

# 高密度电法在老山隧道勘察中的应用

李乃旺, 李晓昭, 徐鸣洁, 梁清雨, 钟 凯

(南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 应用高密度电阻率法勘察宁淮高速公路南京老山隧道工程, 查明了隧道 YK5+280~ZK5+540 段的地层分布和构造特征, 并推断出鹰嘴山断层的位置和产状, 结合勘察资料证明该断层为高角度逆断层。预测出隧道和断层破碎带相交处为浅部裂隙岩溶含水带中的优良导水带, 该处涌水的可能性很大, 其推断结果在施工中得到证实。说明高密度电法是进行隧道勘察和构造裂隙岩溶富水带探测的一种可靠手段。

**关键词:** 高密度电法; 老山隧道; 工程勘察; 浅部裂隙岩溶含水带

**中图分类号:** U452.1+1; P631.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)04-0412-04

## Application of High Density Resistivity Method in Geotechnical Engineering Investigation of Laoshan Tunnel

LI Nai-wang, LI Xiao-zhao, XU Ming-jie, LIANG Qing-yu, ZHONG Kai

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

**Abstract** The principle of high density resistivity method is introduced. Using this geophysical method to geological investigation of Laoshan Tunnel project, the strata and geological structures are identified. Meanwhile, the position and attitude of Yingzuishan fault are determined. An aquiferous fracture zone is predicted and is proved later on. The engineering practice indicates that high density resistivity method is an effective geophysical method for tunnel engineering investigation and the aquiferous epikarst zone exploration.

**Key words:** high density resistivity method; Laoshan Tunnel; geological investigation; aquiferous epikarst structure fracture zone

## 0 引言

高密度电法是一种高效简便了解和探究地球内部结构及其演化过程的地球物理方法, 其不仅应用在地质勘探工作上, 也应用在隧道勘察中<sup>[1-10]</sup>。笔者介绍高密度电法对老山隧道 YK5+280~ZK5+540 段工程地质调查、岩溶构造裂隙富水带探测以及隧道开挖涌水预测。

## 1 老山隧道工程概况

### 1.1 工程简介

老山隧道属于宁淮高速公路南京江北段, 位于江苏省南京市浦口区老山林场(图1), 呈南北向分

布, 高7 m, 宽15 m, 6车道, 全长3 595 m, 是国内最长的6车道隧道。老山隧道设计为分离式三车道隧道, 线间距在35 m左右, 其中1号隧道左隧长1 785 m, 右隧长1 795 m; 2号隧道左隧长1 425 m, 右隧长1 800 m, 两隧间有60 m左右的路基相连。设计隧道底面标高78~110 m, 埋深多在60~100 m, 开挖跨度在17 m以上, 开挖高度约12 m。

### 1.2 工程区地质概况

隧道所在区域为低山、丘陵区, 老山山脉北东走向, 长约35 km, 最高峰大刺山峰顶海拔442.1 m, 其余山峰多在200~300 m; 山地北西、南东两侧为低缓丘陵, 海拔10~60 m。场地地形地貌单元为构造剥蚀低山, 山体呈南西—北东走向, 西高东

收稿日期: 2006-12-08

作者简介: 李乃旺(1981-), 男, 甘肃白银人, 从事城市环境岩土工程研究。E-mail: linaiwang@gmail.com

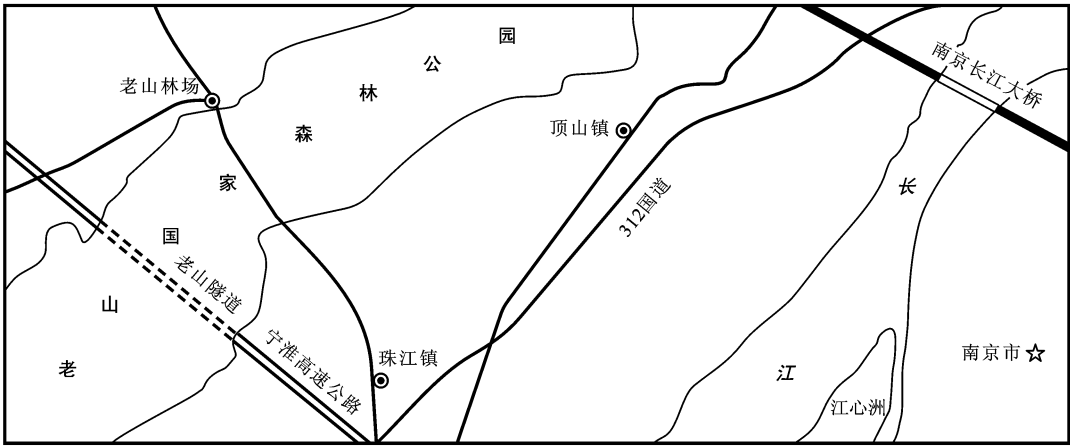


图 1 老山隧道地理位置

Fig. 1 Position of Laoshan Tunnel

低, 地形起伏, 最大坡度  $70^{\circ}$ , 局部出现陡坎。

本区地层属扬子分区, 江浦地层小区<sup>[12]</sup>。区内地层发育齐全, 从震旦系上统到上第三系上新统均有出露。隧道穿越地段主要为白垩系浦口组( $K_2p$ )泥岩和震旦系灯影组( $Z_2dn$ )白云岩、白云质灰岩与灰岩。除进口段揭露白垩系浦口组( $K_2p$ )泥岩外, 隧道穿越地层主要是震旦系灯影组( $Z_2dn$ )白云质灰岩、灰岩与白云岩。灯影组下段, 主要为灰白—灰色中、巨厚粉晶白云岩, 夹硅化微晶白云岩、白云质微粒硅质岩和砾屑白云岩, 分布在鹰嘴山一带; 灯影组上段, 微晶白云岩含硅质条带, 在鹰嘴山南麓可见到。岩层裂隙较发育, 局部地段岩溶发育, 强风化层厚度不等, 一般在  $1.8 \sim 9.1$  m。第四纪地层以残坡积为主, 局部冲洪积, 沉积厚度受基岩起伏控制, 厚薄不均。第四系由填土、上更新统粉质粘土和中下更新统粉质粘土混碎石及碎石土组成。

构造特征主要是北东向复式倒转背斜、具有一定延伸长度的北东向逆断层和北西向平移断层构成基本构造格架。

区域地质资料和前期工程地质勘察报告显示, 老山隧道工程区内主要的区域性断层——鹰嘴山断层将横向穿过隧道。为了进一步查明隧道围岩构造发育情况, 断层破碎带的位置、分布特征和富水状态, 运用了高密度电法进行了现场探测。

2 测线布置和测区岩土层分布

高密度电法是一种阵列勘探方法。电极的排列方式, 目前已经发展到十几种<sup>[9, 13]</sup>。此次采用最

常见的温纳四极装置( $\alpha$  排列), 这种排列方法电位差大、易读数, 不均匀干扰与地形影响相对较小。

高密度电阻率法测量的场地位于隧道工程场区内鹰嘴山东南坡  $YK5+280 \sim ZK5+540$  之间。测线布置沿钻孔  $SZK8 \sim SZK14$  一线, 跨越 2 号隧道左右线, 共长 300 m (图 2)。测线为  $ABCD$ , 与隧道夹角为  $30^{\circ}$ , 其中  $AB$  段测线长 125 m,  $BC$  段 85 m,  $CD$  段 90 m, 测线与隧道左右线分别交于  $C$ 、 $B$  点。 $B$ 、 $C$  点的隧道中心里程桩号为  $YK5+390$  和  $ZK5+462$ ;  $A$ 、 $D$  点在右线和左线上的截距的隧道中心里程桩号为  $YK5+280$  和  $ZK5+540$ 。

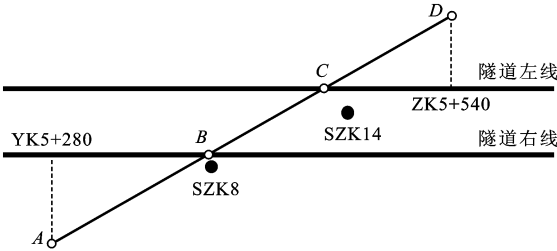


图 2 高密度电法测线

Fig. 2 Position of Surveying by High Density Resistivity Method

在极距大小的选择上综合考虑了构造体的尺度和所需的探测深度, 每 2 个电极测点间距定为 5 m, 共布置了电极测点 60 个。

对于裸露无土被地点的电极布设, 采用了堆覆泥包插入电极的方法。

测区内岩土层分布, 上部为第四纪地层, 由中下更新统黄褐色粉质粘土和粘土混碎石组成, 层厚较薄, 且受地形起伏控制厚薄不均, 约为  $0 \sim 5$  m, 下伏基岩是震旦系灯影组的白云质灰岩、硅化灰岩

和灰岩, 岩质坚硬。

3 测量结果

3.1 测量数据的反演及解释

高密度电法解释时, 根据场不能突变的原则, 相邻数据点不能突变, 在数据处理过程前先对个别数据畸变点进行圆滑处理, 但保持电阻率曲线的总体趋势不变<sup>[13]</sup>。数据处理完后再进行数据格式转换和地形改正, 最后以快速最小二乘法得到反演剖面图, 根据反演成果图进行解释推断(图 3)。

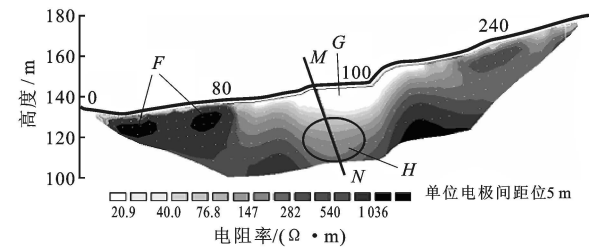


图 3 沿测线 *ABCD* 的高密度电法测量反演剖面  
Fig. 3 Inversion Section of *ABCD* Line Surveyed by High Density Resistivity Method

对电阻率剖面进行解释的前提是要充分掌握不同岩土介质的电性特征, 表 1 给出了工程区所见到的各种岩土介质和浅层地下水电阻率的变化范围<sup>[14]</sup>。

表 1 各种岩土介质的电阻率  
Tab. 1 Resistivity of Rock and Soil

岩土介质名称	电阻率/( $\Omega \cdot m$ )
粘土、亚粘土	1~200
含水沙砾石层	50~500
多孔灰岩、多孔白云岩	60~4 000
致密灰岩、硅化灰岩	1 800~106
潜水	1~100

白云岩、灰岩的电阻率大小取决于岩体的风化程度和含水条件。坚硬完整的白云岩、灰岩, 孔隙度小, 所含的水分也小, 电阻率很高; 而破碎岩体、溶洞和碎石土等孔隙度大而渗透性强的岩土介质, 其电阻率明显取决于含水条件, 当饱含矿化度较高地下水时, 电阻率只有几十到几百欧姆米, 当其位于地表潜水面以上含水条件差并且比较干燥时, 其电阻率可高达几百到几千欧姆米。

对测线 *ABCD* 的测量数据反演并进行地形修正后得到的剖面图(图 3)的解释:

(1)沿地表测线标尺 0~90、200~300 m, 地表

表层厚度为 0~2 m 内的条带电阻率相对较低, 为 40~200  $\Omega \cdot m$ , 所对应的为地表覆盖第四系更新统亚粘土和粘土层, 含植物根系和岩石风化碎屑, 呈硬塑—可塑状。

(2)剖面图的两端, 水平方向沿地表测线标尺 0~90、200~300 m, 深度 2~40 m 内, 岩体电阻率相对较高, 为 300~2 000  $\Omega \cdot m$ , 应为岩体较完整的白云质灰岩、硅化灰岩和灰岩。对照工程勘查资料应该是震旦系灯影组的浅灰色白云质灰岩, 中厚、巨厚层粉晶白云岩, 夹硅化微晶白云岩和砾屑微细晶白云岩, 裂隙发育不完全, 结构较完整的这类岩体具有相对较高的电阻率。图 3*F* 部分电阻率大于 2 000  $\Omega \cdot m$ , 推测可能为硅化灰岩或白云质微粒硅质岩, 与工程勘察资料对照, 结果一致。

(3)图 3 中间部分, 地表测线标尺在 90~200 m、深度 3~12 m 的 *G* 部分, 电阻率小于 50  $\Omega \cdot m$ , 远远低于左右同深度岩体的电阻率, 应是结构比较疏松, 孔隙率很大, 含水量很高的松散岩土层, 并参照地形推测为风化强烈, 结构基本破坏, 岩石呈碎块状的灰岩, 表层堆积一定量的坡积物, 主要为第四系亚粘土和灰岩风化碎屑, 含大量植物根系、腐殖物和碎石, 结构松散。与工程勘察资料吻合。现场测试工作是在雨后进行, 这一部分岩土体临近地表, 为雨水浸润, 故测得的电阻率很低。

(4)深度大于 12 m, 宽度 30~40 m 的 *H* 部分较之左右两旁岩体存在十分明显的低阻异常, 异常体范围向下延伸, 电阻率为 60~300  $\Omega \cdot m$ , 为岩体破碎裂隙十分发育的灰岩带, 推测是断层构造破碎带, 并可由其分布特征推断为陡倾断层。对照工程勘察资料和野外追踪查勘结果可知对应的为鹰嘴山断层。鹰嘴山断层是一个宽 30 m 的硅化破碎带, 局部见糜棱岩和断层擦痕, 走向北东 60°, 倾向北西 30°, 倾角 60°~70°, 属于高角度逆断层, 轴线位置为图 3 中 *MN*。

3.2 隧道开挖涌水预测

老山隧道所穿越的碳酸岩地层地下水分布具有强烈的不均一性, 主要受构造裂隙和表层岩溶控制。据野外地质调查和钻孔资料, 深度 30~40 m (局部达 50 m 左右), 发育浅部裂隙岩溶含水带<sup>[15]</sup>。该带是由岩溶、风化、构造和生物作用等多种因素, 互为条件、相互影响而共同作用的结果。其形态, 有溶蚀的沟槽、裂隙与孔洞, 也有浅部地层中未胶结、充填的构造裂隙, 以及物理、化学与生物

风化作用形成的风化裂隙与孔隙。

由高密度电法探测结果分析预测,剖面所反映的断层与隧道左右线相交的地方,隧道穿过断层破碎带,此处岩体破碎松散,是浅部裂隙岩溶含水带中优良的导水带,存在涌水的可能性较大,施工时应该注意防范。

### 3.3 隧道开挖涌水反馈分析

测线段内在隧道施工过程中存在两个涌水相对较多的地段,其对应隧道中心里程桩号分别为:ZK5+516和YK5+480。

(1)ZK5+516对应于本次高密度电阻率法测线标尺上275 m处,由于位于剖面尾端,此点下方的电阻率变化情况已经在本次测量所得的剖面范围之外,所以剖面无法反映岩层情况。

(2)YK5+480处涌水点位于此次测量剖面所反映的断层与隧道右线的相交处,隧道穿越白云质灰岩和硅化灰岩的破碎带,此处岩体受断层构造影响严重,节理裂隙很发育,分布杂乱,岩体呈碎石和角砾状松散结构,含有泥岩夹层,是优良的导水带,涌水来源为断层或断层所形成的裂隙导水。开挖时出现了涌水,涌水量约为 $0.6\text{ m}^3/\text{h}$ ,持续涌水时间约25 h,随后水量变小。一般涌水量为 $0.15\text{ m}^3/\text{h}$ 左右,且数量随时间推移变化不大。两处涌水都受灰岩岩体构造裂隙和岩溶裂隙控制,导水裂隙连通性好,出水量稳定,主要受大气降水影响。

## 4 结语

(1)查明了沿隧道方向分布的剖面段地表以下40 m深度范围内的风化岩层分布和构造起伏变化,断层分布,探明断层下延深度超过40 m,将横向穿过隧道。由断层与隧道相交的位置存在低阻电性体发育,推断存在浅部构造裂隙岩溶富水带,并且在实际施工中得到了验证。

(2)实践证明,高密度电法可用于岩溶山区工程地质勘察和浅部构造裂隙岩溶富水带探测的一种有效的地球物理方法,能迅速有效地查明地下岩体构造和不同岩土体接触面的位置和深度,具有快速、经济、准确、直观的特点。需要注意在应用该方法前必

须充分掌握不同岩土介质之间电性特征的规律性,同时要充分调查分析测区内地表及地下水的分布情况,然后进行综合分析和解释,达到理想的效果。

(3)由于地球物理反演方法的结果存在非唯一性,与钻孔、探槽等工程地质勘察方法综合运用,进行对比分析和检验,对于保证探测结果的准确性十分重要。

### 参考文献:

- [1] 伍开江,周启友.基于序列二次规划方法的高密度电阻率反演[J].地球科学与环境学报,2005,27(3):63-67.
- [2] 刘晓东,张虎生,黄笑春,等.高密度电法在宜春市岩溶地质调查中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(1):72-75.
- [3] 吴长盛.北大港水库堤坝裂缝检测与评定技术研究[J].水利水电技术,2001(5):61-63.
- [4] 杨湘生.高密度电法在湘西北岩溶石山区找水中的应用[J].湖南地质,2001,20(3):230-232.
- [5] 刘康和,庞学懋.黄河大柳树坝址区物探方法及其效果浅析[J].人民黄河,1994(1):30-32.
- [6] 郭铁柱.高密度电法在崇青水库坝基渗漏勘察中的应用[J].北京水利,2001(2):39-40.
- [7] 黄建生.物探方法在安庆至景德镇高速公路初勘中的应用[J].资源环境与工程,2005,19(3):56-58.
- [8] 王文州.物探技术在高速公路岩溶地区地质勘探中的应用[J].中外公路,2001(4):56-58.
- [9] Loke M H, Barker R D. Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudo Sections by a Quasi-Newton Method[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44: 131-152.
- [10] 刘晓东,张虎生,朱伟忠.高密度电法在工程物探中的应用[J].工程勘察,2001(4):64-66.
- [11] 刘 蓓,孙寅鹤,王绪本,等.高密度电法在香山隧道勘察中的应用[J].物探装备,2003,13(1):46-48.
- [12] 董浩斌.分布式智能化高密度电法测量系统[J].地学仪器,1997(4):11-13.
- [13] 中交公路第二勘察设计院.宁淮高速公路南京江北段施工图设计阶段工程地质详细勘察报告I-II标段[R].武汉:中交公路第二勘察设计院,2003.
- [14] 陈仲候,王兴泰,杜世汉.工程与环境物探教程[M].北京:地质出版社,1993.
- [15] 陈 鹏.老山隧道建设过程中水环境效应研究[D].南京:南京大学地球科学系,2003.