

# 音频大地电磁测深法在喀斯特隧道中的应用研究

廖家友

重庆交建工程勘察设计有限公司, 重庆 401121

[摘要] 通过音频大地电磁测深法进行野外勘探与研究, 查明喀斯特隧道所造区域的地层、岩性分界线、地质构造特征, 特别是破碎带、断层、软弱夹层宽度以及喀斯特溶洞、溶蚀裂隙、破碎软弱或富水岩体的埋深和规模, 为隧道围岩类别划分提供参考依据。

[关键词] 音频大地电磁测深法; 岩溶隧道; 围岩类别

DOI: 10.33142/sca.v5i4.6699

中图分类号: P631;U45

文献标识码: A

## Research on Application of Audio Magnetotelluric Sounding Method in Karst Tunnel

LIAO Jiayou

Chongqing Communications Construction Engineering Survey and Design Co., Ltd., Chongqing, 401121, China

**Abstract:** Carry out field exploration and research through audio magnetotelluric sounding method to find out the strata, lithologic boundaries and geological structural characteristics of the area created by karst tunnel, especially the width of fracture zone, fault and weak interlayer, as well as the buried depth and scale of karst cave, dissolution fissure, broken weak or water rich rock mass, so as to provide reference basis for the classification of tunnel surrounding rock.

**Keywords:** audio magnetotelluric sounding; karst tunnel; surrounding rock category

### 引言

随着我国公共交通基础设施的不断发展, 各种隧道建设在数量上不断增多, 规模上不断扩大。我国西南地区喀斯特分布广泛, 查明喀斯特隧道隧址区地质构造, 特别是断层、破碎带宽度以及岩溶洞穴、破碎软弱或富水岩体的埋深和规模对设计和施工具有重要指导意义。当原始沉积地层未受严重构造重组调整, 地层沉积序列还比较清楚时, 在比较原生地层状态下, 地层的导电特征在纵向上有相对固定的变化规律, 在横向上一般则比较均一。但岩性变化较大时, 电阻率值会急剧变化, 通常电阻率等值线图上, 等值线较密集区域会作为分层的依据。由工区地层岩性可知, 基岩与填土、填土与原生土之间存在电阻率差异, 这就为使用音频大地电磁测深提供了物性基础。

### 1 测区工程地质概况

拟建的隧道段位于构造剥蚀中山斜坡地貌区, 地形起伏较大, 线路纵向地面高程约为 1352~1820m, 相对高差 468m, 线路横向上地形坡角 15~60°; 斜坡上基岩裸露, 局部地势低洼处有少量第四系崩坡积碎石覆盖, 隧道进口处为陡崖; 出口处为自然斜坡, 植被茂密。

隧址区位于背斜核部及西北翼, 未见活动性构造迹象。岩层呈单斜产出, 实测岩层产状为  $313^{\circ} \sim 334^{\circ} \angle 1^{\circ} \sim 38^{\circ}$ , 结合程度一般, 属硬性结构面。隧址区斜坡的凹部、沟谷区有第四系崩坡积层 ( $Q_4^{dl+col}$ )、坡残积层 ( $Q_4^{el+dl}$ ) 碎石土覆盖, 下卧基岩为三叠系下统大冶组 ( $T_1d$ ) 灰岩, 灰色、灰白色, 隐晶质结构, 厚层状构造, 以方解石为主

要成分, 部分有铁质浸染现象, 含有溶蚀小孔, 层面上充填有方解石石脉、晶粒。强风化层厚度 1.80~4.00m, 岩芯破碎呈碎块状, 岩质软, 力学性能差, 以下为中风化岩芯较完整呈柱状, 节长为 8~18cm, 最长 22cm, 岩质硬, 为较硬岩。其中, 局部段存在灰岩破碎带, 岩芯破碎, 节理裂隙及次生裂隙发育, 以张性及剪性陡倾节理为主, 延展性较差, 间距小, 次生裂隙发育, 主向分散, 密度较大, 层面与原生、次生带组合, 岩体完整性及强度显著下降。

隧址区裸露型岩溶发育, 地表多见溶蚀沟槽。据地面调查, 拟建隧道地表溶蚀沟槽多发育在隧道顶部地形相对陡的地带 (属地表水补给区及消散区), 形成大规模的岩溶槽谷地带, 岩溶多顺层面和裂隙走向呈追踪发育, 呈串珠状分布, 规模不一 (最小的直径约 15m, 最大直径超过 300m)。

隧址区水系类型主要属羽状水系及树枝状水系, 水系主流大致平行于测区内的主要构造线, 主要由南东流向西北, 水系支流短而密集, 多与主流呈直角相交。

隧址区向老山为地表水分水岭, 向老山北侧主要发育冲沟、小溪等, 并最终流入长江水; 向老山南侧主要发育冲沟、小溪等, 并最终流入长江水。隧址区地表水系位于向老山属长江水系, 长江为区内地表水排泄终点。

### 2 工作方法技术

#### 2.1 音频大地电磁测深法基本工作原理

音频大地电磁探测深度可达一公里, 对低阻构造有较好的反映, 其主要特点是测试深度深、无需人工震源、采集信息较为丰富、装备相对轻便、技术比较成熟、处理手

段可以多样化。

根据隧道物探工作的基本技术任务要求，以及地形、地质情况，采用音频大地电磁测深(AMT)，进行地面探测。

大地电磁测深(MT)它是探测岩土层电性结构的常用物探方法之一。在工程实践中，MT法根据采用的频率范围区别可划分为：大地电磁测深法(MT)、音频大地电磁测深法(AMT)及高频大地电磁测深法(HMT)。而高频大地电磁测深(HMT)是针对音频大地电磁(AMT)和大地电磁测深提出来的。常规条件下大地电磁测深(MT)及音频大地电磁测深(AMT)的工作频率分别为340Hz~0.001Hz及8192Hz~1Hz；高频大地电磁测深(HMT)工作频率范围则为100KHz~10Hz，弥补了音频大地电磁测深高频不足，提高了0~200米勘探分辨率。高频大地电磁测深(HMT)10KHz以下的电磁信号主要来自太空和雷电的电磁信号，而10KHz以上电磁波的场源主要是无线电台发射的能量。

音频大地电磁测深法(AMT)基本原理是利用宇宙中的无线电波、雷电、太阳风等入射到地面上的天然电磁场信号作为一次场，又称激发场源，平面电磁波垂直入射到大地介质中，将会在大地上产生感应电磁场，此感应电磁场与激发场源的频率是相同的。在水平层状大地情况和均匀大地假设下，引入波阻抗Z、电场E、磁场H，Z是E与H的水平分量的比值。

$$Z = \frac{E}{H} e^{i(\varphi_E - \varphi_H)} \quad (1)$$

$$\rho_{xy} = \frac{1}{5f} |Z_{xy}|^2 = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2)$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{5f} |Z_{yx}|^2 = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (3)$$

式中：f为频率(Hz)，ρ为电阻率(Ω·M)，E为电场强度(mV/Km)，H为磁场强度(nT)，φ<sub>E</sub>为电场相位(mrad)，φ<sub>H</sub>为磁场相位(mrad)。需要注意，此时的电场E与磁场H，应理解为激发场源和感应场的空间矢量叠加后的形成综合总场。电磁理论中，电磁场在大地中传播时，电磁场的振幅衰减到初始值(1/e)时的深度为趋肤深度(δ)

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4)$$

由(2-4)式可知，趋肤深度(δ)是随着频率(f)和电阻率(ρ)的变化二变化的，测试进行深度是在与地下研究深度基本对应。一般而言，较高频率的数据反映浅部的电性特征，较低频率的数据反映较深的电性特征。又此，在一个宽频带上观测电磁场信息，计算出视相位和电阻率，可确定出大地的地电特征和上述地下构造。

StrataGem电磁系统野外工作方式主要有单点测深和连续剖面测深两种。该系统一般采用天然场源，有时为了改进数据质量，提高数据信噪比，在天然场信号很弱或没有信号的频点上，也可使用人工场源。为确保数据质量

与工作实效，StrataGem电磁系统可视情况采用10Hz—1KHz、500Hz—3KHz、750KHz—92KHz三组频率采集数据。

野外测试能够获得的Hy、Ex、Hx、Ey振幅，ΦHy、ΦEx、ΦHx、ΦEy相位，以及一维反演和二维电阻率成像结果。而且是实时的。在室内数据加工后处理，可得到二维正、反演结果等。

## 2.3 野外基本数据的采集过程

### 2.3.1 测试点布设

根据野外测试的测网布置技术要求和测量控制点坐标，采用实时动态差分法(RTK)对测线进行定位，实际工作时详细记录每个电极、检波器的实际位置，以校正因地形原因，实际铺设测线比设计测线长的问题。

### 2.3.2 音频大地电磁测深法野外观测方法

本次音频大地电磁测深法采用美国生产的EH-4连续电阻率剖面仪进行测试。观测方法如下：

(1)平行试验：正式测试前，应先行进行平行试验，主要校核检测仪器工作状态。具体方法是将两个间隔为5米的磁棒平行的放在测试地面上，同时相应的两个电偶极子也需要平行放置。然后对电磁场通道上的时间序列信号进行观测，如下图1所示，如果磁场、电场信号波形图在低频段和高频段从两个方向通道观测到波形的形态及强度差异不大，基本一致，则说明仪器属于正常工作状态。

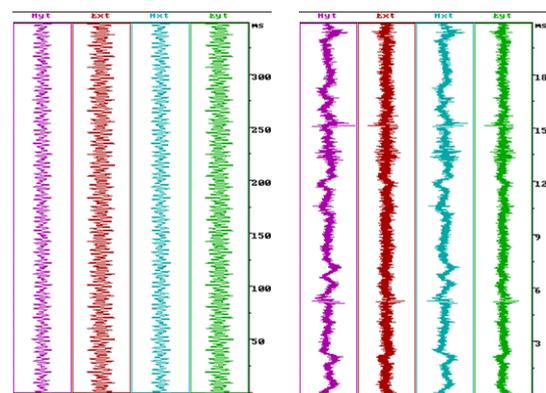


图1 平行试验检查仪器通道相关性波形图

(左为低频段，右为高频段)

(2)布置电极的方式及要求：如下图2-2所示，工作过程中共用到四个电极，其中每两个电极可以组成一个电偶极子。电偶极子与测线的方向一致时称为X-Dipole；电偶极子与测线方向垂直时称为Y-Dipole；为方便对比监视电场信号的差异情况，一般长度均取为20米。通过使用森林罗盘仪对方向进行测量，误差控制在±5°以内，从而确保Y-Dipole与X-Dipole的方向是垂直的；使用测绳对电偶极子的长度进行测量，误差控制在±0.5m以内。

(3)磁棒的布置要求：磁棒与前置放大器的距离应>5m，且两磁棒埋入地下的深度应>5厘米(消除人为干扰)，用罗盘测定方向确保其是相互垂直的，误差控制

在±2° 以内，并保证水平放置。磁棒与场内人员的距离应>10m，布置磁棒时尽量选择远离大树、房屋及电缆的地方。

(4) 前置放大器(AFE)布置的技术要求见图2。

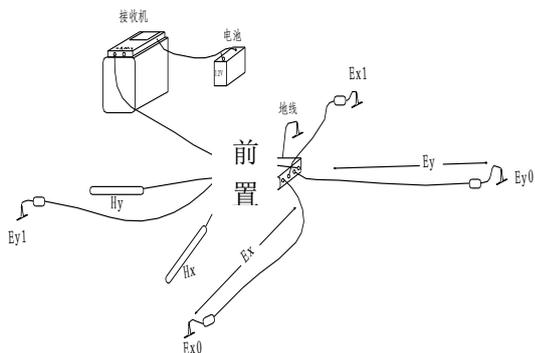


图2 EH-4工作连接图

### 2.3.3 音频大地电磁测深法数据处理

根据野外采集到的原始数据，通过对原始数据进行资料处理后得到的成果便我们需要的成果，处理过程步骤为①解编转换②编辑平滑③极化模式识别④静位移校正⑤横向滤波⑥反演计算⑦编辑成图。

使用“winglink 大地电磁二维处理和解释软件”对资料进行处理及解释。该软件的主要系统包括处理功能及解释功能两大部分，处理功能包括曲线的整理、平滑、插值、分析、静校正等；解释功能包括一维 Bostick 变换、一维 Occam 反演、二维 Occam 反演、二维非线性共轭梯度(NLCG)反演，二维概率成像等解释功能。该软件是目前国际上主要处理及解释音频大地电磁测深法成果的软件之一，在 Windows 界面下进行操作，还具有多种图形显示功能。

实时处理与解释的资料的流程可以分成三部分，即：

(1)资料预处理：主要包括 MT 曲线的平滑、去飞点、极化模式判别与转换等；

(2) MT 资料的静位移校正与空间滤波；

(3) 二维反演、成图与解释。

本次资料处理与解释的总体流程如图3所示：

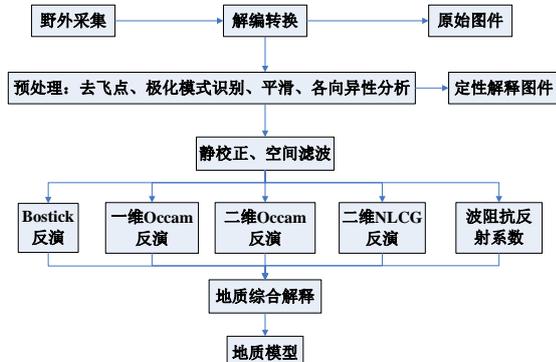


图3 资料处理流程图

## 3 成果分析应用

### 3.1 资料分析及判别依据

通过对整个工区的音频大地电磁数据及高密度电法数据的统计，对比已完成钻孔资料分析，获得本区的解释参数为：依据电阻率及本区地质资料，划分围岩等级：V  $\rho \leq 500 \Omega \cdot M$ ；IV  $500 \Omega \cdot M \leq \rho \leq 1000 \Omega \cdot M$ ；III  $1000 \Omega \cdot M \leq \rho \leq 5000 \Omega \cdot M$ ；II  $\rho \geq 5000 \Omega \cdot M$ 。

### 3.2 音频大地电磁测深成果解释

隧道岩体地层为三叠系下统大冶组(T1d)灰岩，中风化灰岩天然单轴抗压强度为 50.06MPa，饱和单轴抗压强度为 45.37MPa。隧道进洞口段为崩塌积体碎石以及强~中等风化灰岩，洞身段岩性为中等风化灰岩，出洞口段主要岩性为碎石以及强~中等风化灰岩。进出口岩石强度较低，抗风化能力一般，自稳定能力一般。

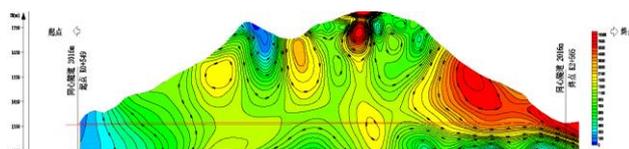


图4 电阻率断面图

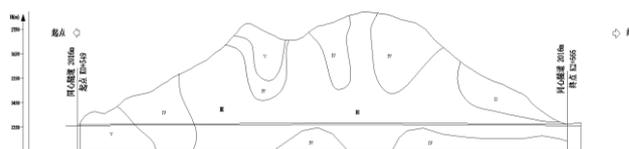


图5 电学地质断面图

K0+549-K0+800 段：洞口段处斜坡坡向约 247°，坡度约 34-60°，天然斜坡较稳定。斜坡坡表覆盖薄层第四系崩塌积碎石土，局部坡体基岩裸露，为三叠系下统大冶组灰岩，灰岩为较硬岩，中厚层状，层间结合一般。隧道洞轴线与岩层走向交角 20°-41°，岩层倾角较平缓，约 1-15°，拱部及侧壁无支护时，易出现中-小坍塌。砂岩 RC=38.3Mpa，完整性系数 Kv=0.35，K1=0.3，K2=0.2，K3=0，[BQ]=242。地下水较贫乏，雨后可能有淋浴状出水，应预防局部岩溶裂隙通道涌水。洞身段范围视电阻率范小于 500  $\Omega \cdot M$ ，推测该段洞身段岩层极破碎，岩溶发育，富水，推测围岩等级为 V 级，V 级围岩的稳定性一般差，易发生小型坍塌，若处理不当可能会出现大型坍塌；洞口浅埋段时易发生地表的下沉（陷），甚至塌陷。施工期间应当采用辅助工法进洞。

K0+800-K1+040 段：洞身段穿越地层为三叠系下统大冶组灰岩，灰岩为较硬岩，中风化岩体较完整，中厚层状，层间结合一般。隧道洞轴线与岩层走向交角 20°-41°，岩层倾角较平缓，约 1-15°，拱部及侧壁无支护时，易出现中-小坍塌。灰岩 RC=38.3Mpa，完整性系数 Kv=0.40，K1=0.2，K2=0.2，K3=0，[BQ]=264。地下水贫乏，部分裂隙较发育段存在滴状或线状出水，应预防局部岩溶裂隙

通道涌水。推测该段洞身段岩层破碎,岩溶较发育,岩体中等富水,推测围岩等级为IV级;IV级围岩,呈层状结构。其节理较发育,层间结合一般,稳定性较差,拱部及侧壁无支护时可产生较大的坍塌,侧壁有时失去稳定。采用光面爆破进行施工,在施工开挖时可采用导洞或台阶分步开挖进行二次复合支护。应加强洞顶及右侧壁支护措施,短开挖,快支护的施工方法。

K1+040-K2+500段:洞身段穿越地层为三叠系下统大冶组灰岩,灰岩为较硬岩,中风化岩体较完整,中厚层状,层间结合一般。隧道洞轴线与岩层走向交角 $41^\circ$ ,岩层倾角较平缓,约 $15\sim 30^\circ$ ,拱部及侧壁无支护时,易出现中-小坍塌。砂岩 $RC=50.03\text{Mpa}$ ,完整性系数 $K_v=0.68$ , $K_1=0.1$ , $K_2=0.4$ , $K_3=0$ , $[BQ]=360$ 。地下水贫乏,地下水出水状态为局部点滴状出水,应预防局部岩溶裂隙通道涌水。洞身段围岩视电阻率范围为 $1000\ \Omega\cdot\text{M}\leq\rho\leq 5000\ \Omega\cdot\text{M}$ ,推测该段洞身段岩层较破碎,岩溶弱发育,岩体弱富水,推测围岩等级为III级;III级围岩拱部无支护时不易生的大型坍塌,侧壁有可能出现小型坍塌。采用光面爆破进行施工,在施工开挖时可采用导洞或台阶分步开挖进行二次复合支护。

K2+500-K2+565段:洞口段处斜坡坡向约 $54^\circ$ ,坡度约 $13\sim 25^\circ$ ,天然斜坡较稳定。斜坡坡表覆盖薄层第四系崩坡积碎石土,局部坡体基岩裸露,为三叠系下统大冶组灰岩,灰岩为较硬岩。隧道洞轴线与岩层走向交角 $40^\circ$ ,岩层倾角约 $38^\circ$ ,拱部及侧壁无支护时,易出现中-小坍塌。灰岩 $RC=38.3\text{Mpa}$ ,完整性系数 $K_v=0.30$ , $K_1=0.35$ ,

$K_2=0.2$ , $K_3=0$ , $[BQ]=225$ 。地下水较贫乏,雨后可能有淋浴状出水,应预防局部岩溶裂隙通道涌水。洞身段范围视电阻率范小于 $500\ \Omega\cdot\text{M}$ ,推测该段洞身段岩层极破碎,岩溶发育,富水,推测围岩等级为V级,V级围岩的稳定性一般差,易发生小型坍塌,若处理不当可能会出现大型坍塌;洞口浅埋段时易发生地表的下沉(陷),甚至塌陷。施工期间应当采用辅助工法进洞。

#### 4 结语

隧道洞身范围内穿越较破碎岩体,在岩体较破碎段落,在隧道设计和施工时建议对该段进行特别加强支护,预防隧道发生塌方或出现大量涌水现象。通过音频大地电磁测深方法,结合地质资料,基本查明了测区岩溶洞穴、破碎软弱及富水岩体的埋深和规模,提供了较准确的参考资料,取得良好的效果。

#### 【参考文献】

- [1]周亚东,陈江平.音频大地电磁测深法在某隧道中的应用[J].价值工程,2014,12(29):116-117.
  - [2]田如金.公路喀斯特地形岩溶隧道施工及其病害治理[J].桥梁与隧道工程,2015,12(4):186-187.
  - [3]张庆松,李术才.岩溶隧道施工风险评价与突水灾害防治技术研究[J].山东大学学报,2009,12(3):106-116.
  - [4]吴银龙,陆明峰,李琴.EH4野外工作方法的研究与应用[J].四川地质学报,2011,31(4):476-480.
  - [5]DZ/T0173-1997,大地电磁法测深技术规程[S].
- 作者简介:廖家友(1989-),男(土家族),工程师,研究方向:岩土工程勘察设计以及地质灾害防治。