

# 山区公路深埋隧道勘察中工程物探的运用

陈 璋, 刘章捷, 王云安  
(湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051)

**摘 要:** 以沪蓉国道主干线湖北宜昌至恩施公路隧道初勘过程中工程物探运用实例为基础, 探讨了在公路隧道勘察中工程物探勘察工作运用的有效性、存在问题和地质可比性等。

**关键词:** 深埋隧道; 工程物探; 有效性

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

随着我国国民经济的飞速发展, 高等级公路建设突飞猛进, 为满足设计要求, 路线在山岭重丘区不可避免地要采用深埋特长隧道, 工程物探是深埋特长隧道勘察的有效手段之一<sup>[1]</sup>。沪蓉国道主干线湖北宜昌至恩施段地处鄂西南褶皱山区, 地形特征为峰峦连绵、谷深坡陡、切割强烈、高差急剧变化, 区域地貌类型属构造剥蚀溶蚀中山- 低中山峡谷。路线设计隧道众多, 其中深埋特长隧道工程地质问题, 特别是喀斯特、断裂等不良地质问题尤为突出。

工程地质条件复杂的深埋特长隧道往往是整个工程的控制性工程, 控制性隧道工程为工程物探勘察技术的运用提供了广阔的天地<sup>[2]</sup>。

## 1 工程物探在隧道勘察中的作用

工程物探作为公路隧道工程地质勘探的主要手段, 用于查明隧道工程场址的地质构造背景, 查明对隧道方案有影响的煤层、矿体、采空区、破碎带、喀斯特发育区和水文地质的基本特征, 为隧道的比选、隧道线型的展布和避让重大不良地质现象<sup>[3]</sup>提供依据; 利用综合物探的方法测得岩质隧道围岩岩体、岩石纵波速、横波速, 从而求得围岩动弹性模量、泊松比等物理力学指标, 为隧道洞身的围岩分类、隧道洞室的开挖和衬砌设计提供依据。

## 2 工程物探方法的选择

根据隧道工程的特点、地质环境特征及各物探方法适用的地质地球物理前提条件, 在沪蓉国道主干线湖北宜昌至恩施公路隧道勘察中选择了地震勘探、瞬变电磁法、音频大地电磁测深等物探手段。各方法应用范围如下:

**地震勘探:** 调查覆盖层、风化带和基岩面的起伏形态; 探测断裂构造的空间分布及发育特征; 岩石动弹参数( 杨氏模量、剪切模量、泊松比等) 的测定; 岩体的波速及隧道的围岩类别划分; 辅助调查喀斯特的分布特征。

**瞬变电磁法:** 主要解决深埋隧道工程场址的断裂构造、喀斯特发育、岩层划分等工程问题, 探测深度可达 400~ 500 m。

**音频大地电磁测深:** 重点调查特长深埋隧道工程场址的地质构造背景, 了解对隧道方案有影响的断裂构造、喀斯特发育的基本特征, 勘探深度可达 800 m。

以上工程物探方法各具特点, 对于某些复杂的工程地质问题, 应选用综合物探方法进行勘探, 达到相互印证、多信息补充, 以利于获取符合客观实际的地质解释。工程物探工作的重点是在对已有资料充

收稿日期( Received date): 2004- 02- 01; 改回日期( Accepted): 2004- 03- 20。

基金项目( Foundation item): 国家发展改革委员会项目( 发改交运[ 2003] 1082 号)。[ Supported by the national key project of the Planning Commission of China( 20031082). ]

作者简介( Biography): 陈璋( 1964- ), 男( 汉), 湖北武汉人, 硕士, 副院长。主要研究方向: 公路岩土工程勘察与设计。[ Chen Zhang( 1964- ), male, senior engineering, vice dean, mainly work on the design and exploration of the express way. ]

分分析、了解的基础上,结合隧道场址的实际情况,确定适宜的勘探方法及合理的工作布置,并结合其他岩土工程勘察手段获取的信息进行综合分析,及时验证,再重新认识、解释。只有这样才能充分发挥工程物探的优势,查明高等级公路深埋特长隧道的重大工程地质问题。

### 3 运用实例探讨

下面以沪蓉国道主干线湖北宜昌至恩施公路龙潭隧道、野三关隧道的勘察为例,对工程物探方法所取得的效果和存在的问题进行阐述。

#### 3.1 龙潭隧道

龙潭隧道为全线控制性工程,设计为分离式隧道,呈近东西向展布,右幅全长 8 120 m (YK65+420~YK74+090),左幅全长 8 476 m (ZK65+416~ZK74+090),最大埋深约 500 m。隧道位于长阳背斜的北翼,构造线走向近东西,与路线基本平行。地层产状总体为向北倾斜的单斜构造,倾角  $50^{\circ}$  左右,无区域性断裂构造,工程地质条件较好。

隧道围岩前段 70% 由志留系下统龙马溪组 ( $S_{11}$ ) 页岩、粉砂质页岩及奥陶系上统五峰组 ( $O_{3w}$ ) 页岩、硅质岩组成,属层状软质-半坚硬岩石。节理裂隙发育,易风化,地表全强风化带岩体呈碎石状、散块状,弱风化层、微风化层岩石完整。隧道围岩后段 30% 由奥陶系构成,属层状坚硬-半坚硬碳酸盐岩。地表所见南津关组 ( $O_{1n}$ ) 灰岩、白云岩喀斯特发育外,其他岩组喀斯特不发育或弱发育。

在选择物探方法时,选用了瞬变电磁勘探和地震纵波反射勘探相结合的方法。隧道出口横剖面施测地震纵波折射勘探;隧道洞身的横剖面施测地震纵波反射。

地震纵波反射的点距 2 m,地震纵波反射采样时间 250 ms,勘探深度可达 500 m,为确保地震勘探反射异常信息有一定的特征,激发采用多次迭加技术;检波时,采用检波器组合检波技术,确保地震勘探有足够的深度和精度。地震纵波折射采用相遇追逐观测系统,道间距 5 m,排列长度 115 m,炸药爆炸为震源。

瞬变电磁测量采用深层测量系统,  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  正方形重叠回线装置,加大发射电流至 5 A,增加叠加次数等技术措施,以得到更好的信号质量。

工程物探工作的效果显著,异常特征明显(图

1、2)。从图 1 可知:在 K71+200 附近  $\rho_s$  视电阻率断面图上低阻异常特征明显,局部的低阻带  $\rho_s$  值仅为 20  $\Omega\text{m}$ ,而两侧  $\rho_s$  视电阻率在 100  $\Omega\text{m}$ ,显示出喀斯特现象和喀斯特水发育情况存在,并且有较强的规律性特征。从图 2 可知:在 K71+955 附近,  $\rho_s$  视电阻率断面图的异常明显,低阻带  $\rho_s$  值为 40  $\Omega\text{m}$ ,显示出喀斯特水发育情况存在,视电阻率断面图呈现梯度变化,断裂构造异常特征明显。从图 3 可知在 K71+955 附近围岩波速变低,反射波组呈现出扭曲错断、相位和能量产生变化。

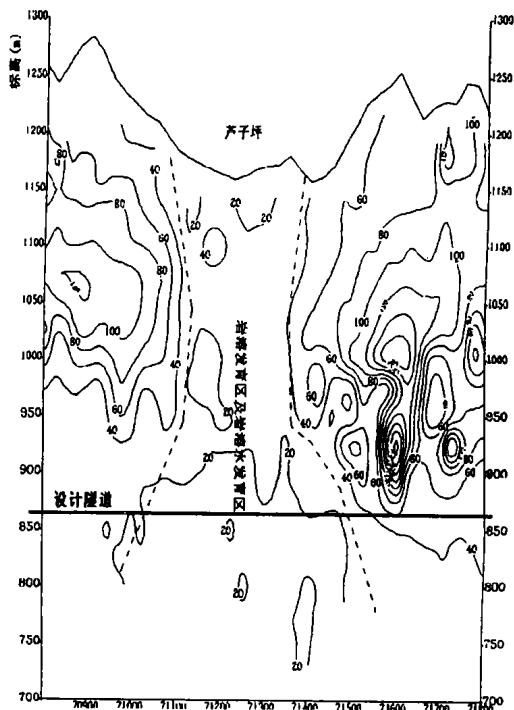


图 1 ZK71+200 喀斯特发育区瞬变电磁视电阻率特征

Fig. 1 Resistivity character of transient current of karst region at ZK71+200

在工程物探推测的喀斯特发育地段 K71+200 处布设龙潭隧道 ZK3 钻孔(图 4),钻探资料表明在孔深 228.66~236.80 m 处见规模较大的溶洞。同时,对该钻孔进行了钻孔彩色摄像、声波及地下水的连通等试验。彩色摄像结果表明:ZK3 号钻孔孔壁岩体中,缓倾角裂隙约占 15%,主要以陡倾角裂隙为主,多处裂隙渗水,渗水量很大,但未见积水,由此推测溶洞为链状溶洞,渗水随溶洞通道流出。连通试验采用指标剂法,将荧光粉稀释后配以 60% 浓度的溶液装入 50 mm 口径的 PVC 管中,用钻杆连接

下至孔深 230 m 时投放, 在该孔上、下游冲沟观测点均未发现荧光粉踪迹, 初步判断钻孔中的喀斯特水与周边地下水连通性差。

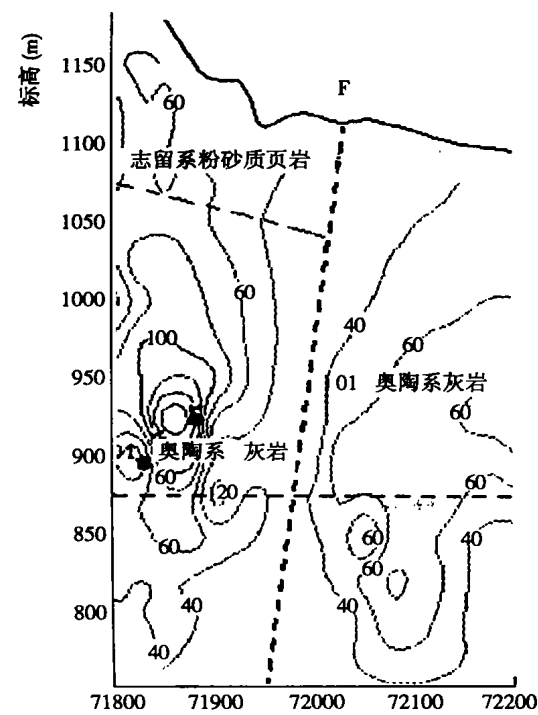


图 2 ZK71+ 955 断层瞬变电磁视电阻率特征  
Fig. 2 Resistivity character of transient current of fault at ZK71+ 955

在工程物探推测的喀斯特发育地段 K71+ 955 处布设龙潭隧道 ZK4 钻孔。钻探资料表明在孔深 57.4~ 175.6 m: 弱风化白云质灰岩, 发育 3 组裂隙, RQD 值 30%~ 60%, 中部岩芯较完整, 上部及下部较破碎。孔深 76~ 86 m、163 m 以下钻孔严重漏水, 喀斯特裂隙较发育。

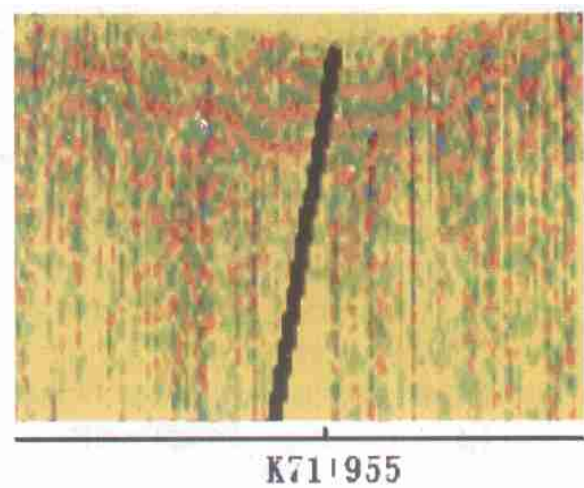


图 3 K71+ 955 断层地震时间剖面图  
Fig. 3 The seismic profile of fault at K71+ 955

龙潭隧道的 ZK3、ZK4 钻孔验证了物探工作成果, 工程物探推断的隧道洞身发现两处主要喀斯特异常区(ZK71+ 150~ ZK71+ 370 和 YK71+ 150~ YK71+ 370 段; ZK71+ 880~ YK72+ 120 段), 地质调查发现 K70+ 600(蒋家坟)、K71+ 450(芦子坪)等灰岩沟谷部位附近有溶洞, 沟中地表水有漏失现象, 表明这一带冲沟存在喀斯特问题, 并与物探推测的洞身喀斯特有连通关系。

3.2 野三关隧道

隧道位于低中山区溶丘洼地, 穿越猫儿坪向斜南东翼、核部及北西翼。全长 3 600 m, 洞底标高 998~ 1 087 m, 最大埋深 240 m。向斜南东翼岩层产状  $32^{\circ} \angle 50^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ; 核部产状较平缓, 挤压揉皱发育, 产状多变; 北西翼产状  $200^{\circ} \sim 160^{\circ} \angle 20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。隧道走向与地层走向总体呈  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  斜交。

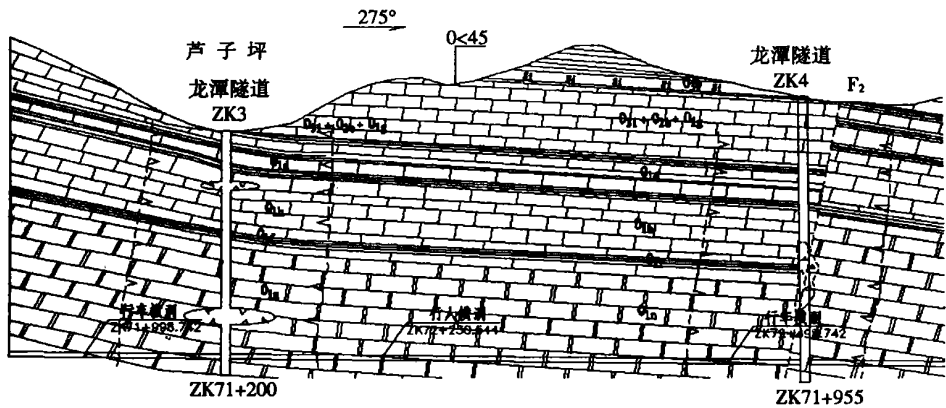


图 4 龙潭隧道 ZK71+ 200~ K71+ 955 段地质纵断面图

Fig. 4 The geological profile of Longtan tunnel between ZK71+ 200~ K71+ 955

隧道前段洞身长约 900 m, 穿过  $P_{2w}$ 、 $P_{2c}$ 、 $T_{1d}^1$  地层序列, 以隔水层为主, 水文地质问题较简单, 不良地质为软弱夹层、有害煤系地层等, 可采取相应措施处理。

隧道后段洞身约 1 700 m 位于  $T_{1d}^2$  薄层夹中层灰岩中。因处在三级溶蚀剥夷面, 地表喀斯特现象普遍发育, 强烈发育地段为茶场、高四洞、石虎坪槽状洼地群。YK103+ 720 处的茶场- 猫儿坪洼地、YK104+ 950 处的高四洞槽状洼地以及 YK105+ 640 处的石虎坪槽状洼地均为封闭状, 呈 NW 向展布, 长 1. 5~ 3. 0 km, 宽 100~ 200 m, 汇水面积达 10 km<sup>2</sup>。

洼地底部皆分布有漏斗、落水洞。高四洞地表大溶洞(K104+ 860 左 30 m, 干洞) 标高 1 149 m, 下倾式延伸, 方向 55°。由此推断, 上述槽状洼地之下发育岩溶管道, 分布有较丰富的喀斯特水。隧道遭遇可发生突水突泥危害。工程物探的目的就是查明隧道洞身喀斯特发育特征和连通关系。

对于隧道洞室埋深大和喀斯特发育区, 物探选用地震纵波反射和瞬变电磁相结合沿隧道轴线施工。针对隧道山体浅部与深部喀斯特均强烈发育且贯通的情况, 对隧道浅部喀斯特发育特征用高密度电法勘察, 布置横向剖面, 采用装置以  $\alpha$  为主, 辅以施伦贝谢尔装置, 采用最小电极系数为 1, 最大电极系数为 19。

物探结果显示, 完整的碳酸盐岩地球物理场稳定, 地震勘探反射波波组连续性和延伸性都较好, 波组能量较强, 持续时间稳定。如果岩石中存在地质构造、喀斯特时, 物探工作的地球物理场会发生变化。地震勘探表现为围岩波速变低, 反射波组呈现出扭曲错断、相位和能量产生变化。瞬变电磁和高密度电法在  $\rho_s$  视电阻率断面图上高低阻异常交替出现, 出现高阻圈闭异常表现为喀斯特富水性差; 当  $\rho_s$  视电阻率断面图上出现低阻圈闭异常和大范围低阻异常时, 喀斯特富水性好, 地下水发育且连通性好。

根据  $\rho_s$  视电阻率断面图上的低阻圈闭异常明显, 推断为喀斯特强烈发育区(图 5), 在 YK106+ 229 布置洞身钻孔验证, 洞身上部溶蚀现象发育, 洞身附近岩芯破碎, 呈碎块状, 为构造影响带, 并有喀斯特水与外部地面井水相通。

根据  $\rho_s$  视电阻率断面图上的低阻异常明显, 推断为喀斯特强烈发育区(图 6)。地质调绘在该处为

长 1. 8 km, 宽 100~ 150 m 的 NE 向槽状洼地, 洼地中漏斗、落水洞发育, 并在路线左 50 m 的东缘发现有伏流入口, 标高 1 150 m, 流量 60 l/s, 流向东。说明了喀斯特的复杂性, 与物探的推断相吻合。

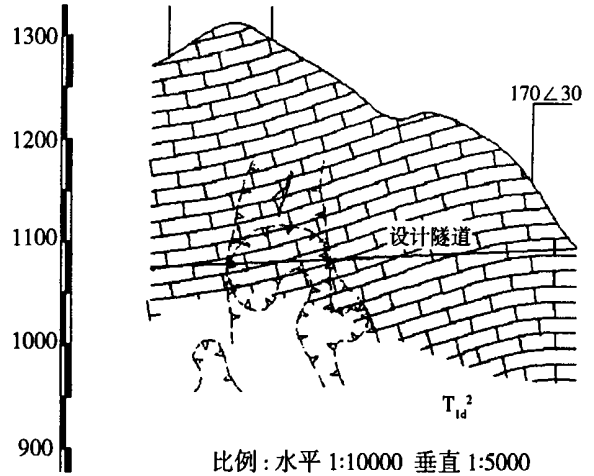


图 5 野三关隧道 YK106+ 230 段推断地质断面  
Fig. 5 The geological profile of Yesanguan tunnel at YK106+ 230

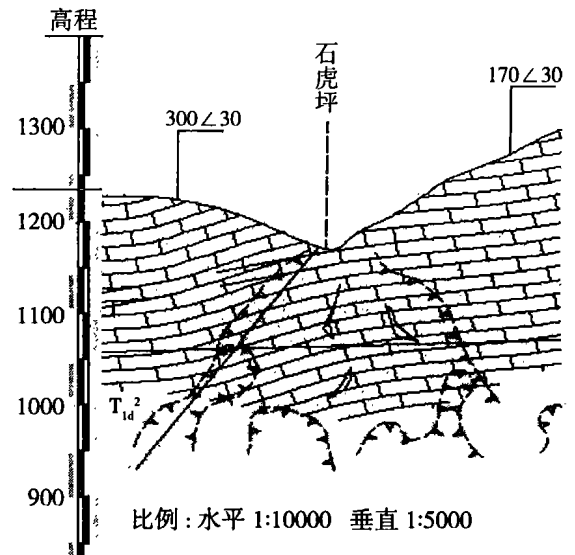


图 6 野三关隧道 YK105+ 600 段推断地质断面特征  
Fig. 6 The geological profile of Yesanguan tunnel at YK105+ 600

## 4 结 语

1. 地震勘探、瞬变电磁法、音频大地电磁测深等物探方法在公路深埋特长隧道勘察中有着广泛的应用。公路深埋隧道勘察随着勘探深度的增加, 虽然其精度有所下降, 但只要根据现场地质条件, 选用

合适的物探工作方法、多种物探方法相互补充, 对于查明隧道工程场址的地质构造背景, 了解对隧道方案有影响的断裂、喀斯特的基本特征等, 都是非常行之有效的。

2. 工程物探结合隧道地表地质调绘对隧道洞身的围岩分类, 可为隧道洞室的开挖和衬砌设计提供依据。但由于隧道埋深大, 对隧道围岩分类位置存在一定的误差。

3. 工程物探对隧道洞身附近的喀斯特的位置准确圈定也存在一定的误差, 只能根据物探异常划定喀斯特发育带, 定性分析喀斯特发育程度。

## 参考文献(References):

- [1] Zhao Zuzhan. Application of integrated engineering exploration in route selection of the tunnel in Yuqian Mountain[J]. *Engineering Investigation*, 1996, 1: 66~ 68. [赵竹占. 综合工程物探在玉泉山隧道选线中的应用[J]. 工程勘察, 1996, 1: 66~ 68.]
- [2] Huang Shengjun. Application of earth physical investigation in geological investigation of Cushisan Tunnel[J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2001, 27(3): 67~ 68. [黄胜军. 地球物理勘察在粗石山隧道地质勘察中的应用[J]. 湖南交通科技, 2001, 27(3): 67~ 68.]
- [3] Yang Kun, Ma Dongtao, Cui Peng. The hazards along Xinjiang-Tibet highway in Xinjiang [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(1): 53~ 58. [杨坤, 马东涛, 崔鹏. 新疆公路(新疆境内)沿线道路病害[J]. 山地学报, 2002, 20(1): 53~ 58.]

# Application of Engineering Geophysical Exploration Methods in Deep-bedded Tunnel Investigation

CHENG Zhang, LIU Zhangjie, WANG Yunan

(HuBei Traffic Layout Department, Wuhan, 430051)

**Abstract:** On the basis of the preliminary investigation on the tunnel in Yichang-Enshi highway in Hubei Province, the paper discussed the validity and limitation of engineering geophysical exploration in the engineering survey. It shows that the exploration method can be greatly helpful for the the exploration of tunnel.

**Key words:** deep-bedded tunnel; engineering geophysical exploration; validity