

文章编号:1672-3961(2009)04-0082-05

地质雷达在岩溶隧道超前预报中的应用

高阳,张庆松,原小帅,许振浩,刘斌

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要:地质雷达是一种广泛用于地质探测的高频电磁脉冲波技术.针对湖北大广南高速公路建设中紫荆山岩溶隧道实际工程,为了探明隧道周边岩溶等不良地质体,采用地质雷达中连续测量方法进行信号采集,并通过增益调节、滤波处理等方法对采集信号进行处理.通过结合裂隙、溶洞、富水岩体三个典型实例,分析并总结了它们的地质雷达反射波的具体特征,分别表现为节理裂隙反射波同相轴杂乱、岩溶裂隙反射波的带状分布、溶洞反射波的“双曲线反射”、富水岩体反射波的主频显著降低和能量迅速衰减等.这些特征有助于断定出不良地质体的具体位置和规模,从而为保障隧道的安全施工提供了一定依据.

关键词:地质雷达;超前地质预报;岩溶隧道

中图分类号:TD163 **文献标志码:**A

Application of geological radar to geological forecast in karst tunnel

GAO Yang, ZHANG Qing-song, YUAN Xiao-shuai, XU Zhen-hao, LIU Bin

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Geological radar is one kind of the electromagnetic wave technologies with high frequency, which is widely used in geological exploration. According to the Zijingshan karst tunnel engineering during the Daguangnan Highway construction in Hubei, a continuous mode was adopted to collect signals by geological radar in order to detect an adverse geological body. Signals collected were processed by gain control and filtering processing. Combining with the typical examples of fissure, karst cave and water-bearing rock mass, the specific characteristics of their radar reflection were analyzed, such as unorganized events in reflection of joint fissure, zonal distribution in reflection of karst fissure, hyperbola in reflection of karst caves, the decrease of frequency and energy in reflection of water-bearing rock mass. These characters are helpful for estimating the concrete position and scale of an adverse geological body and can provide a basis to protect the safety of tunnel construction.

Key words: geological radar; geological forecast; karst tunnel

0 引言

探地雷达技术(ground penetrating radar, GPR)是利用高频电磁脉冲波的反射探测地下目的体分布形态及特征的一种方法^[1].1904年,德国人 Hulsemeyer 首次尝试用电磁波信号来探测远距离地面金属体.1926年,Hulsenbech 首次利用电磁脉冲技术研究地下岩性构造并获得成功,他指出地质雷达研究领域的一条基本理论根据,即电磁波在介电常数不同的

介质交界面上会产生反射.70年代以来,随着电子技术的发展以及现代处理技术的应用,地质雷达技术得到了巨大发展,覆盖了考古、矿产资源勘探、工程地质勘察、建筑结构调查、公路工程质量检测、地下管线探测等众多领域.探地雷达基本原理国外出现了许多商业化的探地雷达系统,其中具有代表性的有美国地球物理探测设备公司的 SIR 系统、加拿大探头及软件公司的 PULSE EKKO 系列、瑞典地质公司的 RAMAC 钻孔地质雷达系统及日本应用地质株式会社的 GEORADAR 系列等^[2].

收稿日期:2009-05-19

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(Y2008F22);国家自然科学基金资助项目(50874068)

作者简介:高阳(1984-),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事隧道与地下工程方面研究工作. E-mail:highsun117@163.com

1 地质雷达的工作基本原理

探地雷达的基本原理如图 1 所示.发射天线将高频短脉冲电磁波定向送入地下,电磁波在传播过程中遇到存在电性差异的地层或目标体就会发生反射和透射,接收天线收到反射波信号并将其数字化,然后由电脑以反射波波形的形式记录下来.对所采集的数据进行相应的处理后,可根据反射波的旅行时间、幅度和波形判断地下目标体的空间位置、结构及其分布.

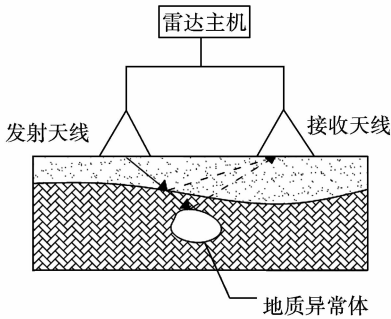


图 1 地质雷达探测原理

Fig.1 Simplified schematic of geological radar

1.1 电磁波传播特征

地质雷达探测过程中,雷达电磁波可近似为均匀平面电磁波.在往地下介质传播过程中,他的电场分量瞬时波动方程为^[3]

$$E_x(r, t) = E_0 e^{-\beta r} \cos(\omega t - \alpha r), \quad (1)$$

其中, E_0 为 $r = 0, t = 0$ 时的电磁场强度; β 为衰减系数; α 为相位系数; r 为传播距离, ω 为电磁波的角频率.

探地雷达的电磁脉冲在介质中的传播速度为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (2)$$

其中 c 为电磁波在空气中的传播速度, ϵ 为介质的介电常数,常见介质的介电常数如表 1 所示.

表 1 常见介质的介电常数

Table 1 Dielectric constant of common medium

| 材质 | 相对介电常数 | 电导率/($\text{ms}\cdot\text{m}^{-1}$) | 速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) |
|--------|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 粉质粘土 | 6.00 | 6.60 | 0.12×10^9 |
| 干砂 | 3.00~5.00 | 0.01 | 0.13×10^9 |
| 湿砂 | 20.00~30.00 | 0.10~1.00 | 0.06×10^9 |
| 金属 | 300.00 | 1.00×10^{10} | 0.02×10^9 |
| PVC 塑料 | 3.30 | 1.34 | 0.16×10^9 |
| 混凝土 | 6.40 | 0.50~2.00 | 0.12×10^9 |
| 空气 | 1.00 | — | — |
| 水 | 81.00 | — | — |
| 灰岩 | 4.00~8.00 | — | — |
| 花岗岩 | 4.00~7.00 | — | — |
| 砂岩 | 6.00 | — | — |

1.2 电磁波的反射

地质雷达在探测过程中,雷达电磁波在传播过程中遇到不同的波阻抗界面时,将同时产生反射波和折射波,它们均遵循波的反射和透射定律.而在雷达探测过程中,我们主要关心的是反射波.反射波的强弱取决于反射系数 k ,在隧道工程的探测中可表示为

$$k = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}, \quad (3)$$

式中, ϵ_1, ϵ_2 分别表示界面上下介质的相对介电常数.

在隧道工程的地质雷达探测中,围岩的相对介电常数通常为 4~9,而与不良地质体溶洞(空气相对介电常数为 1)、水(相对介电常数为 81)或者泥(介电常数介于土和水之间)有显著差异.差异越大则反射系数越大,更有利于探测,这就给地质雷达探测带来了极大优势.

根据电磁脉冲的传播规律,在地质界面上如果反射系数为负,则相位与发射脉冲相反,若反射系数为正,则相位与反射脉冲一致.

2 地质雷达在紫荆山隧道中的实际应用

2.1 工程概况

紫荆山隧道区为构造剥蚀——溶蚀低山丘陵地貌,地处富水河主流与其支流——八湘河间之次级分水岭,为鄂东南侵蚀——剥蚀山地余脉越岭地段,地势较高.隧道穿越主要岩石地层为三叠系大冶组和二叠系下同茅口组层状弱风化灰岩,岩溶不良地质现象十分发育,地表有溶洼地、溶洞、溶沟、溶槽、落水洞、泉眼等,地下则形成溶洞、溶隙、岩溶管道等,岩溶水丰富.同时,隧道穿越三条断层,断层带岩石破碎,岩溶发育,施工时极易发生突水突泥.在 16.1 km^2 范围内,有一定规模,较易识别的岩溶塌陷、天坑、暗河出口、漏斗等岩溶形态有 50 多处,溶蚀洼地部分一般分布有第四系土层.

由于隧道施工区域的地质复杂性,查明隧道掌子面前方岩层的裂隙、岩溶、断层等不良地质因素,对隧道进行超前地质预报则显得尤为必要.通过地质雷达预测掌子面前方的不良地质,及时变更施工方案,保证施工的安全进行.

2.2 采集信号时注意事项

(1) 进行掌子面探测时,要尽量保持掌子面的平整,以保证天线在移动过程中能匀速移动并能贴紧掌子面.否则,容易造成采集信号的异常.

(2) 在采集过程中要及时记录环境中的干扰信号,如金属管件、台车等的反射信号.如不参考现场记录则很容易将其判断为地质异常体.在记录过程中,要记录干扰物的性质及其与侧线的位置关系,以便分析.

(3) 天线移动过程中要及时打码,并且标记位置准确.

2.3 数据处理

由于隧道内岩体构成的复杂性及各种介质对电磁波反射和吸收程度的差异,同时受到外界的各种干扰,使得接收天线接收到的雷达波后,振幅降低、波形杂乱,难以直接从图像识别岩体的构成,所以要接收到的信号进行适当处理.

(1) 增益调节:采用自动增益或手动控制增益用来补偿介质吸收和抑制杂波;增益点的作用是使记录线上的不同时段有不同放大倍数,使各段的信号都能清楚的显现出来.点之间的增益是线性变化的,以免由增益剧增造成假象“强反射”.增益的变化是平滑的.增益太大将造成削顶,增益太小将丢失弱小信号.

(2) 滤波处理:由于高频和低频信号往往掩盖了真实有用的信号,可以通过滤波处理和时频变换用来去除高频和低频信号,以降低外界不良干扰的影响.滤波分垂向滤波和水平滤波,垂向滤波又分高

通和低通,高通频率选为天线频率的 $1/5 \sim 1/6$,高于这个频率的信号顺利通过,相当于带通滤波器里的低截频率.垂向低通频率选为天线频率的 $2 \sim 3$ 倍,低于该频率的波顺利通过,相当于带通滤波器里的高截频率.水平滤波分水平平滑和背景剔除,以消除仪器和环境的背景干扰^[4].

此外,反卷积去除雷达信号在反射界面多次反射和偏移处理绕射现象的技术也得到较大的发展^[56].

3 典型雷达图像分析

3.1 裂隙的地质雷达图像

裂隙主要分为节理裂隙和岩溶裂隙两种.节理裂隙反射波同相轴杂乱,反射界面错乱,如果当岩层比较破碎时,频谱较宽,主频特征不明显,并且波幅衰减很快.

而溶蚀裂隙和溶洞则十分相似,它们的形成过程本质上相同,只是发育形态上有所区别.岩溶裂隙在雷达图像中常为带状分布,随内部填充物的不同而相位发生变化,同时内部同相轴发生错断.如图2,在区域A处存在一强反射面,且同相轴较为连续,从右侧相位途中可以明显看出其相位连续发生偏转,这说明其介电常数发生显著变化.后经开挖验证,该处发育有一条带状岩溶裂隙,裂隙部分为泥质填充.

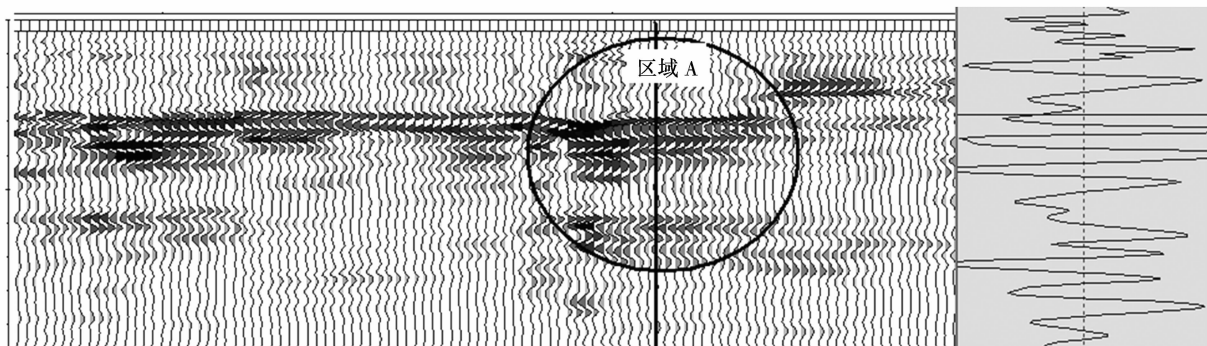


图2 裂隙的地质雷达图像
Fig.2 Geological radar wave of fissure

由于断层两侧岩层的挤压或张拉而在断层处极易形成比较大的破碎带,所以断层破碎带内岩石的孔隙度和含水率与完整岩石差别较大,从而使电磁波穿过断层界面进入破碎带时反射强度增大、波形振幅增大,在图像中容易识别.当电磁波通过时破碎带内断层角砾和断层泥(特别是泥质成分较多时)等填充物时,往往导致形成比较宽的频带特征,主频特征不明显.因此,由于断层内的填充物成分复杂,且厚度有限,不实际揭露而仅靠雷达探测是不能搞清楚填充物的详细赋存状况的^[7].

3.2 溶洞的地质雷达图像

岩溶发育是岩溶隧道不同于其它隧道的显著特点,也是其高风险的重要因素.因此在隧道施工过程中,对岩溶的超前地质预报则显得尤为重要.

岩溶发育应有可溶性、渗透性岩石(如灰岩)和具有溶蚀性流动的水.而溶洞内填充物与可溶性岩层之间存在着明显的物性差异.这些填充物一般是碎石、水、土和空气中的一种或者几种.

致密灰岩的雷达图像特征是非常微弱的反射,内部的某些不规则强反射则是由于局部小裂隙充填

的方解石脉所引起.而溶洞雷达图像特点是被溶洞侧壁**的强反射所包围的弱反射空间**,即界面反射是强反射,且常伴有弧形绕射现象,即“双曲线反射”.这是由于当溶洞洞径远小于测线长度时,天线在移动过程中,由逐渐靠近到远离溶洞的过程.溶洞底界面的反射则不太明显,当溶洞为空洞或充水时,洞体内雷达波几乎是没有反射的,当溶洞充填物质时,内部的形成不规律的反射波,且同相轴错断.而岩溶的

形成是多种多样的.一般多种岩溶的形态叠加在一起,形成各种各样的岩溶形态.如在垂直方向沿裂隙发育容易形成串珠状的隐伏溶洞、溶斗.如何分辨这些复杂岩溶,是探地雷达探测的难点.如下图3,可以从中看出存在有两处明显的即“双曲线反射”现象,同相轴杂乱,推测其内部为碎石填充.从右侧相位图中可以看出,其相位发生偏转且为正反射,推测此溶洞为部分填充,顶部存在空洞.

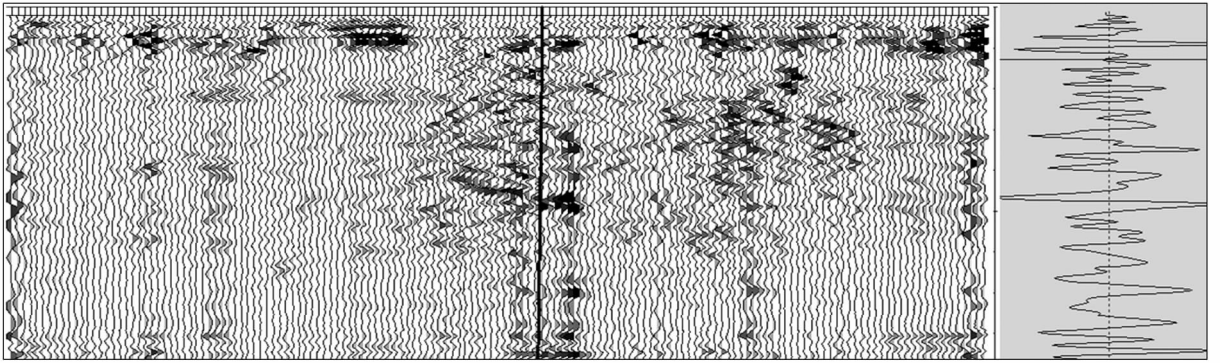


图3 溶洞的地质雷达图像
Fig.3 Geological radar wave of karst cave

3.3 富水岩体的地质雷达图像

电磁类预报方法对水较为敏感,一般雷达波遇水体有如下几个特点^[8]:

- (1) 雷达波对水和含水率高的介质的反射强烈,反射波强度大;
- (2) 雷达波从其他介质到含水层界面的反射波相位与入射波相反;
- (3) 雷达波通过含水层后,高频成分被吸收,反射波的优势频率降低^[9-10].

由于具有以上原因,而在雷达探测中,富水岩体中反射波的脉冲周期明显增大,并且通过富水岩体后能量很快衰减,削波现象严重,故而在雷达图像中富水岩体处为强反射带,且反射波主频显著降低,相位发生翻转,有时会产生绕射、散射现象导致波形紊乱,而在富水带之后区域探地雷达只能接收到微弱的反射回波信号,故而探测距离受到较大限制.如下图4圆圈处,反射波为强反射,说明此处为含水层界面,在穿过含水层时,雷达波周期明显增大且削波严重.

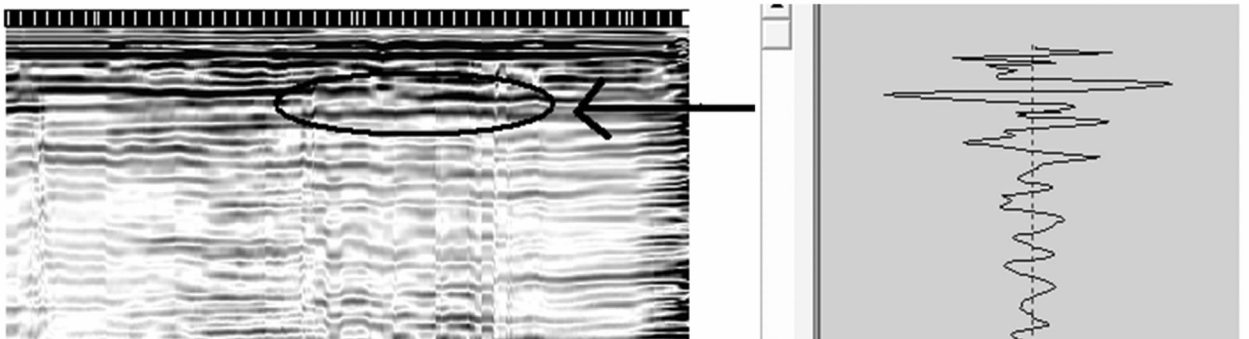


图4 富水岩体的地质雷达图像
Fig.4 Geological radar wave of watery rock

4 结语

通过在紫荆山高风险岩溶隧道中进行的多次地质雷达超前探测,得到了如下认识:

- (1) 地质雷达及时预报隧道前方的不良地质

体,如溶腔、裂隙破碎带等,有效保证了隧道内人身财产安全.

- (2) 节理裂隙反射波同相轴杂乱,反射界面错乱,如果当岩层比较破碎时,频谱较宽,主频特征不明显,并且波幅衰减很快.
- (3) 岩溶裂隙在雷达图像中常为带状分布,随

内部填充物的不同而相位发生变化,同时内部同相轴发生错断。

(4) 溶洞雷达图像特点是被溶洞侧壁的强大反射所包围的弱反射空间,即界面反射是强反射,且常伴有弧形绕射现象,即“双曲线反射”。

(5) 富水岩体处在雷达图像中为强反射带,且反射波主频显著降低,相位发生翻转。当雷达波穿过富水岩体时,反射波的脉冲周期明显增大,并且通过富水带后能量很快衰减,削波现象严重,呈雪花状。

(6) 地质雷达的探测深度和精度受岩体性质影响较大,围岩完整性越好,探测深度和精度就越高。

(7) 地质雷达在进行现场探测时,极易受到施工现场的干扰,尤其是金属物的影响。进行雷达探测时,应准确记录现场实际情况,才能排除干扰,保证雷达准确性。

参考文献:

- [1] 白冰,周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2001,20(4):527-531.
BAI Bing, ZHOU Jian. Advances and applications of ground penetrating radar measuring technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(4):527-531.
- [2] 杜树春. 地质雷达及其在环境地质中的应用[J]. 物探与化探, 1996,20(5):384-392.
DU Shuchun. Geologic radar and its application in environmental geology [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2001, 20(5):384-392.
- [3] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社, 1994.
LI Daxin. Ground penetrating radar method and application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [4] 陈礼伟. 地质雷达检测隧道衬砌质量中的问题研究[J]. 岩土力学, 2003,24(10):146-149.

- CHEN Liwei. Application of penetrating radar to detecting concrete quality in tunnel engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(10):146-149.
- [5] 肖兵,周翔,汤井田. 探地雷达技术及其应用和发展[J]. 物探与化探, 1996,20(5):378-383.
XIAO Bing, ZHOU Xiang, TANG Jingtian. Ground-searching radar and its application and development[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 20(5):378-383.
- [6] MAIJALA P. Application of some seismic data processing methods to ground penetrating radar data[C]// Proc Fourth Int. Conference on Ground Penetrating Radar. Finland: Rovaniemi, 1992: 103-110.
- [7] 刘传孝,蒋金泉,杨永杰. 断层特征参数地质雷达探测与识别的应用研究[J]. 岩土力学, 2004,25(5):832-838.
LIU Chuanxiao, JIANG Jinquan, YANG Yongjie. Research on application of ground penetrating radar to detecting and identifying parameters of faults[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5):832-838.
- [8] 李术才,薛翊国,张庆松. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,27(7):1297-1307.
LI Shucai, XUE Yiguo, ZHANG Qingsong. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7):1297-1307.
- [9] CREMER F, DE JONG W. Klammer schutte fusion of polarimetric infrared features and GPR features for landmine[C]// The 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). Delft, Netherlands: [s.n.], 2003:1-6.
- [10] BROOKS J W. Applications of GPR technology to humanitarian demising operations in Cambodia: some lessons learned[R]. [S.l.]: Brooks Enterprises International Inc, 1996: 1-9.

(编辑:陈燕)