

47-51,57

# 水利隐患 GPR 探测方法研究<sup>①</sup>

TV 221

吴相安 徐兴新 吴 晋

TV 68.231

(中国科学院广州地球化学研究所·广州·510640)

李 栋 饶绮珍 黄顺明 沈锦音

(广东省科学院昆虫研究所·广州·510260) 广东省水利厅·广州·510150)

结合对堤坝各类隐患探测实践与效果,从堤坝外在条件与内部性质特点,联系各种隐患自身性质、特点及其与外部条件之间的关系、差异等因素,探讨利用探地雷达(GPR)探测各类隐患的探测方法与要求。

关键词 GPR 探测法, 水利设施隐患

堤坝, 裂缝, 白蚁巢

堤坝隐患,包括白蚁巢、裂缝、被废弃的涵管、涵洞以及坝基中溶洞、漏水通道等的存在,以及浸润线升高都将对堤坝安全运行构成威胁,或降低原有设计所应达到的作用和效益。Ground Penetrating Radar(GPR)探测技术是近十多年发展起来的具有分辨率高、定位准确、探测速度快捷、实时图象显示的有效浅层探测方法。结合水利设施与各类隐患性质、特点,将此技术成功地运用于堤坝隐患探测中来是本研究所要解决的问题。

## 1 探测原理和方法

不同介质具有不同的电性特征,象土壤和空气等非磁性介质的电特性可以用介电常数 $\epsilon$ 和电导率 $\delta$ 来表征,一些常见介质的电性参数见表1。介电常数决定介质的波速 $v$ ,电导率则对介质的反射、吸收特性起主导作用。不同电性介质的分界面由于电性差异,主要是电导率不同,形成电性界面,当电磁波在介质中传播时遇到电性界面会发生反射,电性差异越大反射就越强烈。

堤坝中存在着蚁巢、鼠洞、空洞、裂缝等隐患时,土壤与隐患之间存在着电性界面,有的甚至形成土壤—空气自由界面。在这种情

况下,由于土壤与空气的电性差异较大(表1),就形成了良好的电磁波反射界面。堤坝中,浸润线上、下土壤介质由于含水份不同导致电性差异而形成电磁波的良好反射界面。这就是堤坝中各类隐患及浸润线所以能够被地质雷达所探测的物理前提。

表1 常见介质电性参数表

介 质	电导率 $\delta$ (Sm)	相对介电 常数 $\epsilon$	速度 $v$ (m/ms)	衰减系数 $\alpha$ (dB/m)
空气	0	1	0.3	0
纯水	$10^{-4} \sim 3 \times 10^{-2}$	81	0.033	0.1
砂(干)	$10^{-7} \sim 10^{-3}$	4~6	0.15	0.01
砂(湿)	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	30	0.06	0.03~0.3
粘土	$10^{-1} \sim 1$	8~12	0.06	1~300
灰岩(干)	$10^{-9}$	7	0.11	0.4~1
灰岩(湿)	$2.5 \times 10^{-2}$	8	0.12	0.4~1
混凝土		6.4	0.12	

由雷达公式知:

$$P_R = P_T G^2 \lambda_0^2 S L_{01} L_{10} L_S e^{-4\alpha R} / ((4\pi)^3 R^4) \quad (1)$$

式中: $P_T$ 、 $P_R$ 分别为天线发射和接收功率, $G$ 为天线增益, $S$ 为地下目标散射面积, $R$ 为目标深度, $\alpha$ 为介质衰减系数, $L_{01}$ 、 $L_{10}$ 分别为发射天线与接收天线与地面的耦合损耗, $L_S$ 为传播媒质的散射损耗。可以看出,雷达接收到的信号大小与雷达天线的特性、土壤的衰减、目标深度和反射特性、工作频率、地下目标的

本文1997年8月收到,11月改回,李翠华编辑。

① 国家自然科学基金项目(49171051)和广东省自然科学基金项目(950900)部分成果。

散射面积和发射功率均有关系。值得注意的是,对于点反射体,接收功率与 $R^4$ 成反比,对于一维反射体则与 $R^3$ 成反比,而对二维目标(连续界面)则与 $R^2$ 成反比关系。

探测工作方式主要分点测和连续测量两种,这里主要讲连续测量。连续测量探测时,天线沿测线方向以步行速度向前移动,发射天线向地下不断发射重复频率最高可达 $n \times 10 \text{ kHz} \sim n \times 10^2 \text{ kHz}$ 、宽度为 $8 \text{ ns} \sim 10 \text{ ns}$ 量级的电磁波脉冲串。这些电磁波脉冲串在地下传播过程中遇到电性界面被先后反射回地面上来为接收天线所接收,并被送至等效时间采样系统进行等效时间采样处理(图1)。显示系统将通过等效时间采样后又重新组合恢复起来的波形按一定方式编码排列,最后以二维图象形式在显示器上实时显示出地下连续剖面的情况。影像中纵坐标为时间坐标,横坐标为沿测线方向的水平距离。

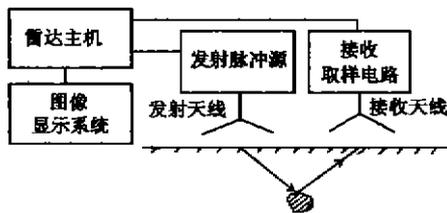


图1 探地雷达探测原理图

探测剖面一般要布设在目的体上方与目的体走向大致垂直的方向上,剖面的疏密程度视探测要求而定。对于目标不清的情况,或普查等的检测时,要根据地形进行合理分布。如象库坝安全检测,则要按与坝轴平行方向布置。实际上,探地雷达所测得的信号是来自地下一定深度的相应散射截面积上的平均结果,所以具有一定覆盖范围,即具有一定有效探测宽度。在剖面间距确定时,应当把这一因素考虑进去。

## 2 探测装置及观测参数选择

实验使用LT-1型探地雷达仪,其性能和探测效果与美国SIR-10型仪器大致相

当。主要参数:

- 1 脉冲发射电压 150 V;
- 2 重复频率 50 kHz;
- 3 最大时窗 1200 ns;
- 4 扫描采样(Samples/Scan) 512;
- 5 扫描速度范围 3.2~51.2

由时间分辨率 $\Delta t = 1/B_{eff}$ ( $B_{eff}$ 为接收信号有效频带宽度, $\Delta t$ 为分辨界面有效波形之间的时间间隔)通过波速转换成深度方向分辨率 $\Delta h = v\Delta t$ ,可以看出有效频带宽度越宽,时域脉冲越窄,射线方向的时间分辨率就越高,也就是深度方向的分辨率越宽。从波长 $\lambda = v/f$ 考虑,一般以 $\lambda/2$ 作为分辨率,可见当波速一定时,频率 $f$ 越高,分辨率也就越高。

土壤对电磁波是一种衰减很大的介质,并且频率越高衰减越大。当频率为1 GHz时,湿粘土可达100 dB/m,细粘土达20 dB/m~30 dB/m,砂土可达10 dB/m。土壤是色散介质,对脉冲的吸收扩散作用很强,随着波程加大高频成分将降低,波形被拉长,所以随着探测深度加大,分辨率会随之降低。使用高的工作主频可以获得较高的分辨率,相应探测深度要小;使用较低的工作频率可获得较深的测深度,但分辨率相对较低。所以在使用LT-1型仪探测时,对于象堤坝的蚁巢系、鼠洞等的探测深度要求较小(一般3 m左右即可),但对分辨率要求较高,如要分辨直径10 cm以上的空洞(相当于1年~2年的幼龄巢),选用400 MHz的工作主频为最佳。而要探测象废涵管、洞洞、堤坝裂缝、坝基及库底以下较深的探测(10 m~40 m),则要选用100 MHz或更低的工作主频才行。

一般地说,在相同频率下探测时,岩石,尤其是石灰岩,探测深度会很大。从我们所开展的工作看,当工作主频为100 MHz时探测深度可以达到40 m左右。

关于水平分辨率,很大程度上决定于介质吸收特性,介质吸收越强,目的体中心部位

与边缘部位反射能量差异相对较大,水平方向的分辨率也就较大。对点测方式测量,当吸收系数  $\alpha$  和深度  $D$  都较大时,水平分辨率为  $\Delta x = 3.3\sqrt{D/\alpha}$ , ( $\Delta x$  表示测点间距)。当然这个分辨率还与地下各方向上能量分布情况有关,即与天线指向性有关。此外,波的散射截面大小也对分辨率有影响。对于连续方式探测,分辨率会提高很多,适当降低天线移动速度和保持较高的扫描速度,效果会更明显。

天线是探地雷达的关键部件之一,天线性能好环、天线与地面之间的耦合效果如何,对探测效果都有直接影响。堤坝一般为人工填土,土质不均、地面陡倾、地面平滑程度低且有的地方可能生长有植物复盖,野外施测条件较差而国内外产品天线设计均未着眼于这个方面,探测深度、分辨率以及重量、体积和外型都不太适用,且不具备在水面上探测的功能。根据这一情况,我们研制了轻便偶极板加载扇形天线系列,较好地解决了这个问题。我们研制的天线具有行波性能好、与地面之间藕合效果好,探测深、分辨率高的特点,而且重量很轻(300 MHz 天线重 7 kg,仅相当于同类产品重量的 1/4),便于野外操作。通过电阻加载克服了谐振引起的天线“振铃”影响,用离散加载逼近连续加载,避免了由于电阻分布不连续造成具有频率选择作用的负面效应。实践证明比其他探测天线性能要好。我们研制的天线在陆上和在水面上探测水底及水底以下地质情况都取得了较好的地质效果,其中 100 MHz 天线,最大探测深度达 40 m 左右,研制的 400 MHz 天线探测深度接近 5 m,分辨率在 20 cm 左右,可作为堤坝白蚁巢、鼠洞等探测的专用天线。

### 3 数据处理与解释

由于探地雷达探测在波动特征上与地震勘探有很大相似之处,所以信号处理方式和资料解释的基本方法都与地震勘探相类似,

但是电磁波传播与弹性波相比还是有着重要的区别。首先,介质吸收较大,土壤波速受含水量影响,波长甚短及其变化,使得目的体影像受到背景波形的严重影响。为了从感性和理性了解雷达影像特征,并摸索其中的规律,建立了模拟实验场进行了大量的模拟实验(图 2),以便了解不同目的体的影像特征;不

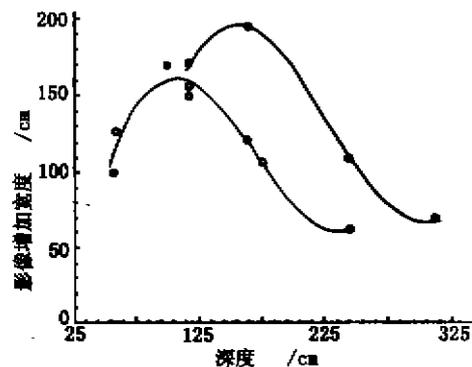


图 2 雷达影像增加宽度几何校正曲线

同频率下探测深度和分辨能力;不同深度下影像宽度与目的体实际尺寸间相互关系等。发现影像宽度都比实际宽度大,并存在一个影像扩大量。现行比较普遍采用的方法是将影像所显示的宽度乘以 60% 作为目的体的解释宽度,此种校正方法误差甚大。研究表明,这个扩大量与目的体自身的尺寸无关,在一定主频下对于一定土壤而是随深度依从  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$  的规律而变化的。这里  $y$  为影像扩大量,  $x$  表示深度,  $a, b, c, d$  为系数,对于不同土质可通过实验确定。这也可以理解为,电磁波在目的体沿测线方向的两端都发生了衍射,每端贡献各占一半,为  $y/2$ 。在花岗岩风化层中,500 MHz 情况下:  $a = 8.815 \times 10^{-5}$ ,  $b = 0.045$ ,  $c = 6.469$ ,  $d = -126.078$ ; 300 MHz 情况下:  $a = 8.428 \times 10^{-5}$ ,  $b = -0.057$ ,  $c = 11.620$ ,  $d = -538.141$  (图 3)。利用这种校正方法校正后都较接近实际,经开挖验证一般误差小于 10%。

雷达影像中产生这种现象的原因在于,根据雷达探测原理回波信号是来自天线辐射

场中在一定深度上的所谓“有效探测视场”的整个面积上,而有效探测视场受天线指向性特征和介质吸收特性两个因素所决定。在这两方面因素的支配下有效探测视场随深度变化而变化。

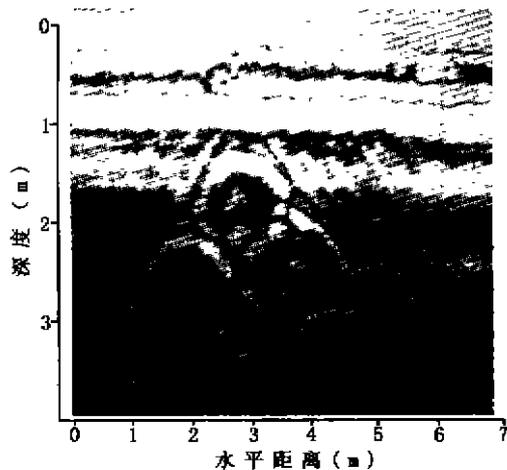


图3 实验场土层中空洞群雷达影像

由于地下介质相当于一个复杂的滤波器,介质的不均匀性和对波的吸收、散射使得接收到的信号较之发射信号有了较大的改变,波幅变小,波形不同程度地被改造甚至被拉宽,而且还存在着各种随机噪声和干扰波,所以对记录到的波形必须进行一些必要的数字处理:进行自动时变增益处理以补偿介质随深度增加对波的吸收和压制杂波;进行带通滤波以去掉低频振荡和高频噪声成分;进行水平滤波以消除背景噪声;进行反褶积滤波以消除天线瞬变和多次反射,提高数据垂向分辨能力;进行偏移处理以消除在数据采集过程中引起的畸变,消除多次反射波的影响,使点状反射体在剖面上的双曲线形态的两翼上的能量回归到顶点上来,使反射波归位进而正确反映地下界面的形态和空间位置。

雷达影像双曲线顶点的位置对应于目的体的埋深  $h$ , ( $h = vt/2$ ,  $t$  为双程走时)。目的体直径,可以先从影像上量出双曲线所显示的宽度  $L$ ,然后再按以上所说几何校正方法

进行校正得到,  $l = L - y$ ,  $l$  为目的体的解释宽度,  $L$  为影像宽度,  $y$  为不同深度下的几何校正量。

关于波速 ( $v = c/\sqrt{\epsilon}$ ,  $v$  表示波速,  $c$  表示光速,  $\epsilon$  表示介质相对介电常数),不同土壤可能有不同波速,即使同一种土壤波速也会受到水饱和程度及温度条件影响,实际工作中一般要通过现场实验取得才更可靠。

#### 4 探测实例和效果

##### 1) 堤坝的蚁巢探测方面

使用 300 MHz、500 MHz 两种天线。500 MHz 天线虽然分辨率高但探测深度太浅(1 m ~ 2 m);300 MHz 天线探测深度为 5 m 左右,可探测出直径 25 cm 以上蚁巢,在特殊情况下甚至可测出大的蚁道,但对更小的蚁巢(幼龄巢)比较困难(图 4、图 5)。

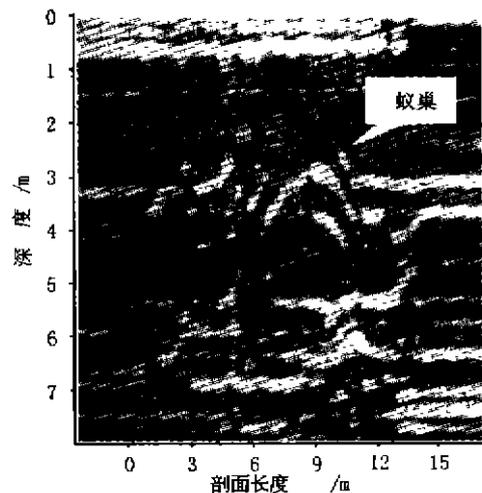


图4 埋深 2.8 m 白蚁巢雷达影像  
(天线频率 300 MHz)

2) 使用 100 MHz 天线测出了堤坝以下 10 多 m 深的废涵洞和 1.7 m 深的废涵管(图 6);测出了坝基及库底铺膜与未铺膜的情况及铺膜后重新被破坏的部位(图 7),以及库底以下相当深度范围内空洞、裂缝等,最大探测深度可达 40 m 左右,对尺寸在 1 m 以上的隐患取得了较好的探测效果。广东省阳春市

合水水库经探测在 300 m 长的剖面线上测出了空洞 20 余处,比较大的裂缝两处(随后出现的踏窝现象证实了这一推断),为这座多年漏水的水库进行治理提供了科学依据。



图5 图4所示白蚁巢开挖验证结果

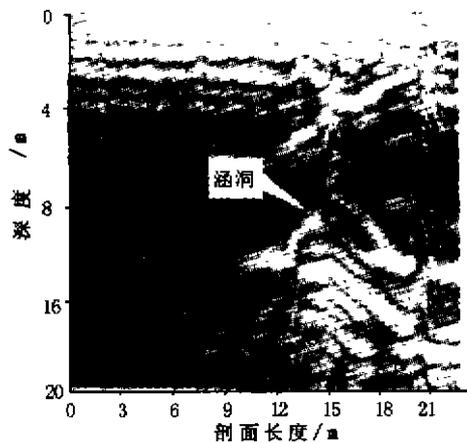


图6 堤坝中废涵洞雷达影像  
(天线频率 100 MHz)

## 5 结论

1)实践证明,地面潮湿,例如雨后,可以取得较好的探测效果。这是由于这种情况下天线与地面之间具有较好的耦合效果,电磁波能量被传入地下的分量加大的缘故。

2)使用 LT-1 型探地雷达探测堤坝的蚁

巢系等隐患,综合深度和分辨率要求,最佳工作主频应为 400 MHz,可以实现对 30 m 以内、直径 20 cm 的巢系准确探测。

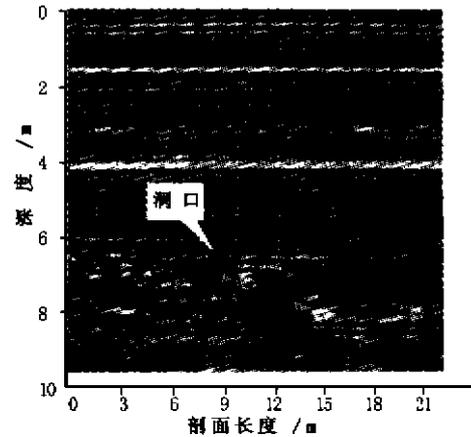


图7 水库底部防渗膜破裂位置雷达影像  
(天线频率 100 MHz)

3)对堤坝内和坝基中及库底深度 40 m 以内空洞、裂缝等隐患要使用 100 MHz 及以下工作主频可达到大于 1 m 目的体探测。

4)采用  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$  对影像宽度进行几何校正确定目的体大小的方法可大大提高解释精度。

### 参考文献

- 1 徐兴新. 探地雷达探测堤坝白蚁巢研究. 昆虫学报, 1996, 39(1): 46 ~ 52
- 2 方广友. 雷达性能分析及其 FD - TD 法数值模拟计算. 电波科学学报, 1997, 12(1)
- 3 范国新. 探地雷达原理、设计思想及实现. 电波科学学报, 1992, 7(10)
- 4 王惠廉. 探地雷达概论. 地球科学, 1997, 18(3)
- 5 M Bernabini. Application of Ground Penetrating Radar on colosseum pillars, GPR' 94, Fifth international conference on Ground Penetrating Radar, Volume 2 of 3
- 6 Al - Shayra. Detection of buried objects by the GPR method, GPR' 94, Proceedings of the Fifth international conference on Ground Penetrating Radar, Volume 3 of 3
- 7 Sylvie lillard. Analysis of GPR data: Wave propagation velocity determination. Journal of Applied Geophysics, 1995, 33

(下转 57 页)

## PILE HOLE CONSTRUCTION TECHNIQUE IN DEEP BOULDERY FORMATION

Long Wei, Shu Daiwang

Grab drilling method is efficient and economical in shallow soft clays. Reverse impact drilling in bouldery formation is a new - hopeful technique. Some experiences on this technique were introduced.

**Key words** pile foundation, grab, reverse impact bouldery formation



### 第一作者简介:

隆 威 男,1962年生。1982年毕业于中南工业大学地质系探矿工程专业,1985年在中南工业大学地质系获硕士学位。现任中南工业大学地质系教授,主要从事基础与勘察工程方面教学与科研工作。

通讯地址:湖南长沙中南工业大学地质系 邮政编码:410083。

(上接 33 页)



### 第一作者简介:

刘一波 男,31岁。冶金工业部钢铁研究总院博士后,主要从事金刚石与立方氮化硼多晶材料及超硬材料制品的研究开发。

通讯地址:北京市学院南路76号 冶金工业部钢铁研究总院 邮政编码:100083

(上接 51 页)

## RESEACH ON THE GPR EXPLORATION FOR VARIOUS HIDDEN DANGERS IN WATER CONSERVANCY PROJECTS

Wu Xiang'an, Xu Xingxin, Wu Jin, Li Dong, Rao Qizhen, Huang Shunming, Shen Jinyin

The Ground Penetrating Radar (GPR) exploring method and its requirements for various hidden dangers in water conservancy projects were discussed based on exploring practices and effects, and the connection between dyke's or dam's external conditions with internal quantities and various hidden danger's natures.

**Key words** GPR exploration, hidden danger, water conservancy project



### 第一作者简介:

吴相安 男,1947年生。1977年毕业于河北地质学院物探系地震专业,现任中国科学院广州地球化学研究所工程师,主要从事波传播规律与勘探方法研究。

通讯地址:广东省广州市五山 中国科学院广州地球化学研究所地球物理室 邮政编码:510640