

我国堤坝隐患及渗漏探测技术现状及展望

冷元宝¹, 朱文仲¹, 何 剑², 刘建明³

(1. 水利部黄河水利委员会基本建设工程质量检测中心, 河南 郑州 450003;

2. 中国核工业工程勘察院, 河南 郑州 450002; 3. 黄河水利委员会科技外事局, 河南 郑州 450003)

摘要: 简要回顾我国堤坝隐患及渗漏探测技术的发展历史, 重点介绍电法探测技术、电磁法探测技术、弹性波探测技术及放射性探测技术在我国堤坝隐患及渗漏探测中的应用情况, 认为在我国堤坝“洞”、“松”、“缝”等隐患的现行探测方法中, 高密度电阻率法处主导地位; 同位素示踪技术是探测堤坝管涌和渗透性及堤坝截渗墙质量的有效方法, 文中对高密度电阻率法探测堤坝隐患及渗漏技术存在的问题及发展趋势作了探讨。

关键词: 堤坝; 隐患探测; 渗漏探测; 高密度电阻率法; 同位素示踪技术; 流场法

中图分类号: TV871.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)02-0059-04

我国现有大中型水库 8 万余座, 江河湖泊堤防 26 万 km, 这些堤防及水库在国民经济及社会发展过程中产生了巨大的社会、经济和环境效益, 但因受当时技术、经济和环境条件的限制, 加之已运行数十年, 这些水利工程不同程度地存在一些隐患, 在洪水期间极易形成渗水、管涌、漏洞、散浸、跌窝等险情, 严重威胁堤坝工程的安全, 如何快速有效地探找隐患及渗漏, 有的放矢地对堤坝工程进行除险加固处理, 一直是防洪工程管理的重点课题。所谓堤坝隐患^[1], 是指那些可能造成堤坝破坏而尚未被发现的所有的天然地质缺陷、整治施工中的质量缺陷、生物破坏引起的洞穴和各种裂缝, 以及建堤坝或抢险堵口时人为的薄弱环节, 如树枝、草包、棉絮等不利于堤坝安全的物质, 其显著特征是与堤坝其它部位的物性截然不同。20 世纪 90 年代以前, 地球物理探测堤坝隐患及渗漏的研究工作一直没间断过, 取得了一些零星的成果。20 世纪 90 年代以来, 随着我国对堤坝工程的日益重视, 堤坝隐患及渗漏探测技术的研究工作得到较大进展。山东黄河河务局研制的 ZDT-1 型智能堤坝隐患探测仪, 1998 年用于湖南、九江等地堤防隐患汛期探测取得成效, 曾受到有关防汛部门的嘉奖; 江苏省农业科学院原子能研究所、河海大学自 1991 年至今, 作了大量的堤坝渗漏探测的试验研究和生产实践, 应用在全国十几个省市近 30 项水利工程中, 所完成的“坝基渗流场探测中多含水层稳定流混合井流理论与综合示踪法研究”项目 1996

年获国家科技进步二等奖; 1992 年, “堤防隐患探测技术研究”列入国家“八五”重点科技攻关课题, 由黄河水利委员会物探总队承担, 经过 3 年努力, 取得突破性成果, 并列人国家“九五”重点科技推广项目; 1999 年国家防汛抗旱总指挥部办公室组织有关部门在湖南益阳堤坝隐患探测试验场对多种检测方法、探测仪器进行测评; 1999 年 11 月, 水利部重大科技项目“堤防隐患和险情探测仪器开发”正式启动; 2000 年 8 月, 国家防汛抗旱总指挥部办公室与水利部一起, 组织有关部门对国内外的探测仪器设备在北京大兴永定河一段废堤上进行了模拟隐患比测工作; 2000 年 9 月, 国家防汛抗旱总指挥部办公室等单位在郑州召开了“全国堤坝隐患及渗漏探测技术研讨会”, 这一系列工作, 有力地推动了堤坝隐患及渗漏探测技术的进步。从该技术近几年的发展看, 主要在电法探测、电磁法探测、弹性波探测及放射性探测方面作了大量的研究及生产实践。据不完全统计, 用上述方法或技术对近 1 500 km 的堤防进行了隐患探测, 对近 50 座水库的渗漏进行了探查, 取得不少成果。本文主要介绍这些探测技术的进展情况。

1 电法探测技术

1.1 直流电阻率法探测技术

a. 常规电法探测技术。通常指剖面法和测深法, 是通过观测同一深度不同位置或同一位置不同深度的视电阻率的变化规律来判断堤坝隐患的一种

作者简介: 冷元宝(1963—), 男, 湖北襄樊人, 高级工程师, 中南大学兼职教授, 主要从事工程检测技术的管理、研究及生产实践工作。

方法.山东黄河河务局经多年努力,通过采用恒流供电建立均匀探测电场,研制性能指标高、速度快的电测仪、巧设电极间距等方法实现“四极滚动快速隐患定位”.在黄河大堤上,选择测点距 2~4 m,每小时能探测 500~1000 m.用该方法能快速捕捉到隐患异常点的位置,然后用“连续测深隐患详查法”获得更为详实且形象直观的探测成果图.研制的 ZDT-I 智能堤坝隐患探测仪 1999 年获国家发明专利三等奖.

b. 高密度电阻率法探测技术.高密度电阻率法是 20 世纪 70 年代由英国首先提出,80 年代由日本地质株式会社实现的,80 年代末引入我国.其基本原理与常规电阻率法相同,不同的是测点密度较高,极距在算术坐标系中呈等间距,它是电剖面法与电测深法的结合,一次可完成纵横二维勘探过程,观测精度较高,数据采集可靠,对地电结构具有一定的成像功能,获得的地质信息丰富,堤坝裂缝、洞穴、不均匀体、软弱层等在探测成果图上有明显、直观的反映,是堤坝隐患探测详查的主要方法,已广泛运用于隐患探测的生产实践中.高密度电阻率法探测系统按其信号采集工作模式主要分为两类:一类是串行式;另一类是并行式.堤坝隐患探测大多数使用的是单道分时采集系统,按转换开关设置情况,分为集中式和分布式.

“八五”期间,重庆地质仪器厂、重庆奔腾数控研究所、黄河水利委员会物探总队等单位均推出集中式高密度电阻率探测系统.“九五”期间,长江水利委员会长江科学研究所与中国地质大学(武汉)联合开发出了新型分布式智能高密度电法仪;1999 年 11 月,黄河水利委员会物探总队中标水利部国科 99-01 重大科研项目,研制“分布式高密度电阻率法探测系统”.该系统的主要功能有:①仪器测量包含的方法有电阻率剖面法、测深法、高密度电阻率法、自然电位法、充电电位法、激发极化法.仪器为电阻率剖面成像系统、高密度自然电位测量系统、高密度充电电位三维趋势探测系统及多功能激电仪于一体的智能化直流综合电测站;②快速采集、高速运算、大存储量、大屏幕彩色显示,使得仪器在野外可做到实时采集处理,快速评判隐患性质和位置,为汛期防洪抢险提供现场实测资料;③高密度工作装置分二极装置、三极装置、四极装置(温纳、偶极、施龙贝格),常规工作装置任选;④采用国际流行的串型连接分布式电极开关,随意连接自动寻址,开关采用全密封 PVC 注塑工艺,双重屏蔽 9 芯抗拉电缆,接头有防水工艺处理;⑤留有无无线数据通讯接口,必要时可以进行网络通讯,实时传输数据和资料,以便开展堤坝险情监测和领导层及时决策.

c. 存在问题及发展展望.虽然直流电阻率法已广泛运用于堤坝隐患的探测实践中,但其探测隐患的纵向分辨率一直是一个悬而未决的问题.有人据电法勘探的理论,推测电法探测洞穴的纵向极限分辨率最多只能探测洞径与埋深之比为 1:10 的洞,现有的任何电法勘探仪器都不可能突破这一极限,高密度电法也不例外,因为它与常规电法相比,并无原理上的创新;多窄的裂缝埋藏多深能探测出来,也一直无一定量的说法.黄河水利委员会物探总队“八五”期间曾探测出了洞径与埋深之比 1:12 的洞,引起反响,1:12 的实际情况是在背景电阻率值 30~50 $\Omega \cdot m$ 、埋深 3.5 m 的大堤上,从侧面水平用洛阳铲掏了一个 0.3 m 直径的洞穴,在地面上用仪器探测出了洞穴的存在.事实上,这种纵向探测分辨率不是能用线性推而广之的,也就是说,在背景场相同的情况下埋深 3.5 m、洞径 0.3 m 的洞穴能探测出,埋深 7 m、0.6 m 洞径的洞穴不一定能探测出,因为异常在地面的物性反映幅值至少跟异常埋深的平方成反比.背景值的大小也是影响这种纵向分辨率的重要因素之一,因为它直接影响异常的大小,分辨率跟测点距也与之息息相关,当极距减少到一定程度后,再一味减少极距无多大意义,且工作效率也难于满足.上述种种问题都没有一种权威的解释,所以还需要进一步的研究探讨.虽然如此,直流电阻率法探测技术仍不失堤坝隐患探测的主导地位.我们对高密度电阻率法探测系统的未来发展趋势作一预测:①仪器将以小型轻便为主,电极道数在 30~40 道左右,可充电电池供电,供电以恒流为主,野外作业为“滚动式”;②险情监测主要开展于险工险段和穿堤建筑堤段,仪器将是多参数、多通道同时采集,高密度电阻率只是其中一参数,它将和温度、含水量、应力应变等参数联合应用,对堤身质量和稳定性进行预测预报;③仪器将保留计算机整机性能,仪器自身采集处理能力越来越强,不再需要数据回放;④所有仪器都将具有网络传输功能,实时把采集的数据及处理结果传向各级管理部门;⑤各类仪器的数据格式得到统一,堤防隐患探测和险情的资料将录入 GIS 堤防管理智能数据库和堤防安全性评价专家系统.

1.2 自然电位法

当堤坝中存在集中渗漏隐患时,水溶液在松散层或岩层孔隙、裂隙中流动时,在渗透过滤、扩散吸附和氧化还原等理化作用下,会产生一种电位,称为自然电位.该方法的仪器设备比较简单,只需一台电位计及相应辅助设备即可.普通电测仪均可满足检测要求,探测时,在垂直可能的渗漏方向布置测网,用不极化电极,沿测线测量两点间的电位差,然后绘

制各测线的电位剖面图和平面等电位线图,根据渗漏越大部位其电位越低的特点,来分析确定渗漏隐患的位置、埋深及流向。该方法对散浸或渗漏量较小的隐患反映不一定明显。

1.3 激发极化法

当向地下供入一个强度不变的电流时,在测量电极间可观测到一个随时间而变化,并在一段时间后趋于一个稳定的饱和值。在断开电流后,测量电极间电位差并未马上消失,而是随时间下降并逐渐衰减到接近于零的值。这种在充电、放电过程中产生的附加电场(二次电场)现象,称为激发极化效应,简称IP效应。通过观测堤防IP效应的强弱和衰减的快慢,可分析判断堤防渗漏的部位和规模、形态。长江水利委员会长江勘测研究所曾用该方法成功地检测出云南毛家村大坝坝体渗漏部位。他们还用该方法检测防渗墙施工质量。

2 电磁法探测技术

2.1 瞬变电磁法探测技术

瞬变电磁法(TEM)也称时间域电磁法,其工作原理是利用不同位置、不同深度地层对一次磁场变化产生涡流强度的不同,探测地质异常。地层电导率高,产生涡流强度大,二次磁场强。瞬变电磁系统一般由发射机发射线圈、接收线圈、接收机和微机数据采集绘图系统组成。中国水利水电科学研究院房纯刚教授^[2]等率先将该方法应用于土坝和堤防渗漏隐患探测,并研制成功SDC-2型堤坝渗漏探测仪。该仪器既可作堤防和土坝渗漏隐患探测,又可用于定位渗透漏通道。最大测深60m,位置分辨率为1~5m(横向测站间距可任意设置),深向分辨率1~2m,相对分辨率(径深比)约为8%。采用尺寸70cm×70cm×5.6cm的小线圈,没有插入地下的电极,不受接地电阻变化影响,操作简便迅速,一个测站的测量时间小于0.5min。该系统曾在湖南岳阳进行隐患探测,测线长17.4km,探测深度0~60m,探测出的管涌隐患在洪水期得到了验证;还曾在尼山、密云、岳城和漳泽等7座水库大坝上较成功地进行了坝体渗流通道、坝基渗漏、绕坝渗流、地下水探测和灌浆加固效果检验等工程应用。

2.2 频率域电磁法探测技术

中国水利水电科学研究院房纯刚教授^[3]等在这方面做了些工作。他们采用引进的频率域电磁法仪器EM34-3型大地电导率仪和自己研制的SDC-2型堤坝渗漏探测仪对7座大坝和3段堤防进行了渗漏隐患探测和管涌通道定位探测。大地电导率仪主要根据堤防填筑材料的电导率是否存在异常区来判断

堤防是否存在渗漏隐患,在洪水期用来测定渗漏险情位置。其缺点是深向分辨率较低,难以发现堤身内埋深较浅、体积较小的异常体。在探测洞穴、裂缝堤防隐患能力方面,瞬变电磁法优于频率域电磁法;而在松散区隐患探测方面,频率域电磁法显示出优势。

2.3 地质雷达探测技术

地质雷达的基本原理是基于高频电磁波理论,工作方式是以宽频带、短脉冲的电磁波形式,由地面通过发射天线射入地下,经地下地层或目的体的电磁性差异反射而返回地面,被另一天线所接收,分析接收的信号,进而探测堤坝隐患。现有的地质雷达探测系统用于堤坝隐患检测,对于含水量少埋深较浅的堤段隐患有效果。芝麻燕等在北京大兴永定河堤段7m以上埋深模拟隐患比测中,用地质雷达探测取得成效。吴相安^[4]等自制300MHz和500MHz等几种雷达天线,并运用于工程实践,利用100MHz发射频率查出坝下10m多深的废涵洞和1.7m深的废涵管,利用400MHz工作主频探测3m以上10~20cm的蚁巢,并对影像宽度进行几何校正提高解释精度。肖柏勋^[1]等正在研制双频多普勒相控阵探地雷达三维扫描成像系统,该系统可以将发射的电磁波在一定深度范围内聚成较窄的波束并实行连续扫描(三维扇扫),这种发射方式可以较好地改善勘探深度与分辨率的矛盾,克服介质不均匀影响。同时可以将双频差分多普勒技术用于汛期快速查漏,及时预报险情。虽然多普勒相控阵雷达在军事上已获成功,但对于堤坝隐患探测,由于探测对象和使用环境的变化,很快获得成功也非易事。

3 弹性波探测技术

利用堤坝隐患与背景场的波速及波阻抗差异,可采用纵波、横波反射技术及面波探测技术进行堤坝隐患检测。天津水利科学研究所田世扬^[5]等采用地震反射波法(单点反射)快速扫描检测段,探测施工结合部位和堤防土体成层情况,发现较大隐患,确定可疑堤段,然后再采用其它方法对可疑段进行详查。

瞬态瑞雷面波探测技术可用于检测堤坝松散层和土坝渗漏水异常区。其理论依据是利用瑞雷面波的频散(波速随频率变化)特性达到探测深部构造的目的。国内许多检测单位把该技术用于工程实践。黄河水利委员会物探总队在黄河大堤老口门堤段用该技术得到较好的探测效果,探测结果表明,当深度小于30m时,频散曲线与地层弹性界面有较好的对应关系,可直接推断地层界面,据异常幅值大小,可判断软弱层的强度性质和大小范围;该方法若要探测几十米的深度需较大的激发能量。肖柏勋等拟采用

国内已经研制成功的超磁致伸缩地面声波发射器制作声波发射阵,将能量聚焦于地下某一深度,并且可变深聚焦,研制 B 型声波三维扫描成像系统,来探测堤坝隐患,但该系统的缺点是其发射探头阵必须与地面耦合好,否则能量传不下去。

4 放射性探测技术

放射性探测技术中同位素示踪技术是探测堤坝管涌及管涌渗透性的一种有效的方法,江苏省农业科学研究院原子能研究所及河海大学在这方面作了许多研究和生产实践工作^[6]。

管涌探测主要依据管涌发生时相伴的各种物理场、化学场的变化进行的,洪水期高水位时,沿堤坝后所有堤段地下水都是江河水补给,很难通过测定地层中的强度、电导率、pH 值等参数判定渗漏情况,且堤段也不能进行钻孔验证;枯水期低水位时,地下水一般补给江河水,只有少数渗透性较强的堤段,江河水通过强透水层入侵到堤坝后,江河水入侵的范围与渗透性成正比关系,通过天然示踪方法测出地下水中的强度、电导率、pH 值等参数,然后利用同位素示踪单孔稀释法测定各地层渗透流速,利用同位素示踪单孔测定水平流向,利用同位素示踪测定注水和不注水条件下垂向流,进而确定堤坝管涌及管涌区渗透性,江苏省农业科学研究院原子能研究所研制的一种智能地下水动态参数测量仪,能较好地地在天然流场下的单井中测量地下水的各种渗透特性,近期,利用该方法及上述仪器设备,在黄河下游截渗墙施工质量的检测中取得了较好的成果。

5 流场法探测技术

流场法是中南大学何聚善院士、汤井田教授^[7]等提出的一种测渗漏的新方法,流场法的核心技术是用电磁场、弹性波场等去拟合渗、漏的水流场,测

量场的密度向量,场的密度向量分布与渗、漏水场的水流密度向量相一致,集中指向渗漏水入口,他们的研究表明,将探头放至水底,测量水底的流场密度向量分布,其横向分辨率最高,定位度会更好,他们用自己研制的仪器设备对浏阳株树桥水库进行探测,取得了较好的效果。

6 结 语

经过数十年广大科技工作者的努力,我国堤坝隐患及渗漏探测技术取得了很大的进展,今后,堤坝管理单位、建设单位及各科研院所、生产单位检测技术人员应精诚合作,联合攻关,加强堤坝隐患及渗漏快速无损探测的基础理论研究和高新技术系统的研究与开发(堤坝渗透破坏险情船载(或专用车载)预警、报警系统),加快建立 GIS 堤防运行管理智能数据库和堤防安全性评价专家系统的研究,据此,堤坝隐患及渗漏探测技术才有可能更快地发展,满足我国堤坝管理工作的需要。

参考文献:

- [1] 肖柏勋,等.工程地球物理勘探最新研究进展及技术应用[J].水利水电快报,1999(20):1~8.
- [2] 房纯刚.瞬变电磁法探测堤防渗漏隐患[A].见:全国堤防加固技术研讨会文集[C].南昌,1999.
- [3] 房纯刚.大地电导率仪探测堤防渗漏隐患[A].见:全国堤防加固技术研讨会文集[C].南昌,1999.
- [4] 吴相安,等.水利隐患 GPR 探测技术研究[J].地质与勘探,1998,34(3):47~51.
- [5] 田世场.综合物探在堤防隐患探测中的应用[A].见:全国堤防加固技术研讨会文集[C].郑州,2000.
- [6] 杜国平.同位素示踪技术在堤防隐患探测中的应用[A].见:全国堤防加固技术研讨会文集[C].郑州,2000.
- [7] 汤井田.流场法探测堤坝渗漏隐患研究[A].见:全国堤防加固技术研讨会文集[C].郑州,2000.

(收稿日期:2000-10-30 编辑:马敏峰)

(上接第 58 页)

- [12] 郭创新,梁年生,叶鲁卿,等.水轮机智能 PID 调节[J].大电机技术,1997(5):56~60.
- [13] 王伯林.水轮发电机组的模型参考自适应控制[J].自动化学报,1987,13(6):408~415.
- [14] 王伯林.水轮发电机组转速自适应控制[J].水力发电学报,1989,(4):41~48.
- [15] 陈光大,刘炳文,蔡维由,等.基于测试系统频率的自适应水轮机调速器[J].水力发电学报,1993,(2):37~45.
- [16] 蔡维由,陈光大,刘炳文.水轮机调速器的极点配置法

- 设计及自适应控制[J].大电机技术,1995,(6):47~56.
- [17] 孟佐宏,蔡维由,陈光大,等.水轮机调节系统最优鲁棒极点配置调速器的设计[J].大电机技术,2000,(4):60~64.
- [18] 徐中,孙伟,刘晓冰.单神经元自适应 PID 控制器的研究[J].大连理工大学学报,1999,39(5):667~672.
- [19] 沈祖诒,黄宪培.通过长输电线与电网并列运行水轮机的控制[J].水力发电学报,1989,(3):77~86.
- [20] 刘乐星,毛宗源.水轮机的 GA-PID 控制器研究[J].电力系统自动化,1997,21(12):41~43.

(收稿日期:2000-11-13 编辑:张志琴)