

文章编号: 1002-0268 (2007) 08-0092-04

地质雷达在公路隧道超前地质预报中的应用

由广明¹, 刘学增², 汪成兵¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海同岩土木工程科技有限公司, 上海 200092)

摘要: 首先, 介绍了地质雷达的工作原理及其探测方案和探测技术参数的确定原则。其次, 采用瑞典 MALA 公司的 RAMAC/GPR 通用型主机 CU II, 同时结合掌子面地质素描, 对某高速公路的 3 条隧道进行超前地质预报。根据现场工作条件及探测精度和深度的要求, 测线布置采用“十”形测线, 测量方式采用点测方式, 测点间距为 20 cm, 天线中心频率主要采用 100 MHz。结果表明, 采用该方法对断层、溶洞、含水裂隙和软弱夹层等不良地质状况的预测基本符合掘进实际, 保证了施工安全、加快了工程进度, 同时为地质雷达在公路隧道超前地质预报中的应用积累了一些经验。

关键词: 隧道工程; 超前地质预报; 地质雷达; 公路隧道; 工程地质

中图分类号: U459.2

文献标识码: A

Application of Ground Penetrating Radar to Geological Forecast for Expressway Tunnel Construction

YOU Guang-ming¹, LIU Xue-zeng², WANG Cheng-bing¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Tongyan Civil Engineering Technology Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: First, the working principle of ground penetrating radar (GPR) and the method to confirm the technical parameters are introduced. Second, the geological conditions of 3 tunnels of an expressway are forecasted by using CU II ground penetrating radar and geological sketch method. Cross survey line, point data collection at 20 cm intervals and antenna of 100MHz are used according to the working condition, the accuracy and depth requirement. The results show that the forecast of fault fracture, limestone cave, fissure and feeble stratum fit the reality. The accurate prediction guaranteed safe production, accelerated job schedule and acquired favorable benefit. Some experience about the application of GPR to geological forecast is obtained.

Key words: tunnel engineering; geological forecast; ground penetrating radar; expressway tunnel; engineering geology

0 前言

隧道施工时, 对掌子面前方地质情况进行及时准确的预测, 已受到隧道建设者和广大学者的广泛关注。隧道施工过程中遇到的主要不良地质情况有溶洞、地下暗河、断层、破碎带和瓦斯等, 对这些不良地质条件及时准确的预报, 不仅可以提前采取相应的措施以提高隧道施工的工作效率, 还可以确保施工的安全进行。地质雷达 (Ground Penetrating Radar, 简称 GPR) 是利用无线电波检测地下介质分布和对不可见目标或地下界面进行扫描, 以确定其内部形态和位置

的电磁技术^[1]。其特点是快速便捷、分辨率高、无损伤、探测和处理数据速度快、不影响施工, 对上述不良地质条件有较好的探测结果^[2~9]。

1 基本原理

地质雷达^[10]通过发射天线 T (图 1), 按照确定的方向, 将 1 MHz ~ 1 GHz 高频电磁波以宽频带脉冲形式向地下或进深方向发射。在均匀介质中, 电磁波以一定速度传播, 当遇到有电性差异的地层或目标体时, 如断层、破碎带、溶洞和含水层等, 电磁波便发生反射, 返回到地面或探测点, 被接收天线 R 接收

收稿日期: 2006-03-08

作者简介: 由广明 (1979-), 男, 黑龙江鸡东人, 博士, 从事隧道及地下工程方面的研究工作。(hygm72@163.com)

并由主机记录,得到从发射经地下界面反射回接收天线的双程走时 t :

$$t = \frac{\sqrt{4z^2 + x^2}}{v}, \quad (1)$$

式中, z 为反射体的深度; x 为发射天线和接收天线的距离; v 为电磁波在地下介质中的传播速度。

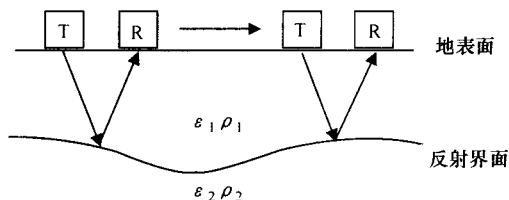


图1 GPR原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of GPR

图1中, T为发射天线; R为接收天线; ϵ 为介质介电常数; ρ 为电导率。

当地下介质的波速已知时, 可根据测到的精确值 t , 并结合对反射电磁波的频率和振幅等进行处理和分析, 便可求得目标体的位置、深度和几何形态。对于低频天线, 在实际应用当中 $z \gg x$, 故反射体的深度近似为:

$$z = tw/2. \quad (2)$$

地质雷达天线有屏蔽和非屏蔽之分, 屏蔽天线为发射天线与接收天线同置一体, 优点是受外来因素的干扰小, 缺点是重量大, 操作不方便; 非屏蔽天线为发射天线与接收天线分体, 优点是重量轻, 操作方便, 缺点是操作时发射天线与接收天线间距很难始终保持一致, 且受外界干扰严重, 对雷达图像的判断要有相当的识别干扰的能力。

2 探测方法及技术参数的确定

2.1 测线布置及测量方式

对于地质超前预报, 测线主要布置在掌子面上, 根据掌子面的情况, 常用的布置形式有十形布置和井字形布置, 必要时可加密雷达测线以提高探测结果的准确性。除了在掌子面上布置测线以外, 还可根据实际的地质情况及施工要求, 在隧道底板和侧壁布置测线, 以对隧道周围的地质情况有所了解。

测量方式有点测和连续测量两种。点测方式是通过电脑键盘发送信号触发指令给雷达主机, 每按一次键盘回车键便可采集一道数据。此种方法的优点是能够适应掌子面恶劣的工作环境, 故实际隧道超前预报中经常采用此法。缺点是要求天线按照固定的距离移动, 这样才能保证采集数据的剖面宽度与测线长度一致。连续测量方式是通过测量轮的滚动或预先设置好

的时间间隔自动采集数据。通过预先设置好的距离, 测量轮每滚动该距离, 便采集一次数据, 此法要求测量表面比较光滑, 以保证测量轮的正常滚动, 该法比较适合用于隧道二衬检测。对于时间触发方式, 当开始测量后, 每隔一定的时间间隔便采集一道数据而不管天线移动与否, 因此采用该法时要求天线能够匀速移动, 如果掌子面处条件允许, 也可采用此种探测方式进行地质超前预报。

2.2 测量参数的选择

地质雷达的测量参数有中心频率、发射天线与接收天线间距、测点间距、采样频率、样点数、叠加次数、时窗等。其中, 对探测结果有显著影响的参数为中心频率、天线间距和测点间距。

天线中心频率越高, 要辐射同样大小的功率, 其天线尺寸可以做得较小, 但频率越高, 能量衰减也就越大, 探测距离就近, 但其分辨率较高。因此, 天线中心频率的选择要考虑的因素为目标体的深度、目标体的最小尺寸 (或者说所关心的最小尺寸) 和天线的尺寸。天线中心频率确定后, 采样频率、样点数和叠加次数可进行相应的选择。一般采样频率为天线中心频率的10倍左右, 最小不低于中心频率的6倍。

同一地层, 采用不同的发射、接收天线间距, 则目标体的回波信号强度也不同, 因此, 存在一个使反射波振幅达到最大的最优天线间距。地层的电导率不同, 最优发射、接收天线间距也有所不同。实际探测时, 可根据地层条件和场地条件通过试验和经验来选取最优间距。

测点间距的选择取决于天线的中心频率和介质的介电常数。在进行地质超前预报时, 选择的测点间距至少要能保证采集到40道雷达数据, 以利于雷达图像的解释。

3 应用实例

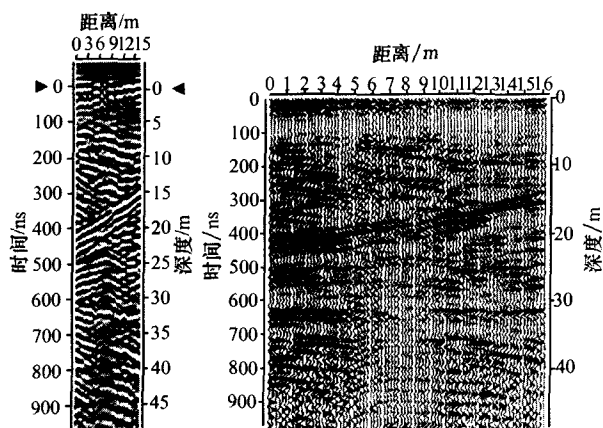
下面介绍地质雷达在某高速公路3条隧道的应用情况。隧道1全长1974 m, 地质条件以原结构已基本破坏的全风化花岗岩、岩芯破碎的软岩质强风化千砂岩、局部岩芯不完整的弱风化千枚状板岩和其他裂隙发育的岩层为主, 且有5条构造破碎带穿过隧道, 断层破碎带内, 地下水较丰富, 并且局部存在岩溶水, 进口围岩极差。隧道2全长1655 m, 隧道顶板近岩溶及地表, 岩溶充填软塑粘土, 爆破震动易垮塌, 微张、张扭性或压扭性节理发育, 受力极易打开, 局部发育溶蚀空洞或沟缝, 岩芯为部分碎块或碎石状, 含少量炭质, 具轻微硅化或硅质胶结, 且含构

造裂隙破碎带及上下盘。含构造脉状水,岩芯破碎,为松散或压碎状镶嵌结构。进出口均为上部硬塑状,下部软塑,呈蠕动状松散结构的残破积碎石亚粘土,断层破碎带内,地下水较丰富,并且局部可能存在岩溶水,因此,地质条件差。隧道3全长1 039 m,围岩为蠕动松散结构的淤泥质软土,岩层风化强烈,以碎块、片状为主,手捏易破碎,风化节理发育,岩石多切割呈碎石-碎块状,岩石软,锤击易碎散,坡度变化起伏。

现场采用瑞典MALA地质雷达(RAMAC/GPR)进行探测,主机为CU II,采用的主要技术参数为:(1)50 MHz非屏蔽天线,天线间距1 m。(2)100 MHz屏蔽天线;天线间距0.5 m。记录时间、叠加次数和采样率根据天线中心频率选取,并根据实际情况做适当调整。主要采用点测方式探测,条件允许时辅以连续扫描进行对比检验。

3.1 裂隙的地质雷达图像

图2是一裂隙的探测图像,面对掌子面自左向右探测得到。从图像中可以看出,出现了连续的反射波界面,反射界面明显,反射面附近波幅显著增强。后经开挖证实,掌子面前方有1条与隧道中心线大角度斜交的压性节理面,并贯穿整个隧道断面,预报结果与实际情况吻合。



(左图为利用采集软件 Groundvision 直接得到的图像;
右图为利用 Reflexw 软件处理后得到雷达图像。下同)

图2 掌子面前方为裂隙的雷达图像

Fig.2 Radar wave of joint fissure in heading face ahead

3.2 断层的地质雷达图像

地质雷达对断层有较好的探测效果,如图3所示。从图像可以看出,掌子面前方有明显的强反射存在,经过多次测试,重复性极好,图像特征为:界面反射强烈,反射面波幅增强,反射波同相轴的连线为破碎带的位置。后经开挖证实,掌子面前方有1条压

性小断层破碎带和2条节理面与隧道相交,走向与隧道中心线交角接近 90° ,预报结果与实际情况基本吻合。

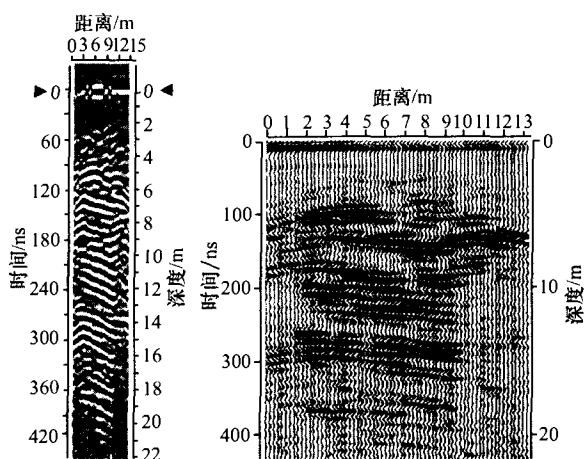


图3 掌子面前方为断层的雷达图像

Fig.3 Radar wave of fault fracture in heading face ahead

3.3 溶洞的地质雷达图像

当隧道通过溶洞发育区域时,除了要在掌子面处探测其前方地质状况外,还要对隧道侧壁进行探测,以发现不利于隧道运营的地质状况。图4是对隧道侧壁探测的雷达图像。从雷达图像可以看出,探测面前方有明显异常存在,结合地质状况,推断前方为溶洞,建议施工方及时采取措施以免对隧道后期运营产生不良影响。后经证实,探测面前方为一夹少量粘土的溶洞。

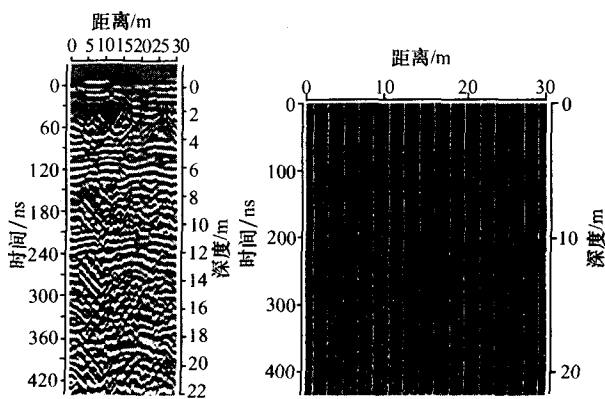


图4 掌子面前方为溶洞的雷达图像

Fig.4 Radar wave of limestone cave in heading face ahead

3.4 含水裂隙的地质雷达图像

图5是一含水裂隙的雷达图像,左图为点测得到的图像,右图为连续探测得到的图像。从雷达图像可以看出,点测和连续探测结果基本一致。探测时掌子面为千枚状板岩,有少量渗水,从图像可以看出,掌

子面前方地质情况可分为左、中、右3个部分。后经开挖证实,左侧围岩完整性相对较好,中间有一夹层,右侧节理裂隙较发育并有少量滴水。

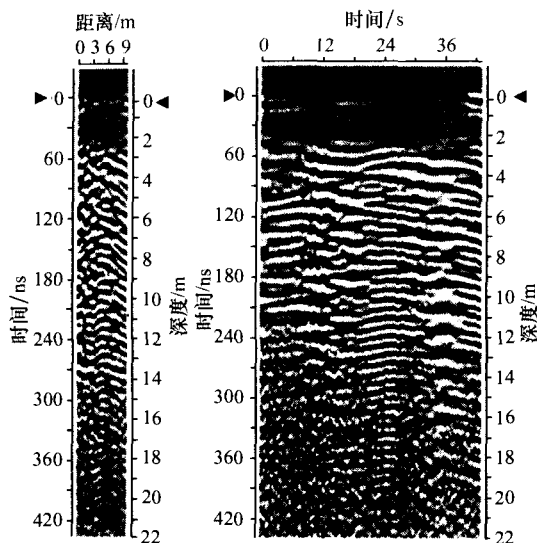


图5 掌子面前方为含水裂隙的雷达图像

Fig.5 Radar wave of fissure containing water in heading face ahead

3.5 软弱夹层的地质雷达图像

图6为一软弱夹层的雷达图像,面对掌子面自左向右探测得到。从图中可以看出,掌子面前方有明显强反射存在,经反复探测,重复性极好。从雷达图像可以看出,界面反射强烈,连续性较好,16 m之后基本无反射波信号。结合地质观察及地质勘查资料,推断掌子面前方为煤层。这一探测结果被后来的开挖观测结果所证实。

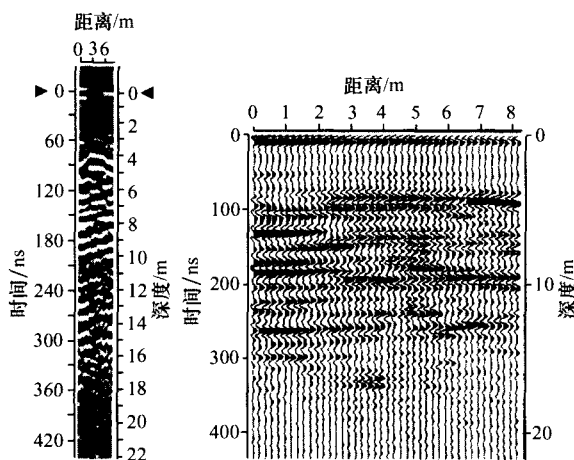


图6 掌子面前方为软弱夹层的雷达图像

Fig.6 Radar wave of feeble stratum layer in heading face ahead

4 结语

(1) 采用地质雷达探测隧道掌子面前方地质状况是一种快速便捷、对施工影响小的探测方法。

(2) 在实施探测的同时,可对采集到的雷达波形进行粗略判断,如发现异常状况,应反复探测并采用不同的探测方式(点测和连续探测),从而确保探测的准确性。

(3) 采用100 MHz天线可对掌子面前方20 m范围内的地质状况做出较好的判断,不同的不良地质状况,可能有相似的雷达图像,因此,结合掌子面地质观察,可以提高判断的准确性。

(4) 由于实际隧道开挖过程中,掌子面往往不平整,这不但增加了探测的难度,同时对探测的结果也有一定的影响。

(5) 探测过程中经常会有干扰因素存在,如隧道台车和装载机等施工机械,因此,如何正确识别干扰,从而得到正确的分析结果至关重要。

(6) 地质雷达是一种正在不断发展的无损探测技术,对不良地质状况的探测效果良好,但准确率不可能达到百分之百,对雷达图像异常情况的解释判断,需要积累大量的实际经验。

参考文献:

- [1] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 吴永清, 何林生. 地质雷达在公路隧道的应用 [J]. 广东公路交通, 1998, 54: 111-114.
- [3] 高才坤, 郭世明. 采用地质雷达进行掌子面前方地质情况预报 [J]. 地质与勘测, 2000, 3: 11-13.
- [4] 唐龙, 孙晓宾. 应用地质雷达探测隧道地质构造 [J]. 山西建筑, 2001, 27 (3): 148-149.
- [5] 万千里. 地质雷达探测在大茅左隧道施工中的应用 [J]. 公路, 2002 (12): 139-142.
- [6] 吴俊, 毛海和, 等. 地质雷达在公路隧道短期地质超前预报中的应用 [J]. 岩土力学, 2003, 24 (1): 154-157.
- [7] 代高飞, 夏才初, 等. 地质雷达在隧道超前预报中的应用 [J]. 西部探矿工程, 2004, 9: 116-118.
- [8] 匡文龙, 古德生, 等. GPR在高速公路隧道掘进中掌子面前方岩体结构超前预报工作中的应用 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (9): 111-114.
- [9] 张志龙, 王兰生, 等. 公路隧道施工超前地质预报技术方法研究现状综述 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (9): 126-128, 136.
- [10] 夏才初, 潘国荣. 土木工程监测技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 245-280.