	向下延伸约 180 米。
	F4	K83+410	118° ∠70°	向下延伸约 190 米。
	F5	K83+650	倾向南西	向下延伸约 200 米。

6 结语

通过在祝源隧道的成功应用，说明瞬变电磁法在断裂构造勘探中反映较敏感，通过资料的正反演计算处理，解释出的成果对于断裂分布及延伸有很好的控制，并得到钻孔、地面调查等资料的验证，其探测结果给隧道设计提供重要的参考和便利，具有很好的经济效益。目前该隧道正在施工中，从隧道开挖情况看，围岩地质条件与瞬变电磁法解释成果吻合性较好。

参 考 文 献

[1]郭玉松，TEM 法在工程勘察中研究与应用，工程勘察，第 1 期，1998.
[2]扬文钦、李秀晗、王永军等，复杂条件下的地面电法勘探，能源技术与管理，第 2 期，2004.
[3]韩王平，瞬变电磁法的原理及计算方法，山西建筑，第 2 期，2003.

Abstract: in the Zhuyuan tunnel engineering geological exploration, The application of TEM explore better distributing and deep extendability of the fault in the tunnel area. The result was validated in the later drilling exploration, and the problem of the tunnel was resolved better.

Keyword: tunnel, engineering geological exploration, TEM

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net