

探地雷达技术在岩溶探测中的应用

崔阿李¹, 刘康和²

(1 山西省万家寨引黄工程管理局, 山西 太原 030012; 2 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要: 以黄河万家寨库区右岸岩溶探测为例, 论述了雷达探测方法的技术及其工作原理, 并结合岩溶探测实例, 分析了岩溶地质现象所产生的雷达波场异常的空间展布特征, 划定了该测区溶洞、溶蚀裂缝等岩溶地质异常的空间展布范围, 验证结果表明: 探地雷达技术在浅层岩溶探测中的有效性。

关键词: 探地雷达; 岩溶; 水利枢纽; 波场; 空间分布

中图分类号: P631.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)02-0197-03

Application of Ground Penetrating Radar(GPR) Technology in Karst Survey

CUI A-li¹, LIU Kang-he²

(1. Shanxi Wanjiashai Yellow River Diversion Project Administration, Taiyuan 030012, Shanxi, China;

2. China Water Resources Beifang Investigation Design and Research Company Limited, Tianjin 300222, China)

Abstract Through analyzing the Karst survey result of the right bank in the reservoir area of Wanjiashai hydro-junction, the application of GPR technology in the survey of Karst is studied. The GPR technique and its working method principle are introduced. The abnormality of radar wave field distribution produced by Karst is analyzed, and the Karst cavern and fracture range are detected by GPR technique. Verified results show that the GPR technique is effective to detect karst at shallow depth.

Key words: ground penetration radar(GPR); Karst; hydro-junction; wave field; space distribution

0 引言

探地雷达具有分辨率高、定位准确、快速经济、灵活方便、剖面直观、实时图像显示等优点, 在岩土工程勘察、工程质量无损检测、水文地质调查、生态环境检测、城市地下管网普查、文物及考古探测等众多浅层勘察领域得到较广泛的应用^[1-4], 并取得较好的效果。在浅层岩溶探测中, 也显示出探地雷达技术的优越性和准确性。

1 基本理论

探地雷达与探空雷达相似, 其探测原理为利用高频电磁波以宽频带短脉冲的形式, 由地面通过发

射天线向地下发射, 当它遇到地下地质体或介质分界面时发生反射, 返回地面, 被布设在地表的接收天线接收, 并由主机记录下来, 形成雷达波剖面图。由于电磁波在介质中传播时, 其路径、电磁波场强度以及波形将随所通过介质的电磁特性和几何形态而发生变化, 因此, 根据接收到的电磁波特征, 即波的旅行时间(亦称双程走时)、幅度、频率和波形等, 经过雷达波场资料的处理和分析, 可确定地下界面或目标体的空间位置或结构特征^[3-4]。

2 探地雷达技术的应用

2.1 测区概况

测区位于黄河万家寨水利枢纽库区右岸阳壕

收稿日期: 2007-09-20

基金项目: 黄河万家寨水利枢纽有限公司万家寨库区岩溶综合研究基金项目(WJZ2005-18)

作者简介: 崔阿李(1967-), 女, 山西太原人, 高级工程师, 从事工程勘察管理与研究工作。E-mail: eli6701@sina.com

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

沟内,地表为第四系黄土,局部地段受水库蓄水的影响使得表层黄土受冲刷伴有陷落现象,沟壁多处已出现塌滑。下伏基岩为奥陶系中统灰岩,风化程度较高,溶蚀洞、溶蚀裂缝发育。

理论及实践经验表明:黄土、灰岩之间以及溶蚀洞、溶蚀裂缝带与围岩之间存在较大的电性、电磁性差异^[5],具备探地雷达探测的物理前提。但测区场地狭窄,地形起伏相对较大,不利于雷达资料的采集以及探测成果的对比分析。

2.2 探测技术

2.2.1 资料采集

为便于对比分析,雷达测线一般沿沟底分段布设或沿沟壁等高线布置。

外业施工探测使用瑞典 MALA 公司生产的 RAMAC/GPR 探地雷达系统^[2],天线中心频率 50 MHz,收发天线间距 2 m。实测采用剖面法,且收发天线方向与测线方向平行。记录点距 0.5 m,采样频率 905 MHz,单一记录迹线的采样点数为 512,迭加次数为 16,记录时窗为 565 ns。

2.2.2 资料处理

雷达资料的数据处理与地震反射法勘探数据处理基本相同,主要有滤波及时频变换处理、自动时变增益或控制增益处理、多次重复测量平均处理、速度分析及雷达合成处理等,旨在提高有效信息的信噪比,突出目标体的波场特征,为进一步解释提供清晰可辨的图像^[3,6-7]。处理后的雷达剖面图和地震反射的时间剖面图相似,可依据该图进行地质解释。

根据以往工程经验和已知钻探揭露地层校准,该区第四系黄土雷达波速为 0.07~0.09 m/ns,奥陶系灰岩雷达波速为 0.10~0.13 m/ns,结合处理后的雷达剖面图中目标体的双程反射时间,即可得出目标体的埋深或倾向。

2.2.3 资料解释

探地雷达资料反映的是地下地层的电磁特性的分布情况,须把地质、钻探、探地雷达几方面的资料有机结合起来,建立测区的地质-地球物理模型,才能获得正确的地下地质结构模式^[1,6-7]。

雷达资料的地质解释步骤分为反射层拾取和时间剖面的解释。

(1)反射层拾取。根据勘探孔与雷达图像的对比分析,建立各种地层的反射波组特征,而识别反射波组的标志为同相性、相似性与波形特征等。

(2)时间剖面的解释。在充分掌握区域地质资

料、了解测区所处地质结构背景的基础上,研究重要波组的特征及相互关系,掌握重要波组的地质结构特征,其中要重点研究特征波的同相轴变化趋势。同时还应分析时间剖面上的常见特殊波(如绕射波和断面波等),解释同相轴不连续带的原因等。

2.3 实例分析

图 1 为黄河万家寨水利枢纽库区右岸阳壕沟沟底右侧坡脚 1[#]测线的雷达探测图像。此图由浅至深解释为:雷达波双程时间小于 110 ns 时呈现波形稳定、振幅较强、可连续追踪的似水平层状(局部有起伏,基岩面不平所致)反射同相轴,该特征为均质黄土在雷达图像上的反映,经定量解释该黄土层厚 6~8 m;黄土层以下灰岩即雷达波双程时间大于 110 ns 段(埋深 6~8 m)出现雷达波同相轴不连续或缺失或杂乱无章,说明该处灰岩岩体溶蚀现象严重,如该测线测点桩号 25~37 m,顶部埋深 9~10 m 处出现强反射弧,推测为洞径 3~4 m 的溶洞,但该溶洞周围溶蚀裂缝发育,部分尚未完全成洞;而该测线测点桩号 32~60 m,顶部埋深 21~22 m 处也表现为强反射弧,推测为洞径 4~5 m 的溶洞,但该溶洞已完全发育成洞。

图 2 为黄河万家寨水利枢纽库区右岸阳壕沟沟底左侧坡脚 2[#]测线(与 1[#]测线近平行)雷达探测图像。此图由浅至深解释为:雷达波双程时间 90~110 ns 时呈现波形稳定、振幅较强、可连续追踪的似水平

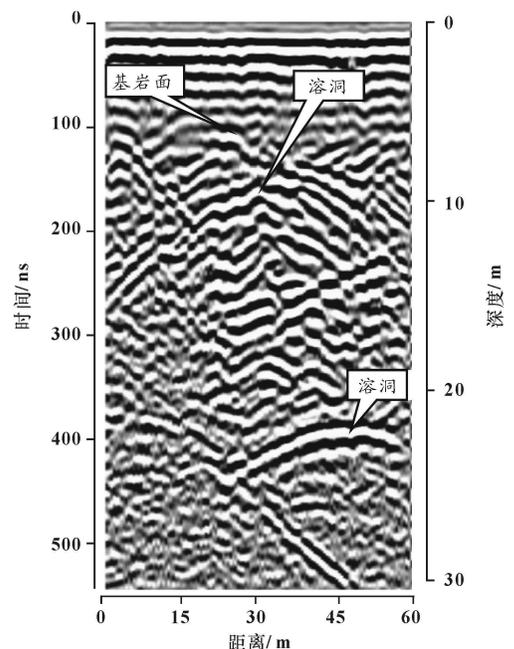


图 1 阳壕沟 1[#]测线雷达图像

Fig. 1 GPR Image of No. 1 Section at Yanghaogou

层状(局部有起伏,基岩面不平所致)反射同相轴,该特征为均质黄土在雷达图像上的反映,经定量解释,该黄土层厚 6~7 m;黄土层以下灰岩即雷达波双程时间 90~110 ns 段(埋深 6~7 m)出现雷达波同相轴不连续或缺失或杂乱无章,说明该处灰岩岩体溶蚀现象较严重,如该测线测点桩号 20~40 m,顶部埋深 12~13 m 处出现强反射弧,推测为洞径 3~4 m 的溶洞,但该溶洞周围及岩体内溶蚀裂缝发育,部分尚未完全成洞;而该测线测点桩号 58~65 m,顶部埋深 22~23 m 处也表现为强反射弧,推测为洞径小于 3 m 的溶洞,该溶洞也未完全发育成洞。

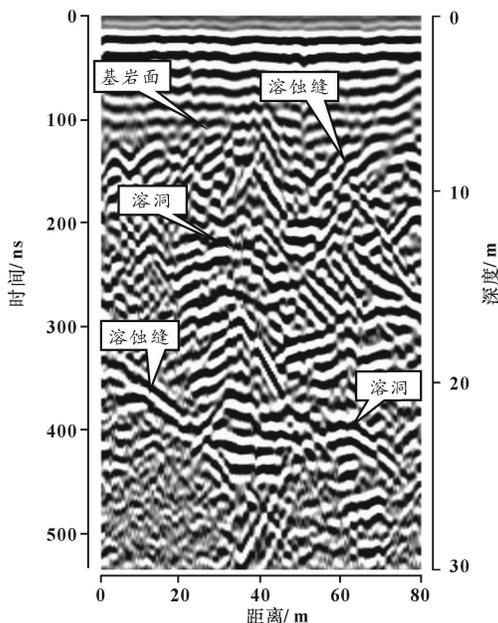


图 2 阳壕沟 2[#]测线雷达图像

Fig. 1 GPR Image of No. 2 Section at Yanghaogou

图 3 为黄河万家寨水利枢纽库区右岸阳壕沟谷底 3[#]测线(较 1[#]~2[#]测线远离黄河且其延长线与黄河近垂直)雷达探测图像。此图由浅至深解释为:雷达波双程时间 60~90 ns 时呈现波形稳定、振幅较强、可连续追踪的似水平层状(局部有起伏,基岩面不平所致)反射同相轴,该特征为均质黄土在雷达图像上的反映,经定量解释,该黄土层厚度 4.5~6.5 m;黄土层以下灰岩即雷达波双程时间 60~90 ns 段(埋深 4.5~6.5 m)出现雷达波同相轴不连续或缺失或杂乱无章,说明该处灰岩岩体溶蚀现象较严重,如该测线测点桩号 25~56 m,顶部埋深 10~11 m 处出现强反射弧,推测为洞径 5~6 m 的溶洞,但该溶洞周围及岩体内溶蚀裂缝发育,部分尚未完全成洞;而该测线测点桩号 80~100 m,顶部埋深约 17 m 处出现强反射半弧(由于地形关系未能全部测到),推测

为洞径约 5 m、洞顶中心在桩号 100 m 处的溶洞,该溶洞发育成洞相对较好。

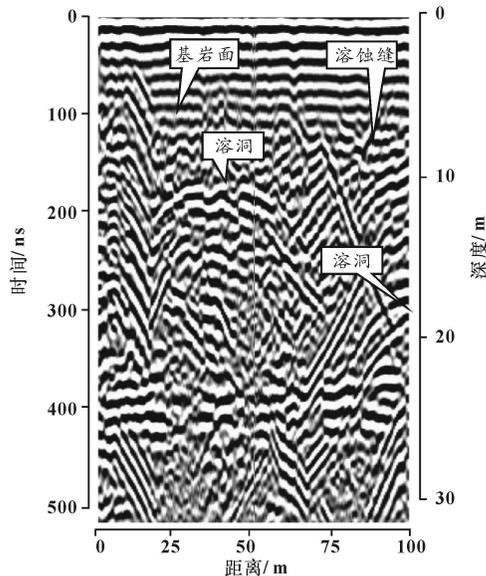


图 3 阳壕沟 3[#]测线雷达图像

Fig. 3 GPR Image of No. 3 Section at Yanghaogou

通过雷达探测成果的地质解释共划定地下灰岩岩体隐伏溶洞 2 个,溶蚀裂缝集中带多处,经地质钻探对部分物探成果验证,除洞径大小误差较大外,其他如埋深和位置基本与客观实际吻合,取得了较好的应用效果。

3 结语

(1)探地雷达在地下岩溶探测中,不但具有快速、非破损、高精度、经济等优点,而且还可形象地揭示溶蚀异常的空间展布规律,适宜于埋藏在地表以下 20~30 m 内的目标体探测。

(2)探地雷达技术可针对地下目标体实施大范围的连续扫描,能提供直观连续的剖面图和平面图,能有效弥补常规地质调查和钻探的不足,有利于岩溶区的灾害治理和地基评估。

(3)使用多种频率重复探测可以较好地处理不同深度、不同大小的目标体,并且可将不同频率的资料相互对比印证,提高解释的精度和可靠性。

参考文献:

[1] 王兴泰. 工程与环境物探新技术新方法[M]. 北京:地质出版社, 1996.
 [2] 刘康和, 杨 萍. 瑞马探地雷达及其工程应用[J]. 水电站设计, 1999, 15(4): 67-70.

(下转第 213 页)

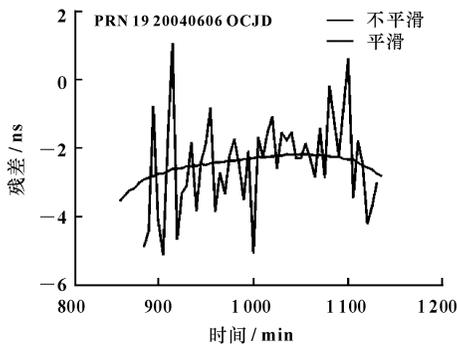


图 3 PRN19 平滑前后的卫星钟差残差比较

Fig. 3 Comparison of Clock Residuals Error Satellite

PRN19 Between Pseudo-Range and Smoothed Pseudo-Range

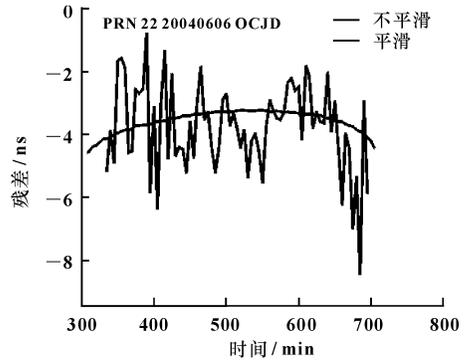


图 4 PRN22 平滑前后的卫星钟差残差比较

Fig. 4 Comparison of Clock Residuals Error Satellite

PRN22 Between Pseudo-Range and Smoothed Pseudo-Range

参考文献:

- [1] 季善标, 朱文耀, 熊永清. 精密 GPS 卫星钟差的改正和应用 [J]. 空间科学学报, 2001, 21(3): 42-48.
- [2] 范士杰, 郭际明, 彭秀英. GPS 双频相位平滑伪距及其单点定位的精度研究 [J]. 测绘工程, 2005, 14(4): 39-42.
- [3] Hatch R. The Synergism of GPS Code and Carrier Measure-

- ments [C] // Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, New Mexico USA, 1982.
- [4] 周忠谟, 易杰军, 周琪, 等. GPS 测量原理与应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 1999.
- [5] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型 [M]. 北京: 测绘出版社, 1998.

(上接第 199 页)

- [3] 刘康和. 地质雷达在水利工程质量检测中的应用 [J]. 长江理工大学学报, 2001, 18(1): 10-13.
- [4] 赵修军, 陈锁忠, 邹叶锋. 地质雷达在江苏宜兴段高速公路边坡勘测中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(1): 111-114.
- [5] 余中明, 丁强. 地质雷达探测工程的几个问题 [J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(增刊): 182-184.

- [6] Porsani J L, Sauck W A, Junior A O S. GPR for Mapping Fractures and as a Guide for the Extraction of Ornamental Granite from a Quarry: A Case Study from Southern Brazil [J]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 51(3): 177-187.
- [7] Beres M, Olivier R, Luetscher M. Integration of Ground Penetrating Radar and Microgravimetric Methods to Map Shallow Caves [J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 46(4): 249-262.