

我国堤坝隐患探测技术及面临的问题与建议

李雷^{1,2}, 张国栋^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院 大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 阐述了我国堤坝隐患探测技术的应用情况,总结了堤坝隐患探测技术在我国实际应用中探测结果不确定性的主要原因,分析了介质材料的多样性和介质特性的不确定性对探测结果的影响、被探测对象中隐患尺度和仪器分辨率的矛盾、探测结果解读的不确定性和困难性等问题. 建议加强堤坝介质特性对探测结果的影响以及现场对比试验研究,多种隐患探测技术的综合应用研究,加强理论和仪器应用技术的研究和跨学科技术人员的培训.

关键词: 堤坝隐患探测; 高密度电阻率法; 地质雷达法; 瞬变电磁波法; 面波法; 介质材料特性; 仪器分辨率

中图分类号: TV871.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0091-09

我国堤防和大坝病害严重,其中有不少堤坝存在严重隐患,每年汛期演变为险情.我国一直以来对堤坝隐患探查技术十分重视,期望能够预先发现隐患,及时处理,改变被动局面.上世纪90年代后,堤坝隐患探测技术研究得到较大进展.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^[1],进而列入国家“九五”重点科技推广项目.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9月,国家防办在郑州举办了“全国堤坝隐患及渗漏探测技术研讨会”;2005年11月水利部建管司和国科司在西安举办了“大坝安全与堤坝隐患探测国际学术研讨会”,有力地推动了隐患探测技术的学术研讨和发展.

为了进一步推动隐患探测技术的实用和适用研究,国家防办先后在湖南益阳和北京大兴建立了南方和北方两个堤坝隐患探测试验场^[2],1999年在湖南益阳进行了全国范围的物探仪器测试,2000年8月在北京大兴永定河一段废堤上再次进行了隐患探测技术现场测试.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,基本反映了我国物探技术在堤坝隐患探测方面应用的现状和水平,积累了各类仪器测试的第一手资料.

虽然近20年来在隐患探测技术方面已经取得了很多研究成果^[3-5],但从目前掌握的测试资料看,还没有完全适用于堤防隐患探测,特别是能够在汛期快速准确地探测堤防险情的仪器设备^[2].同时,虽然堤坝隐患探测的原理等同于找矿勘探、地质普查和一般工程勘查领域中的原理,各类堤防隐患也与正常堤身、堤基介质具有一定的电磁、电性、弹性等差异,具备应用各种物探方法的物理前提,但能用于堤防隐患探测的主要可归纳为高密度电阻率法、探地雷达、瞬变电磁法和面波法四类,这些方法和仪器还需要在可靠性和准确性方面做进一步的研究和完善.

收稿日期: 2009-06-19

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC14B07)

作者简介: 李雷(1948-),男,浙江慈溪人,教授级高级工程师,主要从事大坝安全研究. E-mail: lli@nhri.cn

1 几种常用的堤坝隐患探测技术

1.1 高密度电阻率法

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.该方法以岩土体的电性差异为基础,研究在施加电场的作用下地下传导电流的变化分布规律,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、直观反映,是堤坝隐患探测详查的主要方法.

郑灿堂等^[6]通过充电法、高密度电法、地质钻探的联合探测以及渗流计算分析,有效查明了郭家村水库坝后渗水明流的成因,并对该库渗流安全进行了评价.郑灿堂等认为充电法能快速有效地查明渗漏入渗处、渗漏通道在平面上的分布;高密度电阻率成像可以形象地反映地质体的细部变化;充电法和高密度电法既可相互验证,又能互为补充,二者联用可以查明渗漏隐患的空间分布范围,为钻探和渗流计算分析提供指导.

谢向文等^[7]应用“HGH-III 堤防隐患探测系统”在黄河大堤花园口段对一已知的直径约 1 m、埋深 8 m 的穿堤涵管进行了高密度电阻率法实验研究,得到已知隐患的电阻率图像.在黄河九堡老口门段堤防的已知隐患进行了同样的图像实验研究,得到了三层不同填筑体的电阻率图像.这种试验研究对提高隐患探测可靠性极为重要.自 1999 年以来,谢向文等^[8]应用“高密度电阻率法堤防隐患探测仪”对黄河下游堤防工程隐患进行了大规模的探测,发现了大量隐患,但没有说明所发现的隐患或异常点是否确为隐患和异常部位,对所探测的隐患缺乏明确的结论.

吕玉增等^[9]针对高密度电法中电极布置和观测装置多样而出现的实际探测中装置选择问题进行了研究,从工作条件要求、观测装置选择以及数据观测三方面进行了探讨.他们认为高密度电法仪器的电缆设计电极间隔应相等,要求测区地形起伏不能太大,选择电极间隔不应大于电缆的电极间隔.探测低阻异常体时,首选的观测装置是偶极-偶极装置;探测高阻异常体时,首选的观测装置是三极装置;探测深部异常体时,最好选用三极装置;测区由浅部到深部要求全面探测时,建议小极距用偶极-偶极装置观测,大极距用三极装置.

邓居智等^[10]利用重庆奔腾数控技术研究所研制的 WGMD-1 型高密度电阻率测量系统,对江西某水库土质坝体的隐患进行了探测.在上游坡、坝顶、下游坡共布置 4 条测线,探测到该坝体的隐患区域为桩号 0+115 m~0+185 m 段.结合钻探资料,施工单位对该段进行了灌浆处理.然而,作者同时认为由于堤坝中存在的隐患种类繁多,高密度电阻率法探测地下洞穴的极限分辨率最多只能探测洞径与埋深之比为 1:10 的洞径.因此,在进行坝体隐患探测时也不能过分夸大高密度电阻率法的作用.资料解释推断也要充分利用各种已知信息,排除各种干扰因素对测量结果的影响,以免判断错误.

郭君科等^[11]使用 WGMD-1 型高密度勘探系统探测了黑龙江二门山水库大坝,推测在桩号 0+109 m 和 0+190 m 处存在两个破碎带.但作者建议采用高密度电法勘探时最好结合钻孔(或探井)资料并辅助以电测深进行综合解释,以提高解释的准确性;如果测区地形起伏较大,应进行地形改正,否则会给最终解释结果带来较大误差;要取得更好的效果还有赖于不断的实验研究及处理技术的提高和深入,如:高密度电法的各个排列装置在特征异常体上的断面特征、层状介质断面特征及任意测点测深曲线抽取和定量解释、高密度电法的地形改正、高密度电阻率反演(Zohdy 和层析成像技术).

谭明等^[12]利用高密度电法仪,数据采集系统为 DZD-4 高密度电阻率测量系统,对新疆最大的土石坝工程克孜尔(又名黑孜尔)水库大坝(最大坝高 44 m)进行隐患探查,试图查明坝体内是否存在空洞、裂隙及其渗漏区域.探查结果显示副坝 1+150 m 至 1+250 m 段为一低阻异常带,初步判定为坝体含水率较高所致,副坝与二道坝连接处 0+750 m 以北坝段至电厂引流涵洞为一相对低阻段,可能是心墙含水率偏高所致.作者

认为在丰富观测资料基础上,结合其他分析手段对坝体采用高密度电法检测异常是一种有效直观的手段,建议对探查的结果采用其他手段进一步探查,弄清含水率偏高的具体原因。

综上所述:①高密度电阻率法在堤防隐患探测中得到了较大规模的应用,效果明显;也开始在水库大坝的隐患探查中应用,并取得了一些应用经验;②据电法勘探理论,电法探测洞穴的竖向极限分辨率最多只能探测洞径与埋深之比为1:10的洞。黄河水利委员会曾经在背景电阻率值30~50 $\Omega \cdot \text{m}$ 、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,测出了洞径与埋深之比1:12的洞^[1]。因此,该方法的应用范围受到纵向分辨率的极大制约,适用于埋深较浅、洞径较大的堤坝隐患,包括白蚁等动物洞穴。

1.2 地质雷达

地质雷达是利用高频电磁波束来探测有耗介质中目标体^[13],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。

已推出的商用探地雷达有美国微波联合体(Microwave Associates)的MK I和II、加拿大探头及软件公司(SI)的Pulse EKKO系列、美国地球物理探测设备公司(GSSI)的SIR系列、瑞典地质公司(SGAB)的RAMAC钻孔雷达系统、俄国XADAR Inc.的XADAR系统等和英国ERA工程技术部的雷达仪。地质雷达技术在中国应用时间不长,却已取得了不少资料和成果,已应用于基岩探测、地下水调查、地质分层、喀斯特成图、河底及湖底剖面、岩溶及空洞探测、坝体深部探测、滑坡调查及坝体质量检测等。

李宜忠等^[14]等在山西五台县西龙池抽水蓄能电站,为了解覆盖层碎石土深度10 m以内的土质透镜体、松散碎石土架层的分布情况,对坝基覆盖层进行了分区地质雷达探测。根据地质雷达图像分析,共圈定7处松散碎石土架空层和5处土质透镜体。除次堆石区一处推测的碎石土架空层开挖后为土质透镜体外,其余目标物开挖结果与地质雷达解释结果基本吻合。何开胜等^[15]以甘肃省民乐山丹地震时受到一定破坏的李桥水库为对象,对水库大坝裂缝和渗漏通道等病害进行了现场踏勘和地质雷达探测研究。探测表明,坝身壤土心墙填土总体密实性差,松散、不均匀、裂隙较多,由此带来坝身渗漏。他们分析了东、西坝段坝顶轴线下和坝后道路下渗漏状况及其连通性,研究提出了李桥水库坝顶裂缝的典型雷达图像特征、堤坝渗漏通道经历的三个发展时期及其对应的雷达图像特征,以及坝身不密实土层的雷达波形特征的识别方法,分析了这些病害的地质雷达探测机理,诊断了水库受震后这些内部深层病害的位置、程度,可供水库除险加固决策时参考。李桥水库震后典型病害的探测研究表明,地质雷达技术可以对土体不密实等引起的坝基渗漏通道及其发展过程进行有效探测。何开胜等^[16]对甘肃省瓦房城水库左岸边坡地震时受到的滑动破坏进行了现场踏勘和地质雷达探测,分析了左岸高边坡的土质状况、裂隙发育程度、滑动面形状和位置,提出了浅层滑动和深层滑坡的典型雷达图像特征和雷达探测机理。同时以甘肃省民乐地震时受到一定破坏的双树寺水库为对象,对水库坝顶纵向裂缝、坝顶沉陷、库岸道路滑坡开裂裂缝、溢洪道右岸高边坡滑坡趋势、左坝肩渗漏通道等病害进行了现场和地质雷达探测研究,揭示了这些水库病害的典型雷达图像特征,分析了这些病害的地质雷达探测机理,提出了水库受震后这些内部深层病害的位置、程度或发展趋势。利用震后典型病害的探测研究表明,只要掌握了被测病源体的物理特性、病灶结构、发展过程、力学演变规律,弄清雷达电磁波对特定病患的探测机理,正确处理好天线频率与探测深度的关系,就能找出各种病患的雷达图像特征,从而有效的进行探测。

何开胜等^[16]通过对京杭运河、洪泽湖大堤危险段渗漏病害的探地雷达探测,结合往年这些堤段的散浸、渗水、冒气、冒水观察结果,分析这些病害的雷达波形异常特征,推断了散浸出水点、渗漏通道出水点的位置,并进行手摇钻探取予以验证。他指出探地雷达探测堤坝渗漏虽有一定的效果,但考虑软土区堤坝地下水位较高、电磁波随深度衰减快、雷达分辨率随深度下降大等因素,探地雷达目前只能定位于探测较大规模的渗漏通道。对于处于成长期的细小渗漏通道,有时探地雷达还不能完全分辨,建议进一步加强研究,改进探测设备,提高软件处理能力。徐兴新等^[17]应用地质雷达探测堤坝内部和基础的隐患,通过探巢试验和开挖验证,表明探地雷达技术可探测出深度3.5 m左右的白蚁成年主巢和1.5 m以内的主蚁道。在6个测试点415 m

长的剖面开挖验证表明,主巢定位准确率为 95% 以上,深度和平面定位误差 10 cm 左右.在广东枫树坪水库大坝的右岸坝基探测到一条溶蚀带,是水库 30 年来严重渗漏的主要通道,经灌浆已处理好渗漏问题.对南水水电厂大坝(定向爆破堆石黏土斜墙坝)的黏土斜墙进行了探测,查出斜墙多处存在裂缝、塌陷、护坡垫层被淘刷等严重隐患,经 3 处开挖验证,实际情况和探测结果完全一致.对吴川积美水闸的水下结构进行探测,查出铺盖上游边缘和海漫下游边缘各有一个冲刷坑,闸下数百平米的混凝土海漫和部分齿墙被冲毁,靠近深水闸门的部分海漫基底被淘刷,且塌陷边界将以较快速度向上游扩展,威胁闸体安全.检测结果均被验证.

虽然地质雷达技术有着较为广阔的应用前景,但也存在一些局限性,主要体现在探测深度方面.地质雷达发射的电磁波频率越高,电磁波在地下介质中衰减越厉害,探测距离越小,同时分辨率越低.因此,在不增加地质雷达体积和重量的情况下,如何提高其发射功率和分辨率还有待于研究.地质雷达受地面金属体、电线等干扰较大,这也限制了地质雷达技术的应用.此外,地质雷达技术作为物探的一种手段,同样存在多解性和目标体方向不确定性的缺陷.应用现状表明,地质雷达的图像解释高度依赖于专家的经验,图像的数据处理和地质解释急需进一步改善;需慎视人们对当前广泛应用成果的简单认识,需了解这一技术理论基础的重要性.作者提醒使用者注意探地雷达应用的基础在于地下介质允许的物理条件和现时的设备条件,当前还很难同时兼有高的分辨力和足够的穿透深度,建议在矛盾统一的基础上,合理利用.

1.3 瞬变电磁波法

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.房纯刚等^[18-20]率先将该方法应用于土坝和堤防渗漏隐患探测,并成功研制 SDCO2 型堤坝渗漏检测仪.该仪器既可用于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 60 m,位置分辨率为 1~5 m(横向测站间距可任意设置),深向分辨率 1~2 m,相对分辨率(径深比)约为 8%.采用尺寸 70 cm×70 cm×5.6 cm 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 0.5 min.该系统曾在湖南岳阳进行隐患探测,测线长 17.4 km,探测深度 0~60 m,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.

作者认为影响堤身和基础电导率变化的因素十分复杂,主要可分为土和水的因素.土的因素包括①土质,即土的组成成分及其比例;②颗粒级配;③密度孔隙率.水的因素包括①水质,即水所含各种化学物质及其比例;②含水量;③水的矿化度.为解决物探结果的多解性,常采用联合物探法.然而,在通常情况下,对于一段堤防,填筑材料就近取土,土质和水质可近似认为是均匀的,因而,各处的电导率也是均匀的.当其中某些部位存在缺陷或渗漏时,该处的电导率就会出现异常.通过探测电导率异常区,就可以发现隐患,并确定其部位.作者认为在进行探测资料解释时,充分了解探测现场情况和地质情况,并请堤防管理人员介绍堤防运行情况也是十分重要的.

1.4 面波法

面波勘探也称弹性波频率测深,是国内外近几年发展起来的一种新的浅层地震勘探方法.面波分为瑞利波(R波)和拉夫波(L波),而 R 波在振动波组中能量最强、振幅最大、频率最低,容易识别也易于测量,所以面波勘探一般是指瑞利面波勘探.

在进行堤坝隐患探测时,利用冲击震源激发地震波,多通道采集地震动记录,通过面波分析软件提取面波频散特性,分析堤坝的结构和物性.探测时,当介质层呈现层状具有波速差异时,其效果反映明显.因此,可以利用面波的频散曲线,了解堤段的不均匀情况.

瑞利面波凭借其衰减小、信噪比大、抗干扰能力强以及在层状介质中所具有的频散特性,在工程地质勘察和工程无损检测等领域已得到广泛应用.自上世纪 90 年代以来,我国利用瑞利面波技术进行了大量的工程质量检测及隐患探查^[21].1994 年,任青文^[22]将该法应用于材料损伤探测,即对材料内部的裂缝、空隙等缺陷进行探测;1996 年,赵明^[23]将瞬态瑞利面波法应用于灰岩溶洞、挡土墙厚度、地层分层、水库大坝质量的

探测.1995年,黄嘉正等^[24]将RSM216H动测仪结合RL21型激振系统及锤击方法,采用稳态和瞬态两种方法对地基进行了检测;1996年,杨成林等^[25]应用瑞利面波法对廊坊北大街沥青混凝土公路基层压实度、广东乳源—坪石公路路基质量进行了检测;1998年,王士恩等^[26]将瞬态多道瑞利面波法应用于堤坝防渗墙质量检测中;1996年,肖柏勋等^[27-29]自行研制了一种具有宽频带、大功率特点的超磁致伸缩声波震源,将其用作瞬态瑞利面波勘探的地面震源以替代传统人工锤击方法,并将其成功地应用于长江三峡工程大坝建基岩体质量和爆破松动层厚度等检测.

王书增等^[30]应用面波法分别在安徽定远县青春水库、黄桥水库淮洪新河土坝、齐顾镇水库、临淮岗副坝等处探测了土坝中的管涵、土洞或软弱层、白蚁巢穴、土坝滑坡、坝体质量,进行了较为系统的工作.2007年林锦霞等^[31]在高速公路设计中针对土体边坡、滑坡体采用瞬态面波勘探手段,划分边坡土层的分层、寻找滑动面,并结合钻探资料综合分析边坡的稳定性程度.作者认为,在土质地层勘探中,利用面波速度差异建立地层的速度分层是可行的,利用面波勘探划分土质滑坡体的软弱夹层,确定滑动面,具有较好的效果,但是面波勘探无法获得土层的物性参数.因此,在实际应用中应结合钻探资料,对地层进行层位连续划分.

2005年蔡靖等^[32]利用面波与震动映像相结合的方法进行了防渗墙无损检测的试验研究和应用,建造了4段含有施工中容易出现的质量问题的模型墙,应用高密度震动映像进行模型墙试验,建立墙体均匀性评价标准;同时建立了应用瞬态面波法定性评价墙体均匀性和局部缺陷的标准.

可见,面波法是一种具有应用前景的隐患探测技术.但在堤坝隐患探测方面的应用时间不长,在探测技术理论上还有待进一步研究,同时应针对堤坝隐患的特点,进行实用性研究,例如瑞利波勘探的震源问题^[25]、高模式瑞利面波的“之”字型频散曲线产生的深层次原因、高模式导波的特性及其影响因素、瑞利面波反射特性和提纯问题、反演问题等.

2 存在的问题及对策

2.1 存在的主要问题

2.1.1 介质材料的多样性和介质特性的不确定性对探测结果的影响 堤坝隐患探测技术是根据介质特性的异常变化,判断堤坝隐患部位、类型和严重性,但堤坝介质特性具有多样性和不确定性.对于土介质,堤坝填筑土的土质不同,其介质特性不同;即使同一类土,土的级配、碾压程度都会对介质特性产生重大影响.对于水介质,水的成分、土体含水率、饱和度都将影响到土介质特性,特别是土体的含水率还随时间而变化.这些因素都将影响探测结果的准确性.

2.1.2 被探测对象中隐患尺度和仪器分辨率的矛盾 堤坝的隐患从空间特征看无非是点、线、面三类.所谓点,如渗漏点、动物洞穴(包括白蚁巢穴);所谓线,如裂缝(包括纵向、横向、水平向)、穴道;所谓面,如施工薄弱带、不满足要求的材料带等.这些隐患有两个特点,一是小尺寸,二是平时发觉不了,但汛期可能发展为险情.一般情况下,点、线、面都不会很大,裂缝一般都是细微的,大的为厘米级,小的为毫米级,它的危害在于汛期大水时可能成为渗流通道,导致冲蚀破坏.如果是动物穴道,直径也不会很大.如果是薄弱带,情况可能非常复杂,由于分层碾压,深度方向上的压实度其实是不均匀的,压实度不足的薄弱带,可能和压实度满足的正常带的区别并不明显,干密度差别很小,在分层上,薄弱层厚度不会很厚.但是堤坝隐患探测技术是从物探技术移植过来的,物探技术是水利水电工程地质勘测的重要方法之一,应用于大范围的地层地质调查.因此,在尺度上往往是较大的,对探测分辨率的要求不是很高.

对高密度电阻率法而言,其分辨率曾探测出洞径与埋深为1:12、埋深3.5 m、洞径0.3 m的洞穴,已经引起轰动.对探地雷达来说,电磁波在土体中衰减大,穿透距离小.在粉土中的衰减程度是干砂中的100~10000倍,黏土中的衰减比粉土更大.地质雷达的探测深度通常与介质特性和雷达发射天线频率有关,频率高,探测距离小,但分辨率高,反之,分辨率低.不同天线频率对应的分辨率见表1.

表 1 SIR 系列雷达不同天线频率的探测深度及分辨率^[17]

Tab. 1 Detective depth and resolution ratio of different antenna frequency for SIR radar series

雷达天线频率/ MHz	用 途	屏 蔽	脉冲宽度/ ns	最大探深/ m	分辨率/ m
80	地质勘探	无	13	30	1.5
100	地质勘探	有	10	30	1.2
120	浅层地质勘探	无	8	25	1.0
300	浅层地质勘探	有	3	10	0.3
500	洞穴、公用事业	有	2	5	0.3
900	洞穴、钢筋	有	1	1.5	0.1
1000	混凝土	有	1	0.5	0.1

根据堤坝的要求,如果选用 25~30 m 深度,则分辨率为 1~1.2 m,和堤坝隐患尺度相比,分辨率过大。

对瞬变电磁法而言,位置分辨率为 1~5 m(横向测站间距可任意设置),深向分辨率 1~2 m,相对分辨率(径深比)约为 8%,即 1:12 左右。因此,隐患探测技术的分辨率和堤坝隐患的尺度之间存在较大的矛盾。

2.1.3 探测结果解读的不确定性和困难性 探测结果解读的影响因素很多,主要可分为三类。一是介质材料的多样性和介质特性影响因素的多样性,客观上带来解读的困难;二是探测仪器和技术所能达到的深度、分辨率等因素导致的探测结果判读的困难性;三是解读人员的综合素质。前两点已如前所述,解读人员的技术素质是决定解读准确程度的重要因素。目前隐患探测仪器多从国外引进,即使是国内生产,也经过了理论和技术方面的不断改进。能熟练掌握仪器和探测技术的技术人员并不是很多,因此对于探测技术和仪器所导致的问题,难以及时发现和排除,正确解读存在一定的困难。另一方面,探测技术人员虽然是仪器方面的专家,但很可能不是堤坝方面的专家,对于堤坝的材料特性、工程特性并不是十分了解,隐患探测结果的理解受到专业的局限。正是这些主观、客观方面的因素使得探测结果的解读存在较大的不确定性和困难性。这也是很多论文中提到加强培训的原因。

2.2 对 策

2.2.1 加强介质特性对探测结果的影响以及现场比对试验研究 上述所有堤坝隐患探测技术中,介质特性对探测结果的影响最为明显,对探测结果的解读具有重要意义。“八五”“九五”期间研究的重点在于隐患探测仪器与技术的开发研究,在国外研究的基础上出现了一批国产隐患探测仪器,并且得到广泛应用,下一阶段的研究重点应该是隐患探测结果解读的可靠性、准确性。为此,建议加强对影响探测结果解读的不确定性因素进行深入系统的研究,其中探测介质特性的影响应予以特别重视。

尽管目前已开展不少现场比对试验,通过已知的隐患得到相应的探测结果,可以加强对探测结果解读的可靠性,但这样的比对验证试验还需系统化、制度化,建立起各种隐患下探测图谱档案,增加技术可信性和可靠性。国家防办已建立了两个试验基地,可通过不断地现场测试推荐可靠可信的仪器和技术。

2.2.2 加强多种隐患探测技术的综合应用研究 由于堤坝探测目标的复杂性和不确定性,探测结果的解读有很大的难度。因此,建议至少需有 2 种方法或仪器同时检测,以便互相校核和补充。这是堤坝隐患探测的一个发展方向,将大大提高判读的准确性和可靠性。

2.2.3 加强理论和仪器应用技术的研究 加强探测理论和基础技术研究,总结和掌握各种隐患在物探曲线或剖面上的影响或异常特征,达到真实可靠地划分隐患异常,并确定各种物探异常的物性地质特征。打破部门界限,吸收地质矿产、地震等多年应用物探技术的部门专家参与研究,引进、消化、吸收现有国内外先进物探仪器的技术,并结合堤防隐患特点和查险快速、准确、适应恶劣环境的要求,研究适合堤防隐患探测的布置方式和探测程序。

2.2.4 加强培训,提高技术人员跨学科综合素质 隐患探测技术对探测结果解读人员的要求极高。隐患探测其实是一门多学科综合应用,对仪器、技术、堤坝隐患、水土介质特性等几个方面都要有深刻的理解,必须

是综合型人才. 解读技术人员知识越是全面、综合,其解读的准确性和可靠性越高. 因此,对探测人员的全面培训,提高其跨学科的综合素质,是今后一个重要而艰巨的工作.

3 结 语

堤坝隐患探测技术是我国堤坝安全监控技术的重要内容,虽然已有不少应用实例,但由于堤坝材料的多样性,性态的复杂性,隐患的小尺度特性等,使得探测成果的不确定性成为发展的瓶颈. 今后的一段时间内,必须在介质特性对探测结果的影响、多种探测技术的综合应用、探测成果的确定性、技术人员的综合素质等方面加强研究,才能突破瓶颈,促进该技术在堤坝隐患探查中的实际应用.

参 考 文 献:

- [1] 冷元宝,朱文仲,何 剑,等. 我国堤坝隐患及渗漏探测技术现状及展望[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(4): 59-62. (LENG Yuan-bao, ZHU Wen-zhong, HE Jian, et al. Actuality and expectation on the detective techniques of hidden troubles and leakage in dikes and dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002, 22(4): 59-62. (in Chinese))
- [2] 束庆鹏,冯 琳. 堤防隐患探测技术应用初探[J]. 中国水利, 2000(5): 51-52. (SU Qing-peng, FENG Lin. Preliminary study on hidden trouble detective technique application in dikes and dams[J]. China Water Resources, 2000(5): 51-52. (in Chinese))
- [3] 李富强,王 钊. 堤坝隐患探测技术综述[J]. 人民黄河, 2004, 26(10): 15-17. (LI Fu-qiang, WANG Zhao. Overviews on hidden trouble detective techniques[J]. Yellow River, 2004, 26(10): 15-17. (in Chinese))
- [4] 冷元宝,黄建通,张震夏,等. 堤坝隐患探测技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 370-379. (LENG Yuan-bao, HUANG Jian-tong, ZHANG Zheng-xia, et al. Research progress in scatheless detection of hidden troubles in embankments[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(3): 370-379. (in Chinese))
- [5] 张震夏. 堤坝隐患检测的方法与仪器[J]. 大坝与安全, 2004(1): 1-8. (ZHANG Zheng-xia. Methods and instruments to detect perils in embankments and dams[J]. Large Dam & Safety, 2004(1): 1-8. (in Chinese))
- [6] 郑灿堂,万 海,董延朋,等. 电法探测技术在水库大坝渗漏隐患评价中的作用[C]//大坝安全与堤防隐患探测国际学术研讨会,西安,2005. (ZHENG Chan-tang, WAN Hai, DONG Yan-peng, et al. The function of electrical prospecting technique in reservoir dam appraisal[C]// Proceedings of International Symposium on Dam Safety and Detection of Hidden Troubles of Dams and Dikes. Xi'an, 2005. (in Chinese))
- [7] 谢向文,马爱玉,张晓予,等. 堤防隐患探测和险情监测技术研究[J]. 大坝与安全, 2004(1): 24-26. (XIE Xiang-wen, MA Ai-yu, ZHANG Xiao-yu, et al. Study on peril detecting and danger monitoring technologies for dikes[J]. Large Dam & Safety, 2004(1): 24-26. (in Chinese))
- [8] 谢向文,郭玉松,张晓予,等. 地球物理技术在黄河下游堤防工程隐患探测中的应用与发展[C]//大坝安全与堤防隐患探测国际学术研讨会,西安,2005. (XIE Xiang-wen, GUO Yu-song, ZHANG Xiao-yu, et al. The application research of geophysical technologies in embankment risk detection for dikes in lower reaches of Yellow River[C]// Proceedings of International Symposium on Dam Safety and Detection of Hidden Troubles of Dams and Dikes. Xi'an, 2005. (in Chinese))
- [9] 吕玉增,阮百尧. 高密度电法工作中的几个问题研究[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(4): 264-269. (LU Yu-zeng, RUAN Bai-yao. Discuss several problems about high density resistivity[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(4): 264-269. (in Chinese))
- [10] 邓居智,刘庆成,莫 撼. 高密度电阻率法在探测水坝隐患中的应用[J]. 华东地质学院学报, 2001, 24(4): 282-285. (DENG Ju-zhi, LIU Qing-chen, MO Han. Detecting hidden defects of dams with high-density resistivity technique[J]. Journal of East China Geological Institute. 2001, 24(4): 282-285. (in Chinese))
- [11] 郭君科,田绍义,吕绍龙. 高密度电阻率法技术与应用[J]. 黑龙江水利科技, 2005, 33(1): 115-117. (GUO Jun-ke, TIAN Shao-yi, LV Shao-long. Technology and application of high density resistivity method[J]. Heilongjiang Science and

- Technology of Water Conservancy, 2005, 33(1): 115-117. (in Chinese))
- [12] 谭明, 王坚, 尹力峰. 克孜尔水库大坝典型坝段的高密度电法检测[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(B07): 183-185. (TAN Ming, WANG Jian, YIN Li-feng. Detection of high density resistivity for typical dam section of Kezier reservoir dam[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(B07): 183-185. (in Chinese))
- [13] 薛桂玉, 余志雄. 地质雷达技术在堤坝安全监测中的应用[J]. 大坝与安全, 2004(1): 13-19. (XUE Gui-yu, YU Zhi-xiong. Application of ground penetrating radar technology to embankment safety monitoring[J]. Large Dam & Safety, 2004(1): 13-19. (in Chinese))
- [14] 李宜忠, 严框宁. 地质雷达技术在坝基探测中的应用研究[J]. 人民长江, 2006, 37(6): 30-31. (LI Yi-zhong, YAN Kuang-ning. The application of geological radar in dam foundation detect[J]. Yangtze River, 2006, 37(6): 30-31. (in Chinese))
- [15] 何开胜, 王国群, 周荣官. 瓦房城水库左岸高边坡地震破坏和探地雷达探测研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(3): 320-324. (HE Kai-sheng, WANG Guo-qun, ZHOU Rong-guan. GPR detection study of seepage disease due to earthquake at Wafangcheng reservoir[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(3): 320-324. (in Chinese))
- [16] 何开胜, 凌云, 王国群. 堤防渗漏病害的探地雷达探测研究[C]//大坝安全与堤防隐患探测国际学术研讨会. 西安, 2005. (HE Kai-sheng, LIN Yun, WANG Guo-qun. Ground penetrating radar detection study for seepage diseases of dikes [C]//Proceedings of International Symposium on Dam Safety and Detection of Hidden Troubles of Dams and Dikes. Xi'an, 2005. (in Chinese))
- [17] 徐兴新, 吴晋, 沈锦音. 应用探地雷达监测水利工程隐患技术研究报告[R]. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东省水利厅, 2002. (XU Xing-xin, WU Jin, SHEN Jin-yin. Research report on monitoring hidden troubles of water resource engineering by using ground penetrating radar [R]. Guangzhou Geochemistry Research Institute of Chinese Academy of Sciencer, Guangdong Provincial Department of Water Resources, 2002. (in Chinese))
- [18] 房纯纲, 葛怀光, 贾永梅, 等. 瞬变电磁法用于堤防渗漏隐患探测的技术问题[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(5): 21-24. (FANG Chun-gang, GE Huai-guang, JIA Yong-mei, et al. Techniques of transient electro-magnetic sounding in detection of hidden defects in levees[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(5): 21-24. (in Chinese))
- [19] 房纯纲, 葛怀光, 鲁英, 等. 瞬变电磁法探测堤防隐患及渗漏[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(4): 30-32. (FANG Chun-gang, GE Huai-guang, LU Ying, et al. Detectino of hidden defects and leakage in levees by transient electro-magnctic sounding[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(4): 30-32. (in Chinese))
- [20] 房纯纲, 葛怀光, 鲁英, 等. 堤防渗漏隐患探测用瞬变电磁仪[J]. 水电自动化与大坝监测, 2002, 26(5): 38-41. (FANG Chun-gang, GE Huai-guang, LU ying, et al. Transient electromagnetic instrument for detecting hidden leakage defects in levees[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2002, 26(5): 38-41. (in Chinese))
- [21] 肖柏勋, 李长征. 瑞雷面波勘探技术研究述评[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(1): 38-47. (XIAO Bo-xun, LI Chang-zheng. Review of Rayleigh prospecting technology reseach[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(1): 38-47. (in Chinese))
- [22] 任青文. 表面波谱分析方法及其在工程中的应用[J]. 河海科技进展, 1994, 14(2): 7-14. (REN Qing-wen. Surface spectral analysis method and its application in engineering[J]. Advances in Science and Technology of River and Sea, 1994, 14(2): 7-14. (in Chinese))
- [23] 赵明. 瑞利波法在工程勘察中的应用[J]. 勘察科学技术, 1996(5): 54-57. (ZHAO Ming. The application of Rayleigh wave method in engineering investigation[J]. Site Investigation Science and Technology, 1996(5): 54-57. (in Chinese))
- [24] 黄嘉正, 张学强, 关小平. RSM-16H 动测仪在面波法岩土体检测中应用[J]. 岩土力学, 1995, 16(2): 83-89. (HUANG Jia-zheng, ZHANG Xue-qiang, GUAN Xiao-ping. RSM-16H dynamic testing instrument in rock and soil surface wave method detection applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(2): 83-89. (in Chinese))
- [25] 杨成林, 时福荣, 李从信, 等. 应用瑞雷波等方法对公路质量进行无损检测[J]. 物探与化探, 1996, 20(2): 104-115. (YANG Cheng-lin, SHI Fu-rong, LI Cong-xin, et al. Application of Rayleigh wave methods such as the quality of the road non-destructive testing[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 20(2): 104-115. (in Chinese))

- [26] 王士恩,刘超常,郭伯强. 用瑞利波检验高喷防渗墙的施工质量及地层分布特征[J]. 工程勘察, 1998(6): 11-15. (WANG Shi-en, LIU Chao-chang, GUO Bo-qiang. Rayleigh test with the high spray cut-off wall construction quality and stratigraphic distribution[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1998(6): 11-15. (in Chinese))
- [27] 肖柏勋,刘明贵,肖文治. 一种新型的工程岩体探测震源——超磁致伸缩声波发射器[J]. 地学前沿, 1996(3): 1-2. (XIAO Bo-xun, LIU Ming-gui, XIAO Wen-zhi. A new type of engineering rock detect the source-giant magnetostrictive acoustic transmitter[J]. Earth Science Frontiers, 1996(3): 1-2. (in Chinese))
- [28] 肖柏勋. 水利水电工程坝基岩体质量快速精细检测新技术研究[C]//中国科协第21次“青年科学家论坛”报告文集, 1997. (XIAO Bo-xun. Water conservancy and hydropower project dam foundation rock mass quality fine rapid detection of new technology research[C]//China Association for Science and Technology No. 21, “Young Scientists Forum” Report Collection, 1997. (in Chinese))
- [29] 肖柏勋. 长江三峡工程大坝建基岩体质量快速检测测定方法研究[R]. “八五”国家重大科技攻关项目研究报告, 1995. (XIAO Bo-xun. Yangtze River Three Gorges Project dam foundation rock mass rapid detection method of determining[R]. “85” National Key Scientific and Technological Project Study Report, 1995. (in Chinese))
- [30] 王书增,谭 春,陈 刚,等. 面波法在堤坝隐患探查中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 262-266. (WANG Shu-zeng, TAN Chun, CHEN Gang, et al. Application of Rayleigh wave method in detecting hidden troubles on dams and dikes[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 262-266. (in Chinese))
- [31] 林锦霞,林厚龙,林明海. 瞬态面波法在滑坡体勘探中的应用[J]. 福建地质, 2007, 26(4): 266-269. (LIN Jin-xia, LIN Hou-long, LIN Ming-hai. Application of transient Rayleigh wave to exploring landslide[J]. Geology of Fujian, 2007, 26(4): 266-269. (in Chinese))
- [32] 蔡 靖,张献民,王建华,等. 面波与震动映像结合的防渗墙无损检测技术[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 40-42. (CAI Jing, ZHANG Xian-min, WANG Jian-hua, et al. Surface wave and seismic image combined nondestructive detecting technology for impermeable walls[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(2): 40-42. (in Chinese))

Detective techniques and problems of hidden troubles of dams and dikes in China

LI Lei^{1,2}, ZHANG Guo-dong^{1,2}

- (1. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: The application situation of detective techniques for hidden troubles of dams and dikes in China is systematically expounded. Three key problems about uncertainty of detective results in practical applications are summarized and analyzed; the first is the variety of medium materials and uncertainty of its characteristics which will impact the detective results seriously; the second is the contradictions between the scale of hidden troubles in detective objectives and apparatus resolution powers; the third is the uncertainty and difficulties in interpretation of detective results. Finally, some countermeasures and recommendations are presented so as to strengthen experimental studies on the detective impact caused by different mediums, to apply various detective techniques to the same project in order to compare the results, and to train technicians with multi-subject knowledge in order to enhance their comprehensive diathesis.

Key words: detection of hidden troubles of dams and dikes; high density resistivity; ground penetrating radar; transient electron-magnetic wave; Rayleigh wave; medium characteristic; apparatus resolution ratio