探地雷达在水利设施现状及隐患探测中的应用

邓 世 坤
(中国地质大学,湖北 武汉 430074)

摘要:简述探地雷达的一些基本原理,介绍探地雷达用于水利工程设施现状及隐患探测的 3 个实例,包括拦洪闸底板现状探测、海滨防浪堤隐患探测以及江堤滑塌成因调查。

关键词:探地雷达;水利工程设施;现状及隐患探测
中图分类号:P631.3;TV698 文献标识码:A 文章编号:1000-8918(2000)04-0296-06

水利历来是治国安邦的大事。中华民族的历史在某种意义上说就是一部与水斗争的历史。在古代,我们的祖先"择丘陵而处,逐水草而居"。随着经济社会的发展,人类逐步开始主动避害趋利,改造自然。新中国成立以后,中华民族的治水历史翻开了新的篇章。解放 50 多年来,新中国的水利建设事业取得了辉煌的成就,建设和整修大江大河大湖各类堤防 25 万多公里,建成大中小型水库 84 000 余座,建成大中小型水闸 31 000 多座[1]。

然而,随着时间的推移,现有的水利工程设施在长期经受各种自然与人为因素的影响后,都会在不同程度上遭到破坏,给工程的安全运行埋下隐患。对水利设施的现状进行物理检测,查明其隐患,为水利工程设施的整治和修复方案的制定提供可靠的依据,是现代地球物理方法发挥作用的一个广阔领域。探地雷达(又称地质雷达)方法作为地球物理探测技术的一个分支,具有探测效率高、对探测场地和目标无破坏性、探测资料具有较高的分辨率和较强的抗干扰能力等特点。因而将探地雷达方法用于某些水利工程设施的现状检测和隐患探查具有其独特的优越性。本文结合几个实例介绍探地雷达技术在水利工程现状和隐患探测中的应用。

1 探地雷达探测原理概述

探地雷达利用高频(主频为 $10^6 \sim 10^9$ Hz)电磁脉冲波进行工作。天线将电磁脉冲向地下发射,另一(或同一)天线接收来自地下电性差异分界面上的反射或散射回波,记录波在地层介质中的旅行时间和波形幅度,并采用与单道反射法地震记录相类似的形式显示雷达剖面。

探地雷达所探测的介质的电性及其分布以及探地雷达所采用的电磁脉冲的主频(中心频率)及频带宽度是决定雷达图像特征的关键因素。电磁信号在具有导电性的介质中行进时,采用位移电流和传导电流 2 种形式,因而电磁波在导电性介质中始终具有传播效应和扩散效应。考虑电磁感应效应对观测场值的大小及相位的影响是探地雷达剖面的正反演研究及成果解释进一步发展的一个重要方面。然而,传统的探地雷达技术通常忽略电磁感应因素的影响[2]。当电磁脉冲信号的频率高于一定频率值时,一般地质介质中位移电流远大于传导电流,电磁信号在介质中的行进以传播效应为主,电磁感应因素的影响可以忽略。这时可用几何光学特征来近似电磁波在介质中的传播特征。因此,在通常的探地雷达剖面上可以见到来自于地下介

收稿日期:1999-11-29;修回日期:2000-01-24

万方数据

质中电性分界面上的反射波同相轴 ;可以见到来自电性分界面上的断点或拐点的电磁波绕射(或衍射)现象,以及存在于探测介质中的空洞所产生的波的鸣震(或多次反射)现象。这些现象与反射地震剖面上所具有的特征完全相似,可以用来指导探地雷达剖面的分析与解释。

2　探地雷达在水利工程设施现状及隐患探测中的应用实例

2.1　苏家堡水利枢纽拦洪闸闸底板现状探测

苏家堡水利枢纽位于西辽河上游老哈河、西拉木伦河交汇口下游约 5 km 处。该枢纽于 1969 年 6 月建成。修建该枢纽的主要目的是用于抬高西辽河上游水位,调节河水用于灌溉河流两岸的土地 ;其次还兼有桥梁的作用,可供南北两岸的人畜及车辆通行。该枢纽由拦洪闸(主闸)和南北两岸进水闸组成,拦洪闸走向为南北向。共有闸孔 30 余个,每个闸孔的跨度为 6～7 m。枢纽自建成以来,由于年久失修,现已发现闸(桥)墩出现细微裂缝 ;通过严密的水准测量监测,发现闸身已发生轻度倾斜。由于长期的泥沙淤积,闸底板已被淤积层所覆盖(见图 1a),淤积层由饱含水的淤砂、淤泥质粉细砂组成,其平均厚度在前铺盖和闸室底板范围为 1.8～1.9 m ;在消力池部位淤积层厚度为 3.5～3.9 m。底板为钢筋混凝土构成,其厚度因不同部位而异,前铺盖和闸室底板较厚,钢筋含量较多 ;消力池部位底板较薄,钢筋含量较少。

本次探地雷达探测的目的是为了了解闸底板的现状,查清闸底板的断裂、裂缝的分布情况。该处河流只有在每年的 5 月底至 6 月初流量为最小,这时可以将河水人地为引导到一两个闸孔通过,保持其余闸孔无水流通过。探地雷达现场探测工作在河床表面进行。雷达测线沿平行闸身和垂直闸身走向布置。布线原则为保证在垂直于闸身走向的方向至少有 2 条测线穿过闸孔 ;在平行于闸身走向方向以 2～4 m 为线距布线(由于受闸墩的影响而不能均匀布线) ;测点距为 0.2 m。采用中心频率为 100 MHz 的天线。尽管河床表面比较平坦,但由于河水的冲刷,个别部位仍有 0.3～0.4 m 的高差存在。因此,在实测时以水准测量相配合,测定河床表面的高程,并根据闸底板原有高程可以大致确定各部位淤积层的厚度。

图 1b,c 为 2 条垂直闸底板走向的探地雷达剖面,两剖面分别位于不同联(4 个相邻的闸孔为一联)的闸孔。图 1b 中的探地雷达剖面对闸底界面及其形态反映清晰。图中浅部的 2 条水平同相轴由直达波和表面波组成 ;图 1b 中反映闸底界面的同相轴的轮廓与图 1a 中的闸底板断面形态基本一致。图 1b 中水平位置 0～16 m 段的闸底板反射波幅度比 16～31 m 段底板反射波幅度强,这是由于前铺盖和闸室底板钢筋混凝土的厚度大,钢筋含量高。图 1b 中的雷达图像显示剖面所在位置的闸底板无明显断裂裂缝存在。根据水准测量资料得出的淤积层厚度资料,可以求得淤积层的平均雷达波速度为 0.058 m/ns。图 1c 中的探地雷达图像反映出闸室部位的闸底板存在明显的断裂。图中 6～14 m 处的闸底板反射波同相轴明显错断,断点绕射十分清晰。图 1d 为采用二维克希霍夫积分法偏移处理后的显示闸底断裂存在的探地雷达图像[3]。由于与拦洪闸走向垂直的断面可看成理想的二维断面,因此,经偏移处理后的探地雷达图像能更清晰地反映闸底板断裂的位置和断距的大小。

2.2　某海滨防浪堤隐患探测试验

为了使防浪堤的加固和整治工作做到有的放矢,首先要查明堤内隐患的平面分布和空间位置。本次试验所探测的防浪堤为土石结构,堤芯为砂质粘土碾压堆积而成 ;岸表面为混凝土盖层,其厚度约为 0.2 m ;盖层表面按等间隔嵌入一排排石头短桩,以减缓海浪的冲击。由于长期经受海浪的冲刷,在混凝土盖层底下的土壤被淘空而形成隐伏的空洞。探地雷达探测的目的是查明空洞的平面分布和空间位置,并探明空洞的大小。

万方数据

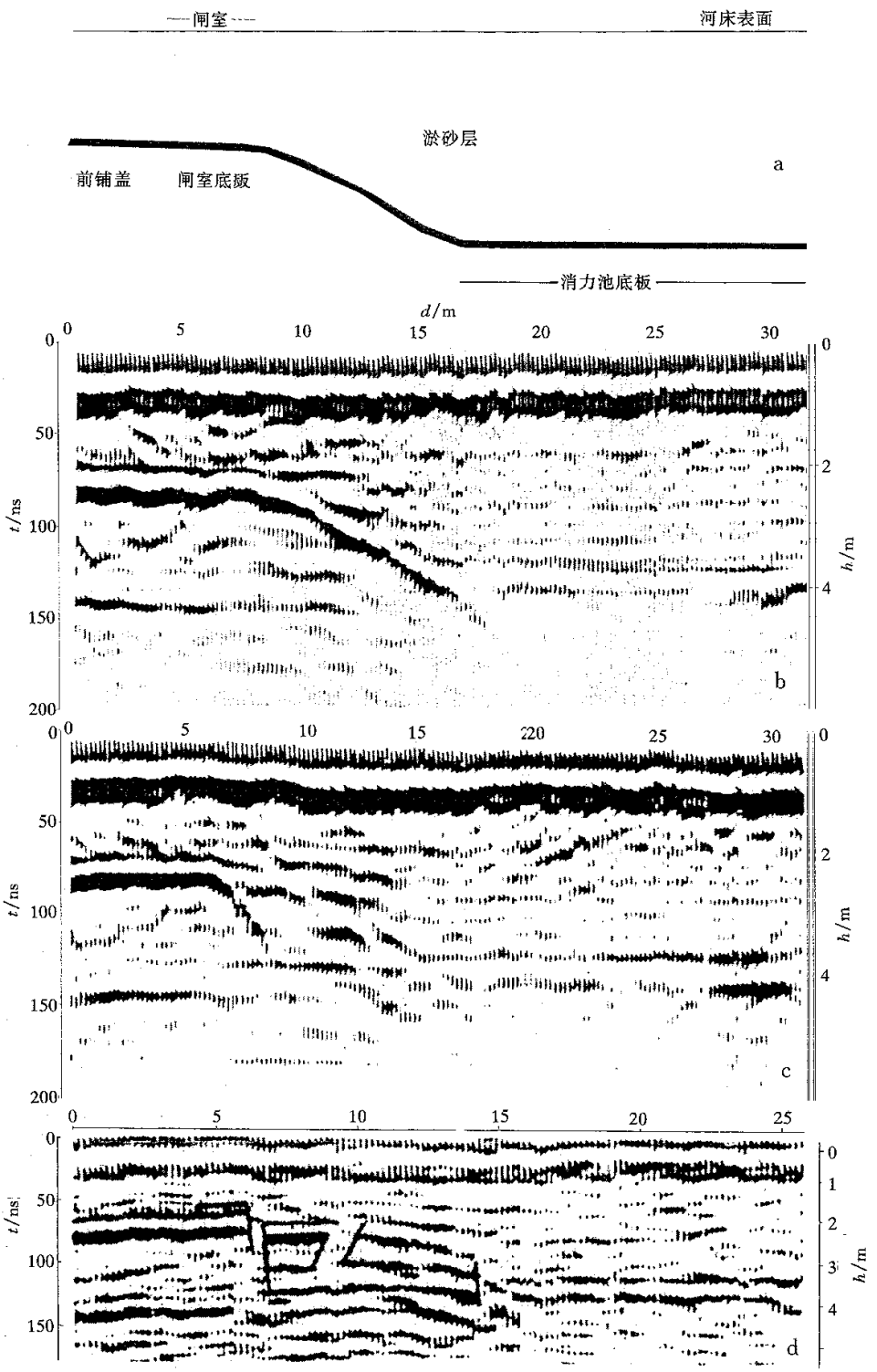

图 1 拦洪闸底板与河床的横断面示意及探地雷达图像

a—拦洪闸底板与河床的横断面示意；b—拦洪闸底板完好的探地雷达图像；c—拦洪闸底板有断裂存在的探地雷达图像；d—偏移处理后的闸底板断裂存在的探地雷达图像

万方数据

试验过程中,采用中心频率为 200 MHz 的天线,测点距为 0.5 m。图 2 为试验过程中所获得的探地雷达记录经背景扣除处理以后的雷达图像❶。图 2 中有 2 处明显的反映空洞的异常

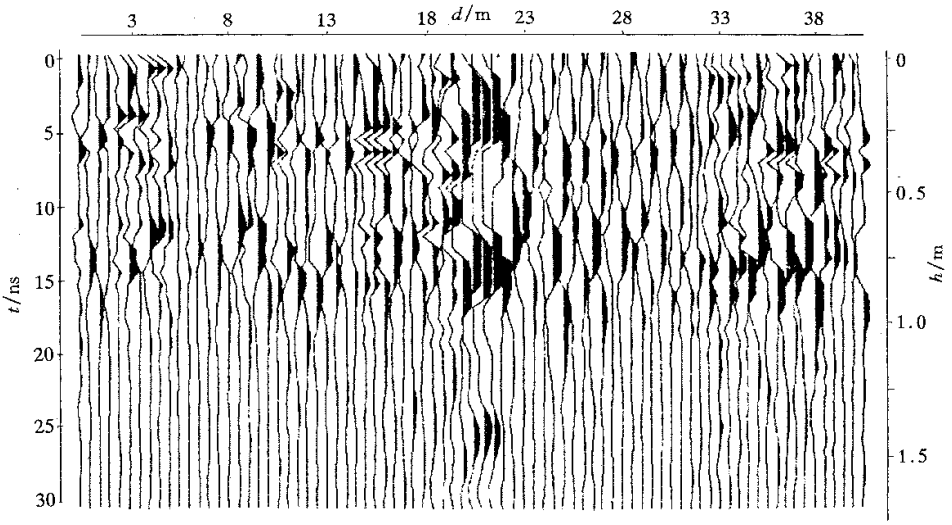

图 2　经背景扣除处理后的防浪堤隐患探测探地雷达图像

存在,一处位于水平位置 19～22 m 之间 ;另一处位于水平位置 34.5～37 m 之间。2 处异常均具有多次反射特征出现,只是前者波形的幅度较后者的高。这说明前一处异常所反映的空洞的规模比后一处异常所反映的空洞的规模要大。图 3 为水平位置 19～22 m 处的异常开挖验证的结果,开挖证实该处异常所反映的空洞洞高为 0.3 m,直径约为 0.7 m。

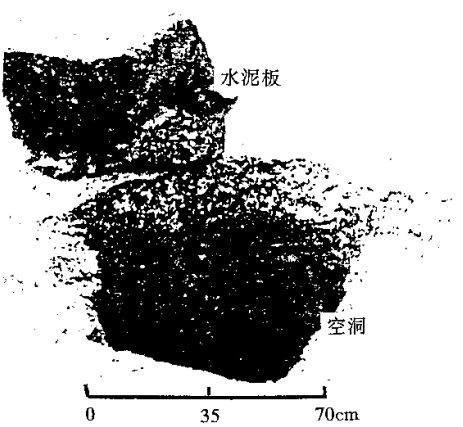

图 3　图 2 中 19～22 m 处异常开挖验证结果

总结本次试验,笔者认为有两点值得改进。首先由于客观原因,所用天线频率偏低。若采用中心频率为 450～500 MHz 的天线可能会获得更好的效果。因为本次探测所要求的深度不大,但所要求的分辨率较高 ;另一方面,本次试验所用的测点距偏大,天线距也可适当减小。这样可以提高雷达剖面的横向分辨率,并提高对异常的解释精度。

2.3　沿海某江堤滑塌成因探测

沿海某江堤近年来曾发生多次滑塌。为了查明其成因,采用探地雷达进行调查。探地雷达探测工作分两方面,第一方面在堤岸附近的江面探测,以了解江堤附近江底地形的变化 ;另一方面在江堤附近及其内侧的滩地上探测,以了解堤基的结构及其稳定性。图 4 为江堤下方滩涂地上测线的探地雷达记录。滩涂地表为粉细砂,雷达天线与地表的耦合条件很好。采用中心频率为 50 MHz 的天线进行探测,天线距为 2.0 m,测点距为 1.0 m。雷达记录中最底部的最清晰的同相轴为砂层与粘性土分界面的反射。该同相轴有 2 处明显错断,断距达 2.4～

五方数据

❶ 邓世坤. 胜利油田防浪堤隐患地质雷达探测试验报告. 中国地质大学(武汉)应用地球物理系,1995.

2.6 m。图 4 中字母标明了雷达剖面上各断点的位置,各断点所产生的绕射波幅度较反射波幅度弱,但却十分清晰。图 5 为根据图 4 解释的地质断面。图 5 中字母所标明的断点与图 4 中相同的字母所标示的断点相对应;图 5 中所解释的断层面 $A-A$ 由于其产状较陡,接收天线无法接收到它的反射,因此,在图 4 中不存在与其对应的同相轴。另外,由于雷达的探测深度所限,对该处断裂的深部信息无法反映。但可以推测,断裂面 $A-A$ 应继续向下延伸。图 4 中数字标明了断裂发生前的砂层表面的反射,由它们组成一条断续的同相轴。雷达探测结果表明,该区内第四系地层内有断层存在,断层应为活动性断层;这说明该区内近代曾有地震发生。由此推测,该处江堤的滑塌可能与地震活动有关。

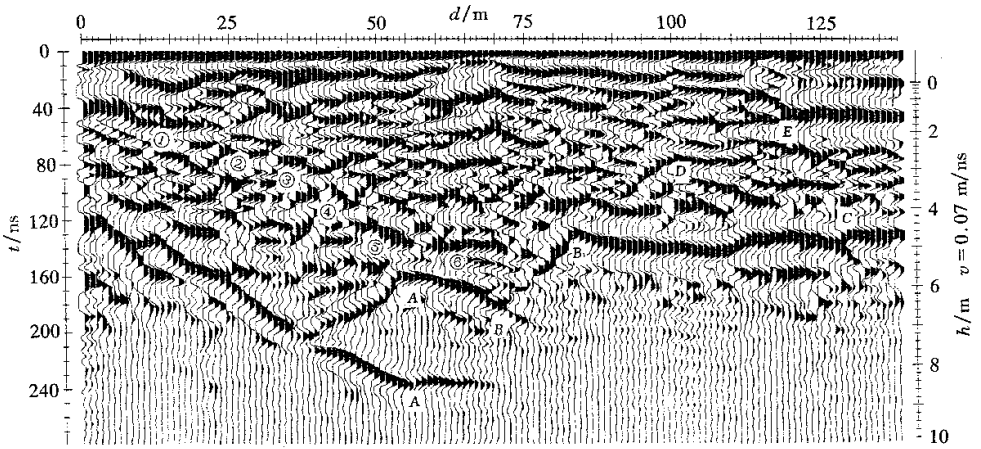

图 4 某江堤边滩涂探地雷达探测记录

①,②,… 表示断裂发生前的砂层表面的反射同相轴;A,B,… 表示各断点位置

3 结论

探地雷达方法是一种无破坏性的地球物理探测技术,可以用来探测浅层或超浅层介质内的小构造或微小构造。探地雷达所用天线的中心频率种类较多,共有十余种中心频率的天线。因此,探地雷达系统具有较强的适应能力,将其用于水利工程设施现状的探测和隐患探查具有其独特的优越性。针对不同的问题,采用适当的设备和合理的方法一定能取得良好的效果。然而,水利工程中存在的隐患种类很多,探地雷达技术由于受探测深度和分辨率这一矛盾的制约,过分夸大其作用,把它当成一种全能的工具,也是不合理的。例如,将目前的探地雷达技术直接用于江河大堤的管涌探测是不会有明显的成效。

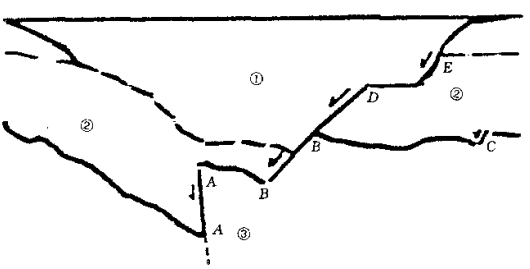

图 5 根据图 4 中的雷达记录解释的地质断面

①—断层发生以后沉积的砂体;②—断层发生以前沉积的砂层;③—粘性土

本文中所引用资料的采集分别得到了内蒙古哲盟水利处、山东黄河勘测设计院、福州雷力之星探测技术有限公司等单位的支持与赞助。笔者在此一并向以上单位致以衷心感谢。

万方数据

参考文献:

[1] 中国水利编辑部.除害兴利,造福人民[J].中国水利,1999(9):6—7.

[2] Annan A P,Cosway S W. GPR frequency selection[R]. Fifth international conference on ground penetrating radar. Kitchener,Ontario, Canada,1994.

[3] 邓世坤.克希霍夫积分偏移法在探地雷达图象处理中的应用[J].地球科学,1993,18(3):303—309.

THE APPLICATION OF GROUND-PENETRATING RADAR TO THE INVESTIGATION OF PRESENT CONDITIONS AND HIDDEN DANGERS IN WATER CONSERVANCY FACILITIES

DENG Shi-kun

(*China University of Geosciences*, *Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: In this paper, some basic principles concerning ground-penetrating radar (GPR) are briefly described, and three examples are given with regard to the application of GPR to the survey of present conditions and dangers in water conservancy facilities, including the survey of present conditions of a flood-gate, the detection of hidden dangers in an anti-seawave dike, and the investigation of the cause of the slide and collapse of a river embankment.

Key words: GPR; water conservancy facilities; investigation of present condition and hidden dangers

作者简介:邓世坤(1964 –),男,中国地质大学(武汉)应用地球物理系副教授,主要从事工程物探技术的研究与开发工作,在国内外学术刊物发表论文 10 余篇。