

跨孔高密度电阻率法在地铁岩溶勘探中的应用

赵腾跃 曹伟光 孔维旭 李浩然

北京市政路桥股份有限公司, 北京 100068

[摘要]精确探明溶洞分布情况对保障地铁隧道施工和运营过程中安全至关重要。跨孔高密度电阻率法是一种测量溶洞分布的常用物理勘探方法。文中首先介绍跨孔高密度电阻率法的原理,随后以浙江省绍兴市地铁一号线为例,对跨孔高密度电阻率法在岩溶勘探中的应用进行分析。结果表明,跨孔高密度电阻率法勘探结果与钻芯取样所得岩溶分布情况基本一致,可有效勘测岩溶地层结构。

[关键词]地铁;岩溶勘探;跨孔高密度电阻率法

DOI: 10.33142/ect.v2i1.10671

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

Application of Cross Hole High-density Resistivity Method in Karst Exploration of Subway

ZHAO Tengyue, CAO Weiguang, KONG Weixu, LI Haoran

Beijing Municipal Road and Bridge Co., Ltd., Beijing, 100068, China

Abstract: Accurately determining the distribution of karst caves is crucial for ensuring the safety of subway tunnel construction and operation. The cross hole high-density resistivity method is a commonly used physical exploration method for measuring the distribution of karst caves. This article first introduces the principle of the cross hole high-density resistivity method, and then analyzes the application of the cross hole high-density resistivity method in karst exploration using the Shaoxing Metro Line 1 in Zhejiang Province as an example. The results indicate that the cross hole high-density resistivity method exploration results are basically consistent with the karst distribution obtained from core sampling, and can effectively survey the karst geological structure.

Keywords: subway; karst exploration; cross hole high-density resistivity method

岩溶是一种通过地表水和地下水对可溶性岩石进行化学溶解、冲蚀、潜蚀和崩塌作用下造成的地貌现象^[1]。在岩溶覆盖区域地下水较为丰富,地下水的频繁运动会产生大量溶洞。在溶洞区域,极易发生水库渗漏、隧道失稳、地表建筑物不均匀沉降甚至地面塌陷,成为土木工程建造过程和使用阶段的不稳定的因素之一。

近年来,为缓解城市地面交通压力,我国各大城市大力发展地铁项目建设。由于地质环境的复杂性,当地铁隧道穿越岩溶地层时,由于岩溶在地下水作用下不断变化,造成地下岩土裂缝、岩溶区地下溶洞和上覆土层土洞,造成岩溶塌陷和建筑物损坏,对地铁工程的施工构成很大的威胁。此外,在隧道开挖中遇到岩溶管道,还会发生涌水灾害。为保证地铁工程的顺利施工,预防溶洞引起的工程稳定性问题,施工前岩溶勘探工作尤为重要。在勘探工作中,要先了解施工区域的岩溶种类以及特点,通过比较选择合适的勘探方法和仪器。选择合适的方法和仪器能够精确的勘探到岩溶的规模并节约成本支出^[2]。

目前国内使用的勘探方法以地球物理探测为主。同时,由于物探方式的局限性,会结合其他手段进行综合分析。根据物理学原理和观测技术的不同,物探方法分为磁法、重力法、电法(含电磁法)、弹性波法(含地震法和声波法)、核法(放射性法)、热法(地温法)与测井等七类方

法。由于电磁波、地震波、电流等信号在不同岩性地层中的传播性质不同,通过监测各类信号在不同地层中的反射信号的差异,即可推测出所探测区域的工程地质情况。目前工程中常用的方法为高密度电阻率法、探地雷达、跨孔电磁法、跨孔地震法、微重力法三维地震法和音频透视法等^[3-5]。其中,地面地震反射波法、跨孔地震法、微重力法探测精度较低,受环境影响显著,主要用于探测土层与灰岩分界面以及岩溶发育带的分布情况。探地雷达和跨孔电磁法受地层中含水程度影响大,探测垂直和水平距离不超过10m^[6]。为了提高探测效率,降低劳动成本,20世纪80年代以来,经过持续改进,逐步出现高密度电阻率法。经过大量工程实践和科学研究,高密度电阻率法的数据处理和反演方法由二维发展到三维,并实现了三维数据场可视化^[7]。高密度电阻率法属于直流电法的一种,是适用于环境地质调查和水文工程的一种阵列电探系统。主要用于探测直径超过5m的溶洞^[8]。

本文以浙江省绍兴市地铁一号线工程为例,介绍高密度电阻率法的工作原理及其在地铁项目中岩溶勘探的应用,并对勘探结果进行分析。

1 跨孔高密度电阻率法作用原理

高密度电阻率法是以土的电阻率理论为基础建立的。该系统包括数据采集系统和数据处理系统。高密度电阻率

法通过岩土电性和电阻率的差异,人工建立地下电流场,通过设备采集勘探区域不同位置的电阻率值,使用计算机反演得到断面数据。

采用高密度电阻率法时,电极铺设一次完成,通过电极转换装置实现电极排列、电极距离和测点转换^[9]。具体而言,使用64个电极依次排列,系统将电极等分为2组,每组32个电极。测量时,分别在这两组电极中各选择一个电极供电,其他作为测量电极,供电电极与测量电极之间将形成电位差。每次测量将形成32²次通电和断电过程,每次供电过程可同时采集61个电位差数据,因此共得到32²×61=62464个数据点^[6]。

供电电极和测量电极线的布置需要尽可能与测量目标保持垂直。根据地形、已知地质资料和勘探目标的规模,选择合适的电极间距,电极等距布置并尽可能地避免外界干扰因素对数据采集的影响。高密度电阻率法测得的电场分布如图1所示。

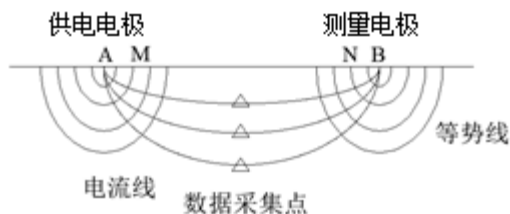


图1 电场分布示意图

根据地下导电电流的分布规律,可推断地下不良地质体的存在。地下电阻率的测量公式如下:

$$\rho_s = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (2)$$

其中 ρ_s 为电阻率, K 为装置系数, ΔV 是N和M间的电位差; I 为电流; K 是装置修正系数,采用四极装置计算;A、B为采集区域供电电极,M、N为采集区域测量电极,A、M、N、B进行等距布置,采用四极装置方式^[5],相较于二极和三极具有更好的电极收发的稳定性和数据采集的精确性。原始数据通过现场的勘探设备进行采集之后,使用工作站将采集到的原始数据进行统计和反演计算,形成所需要的断面图和灰度图,在结合地质和水文条件对上述图进行分析整理最终得结果。

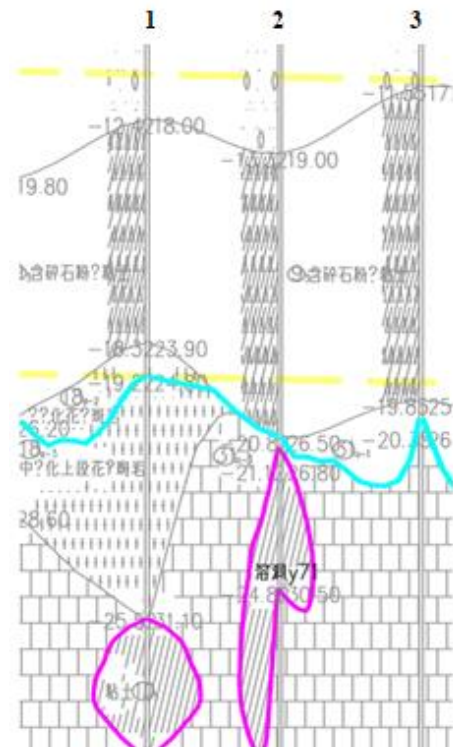
2 实例应用

2.1 工程概况

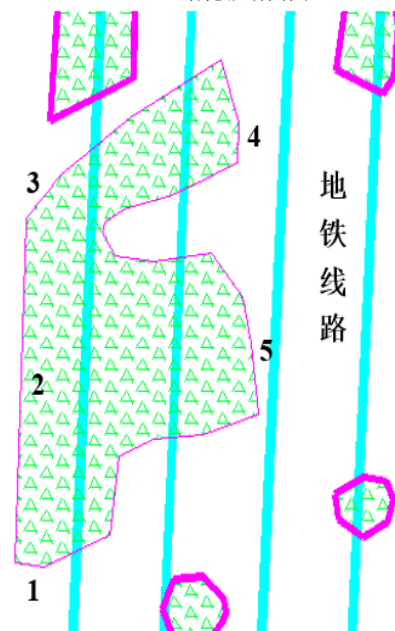
本节以浙江省绍兴市地铁一号线鉴湖镇站~阳和路站区间为例,介绍跨孔高密度电阻率法在隧道工程中的应用。经勘测,本地铁项目鉴湖镇站~阳和路站区间穿越部分强岩溶发育区。该区域地下水网络发育,区内地质条件

复杂,其下为灰岩,属于可溶性岩类,沿线上第四系覆盖层厚度为15~25.5 m,因此确定该区域的岩溶属于覆盖型岩溶。

工程中,勘探钻孔位置位于鉴湖镇站始发处,钻孔编号为ZK1~ZK6。本文以ZK1、ZK2为例进行分析,钻孔位置如图2所示。



(1) 钻孔纵断面图



(2) 钻孔平面图

图2 钻孔位置图

具体钻孔信息如下：ZK1：0~21.8 m 为粉质黏土；21.8~25 m 为灰岩；25~30 m 为溶洞；30~35 m 为中风化灰岩。ZK2：~23 m 为粉质黏土；23~25 m 为灰岩；25~30 m 为溶洞，30~35 m 为中风化灰岩。根据钻孔数据，推测出溶洞位于地下 25 m 左右。

2.2 勘探方法

在勘探开始前使用 PVC 管制作打入孔洞的特制管道。具体方法为：用菱形钻孔法在 PVC 管四周钻孔，间距 10 cm（图 3）。钻孔直径约 1 cm，使得地下水能够通过钻孔进入并能在一定程度上减少地下淤泥倒灌。对预制管道底部进行封装，防止液体倒灌，从而保证设备线路能够顺利到达理想位置。在勘探区域周围进行钻孔，钻孔深度根据计算和取芯机取出的岩芯进行综合确定。钻孔能够达到岩溶周围 1~2 m 深度处，间距不宜过大。



图 3 PVC 管钻孔

准备工作后，将所选定设备带入现场进行测量。本项目工程使用 ZZ-UNIVERSAL96 型超高密度电法仪器系统（图 4），该系统具有 93 道电压通道，发射功率 250 w，输出电压有 36 V/120 V/350 V 三种，可根据地质情况选择，电流采集分辨率<0.1 mA，可实时记录全波形数据。



图 4 ZZ-UNIVERSAL96 型

超高密度电法仪器系统

2.3 测量结果分析

跨孔高密度电阻率法反演结果如图 3 所示。图中横坐标为测孔间距（单位：m），纵坐标为钻孔深度（单位：m）；云图颜色表示电阻率大小（单位： $\Omega \cdot m$ ）。由图可知：

（1）在深度 0~20 m 范围内，电阻率总体低于 $40 \Omega \cdot m$ ，表明该区域为粉质黏土。低阻值区域范围与取芯取样所得粉质黏土范围一致。

（2）高阻值分布在 ZK1 管道中的 36~40 m 以及 ZK2 管道中的 32~40 m。高阻都分布在管壁位置。这种现象主要是采用 PVC 管道材质与岩土体不一致所导致的。上述分析结果与取芯数据基本吻合。

（3）在 ZK1~ZK2 断面中间，ZK1 钻孔附近 20~34 m 以及 ZK2 钻孔附近 16~32 m 深度区域，电阻率处于中低阻异常区域，电阻率处于黏土和基岩之间，由此推测此处含有溶洞，且处于充填状态。表 1 给出了钻孔探测所得溶洞分布情况，对比可知，跨孔高密度电阻率法与钻孔探测结果总体一致。

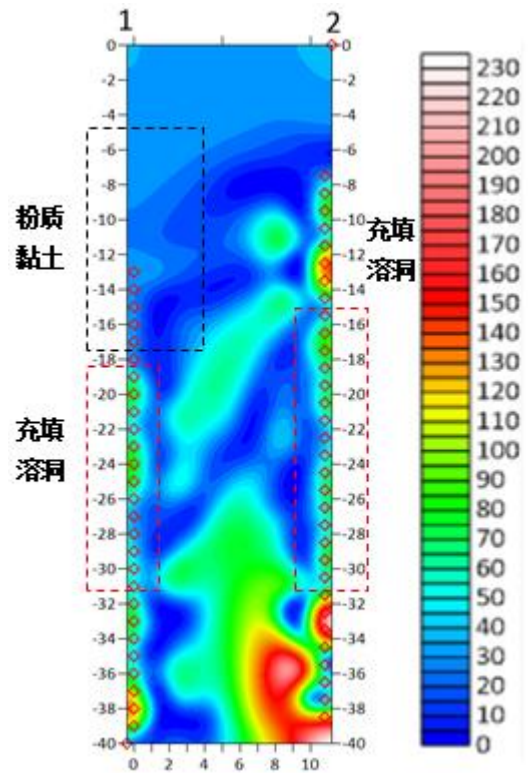


图 5 断面 1-2 电阻率云图

表 1 溶洞相关参数

断面编号	岩溶编号	洞顶/m	洞底/m	宽/m	高/m	填充物性质
ZK1	R1	-26.5	-30.0	3.5	6.4	推测为半填充黏土
	R2	-25.0	-31.2	6.2	2.8	推测为半填充黏土
ZK2	R3	-20.3	-29.8	9.5	5.5	推测为全填充黏土
	R4	-22.6	-32.8	10.2	6.2	推测为全填充黏土

3 结论

跨孔高密度电阻率法是以土的电阻率理论为基础建立的物理勘探方法。本文以浙江省绍兴市地铁一号为例，介绍跨孔高密度电阻率法在工程中的应用。勘探结果表明，电阻率法勘探的岩溶能够查明地下溶洞的具体位置和规

模以及溶洞发育起伏状态。该方法具有测量精准、效率高、操作简单和携带方便等优点。不仅能够为地下工程的建设提供施工保证,而且能为常规工程的物探提供帮助。

[参考文献]

- [1]尹欧,杨帆,彭祖武,等.长沙市煤炭坝地区岩溶发育机理及空间分布规律研究[J].资源环境与工程,2021,35(2):216-220.
- [2]李树林.城市地铁岩土工程勘察应注意的问题[J].铁道勘察,2005,31(5):35-38.
- [3]肖立锋.综合物探方法在施工后岩溶探查中的综合应用[J].工程地球物理学报,2012,9(2):160-164.
- [4]杨祥森,林昀,崔德海.地震映像法在铁路隐伏岩溶勘察中的应用[J].工程地球物理学报,2007,4(5):470-474.
- [5]姜士磊,左帅,赵凤岐,等.高密度电阻率法在推测某场地溶洞发育规模中的应用[J].河北水利电力学院学报,2020,30(1):41-49.
- [6]刘宏岳.直流高密度电法在浅海工程勘察中的应用[J].物探与化探,2013,37(4):756-60.
- [7]苏宝,刘晓丽,卫晓波,等.井间超高密度电阻率法溶洞探测研究[J].物探与化探,2021,45(5):1354-1358.
- [8]杨振威,严加永,刘彦,等.高密度电阻率法研究进展[J].地质与勘探,2012,48(5):969-978.
- [9]郭贵安,魏柏林.井间电磁波CT技术在溶洞探测中的应用[J].华南地震,1999,4(19):28-34.
- [10]樊耀武,王启军,胡延林,等.高密度电阻率法在工程勘察中的应用[J].铁道工程学报,2009,131(8):31-33.

作者简介:赵腾跃(1988.9—),本科学历,工程师,主要从事道路、桥梁、轨道交通工程的施工管理工作。