

# 西北地区水库土石坝渗流隐患探地雷达图像特征分析

田锋<sup>1</sup>, 王国群<sup>2</sup>

(1. 河海大学, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省工程物理勘察院, 江苏 南京 210008)

摘要: 通过西北黄土地区水库土石坝渗流隐患探地雷达探测实践, 从渗流部位的土体扰动、空隙比、含水量的变化入手, 分析探地雷达波形特征变化、波形同相轴连续性的变化, 总结了渗流隐患不同时期的探地雷达图像特征。

关键词: 探地雷达; 水库; 土石坝渗流; 无损检测; 西北黄土地区

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2006)06-0554-04

我国建有各类堤防 25 万 km, 主要堤防 6.57 万 km。堤防构筑的历史较为悠久, 堤基条件差, 多为砂土基础, 且多未作处理, 堤身的构筑材料更为复杂, 如树枝坝、土石坝、砂土坝等, 堤身夯实不均、新旧堤接合不密, 存在渗流、裂缝、孔洞、坍塌等隐患。仅长江下游干堤在 1998 年的大洪水期间, 出现各类险情 6 100 余处, 高水位时, 每天出险达 300 余处。隐患发展到一定的规模时就可能会导致堤防的溃决和垮塌, 对人民的生命财产带来损失。积极开展高新科技手段检测堤防隐患应用研究, 加快检测新技术的推广, 查清堤防的隐患部位和性质, 以利于从根本上治理隐患。

笔者结合近年来在堤防隐患检测方面实践和课题研究, 利用西北黄土地区多个水库堤防隐患检测项目资料, 分析了西北黄土地区水库土石坝渗流隐患探地雷达图像特征, 归纳出土石坝渗流隐患在不同的发展阶段表现出不同的图像特征, 总结了西北黄土地区水库土石坝渗流隐患探地雷达图像特征的一般规律。

## 1 西北黄土地区水库的基本结构

以甘肃李桥水库(图1)为例说明西北黄土地区水库的基本结构。

李桥水库位于山丹县城南 33 km 的马营河干流上, 是一座中型水库。大坝为厚心墙土石混合坝, 最大坝高 25.4 m, 坝长 1 480 m, 坝顶宽 5.4 m, 上有高 1.3 m 的砼预制块防浪墙, 坝底最大宽度 137 m, 其中黏土心墙宽 71 m, 其余为砂砾石坝壳。

库区基岩为第三系中新统青灰色砂岩及砂砾石, 岩石中等坚硬, 弱风化带 1.5 ~ 2.0 m, 岩层呈单

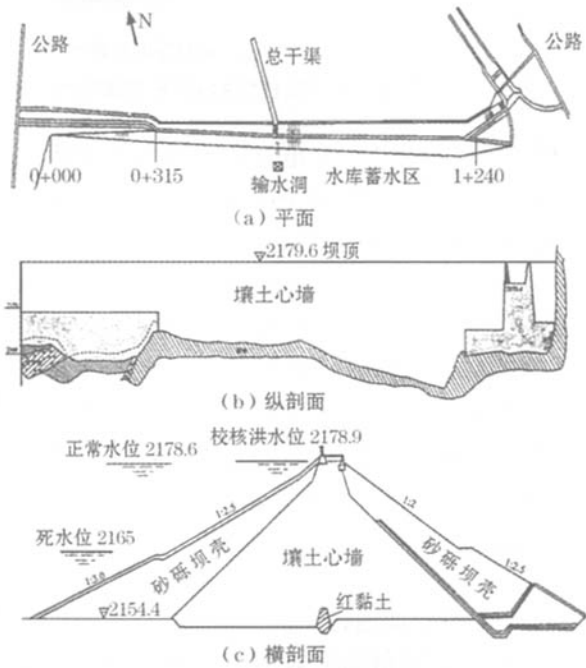


图1 李桥水库平面及坝身剖面示意

斜构造, 断裂及节理裂隙不发育。基岩面上堆积第四系砂卵砾石层和土层, 砂卵砾石层厚 1 ~ 2 m, 分布稳定, 土层为亚黏土及轻亚黏土, 具一定湿陷性和软土特征。

## 2 探地雷达检测堤防隐患的基本原理

探地雷达(GPR)方法, 是利用高频电磁波(1 ~ 1 000 MHz), 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界面或目标时, 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、电性及几何形态特

征,推断地下地层(或目标体)。

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,探地雷达技术存在着探测深度与分辨率的取舍或优选问题。

影响探地雷达探测效果的因素主要有天线中心频率、介质的导电率和介质的介电常数。天线中心频率和介质电导率越大,探测深度就越小,反之探测深度就越大。而在探测深度范围内影响探测效果的主要因素是被探测目标体与其周围介质的介电常数差。因为当介电常数 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 相差很小时,反射系数 $\alpha \approx 0$ ,此时无反射信号,无论探测深度如何,目标体也不会被发现。所以要取得良好的探地雷达探测效果,目标体具备与其周围介质有较大的介电常数差

表 1 不同介质的介电常数及导电率值

| 介质     | 导电率             | 相对介电常数 |
|--------|-----------------|--------|
| 空气     | 0               | 1      |
| 清水     | 0.0001~0.03     | 81     |
| 砂(干)   | 0.0000001~0.001 | 4~6    |
| 淤泥(饱和) | 0.001~0.01      | 10     |
| 砂(饱和)  | 0.0001~0.1      | 30     |
| 粘土(饱和) | 0.1~1           | 8~12   |
| 干砂(海岸) | 0.002           | 12     |
| 农田土    | 0.01            | 15     |
| 多年冻土   | 0.00001~0.01    | 4~8    |

是必要的,同时也应注意到其周围介质的电阻率大小直接影响探测深度。表 1 列出不同介质的介电常数及其导电率值,从中可见,探地雷达检测堤防相对大的洞穴、滑坡面等较大规模隐患时,效果较佳;而检测堤防裂缝、渗流等较小规模隐患时,效果较差。

检测堤防渗流隐患时,主要从渗流部位的土体扰动、空隙比、含水量的变化入手,分析探地雷达波形特征变化、波形同相轴连续性的变化。探地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),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。

3 渗流通道雷达图像特征和探测机理

图 2 为沿李桥水库坝顶轴向上 1 条 50 m 长的探地雷达纵剖面波形图。堤坝长期存在渗流隐患,测线外上游坝坡地震后曾产生局部塌陷。该波形图包含有坝顶纵向裂缝、土体不密实、渗流等信息。裂缝所在处雷达波的同向轴连续性有间断,或波形振幅明显减小。8 m 以下壤土心墙内出现的雷达波的同向轴断断续续、时隐时现特征,说明该区间密实度较差,推断此为上游坝坡局部塌陷所引起的壤土心墙扰动;扰动区两侧存在较大区域的雷达波的同向轴中断,雷达波信号频率低,类似竖向的垂线,接近于砂砾坝壳的雷达波形,结合垂向上及旁侧测线上的异常变化,分析主要异常区,推断主要异常区为渗流通道。

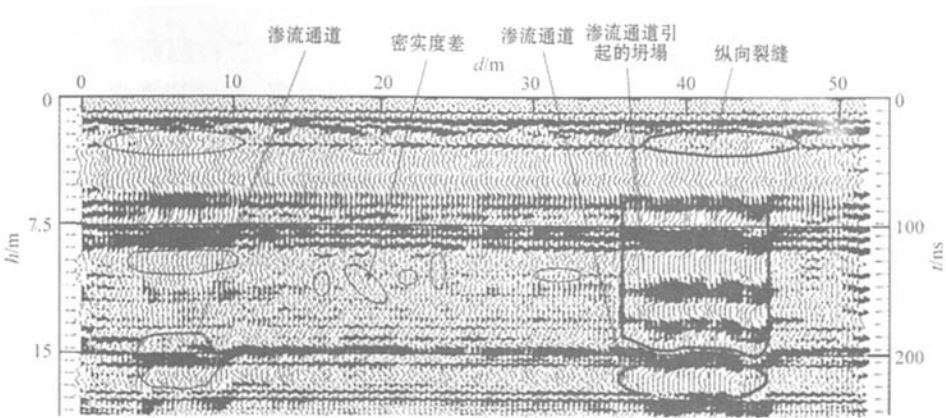


图 2 水库坝顶轴向纵剖面波形

3.1 渗流隐患部位土体结构及其变化分析

怎样判读探地雷达图像上的渗流异常,首先还要从渗流通道的成因机制分析入手。堤坝渗流通常从堤身土体不密实、局部存在松散裂隙的地方开始,在水头差的作用下,水透过土体空隙。坝体上、下游

水头差是坝体水渗透的动力。在此压力差的作用下,水从库内经过堤身逐渐流向库外。若渗流量不大,且处于平衡稳定状态,则坝体安全;若渗流量渐渐加大,并带走其中部分细微颗粒时,则使得局部土体原本相对松散的现象加剧,不密实的颗粒间的空

隙变得越来越大,原本平衡稳定状态遭受破坏。

水在土体中渗流,一方面会造成水量的流失,同时也将引起土体内部应力的变化,从而改变水工建筑物或地基的稳定条件,甚至酿成破坏事故。坝体和坝基渗出的水流挟带走部分颗粒,颗粒带走多了,渗流变得畅通了,就容易产生洞穴,加剧渗流通道形成,进而形成管涌。管涌的结果可以使砂质土层被掏空,最终导致堤身下挫崩塌。

渗透水对堤坝的破坏是一个渐进的过程。坝体的土体由密实到松散,再掏空形成洞穴,进而使洞穴加大加深。渗漏成洞后,空隙尺寸大,雷达图像异常明显,容易识别。工程中遇到最多的是渗漏发展期间的通道,这时土体由密实向松散、洞穴过渡,雷达图像就以扰动土体、松散土层、裂隙发育类的图像特征出现,探测时需引起注意。

### 3.2 不同时期渗流异常雷达典型特征图像

渗流区的物质组成和结构差异是探地雷达能够探测和识别的基础。堤坝渗水通道往往是很小的裂隙等,就其裂隙本身来说,雷达波是不足以分辨的。但由于渗漏使坝身局部细颗粒流失,砂砾等粗颗粒含量相对增多,通道土体滞水相对变多,改变了其介

质特性,扰动和含水量变化范围应大于渗流截面的范围,使原本很难分辨的隐患区域范围扩大了,异常变得明显而易于分辨,为隐患探测提供了有利条件和前提,也正是如此,使得雷达探测得到的渗水通道范围比实际情况偏大。这些特点,尤其是含水量的变化,构成了渗漏区波速差别,物性的差别也使波的振幅发生变化。配合钻孔资料,就可以根据雷达的波形及其振幅的不同,通过同向轴追踪,找出渗漏异常。

土体渗流通道形成和不断扩大的过程,使土体在探地雷达图像上所表现的特征越来越明显。粗略归纳,渗流经历初、中、后 3 个时期。初期堤坝隐患部位表现为土体受到扰动,变得松动,继而形成许多细小裂隙,探地雷达波形同相轴时隐时现,断断续续(图 3a);中期开始含水量较为明显增加,探地雷达波形频率较低(图 3b),通道内土粒平均粒径变大,渗流已形成通道,探地雷达波形频率较低,类似竖向的垂线,同相轴中断的范围变大(图 3c);后期较小的渗流通道扩大引起了通道顶部土层的下塌和沉陷,渗流通道顶部有一段波形同相轴整体错动,平行下移(图 3d)。

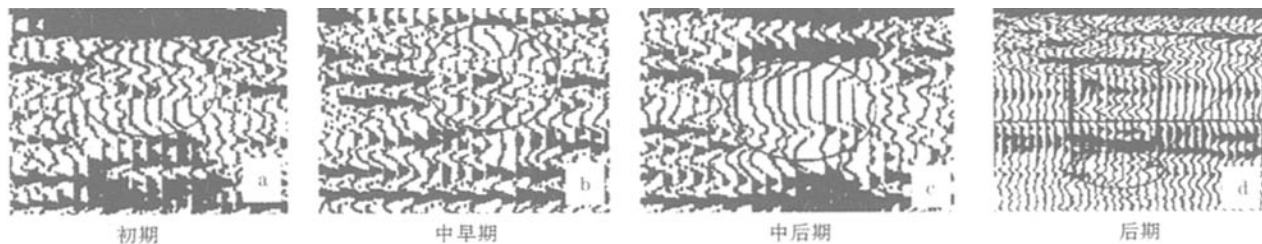


图 3 土石坝渗流不同时期探地雷达典型波形

### 3.3 典型异常及其区间场地描述

图 3 中的图像选自于同一水库堤坝的不同部位。该水库从 1958 年 7 月开工至 1980 年 11 月竣工,经历了三期建设和 1 次除险加固。该水库三期工程竣工后,有 2 个区间存在较为明显的渗流。一是溢洪道在溢流堰出集中渗流严重,以致在堰西边能听到堰下的流水声,溢流堰裂缝渗水达  $18 \text{ L/s}$ ;二是西坝段  $k0 + 220 \sim k0 + 640$  处在 1981 年冬到 1983 年春曾出现纵向裂缝 135 条,长  $4 \sim 12 \text{ m}$ ,宽  $7 \sim 13 \text{ mm}$ ,开挖验证裂缝深度  $0.54 \sim 1.7 \text{ m}$ ,裂缝治理后复合消失。在每年 3 ~ 5 月,当库水位达到  $2178 \text{ m}$  时,约滞后最高水位 10 天开始出现渗流,最大渗流量  $37.64 \text{ L/s}$ ,1985 年 ~ 1992 年连续 8 年平均渗流量  $24.35 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ,并呈逐年减少趋势,2004 年不足  $20 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ 。

在 2003 年甘肃山丹与民乐交界处发生地震后,

结合水利工程病害检测研究课题,根据物探“从已知到未知”原则,在已知渗流出水点附近从坝后往坝前按一定间距布置了平行于坝轴方向测线若干条,对测线成果逐一分析,归纳了不同时期渗流探地雷达波形图像特征。

图 3a、b、c 依次为西侧坝后道路( $k0 + 107 \sim k0 + 167$ )由东向西的 3 处渗流异常图像大样,测线平行于堤坝轴方向布置,测线下介质依次为混凝土路面、砂砾坝壳、反滤层、壤土心墙。渗流异常位于壤土心墙上部,由东向西异常由浅变深,渗流的严重程度由弱到强,渗流通道较大的源头位于测线西南方向的坝前。根据渗流对土体的影响程度依次将 3 处异常划分为早期、中早期、中后期。检测结果与水库工程管理部门对堤坝长期观测的结果相一致。

图 3d 显示的是在西侧坝前滩地平行于堤坝轴方向测线探地雷达波形图像中的 1 个异常大样,测

线中心位置为  $k0 + 200$  ,测线下介质依次为回填土、壤土心墙。渗流异常位于壤土心墙顶部 ,埋深约 9 m。测线成果显示该异常附近有 2 处埋深基本一致的异常 ,异常上覆介质的下沉相对较小。通过多条测线成果的对比分析 ,图 3d 的渗流通道形成时间较早 ,甚至出现了上覆介质下塌的现象 ,定义为渗流通道“晚期”。

坝前滩地图 3d 及其附近的 1 组渗流通道异常与坝后道路图 3a、b、c 渗流通道异常相贯通。三期工程竣工后 ,西坝段的区间渗流 ,有由原来的  $k0 + 220 \sim k0 + 640$  段向东发展的趋势。推断  $k117$ (图 3a 位置)为该渗流区间的东边缘 ,比巡视发现的坝后排水沟东端  $k145$  的渗流出水点偏东 28 m ,与巡视推测坝后道路下的坡面的渗流出水点基本相符。

不同时期的探地雷达波形分别呈现类似裂缝、砂砾石料、塌陷等信号特征 ,同时伴有含水量变化的特征。在分析雷达资料时 ,需要充分了解堤坝本身的资料 ,如异常位置处于常年(或最高)水位之上还是之下、异常是否具有连续性、在横断面上异常的分布状况等 ,否则会误判。

图 4 为位于近坝顶位置异常较为集中的探地雷达剖面 ,图中圈出的 6 处异常 ,表现为土体不密实 ,

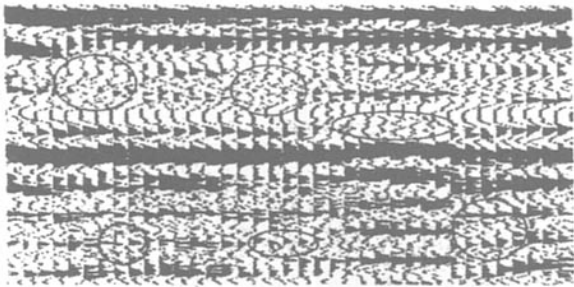


图 4 土坝不密实的雷达图像示意

在波形上与渗流初期的特征无明显区别 ,但该区域异常处于常年水位之上 ,多处异常较为集中 ,异常在堤内外不具有连续性 ,故排除渗流异常 ,推断为不密实异常。

4 结语

堤坝隐患检测具有较强的社会意义 ,而诸如裂缝、渗流等规模小、危害大的隐患探测难度较大。笔者根据甘肃李桥、双树寺、翟寨子、瓦房城 4 个水库探测实践 ,归纳了土石坝渗流隐患发展的 3 个时期 ,并对不同时期所表现的探地雷达图像波形特征进行了分析研究 ,这些异常特征在不同水库、不同地点都得到了相互验证。4 个水库的地质条件、堤坝结构以及探测时气候对坝体含水量的影响基本一致。

试验性研究表明 ,对于西北黄土地区土石坝渗流隐患 ,只要选择好合适的天线中心频率、单位距离的扫描数、记录长度等技术参数 ,综合分析异常所处的环境、位置 ,分析异常自身的特征及其相互关系 ,应用探地雷达方法进行探测是可行的。

参考文献 :

[ 1 ] 郭华东. 雷达图像分析及地质应用[ M ]. 北京 :地质出版社 , 1996.  
[ 2 ] 王国群. 探地雷达技术在堤坝工程中的应用[ J ]. 江苏地质 , 2000 24( 2 ) :101.  
[ 3 ] 彭皖生. 堤坝检测方法简介[ J ]. 大坝观测与土工测试 , 2001 , 25( 3 ) :32.  
[ 4 ] 何开胜, 王国群. 李桥水库地震后堤坝渗漏的探地雷达探测研究[ J ]. 防灾减灾工程学报 , 2005 25( 1 ) :20.  
[ 5 ] 何开胜, 王国群, 周荣官. 翟寨子水库的地震破坏和崩岸的探地雷达图像特征[ J ]. 灾害学 , 2005 20( 1 ) :96.  
[ 6 ] 张宇. 探地雷达在地下洞穴探测中的应用[ J ]. 地质装备 , 2001 ( 4 ) :16.

GEOLOGICAL RADAR GRAPH CHARACTERISTICS OF HIDDEN DANGERS OF SOIL AND STONE DAM PERCOLATION IN RESERVOIRS OF LOESS AREAS , NORTHWEST CHINA

TIAN Feng<sup>1</sup> ,WANG Guo-qun<sup>2</sup>

( 1. Hohai University , Nanjing 210029 , China ; 2. Jiangsu Engineering Physical Exploration Academy , Nanjing 210008 , China )

**Abstract :** Based on geological radar penetrating practice for soil and stone dam hidden dangers of reservoirs in northwestern loess areas and from the variations of the disturbance , pore ratios and water contents of the soil bodies in the percolation positions , the authors analyzed the variations of geological waveform characteristics and waveform phase axis continuation , and summed up the graph characteristics of the percolation hidden dangers in different periods.

**Key words :** ground-penetrating radar ; reservoir ; soil and stone dam percolation ; nondestructive inspection ; loess area in northwest area

作者简介 : 田锋( 1963 - ) ,男 ,高级工程师。1978 年毕业于河北地质学院 ,现为河海大学水资源环境学院博士研究生。