

基于井间电磁 CT 探测的岩溶空间分布特征

罗彩红¹, 邢 健¹, 郭 蕾¹, 秦尚林²

(1. 惠州市公路管理局, 广东 惠州 516008; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 岩溶是桥梁桩基施工中的安全隐患之一, 探明桥梁范围内岩溶的空间分布特征对桥梁安全尤其重要。岩溶勘查目前多以钻探与物探方法相结合, 但特定的岩溶勘察需要根据具体情况选择合适的物探方法, 常用的地质雷达等方法由于受限于各自的适用范围, 往往不能精确地确定局部范围内溶洞的边界。井间电磁波 CT 探测技术主要依据电磁波在不同介质中传播时的吸收差异, 重建井间介质吸收系数的分布图像, 形象而直观地展现地质体内部结构, 具有分辨率高, 勘探距离小的特点, 特别适合于探测桥墩等局部范围内的溶洞分布情况。以惠州 S119 线水西大桥主桥墩溶洞探测为例, 介绍了电磁波法 CT 探测技术的原理、工作方法及应用效果, 结果表明井间电磁波 CT 探测技术有较高的精度和可信度, 可全面清晰地揭示场地岩溶的空间分布, 为工程设计提供可靠的地质资料。

关 键 词: 井间电磁波法; CT 探测技术; 岩溶; 勘探

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2016) 增 1—0669—05

Spatial distribution characteristics of karst based on cross hole electromagnetic computerized tomography technique

LUO Cai-hong¹, XING Jian¹, GUO Lei, QIN shang-lin²

(1. Highway Administration of Huizhou Municipality, Huizhou, Guangdong 516008, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071)

Abstract: Karst is one of the hidden dangers in the construction of bridge pile foundation. It is particularly important for the safety of the bridge to prove the spatial distribution characteristics of karst in the scope of the bridge. At present, the exploration of karst is mostly based on the combination of drilling and geophysical prospecting methods. But the specific karst exploration needs to choose the appropriate geophysical method according to the specific situation. Commonly used geological radar and other geophysical prospecting methods often can not accurately determine the boundary of the local area of the cave due to their limited scope of application. The cross hole electromagnetic wave CT technique reconstructed the distribution image of the medium absorption coefficient of the wells base on the difference of the absorption of electromagnetic wave in different media. The image visually shows the internal structure of geological bodies. It has the characteristics of high resolution and small exploration distance. It is especially suitable for detecting the distribution of karst cave in the local area such as bridge pier. This paper introduces the principle, working method and application effect of the electromagnetic wave method CT detection technology by an example of detecting the karst of Shuixi bridge pier of highway S119. The results show that cross hole CT technology has high precision and reliability. It can fully and clearly reveal the spatial distribution of the karst, so as to provide reliable geological data for engineering design.

Keywords: crosshole electromagnetic wave; CT detection technique; karst; exploration

1 引 言

岩溶在空间上发育往往是不规则的。在工程地质勘探中钻探虽然能揭露出详细的、直接的地层信息, 但不能揭露跨越钻孔之间范围内的地层结构信

息, 若勘探精度不高, 往往为工程建设带来严重的潜在威胁。在惠州S119线水西大桥桥梁桩基(钻孔灌注桩)施工过程中, 由于岩溶分布较为复杂, 多次出现桩孔坍塌、泥浆泄露乃至掉钻问题, 严重影响施工安全和进度。

收稿日期: 2016-04-21

基金项目: 广东省交通科技项目 (No. 201407)。

This work was supported by the Guangdong Traffic Science and Technology Project(201407).

第一作者简介: 罗彩红, 女, 1970 年生, 高级工程师, 主要从事国道公路建设与管理工。E-hz2248858@163.com

针对复杂岩溶问题,通常通过钻探及各种物探来探明其空间分布情况。钻探可以直接得到地层信息,但受钻孔位置、数量等限制,难以精确地勾画出岩溶的分布范围、连通及规模等情况。孔间CT、地质雷达、高密度电法等物探方法可以弥补钻探之不足,二者结合可较为有效地探测出岩溶的空间分布、地层信息以及溶洞的充填物特性等。

由于岩溶地质情况的复杂性,对于特定的岩溶勘察,并不是所有的物探方法都适合使用,如瑞雷波探测岩溶时要求岩溶在水平方向分布范围不小于瑞雷波排列长度的1/4,而且对于地表或地层界面起伏较大或水平方向地层变化较大时容易加大单点瑞雷波探测误差;地质雷达则受天线中心频率及工作参数的影响较大,如果在被探测体为黏土或具有一定厚度的黏土覆盖层或浅部岩体较破碎的情况下不适于探测较深区域的不良地质,并且目标异常体随着探测距离增大其横向尺寸也随之增大,否则无法分辨小尺寸的破碎带或溶蚀区域了^[1]。

井间电磁波 CT 探测技术作为物探方法的一种,是 20 世纪 80 年代发展起来最先进的地球物理探测技术之一,相对电阻率法、地质雷达及声波探测法等而言,其在地学中的应用较少,主要是由于电磁波在地层介质中衰减较快,可探测的间距相对较小^[2]。另外,电磁波 CT 探测需要钻孔,费用较高昂,限制了其使用范围,但电磁波 CT 技术也有分辨率高的独特的优势,是目前各种物探法中几何分辨率精度最高、最直观的方法^[3],特别适合于探测桥墩等局部范围内的溶洞分布情况,既可以利用已有的超前钻探孔,也可以根据需要重新布设钻孔重建两个钻孔之间的地质结构图像,形成一个立体网络,直观而精确地查明局部异常体的位置、形状与性质,为工程设计提供可靠的地质资料。

电磁波 CT 探测技术在探矿、地下水、岩溶桩基质量检测等方面都得到了应用,如李永涛等^[4]利用电磁波 CT 技术探测了长江大堤武汉段地下溶洞,为长江大堤安全的防治提供可靠精确的地下地质资料。郭贵安等^[5]利用电磁波 CT 技术探测了肇庆大桥 5 个主桥墩墩位下方的溶洞分布状况。胡熠等^[6]利用电磁波 CT 对南广铁路岩溶路基试验区段注浆质量检测进行检测。冯等^[7]对煤层开采覆岩破坏进行了层析成像研究,重现了地下结构的形态,裂隙带的位置和煤层开采后变化情况。总之,大量工程实例表明,电磁波 CT 探测技术对岩溶勘查具有很好的效果^[8-12]。

2 电磁波 CT 勘探技术原理与工作方法

2.1 电磁波 CT 法原理

电磁波 CT 法是利用无线电波(工作频率 0.5~32 MHz)在两个钻孔中分别发射和接收,根据不同位置上接收的场强的大小,来确定地下不同介质分布的一种地下地球物理测试方法,也称井中无线电波透视法。其原理如图 1 所示。

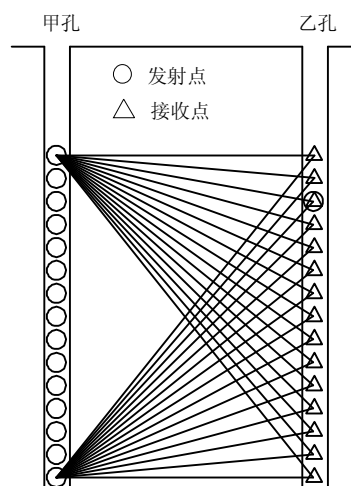


图 1 定发装置示意图

Fig.1 Sketch of setting device

电磁波 CT 法涉及电磁波在地下有耗空间的辐射、传播和接收,其正反演问题的理论基础是电磁场理论和天线理论。电磁波 CT 法中的场强观测值公式为

$$E = E'_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} f(\theta) \quad (1)$$

式中: E 为接收点的场强值; E'_0 为初始辐射常数; β 为吸收系数,即介质中单位距离对电磁波的吸收值; $f(\theta)$ 为收发天线的方向因子函数; r 为发射与接收点之间的距离。

由式(1)可以看出,当电磁波通过不同的地下介质(如各种不同的岩石、矿体及溶洞、破碎带等)传播时,由于不同介质对电磁波的吸收 β 存在差异,如溶洞、破碎带等的吸收系数 β_s 比其围岩的吸收系数 β_0 要大得多,在溶洞、破碎带的背后的场强也就小得多,从而呈现负异常,像阴影一样,就是利用这一差异推断目标地质体的结构和形状,其原理与医学 CT 相似。

地下电磁波法层析技术 CT 根据实测数据,依照电磁波在地下有耗介质中传播规律及一定的物理和数学关系反演透视剖面上的物理参数的分布,以图像的形式表现出来。

岩溶发育的岩石与完整灰岩比较,在物性(电阻率及吸收系数)上存在较大差异,只要溶洞有一定规模时,对电磁场将会产生明显的吸收作用,观测的电磁场强幅度明显减小,吸收系数增大(相对围岩的高阻、低吸收系数),形成高吸收异常。

2.2 野外工作方法及质量控制

(1) 仪器选取

本次岩溶勘查使用中国地质大学(武汉)研制的 TC-RIM-19 型地下电磁波仪系统,见图 2。其工作频率为 0.5~35.0 MHz,由数据采集系统和数据处理系统两部分组成,以跨孔方式探测钻孔间的剖面,或以单孔方式探测孔周围的地质情况。



图 2 TC-RIM-19 型地下电磁波仪系统

Fig.2 Electromagnetic wave system of type TC-RIM-19

数据采集系统包括放置于钻孔中的发射机、接收机及其地下天线、控制发射机、接收机并进行数据采集的地面采集监控器。发射机发射单频的脉冲信号,接收机同步接收此单频脉冲信号。数据处理系统包括数据传输与预处理、数据滤波和 CT 等模块软件。数据经地面采集监控器记录并送数据给处理系统处理成图。为实现宽频带程控扫频脉冲信号的发射和同步接收,数据采集并与计算机通讯,应用了频率合成、功率合成、微计算机控制等现代电子技术。

(2) 测量方法及剖面布置

用电磁波 CT 对岩溶进行探测时,首先需建立观测系统,在被探测区域的两边各根据勘探深度需要各施工一个钻孔,一个钻孔中以一定的点距逐点激发地震波,另一个钻孔中以相同的点距用传感器逐点接收同一震源点激发的地震波信号,并记录地震波形信号。然后两孔互换发射机与接收机重新测量一次,并综合两次的测量结果进行层析处理,从而构建电磁波 CT 观测系统,形成一个观测剖面,如图 3 所示。

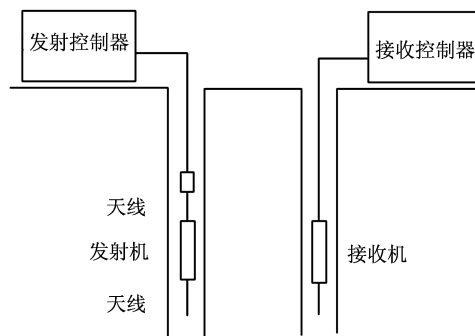


图 3 观测系统示意图

Fig.3 Sketch of observation system

(3) 质量控制

为控制电磁波 CT 方法测量工作的质量,首先需依据铁路工程物探规范^[13]指导测试工作,在测试中,对电磁波测量的全过程进行质量跟踪,并随即抽取一定比例的观测点作为对比重复观测采样点,确保测试误差在规定范围之内。

3 工程实例

3.1 工程概况

S119 线水西大桥位于惠州市龙门县,桥长约 188.10 m,设计桥宽约 50.00 m,改建工程向两侧拓宽约 38.00 m。勘探结果表明,该桥所处区域岩溶较为发育,多呈串珠状,空间分布复杂。为确保墩台基础的安全,为设计施工提供依据,工程场地开展了电磁波 CT 探测岩溶勘查,查明地下溶洞分布状态。

3.2 测试孔布置

根据勘探报告,重点选定 0[#]台下游、2[#]墩上游以及 6[#]墩上、下游共 4 个区域作为电磁波 CT 探测区域,即是在位于上游的 2-1、2-3、6-2、6-9、6-10 孔以及位于下游的 0-15、0-16、6-14、6-6、6-15 孔(前一个编号表示桥梁墩台号,后一个编号表示钻孔号)共 10 个钻孔之间开展的,探测孔深 17~26 m 之间,孔间距在 3.2~17.8 m 之间,如图 4 所示。

本次最终探测完成电磁波 CT 剖面 6 个,分别为 PM2-1-3、PM6-2-9、PM6-2-10、PM0-15-16、PM6-6-14、PM6-14-15。为了保证成像的精度,测试激发点距和接受点距同为 0.5 m。根据工区地下介质的电阻率参数,本次测量选用了 16 MHz 和 24 MHz 两个工作频率。

3.3 测试成果的地质解释

以剖面 PM6-14-15 为例,对现场测试结果进行地质解释。电磁波 CT 反演可得到视吸收系数彩色

β_s 值分布的色谱图。图 5 为钻孔 6-14[#]与钻孔 6-15[#]之间连线形成的测试剖面 (PM6-14-15 剖面) 的视吸收系数彩色 β_s 值分布色谱图。图中, 采用 β_s 值等值线预以表示, 等值线间区域颜色由图示方法构成, β_s 值越小, 介质对电磁波的吸收愈小, 介质的性状越好; β_s 值越大, 介质对电磁波的吸收愈大, 介质的性状愈差。

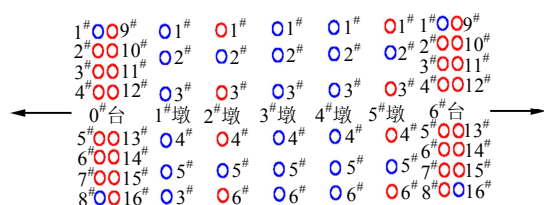


图 4 水西大桥桥梁桩位

Fig.4 Piles position of Shuixi Bridge

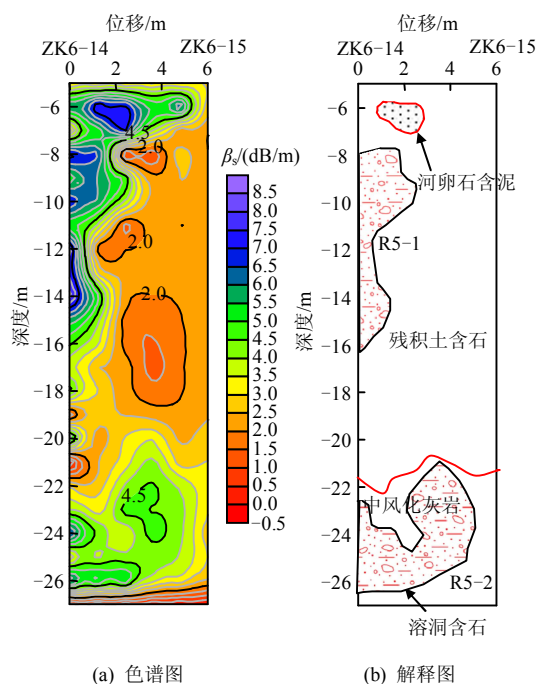


图 5 PM6-14-15 剖面电磁波层析成像色谱图及解释图
Fig.5 Electromagnetic wave tomography imaging and interpretation chart of PM6-14-15 section

CT 剖面图表明, 灰岩中的溶洞由于有泥浆、沙、碎石之类的混合物充填, 使得电磁波通过这些部位时, 能量被大量吸收, 在图像上表现为深颜色的强吸收区域; 而完整的灰岩地段, 电磁波几乎是“透明”的, 不发生吸收作用或吸收很小, 在图像上表现为浅色区域。PM6-14-15 剖面的 CT 电性特征如下: PM6-14-15 位于 6-14[#]孔与 6-15[#]孔之间, 井间距离为 6.0 m, 勘查深度为地面以下 5.0~26.5 m。由剖面的 β_s 分布特征, 可以将该剖面分为 2 层 (见图 5): 第 1 层, 地层深度为 5.0~20.4 m, $\beta_s = -0.5 \sim$

3.0 dB/m, 推断为残积土含石层。第 2 层, 地层深度为 20.4~26.5 m, $\beta_s = 3.0 \sim 4.5$ dB/m, 岩性为中风化灰岩层。由于存在风化现象, 该层有 2 个 β_s 异常区域, 即 R5-1 和 R5-2。剖面中的 2 个异常区域的电性特征具体描述, R5-1 的 $\beta_s = 6.0 \sim 8.0$ dB/m, 深度为 8.3~16.0 m, 水平距离为 0~2.2 m, 形状近似为一长轴为 8.0 m, 短轴为 1.4 m 的半椭圆形, 推断其为无充填物溶洞; R5-2 的 $\beta_s = 4.0 \sim 4.5$ dB/m, 深度为 21.1~26.3 m, 水平距离为 0.2~5.1 m, 其形状不规则, 靠近 ZK6-14 井一侧异常深度为 22.6 m, 推断为其溶洞的充填物含岩石碎屑。

3.4 测试结果验证

根据 6-14[#]孔超前钻探结果, 在距离地表深度 8.30~16.00 m 及 22.60~28.20 m 处发现了溶洞, 而 6-15[#]孔未发现溶洞。根据图 5 电磁波 CT 探测结果, R5-1 溶洞深度范围为距离地表 8.3~16.0 m, R5-2 溶洞深度范围为距离地表 21.1~26.3 m, 两溶洞空间范围未达 6-15[#]孔, 与钻探结果基本一致, 超前钻探中发现的溶洞基本都在物探测试结果中得到体现, 而且 CT 电磁波层析成像可以得到溶洞在水平和垂直向的延伸情况, 充分体现了这种方法的优点。

4 结 论

(1) 水西大桥工区溶洞的吸收系数一般在 6.5~10.5 dB/m, 比正常灰岩及其他岩性的岩石要高 4.5~6.5 dB/m, 探测结果与钻探结果一致, 说明物探方法在测试灰岩地区岩溶、破碎带是有效的。

(2) 电磁波 CT 技术用于探测岩溶等不良地质体时可取得较好的效果, 是一种较为有效的手段, 勘察成果精度较高。

(3) 电磁波 CT 勘探具有图像直观, 信息量丰富, 可以探测岩溶的几何形态及空间分布情况和用于探测复杂条件下的岩溶问题。

参 考 文 献

- [1] 徐建业, 乔东华, 张勇. 地质雷达在贵州公路地质勘察中的适用范围[J]. 黑龙江交通科技, 2013, 36(11): 1-2.
XU Jian-ye, QIAO Dong-hua, ZHANG Yong. Study on the Scope of Geological Radar in Guizhou Geological Exploration[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2013, 36(11): 1-2.
- [2] 张旻舫, 师学明. 电磁波层析成像技术进展[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(4): 418-425.
ZHANG Min-zhu, SHI Xue-ming. Review of

- electromagnetic tomography technique[J]. **Chinese Journal of Engineering Geophysics**, 2009, 6(4): 418—425.
- [3] 温一波. 工程地球物理探测技术进展与局限探讨[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2007, 29(增刊 1): 647—654.
- WEN Yi-bo. The progress and problem on engineering geophysics[J]. **Journal of Yunnan University(Natural Science Edition)**, 2007, 29(Supp.1): 647—654.
- [4] 李永涛, 陶喜林, 余建河, 等. 井间电磁波 CT 技术在长江大堤岩溶探测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2009, 18(1): 55—62.
- LI Yong-tao, TAO Xi-lin, YU Jian-he, et al. Application of cross-borehole electromagnetic computerized tomography in karst detection along yangtze river levee[J]. **CT Theory and Applications**, 2009, 18(1): 55—62.
- [5] 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, 19(4): 28—34.
- GUO Gui-an, WEI Bai-lin. Prospecting corroded cavities using cross-section electromagnetic tomographic technique between boreholes[J]. **South China Journal of Seismology**, 1999, 19(4): 28—34.
- [6] 胡熠, 谢强, 赵文, 等. 电磁波 CT 法岩溶路基注浆质量检测标准[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 441—447.
- HU Yi, XIE Qiang, ZHAO Wen, et al. Electromagnetic wave CT detection standard of karst roadbed grouting[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2013, 48(3): 441—447.
- [7] 冯锐, 陈家庚, 郭强绪. 电磁波井间层析技术在城建工程中的应用[J]. 地球物理学报, 1992, 35(增刊): 348—357.
- FENG Rui, CHENG Jia-geng, GUO Qiang-xu. Application of tomographic technology between boreholes in geotechnical survey of urban construction[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1992, 35(Supp.): 348—357.
- [8] 刘立振, 何建文, 张海云, 等. 电磁波层析成像 100 例的统计分析[J]. CT 理论与应用研究, 1995, 4(1): 15—19.
- LIU Li-zhen, HE Jian-wen, ZHANG Hai-yun, et al. Statistics and analyses for 100 examples in EM tomography[J]. **CT Theory and Applications**, 1995, 4(1): 15—19.
- [9] 顾孝同. 国内工程 CT 技术的发展与应用[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(4): 278—282.
- GU Xiao-tong. Developments and applications of engineering CT technologies[J]. **Chinese Journal of Engineering Geophysics**, 2006, 3(4): 278—282.
- [10] 谈顺佳, 张华, 王瑞雪. 井间地震 CT 技术在岩溶勘察中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2013, 22(3): 439—446.
- TAN Shun-jia, ZHANG Hua, WANG Rui-xue. The cross-well seismic computerized tomography technology and its application in the cavern survey[J]. **CT Theory and Applications**, 2013, 22(3): 439—446.
- [11] 李天祺, 彭涛, 郭印. 井间地震层析成像技术在岩溶勘察中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 127—130.
- LI Tian-qi, PENG Tao, GUO Yin. Application of cross-hole seismic computerized tomography technology to karst caves survey[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2009, 36 (6): 127—130.
- [12] 蒋忠信, 王衡. 南昆铁路岩溶洞穴预报技术[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(2): 69—73.
- JIANG Zhong-xin, WANG Heng. Technology of forecasting to karst cave in construction of nanning-kunming railway[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2002, 29(2): 69—73.
- [13] 中铁第四勘察设计院. TB 10013—2010 铁路工程物探规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- The Fourth Survey and Design Institute, China Railway. TB 10013—2010 Code for geophysical prospecting of railway engineering[S]. Beijing. China Railway Publishing House, 2010.