地质雷达技术在水利工程中的应用

杨金山　卢建旗　　车殿国
（水利部黑龙江水利水电勘测设计研究院　黑龙江哈尔滨　150080）　（黑龙江省公路勘察设计院）

摘　要：从地质雷达的测试原理出发，介绍地质雷达技术在水利工程中的应用实例及应用效果，说明地质雷达探测作为一种快速、无损、准确的检测手段是值得进一步推广的方法。

关键词：地质雷达　无损检测　勘探系统　应用

1　概况

地质雷达是利用空中雷达原理探测地下目标的一种高频电磁波（频率范围约为 1～1000MHz）勘探系统。地质雷达技术最初（50～60 年代）主要用于探测北极和南极的冰层厚度以及冰川厚度，70 年代，这项技术才逐渐用于采矿及地质调查。最近十年中，地质雷达探测无论是技术设备的制造，还是探测方法、数据处理及资料解释都取得了重大进展，它不仅仅局限于测绘冰层厚度、基岩深度、土壤层和潜水深度探测等。目前，该技术在公路路面及路基质量检测、管线探测、考古、地下环境污染调查、隧道掌子面地质情况超前预报、复杂工程地质及其它隐蔽工程调查等各个领域都得到了广泛应用。

黑龙江省水利水电勘测设计研究院自 1998 年应用 SIR-2 型和 SIR-10B 型地质雷达系统已在青龙山水库、音河水库、桦树川水库、新城水库等众多水利工程项目中投入应用，主要用于堤坝渗漏部位探测、塌陷、空洞探测等，均取得了良好的地质探测效果。本文主要介绍地质雷达测试原理、方法及仪器主要性能，并结合工程中的应用实例，说明其应用效果。

2　地质雷达测量的基本原理

地质雷达（又称探地雷达，Ground Penetrating Radar，简称 GPR）方法，是利用高频电磁波（1～1000MHz），以脉冲形式通过发射天线被定向地送入地下。雷达波在地下介质中传播时，当遇到存在电性差异的地下介质或目标体时，电磁波便发生反射，返回地面后由接收天线所接收。在对接收天线所接收到的雷达波进行分析和处理的基础上，根据所接收到的雷达波波形、强度、电性及几何形态，从而达到对地下地层目标体的探测。图 1 为地质雷达反射探测原理图，发射天线和接收天线紧靠地面，由发射机发射的短脉冲电磁波经发射天线辐射传入大地，当电磁波在地下介质中传播时，主要受介质的相

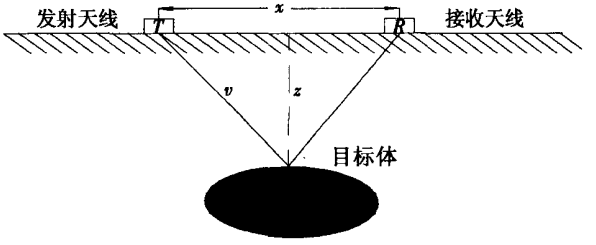


图 1　地质雷达探测反射原理图

对介电常数和电导率的影响。当在两种介质的交界部位，由于介电常数的变化，电磁波便发生类似光学的反射和折射，反射的强弱与介电常数直接有关。雷达波从发射天线发射到被接收，其行程时间：

$$t=\frac{\sqrt{4z^2+x^2}}{v}\qquad v=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

式中：z 为反射界面深度，x 为发射天线到接收天线间的距离，v 为电磁波在介质中传播的波速，c 为光速（$c=0.3$m/ns），ε_r 为介质的相对介电常数，当波速 v 已知时，通过对雷达剖面上反射信号行程时间的读取来计算界面深度 z 值。

电磁脉冲反射信号的强度与界面的反射系数和穿透介质的波吸收程度有关，一般，介质的电磁参数（电性）差别大，则反射系数大，因而反射波的能量也大，这就是地质雷达探测的前提条件。

$$P_R=\frac{P_T G^2 \lambda_0^3 RSL}{(4\pi^3)H^4}RSLe^{-4\alpha R}$$

式中：P_T，P_R——发射，接收功率；

G——天线增益；

R、S、H——为地下目标体的反射率、散射面截面和深度；

α——土壤衰减率；

L——雷达波从发射到接收过程的散射损耗;

λ_0——介质中雷达波的波长。

可以看出,雷达接收到信号的大小与雷达天线的特性、地层的衰减、目标体的深度和反射特征以及雷达的工作频率和发射功率均有关系。在仪器性能和地下介质一定的情况下,探测深度取决于工作频率选择及地层的衰减系数。

一般天线频率越高,则探测深度越浅,分辨率越高;天线频率越低,则探测深度越深,分辨率越低。因此,地质雷达技术存在着探测深度与分辨率的取舍或优选问题。

目前地质雷达所能探测的深度在50m以内,分辨率最高达几毫米,但由于深度的增加,分辨率有较大的下降。同时探测深度与介质的含水量和电导率有较大的关系。

现场测量,一般采用剖面法(CDP)或展开法两种方式,在一些特殊应用中还可采用透射法。

地质雷达资料的解释主要依据剖面的反射信号特征,特别是反射信号的同相轴变化以及信号的强弱(幅度),一般主要表现为层状(线性同相轴)、管线状(双曲线同相轴)、洞穴状(双曲线同相轴)异常特征。地质雷达资料的解释应注意这些主要特征。

3 地质雷达系统

地质雷达系统包括硬件(主机、天线、传输电缆等)和软件(现场数据采集、预处理、后处理等)两大部分。以下仅简单介绍SIR-10B型地质雷达的主要性能和适用范围。

SIR-10B型地质雷达属工程现场非破坏性的高频电脉冲全数字化地面探测系统,分离天线,天线可替换,天线中心频率分别为16～80、35、100、400、900MHz等,天线最高频率为2.5GHz。可采用反射剖面方式(CDP)测量、CMP测量(共中心点方式)及透视测量等方式进行现场检测,边采集边显示波形,有丰富的后处理软件,与地震软件全兼容,可用于覆盖层探测、基岩面或风化层分层、地下管线探测、高速公路路基及浇注层的分层探测、建筑物结构的完整性检查、混凝土缺陷、裂缝及其中的钢筋分布、考古探测等。图2为SIR-10B型地质雷达系统检测现场。

4 应用实例

地质雷达应用实例很多,受篇幅及时间所限,本文就地质雷达在桦树川水库消险加固工程等典型工程中的应用,详细说明地质雷达在无损检测中的应用效果及应用范围。



图2 SIR-10B型地质雷达系统检测现场

4.1 桦树川水库消险加固工程

桦树川水库位于牡丹江市宁安县东南约60km的蛤蟆河中上游,以灌溉为主,结合防洪、发电、养鱼综合效益的水利工程。水库于1966年兴建,1971年7月竣工,该水库由于当时是在文化大革命期间施工,没有保留竣工验收图。地质雷达探测的目的为:

1) 找出0+279～0+345段粘土截渗槽底宽及平面位置;

2) 判断管涌发生处是否有渗漏通道。

根据以上两个目的要求,确定地质雷达检测方案,地质雷达探测工作采用LF480低频天线,天线中心频率约48MHz。采样时间长度为500、700ns,32次叠加。顺坝方向共完成了3条1m点距剖面测量、1条0.5m点距剖面测量、5条0.2m点距剖面测量;垂直坝线方向共完成了10条0.2m点距剖面测量。并结合高密度电法确定渗漏通道。

从图3中可以看出该雷达剖面在大约82ns处见到一物性层,按雷达波在堆石中传播速度为0.10m/ns计算,该层厚度为4.10m,82～150ns之间有一物性层,推断该层为粘土斜墙,按雷达波在粘土中传播速度为0.08m/ns计算,厚度为2.75m。中间同相轴不连续,推断该处为大坝合拢处,该处防渗能力较弱。

图4为高密度电阻率色谱图象,从图4中可以看出第17～19道粘土斜墙不连续,中间有高阻介质存在,可能含碎石。图3、图4中的异常位置为同一处,两种不同方法相互印证,充分发挥了综合物探的作用。

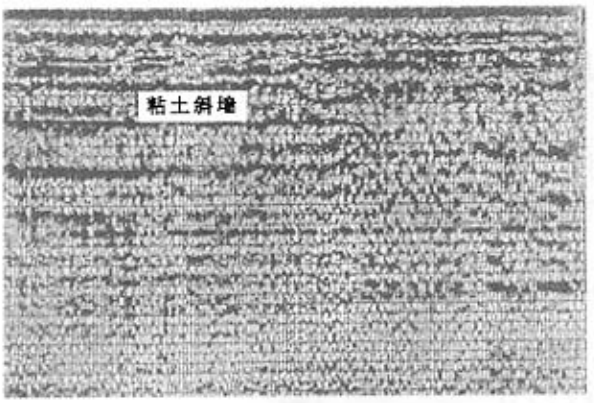


图 3　桦树川水库地质雷达测量剖面图

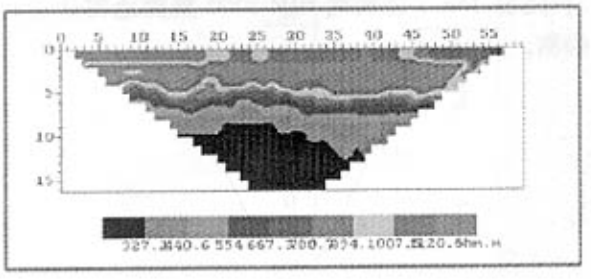


图 4　高密度电法色谱图象

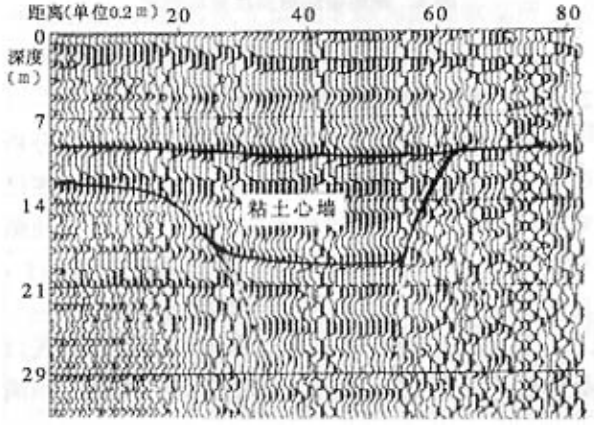


图 5　桦树川水库地质雷达测量剖面图

从图 5 中可以看出该雷达剖面在大约 32～52 测点处底部同相轴较周围介质清楚、连续，推断该层为粘土截渗槽，底宽约为 3m ，经钻探验证在 41 测点处证实，0～9m 人工填筑碎石，9～16m 为粘土，16m 以下为硅质板岩。

4.2　青年水库

密山市青年水库于 1958 年始建，1959 年合拢，1960 年停建，1973 年续建，1977 年 11 月竣工，1978 年 10 月验收。该大坝自 1960 年至 1975 年间多次产生滑坡。局部地段防浪墙明显下沉，图 6 为 0＋900 坝体上游护坡段地质雷达剖面图。

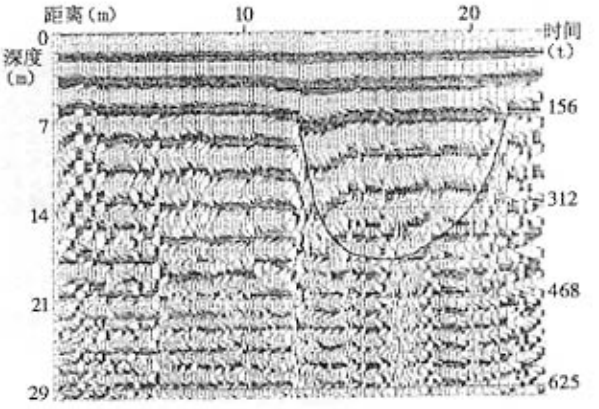


图 6　青年水库地质雷达测量剖面图

从图 6 中可以看出在测线的 11～20 范围内，深度为 5m 左右，异常表现为地质雷达信号连续性差，推测为塌陷。

4.3　新城水库

从图 7 中可以看出：在桩号 0＋362.8～0＋365.5m 处，高程在 215.5～218.8m 处雷达波振幅明显变强(推测为介质含水所致)，频率变低，而且层位与两侧发生错动，推测该处存在一盆状塌陷。

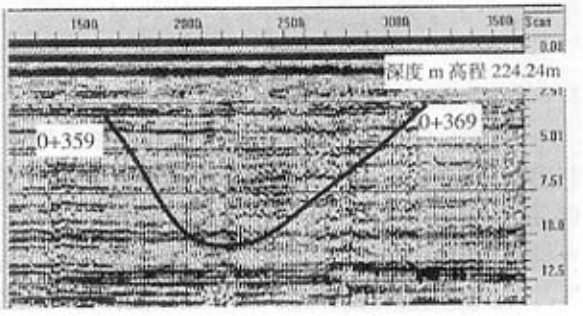


图 7　塌陷探测地质雷达剖面图

5　结　语

5.1　地质雷达作为一种新的高分辨率地球物理探测技术正在工程建设中发挥越来越重要的作用，作为一种非破坏性探测技术，可安全、快捷地用于各种工程项目的地下目标物探测，有很强的解决地质问题的能力。它的应用推广需要设计及管理等部门的领导和技术人员提出需要解决的问题，为这项技术提供应用场所，以充分发挥它的独特作用。

5.2　地质雷达作为一种间接探测手段，除了它具有科学性的一方面，同时也存在着局限性、多解性、

(下转第 6 页)

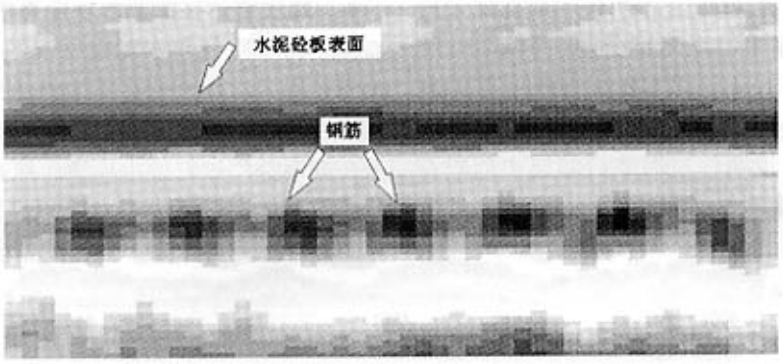


图6 水泥砼板内钢筋影像图

位置和深度。因坝体内部的真实情况至今仍对外保密,所以我们仍不知道地质雷达异常与坝体隐患的详细对应关系,但主办单位的反馈信息表明:①我们所提供的异常位置均对应着坝体隐患;②我们找到了80%的坝体隐患。图5为部分异常剖面。

利用地质雷达探测坝体隐患尚处探索阶段。上述试验只是针对模拟隐患,无论是隐患本身还是探测条件都较实际情况理想。对地质雷达而言,在坝体隐患探测方面最大的困难在于穿透能力不足(尤其在雨季)和地表干扰难以避免。

5 地质雷达在水泥砼构件检测中的应用

地质雷达用在水泥砼构件检测上主要有两个方面,一是砼内部缺陷的检测;二是砼内部钢筋密度的检测。因其对耦合条件要求不严,所以它比常用的超声法更为方便、可靠。图6为一水泥砼板的地质雷达剖面,其上钢筋分布情况清晰可见。值得指出的是,其上亮点大小并不简单地对应钢筋的粗细。要评估钢筋的直径,还须经过大量的模型实验,以确定反射强度与钢筋直径的关系。

6 结 论

地质雷达与反射地震法非常相似,所不同的只是波型及其所涉及的物性。前者为高频电磁波和物质的电磁特性,后者为弹性波和物质的弹性特性。地质雷达在数据处理和解释方面大量借鉴了反射地震中成熟的方法。根据地质雷达剖面上目标层(体)的反射波时间延迟、波形特征以及剖面的宏观和微观形态组合,可以解决大部分工程勘探和检测问题,本文仅列举了几个用得比较成熟的领域。我们相信,随着工程勘探和检测问题的不断提出以及广大科技人员的不断努力,地质雷达所能解决的问题会越来越多,涉及的领域会越来越广。

(收稿日期:2001年9月25日)

The Applications of GPR in Engineering Surveying and Monitoring

Abstract: In this paper, the author first briefs the basic principle of ground penetrating radar (GPR), then gives some examples for the applications of GPR in engineering surveying and monitoring. (**by Zhang Shan**)

Key words: GPR, Application, Engineering Surveying

(上接第9页)

片面性。例如高频天线只能探测浅部问题,而低频天线只能探测深部问题,若用低频天线即解决深部问题又解决浅部问题,那就很难办到。应选择合适的天线频率,恰当的工作参数,根据工程实际情况实时改变工作参数,才能更好的发挥地质雷达探测在无损检测中的作用。

参考文献:

[1] 王兴泰、陈仲候:工程与环境物探教程,北京,地质出版社
[2] 李大心:探地雷达原理与方法,北京,地质出版社

(收稿日期:2001年9月28日)