

# 地质雷达在地铁基坑底隐伏岩溶探测中的应用

成词峰<sup>1,2</sup> 李鹏飞<sup>3</sup>

(1. 云南省建筑科学研究院, 云南昆明 650223; 2. 云南省岩土工程技术研究中心, 云南昆明 650223;  
3. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东广州 510610)

**【摘要】** 地铁车站的建设不仅要保证施工过程中的安全, 而且要保障长期运营中的安全, 因此在可溶岩区基坑底部的隐伏岩溶是地铁工程需重点考虑的特殊地质问题。本文以武汉地铁二号线一期工程洪山广场车站基坑底部隐伏岩溶的地质雷达探测为例, 阐述了地质雷达的工作原理、技术特点及工作方法, 并根据雷达探测结论, 采用地质钻探进行了验证, 实例结果表明, 地质雷达技术能够满足地铁车站深基坑底部岩溶探测的要求, 准确度较高、速度快、效果好, 是一种有效的技术手段, 值得在基坑底部不良地质体探测中推广使用。

**【关键词】** 基坑; 地质雷达; 岩溶; 探测

**【中图分类号】** TU 473.1

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2012.06.012

## Application of Ground Penetrating Radar in the Survey of Hidden Karst for Subway Foundation Pit

Cheng Cifeng<sup>1,2</sup> Li Pengfei<sup>3</sup>

(1. YunNan Institute of Building Research, Kunming 650223, Yunnan, China;

2. YunNan Geotechnical Engineering Technology Research Center, Kunming 650223, Yunnan, China;

3. China Water Resources Pearl River Planning Surveying&Designing CO., LTD, GuangZhou 510610, Guangdong, China)

**【Abstract】** Geological conditions of subway foundation pit bottom should be taken care of to guarantee the safety of construction and operation of subway in karst area. It has shown that geology method should be given the first place together with other auxiliary methods considering the features of subway construction. This paper described principle, technology character of GPR and practical working Method and using an application of the successful detection of the karst in a foundation pit of Wuhan metro Line 2 as example, confirms the effectiveness and feasibility of the method in the exploration of hidden karst in foundation pit. The technique is worthy of wide application with further improvement.

**【Key words】** foundation pit; ground penetrating radar(GPR); karst; survey

### 0 引言

随着城市建设的不断发展, 地下空间的利用得到大重视, 深基坑大量涌现。地铁站深基坑工程, 是地铁工程的重点, 造价占总工程造价的 20% 左右, 有的甚至占工程总造价的一半<sup>[1]</sup>。地铁站深基坑工程施工过程中, 不仅要保证基坑本身的安全与稳定, 而且要有效控制基坑系统的变形以保护周围环境。当地铁站底部坐落在可溶岩地层中时, 隐伏的岩溶为地铁站施工和后期运营带来较大隐患, 如果发生岩溶塌陷, 还将影响到相关人员的生命财产安全, 尤其是在地铁车站, 如果出现这类问题, 将产生非常恶劣的社会影响。为了有效地预防和减少地铁车站隐

伏岩溶的风险, 有必要对进行探测并加以处理。本文结合武汉地铁 2 号线某车站基坑工程为例, 探讨了地质雷达在基坑底部隐伏岩溶探测中的应用。

### 1 工程概况

#### 1.1 工程简介

某地铁广场站是 2 号线与 4 号线的换乘站, 车站在 2 号线方向长度为 169.52 m, 在 4 号线方向长度为 155.60 m, 两站合建, 形成独特的同层换乘车站。洪山广场站为地下三层岛式车站, 地下一层为商业和非付费区通道, 地下二层包括站厅和站台双重功能, 地下三层为站台层, 车站总建筑面积为 26 000 m<sup>2</sup>, 采用“盖挖逆做”施工工艺。

## 1.2 工程地质

根据岩土工程勘察报告,该段地表至基坑底板以下的地层依次为:①杂填土( $Q_4^{ml}$ ):色杂,主要由粘土、砖块等物质组成,结构松散,层厚 1.3~2.9 m。②粉质粘土( $Q_2^{pl+cl}$ ):黄褐色,结构紧密,可塑—硬塑状,层厚 3.0~9.2 m。③碳质灰岩(C-P):灰黑色,细晶结构,层状构。灰岩内岩溶较发育。从揭露到的可溶性碳酸盐类岩石的 5 个钻孔中,有 2 个钻孔遇到溶洞,见洞率占 40%,呈全充填状态,充填物为可塑~软塑粘性土,并夹有小砾石,钻探时未有漏水现象。基坑底板即落入该层中。

## 1.3 水文地质

场地内地下水为上层滞水、基岩裂隙水及岩溶水,上层滞水分布于的人工填土之中。基岩裂隙水赋存于岩石裂隙之中。岩溶水赋存于炭质灰岩溶洞之中。从钻探回水及岩芯情况观察,灰岩溶洞多被粘性土充填,水量有所减小,施工中应采取防范应急措施,避免岩溶水对施工造成不利影响。

## 2 探测原理

地质雷达 GPR(Ground Penetrating Radar)是基于地下介质的电性差异,向地下发射高频电磁波,并接收地下介质反射的电磁波,将其进行处理、分析、解释的一项工程物探技术。其工作过程是由发射天线送入地下高频电磁脉冲波,当其在地下传播过程中遇到不同的目标体(岩土体、空洞等)的电性介面时,有部分电磁能量被反射回来,被接收天线所接收,并由主机记录,得到从发射经地下界面反射回到接收天线的双程走时  $t$ 。地质雷达方法是由已知条件推断未知情况的方法,当地下介质的波速已知时,可根据测到的  $t$  值求得目标体的位置和埋深<sup>[2]</sup>(见图 1)。

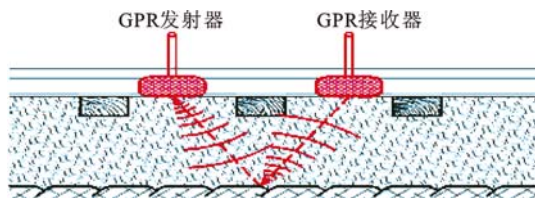


图 1 地质雷达探测原理图

在雷达探测中,介质的电导率和介电常数是最为关键的因素。在灰岩地区深基坑工程的隐伏岩溶探测中,常见的介质主要有空气、淡水、混凝土、粘质粘土、淤泥、干灰岩、湿灰岩,其相关的电性参数见表 1<sup>[3]</sup>。

表 1 常见介质电性参数表

介质	电导率 $\sigma/(\text{ms} \cdot \text{m}^{-1})$	相对介电常数 $\epsilon$	电磁波速度 $v/(\text{m} \cdot \text{ns}^{-1})$
空气	0	1	0.3
淡水	0.5	80	0.033
干混凝土	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	4~40	0.05~0.15
湿粘土	$10^{-2} \sim 1$	5~40	0.05~0.14
淤泥	$5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^3$	40~60	0.06~0.09
干灰岩	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	5~8	0.1~0.12
湿灰岩	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	6~9	0.09~0.11

## 3 探测工作实施

地质雷达探测工作现场数据采集主要是在基坑底板上进行,采集前对现场进行平整处理,使雷达天线与基坑底板能有较好的接触,在探测岩土体附近没有其它的金属物体。

### 3.1 参数设置

本次探测采用瑞典 MALA 地球科学仪器公司生产的 RAMAC/GPR 地质雷达进行,地质雷达工作参数为:雷达天线频率 100 MHz,测线距为 1.5 m,目的在于分别获得深度在 10 m 以上的目标体(溶洞或溶槽等),测点距 0.12 m<sup>[4]</sup>。测线沿着车站基坑边沿方向进行(见图 2)。

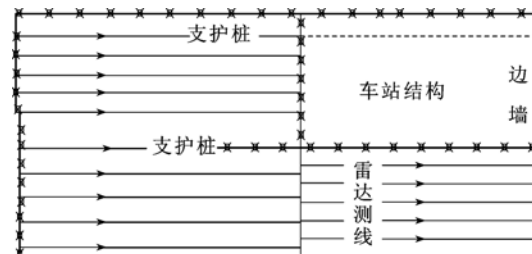


图 2 测线布置示意图

### 3.2 探测结果

在溶蚀裂隙带处,地质雷达图像和波形特征通常表现为裂隙界面反射强烈,在反射面附近振幅显著增强且变化大,波形杂乱,在裂隙带内常产生绕射、散射、同相轴错断。遇到溶洞是空洞时,地质雷达图像和波形特征通常表现为地质雷达波在空洞上顶表面发生强振幅反射,雷达波穿透空洞在下底面再次反射,产生一定规律的多次反射<sup>[5]</sup>。

地铁车站基坑底部隐伏岩溶地质雷达剖面图见图 3,图(a)中部可见雷达反射波同相轴振幅明显增强,波形杂乱,并伴有多次反射的弧形同相轴,初步推断可能是小型的溶蚀空洞,发育深度约 6~7 m,充填良好。图(b)可见多条倾斜的同相轴振幅增强

带,初步推断可能为裂隙带,沿裂隙带可能发育小的溶蚀,发育深度约4~9 m,裂隙倾角约50°。

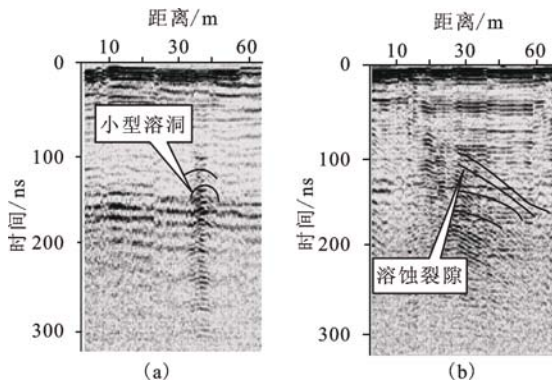


图3 地质雷达探测结果图像

### 3.3 钻探验证

根据地质雷达探测结果圈定的位置,采取地质钻探验证,在该处确实发育有小型溶腔和溶蚀裂隙,溶腔和裂隙被粘土充填(见图4),为了地铁车站运用期间的安全,根据设计对该处进行了注浆加固。



图4 钻探岩芯及注浆加固照片

## 4 结论

地质雷达探测具有能快速有效的确定岩溶孔洞及溶蚀裂隙的空间分布范围,是深基坑底部隐伏岩溶探测的一种有效方法,值得在相关的基坑工程中推广使用。在实际工作中,应对具体工程的地质条件和探测环境进行详细分析,以便合理设置测线及选择探测参数。条件允许时,宜采用钻探对地质雷达探测结论进行验证,以便总结经验教训,从而提高探测工作的成效和精确度。

### 参 考 文 献

- [1] 徐杨青. 深基坑工程优化设计理论与动态变形控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2001.
- [2] 李大心. 探地雷达方法与应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [3] 葛双成, 陈 军, 赵永辉, 等. 深基坑应急工程中的雷达检测技术研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 558-562.
- [4] 傅志峰, 张 磊, 唐检军, 等. 地铁隧道底部探测技术及应用[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(4): 35-40.
- [5] 李光旭, 顾汉明, 詹凤林, 等. 地质雷达结合地震映像法在铁路隧道底部隐伏岩溶探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(6): 783-786.

收稿日期: 2012-09-19