

混凝土防渗面板裂缝综合无损检测技术研究

邹晨阳^{1,2,3}, 张双喜¹, 陈芳^{2,3}

(1. 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330029;
3. 江西省水工安全技术研究中心, 江西 南昌 330029)

摘要:针对某面板堆石坝混凝土防渗面板表面裂缝,采用地质雷达法、冲击回波法和超声波平测法等无损手段进行检测,分析了不同裂缝的电磁波场响应特征,评估了冲击回波法和超声平测法对不同裂缝的检测效果及影响因素,并进行了误差分析;对比钻孔取芯结果,探讨了基于整体快速探测与局部精准测量相结合的综合无损检测方法在裂缝检测中的有效性和精准度。研究表明:地质雷达法直观高效,可实现对防渗面板裂缝的整体检测,快速识别裂缝分布及物性形态;冲击回波法和超声波平测法以其准确灵活的优势,可进一步判定裂缝的深度;通过合理组合检测方法、科学布设测线,综合无损检测方法可查明目标区域裂缝的位置分布、形态规模和具体尺寸,提升裂缝检测的全面性、准确性及精准度。

关键词:混凝土防渗面板;裂缝;无损检测;地质雷达;冲击回波法;超声波平测法

中图分类号:TV698.1⁴ **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0089-07

Study on integrated non-destructive inspection technology for impervious concrete panel cracks//ZOU Chenyang^{1,2,3}, ZHANG Shuangxi¹, CHEN Fang^{2,3} (1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 3. Jiangxi Provincial Research Center on Hydraulic Structures, Nanchang 330029, China)

Abstract: Surface cracks in the impervious concrete panel of a concrete faced rockfill dam were examined by employing several non-destructive testing methods, including ground penetrating radar, impact echo and ultrasonic plane inspection. The characteristics of electromagnetic response of different types of cracks were analyzed, the effects and influencing factors of impact echo and ultrasonic plane measurement upon different cracks were assessed with error analysis. By comparing with direct drilling results, the effectiveness and accuracy of integrated non-destructive method, which was established by incorporating holistic rapid inspecting and local accurate measurement, were discussed in crack detection. The results indicate that ground penetrating radar, with its intuitive and high efficiency, can achieve an overall investigation of impervious panel cracks, and quickly indentify their distribution and physical properties. The impact echo and ultrasonic plane mearsuring method, with their accuracy and flexibility, can further determine the crack depth. Through reasonably combining testing methods and scientifically laying out survey lines, the proposed methods can identify the distribution, basic properties, scope and size of cracks, whilst improving the comprehensiveness, accuracy and precision of detection.

Key words: impervious concrete panel; crack; non-destructive testing; ground penetrating radar; impact echo; ultrasonic plane measurement

面板堆石坝以其安全、经济、环保等优势,成为当前水利建设中应用最为广泛的坝型之一。钢筋混凝土面板作为该类型坝体的主要防渗结构,是大坝安全运行的重要保障^[1]。完整密实的混凝土面板能有效防止水流渗入,但由于设计缺陷、施工质量问题、长期荷载效应、坝基坝体形变、环境侵蚀等因素的叠加作用,防渗面板很容易产生裂缝^[2],不仅影响抗渗性能,甚至可能损害主坝体的承载能力和耐

久性,危及大坝安全。国际大坝协会调查了众多大坝失事原因,结果表明超过10%的大坝是由于混凝土裂缝扩展问题所导致的^[3]。因此,作为面板堆石坝安全鉴定与评价中的关键一环,混凝土防渗面板的裂缝检测的重要性不言而喻,快速准确全面地获取裂缝的位置分布、形态规模和具体尺寸,就可以分析评估裂缝对结构安全的影响,并为后续的修复加固提供科学依据。

基金项目:国家自然科学基金(41874169);江西省重点研发计划(20203BBGL73234);江西省水利厅科技项目(202022YBKT08, 202123YBKT23)

作者简介:邹晨阳(1990—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事水利工程无损检测研究。E-mail:chenyangzou@whu.edu.cn

现有的裂缝检测方法众多,优缺点和适用性各有不同,难以在复杂水工环境下实现裂缝的全面、准确、有效检测。传统的检测方法,如钻芯直接测量和钻孔电视法,优点是直观准确,缺点是检测范围有限,代表性不强且费时费力,同时对实体结构具有破坏作用。近年来,基于弹性波、电磁波等原理的无损检测技术以其便捷精准、快速高效的特点,在混凝土质量检测领域受到广泛关注。田晖等^[4]通过裂缝物理模型试验,证明了超声平测法(ultrasonic plane measurement, UPM)检测裂缝深度的可靠性,并分析了斜交、非对称布点等对测量结果的影响;刘兆勇等^[5]研究了混凝土内钢筋对超声横波三维成像检测结果的影响,指出斜向分布的钢筋对缺陷异常的识别干扰较大;罗广衡等^[6]采用有限元数值模拟定量分析了瑞利波检测混凝土表面裂缝深度的影响因素;刘平等^[7]比较了超声法和瑞利波法对同一裂缝的测试结果,认为瑞利波法受混凝土内部介质影响小,测量深度更大;卢成明等^[8]利用地质雷达(ground penetrating radar, GPR)检测道路结构层中的裂缝,并总结了裂缝的实用探测技术;Tarussov等^[9]提出了一种 GPR 图像视觉分析方法,以此来判定混凝土中的缺陷赋存及钢筋腐蚀状态;邓安仲等^[10]指出红外热成像仪能够识别混凝土裂缝位置及走向,从而实现裂缝的大面积、快速分布式监测;Kang 等^[11]用冲击回波法(impact echo, IE)检测混凝土污水管道中的孔洞,对比了由快速傅里叶变换和短时傅里叶变换计算得出的裂缝深度,指出了两种算法各自的优势;Liu 等^[12]基于 IE 的频谱相位来区分裂缝及钢筋回波,认为裂纹回声的频谱相位接近于 0,而钢筋回声相位接近于 $\pi/2$;冯少孔等^[13]采用冲击映像法对混凝土裂缝的平面分布范围及严重程度进行了定性检测,并通过取芯检验和有限元模拟验证了检测结果。

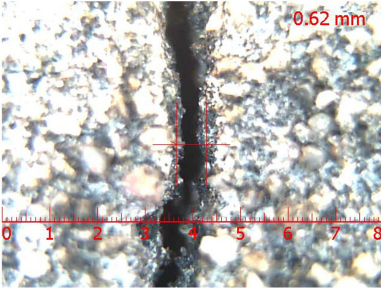
虽然无损检测方法在混凝土缺陷与裂缝的检测上取得了一定进展,但大都只限于单一检测方法的应用,成果也局限于裂缝与缺陷的定性判断或仅是单一指标的定量判定,缺少对混凝土裂缝全面检测的研究。实际上,水工混凝土受限于裂缝发育面难检测、裂缝深度范围难预估、内部复杂介质及环境干扰等多因素影响,采用单一方法检测裂缝很有可能形成多解,难以做出全面准确的判定。本文针对江西省某面板堆石坝混凝土防渗面板裂缝,采用基于整体快速探测与局部精准测量相结合的综合无损检测方法进行检测,并结合钻孔取芯进行观察验证,以提高裂缝检测的准确性和精准度。

1 研究区概况

某水库控制流域面积为 58.7 km²,正常蓄水位为 443.00 m,总库容为 1041 万 m³,是一座以供水为主,兼有防洪、发电等综合效益的中型水库。大坝由钢筋混凝土面板堆石坝和混凝土重力坝两部分构成,堆石坝采用弱至微风化的千枚岩填筑,坝顶最大坝高 78.5 m,坝轴线长 244.16 m,从左岸向上游偏转后通过重力坝与山头相接。防渗面板(图 1(a))设计厚度为 50 cm,采用 C25 混凝土浇筑,内部配有双层双向钢筋。由于堆石坝迎水面的混凝土防渗面板常年带缝(图 1(b))运行并存在渗水问题,给整个坝体的安全带来隐患。为查明裂缝发育情况,开展了裂缝检测工作,检测内容主要包括裂缝的位置分布、形态规模和具体尺寸等。



(a) 混凝土防渗面板



(b) 面板表面裂缝

图 1 主坝防渗面板和典型表面裂缝

经前期表观调查,混凝土防渗面板裂缝大部分为走向平行于大坝轴线的横向裂缝,少部分为纵向裂缝。检测查明主坝左 2 号防渗面板有表面横向裂缝 3 条,分别编号为 L2-1、L2-2 和 L2-3。其中 L2-1 号裂缝位于面板偏上部,长度约为 1.6 m,宽度为 1.0 ~ 1.6 mm;L2-2 号裂缝位于面板中部,长度约为 0.7 m,宽度为 0.5 ~ 2.6 mm;L2-3 号裂缝位于面板中部偏下,长度约为 2.1 m,宽度为 0.8 ~ 3.1 mm。

2 检测方法及测线布置

2.1 GPR

GPR 向混凝土内部发射宽频带脉冲电磁波,电磁波在传播过程中遇到存在电性参数(介电常数和电导率等)差异的目标介质,如层内分界面、不规则

缺陷或裂缝等,电磁波反射上行,被接收天线接收。通过分析接收到的反射电磁波的双程走时、振幅、波形和频率等参数,推断混凝土内部目标体的几何形态、位置分布、物性结构及电性特征等,从而达到探测内部隐蔽物的目的^[14]。

现场检测使用1500 MHz屏蔽天线,采集仪器为GSSI的SIR-3000主机,采用自激自收模式,天线垂直于裂缝轴线方向移动,沿面板中轴线从上而下进行探测(图2)。经现场初步探测试验对比,测线记录点距设置为0.05 m,记录时窗取10 ns时,可保证防渗面板内数据采集的完整性并提高裂缝在雷达剖面上的辨识度。每道扫描采样点数为1 024个,以保证采样数据准确可靠。后期采用Reflexw软件处理雷达数据,经过直达波去除、零时校正、背景去除、滤波、静校正、增益等步骤对原始信号进行处理。

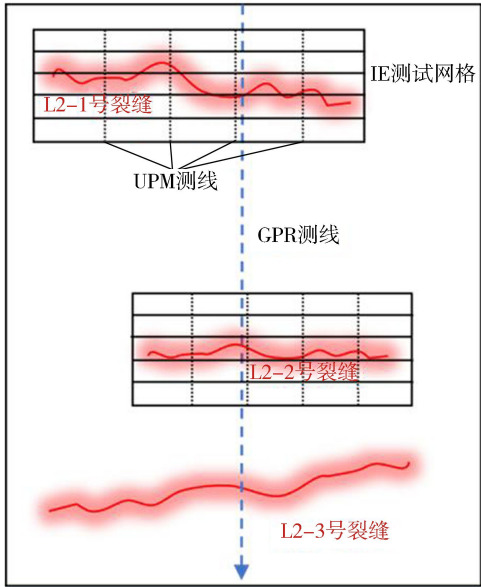


图2 主坝左2号防渗面板总体测线布置示意图

2.2 IE

IE利用小钢球在结构表面施加微小弹性脉冲,因脉冲波阻抗差异,脉冲波在混凝土各边界面和裂缝与缺陷处发生多次反射,形成瞬态共振,使时域位移信号具有周期性特征。通过快速傅里叶变换将时域波形转换为频谱曲线,其中峰值频率代表了混凝土内部裂缝与缺陷的深度或混凝土结构层的厚度^[15],可通过下式计算:

$$H = \frac{\lambda v_p}{2f} \tag{1}$$

式中: H 为裂缝与缺陷深度或混凝土结构层厚度,mm; v_p 为厚度已知的混凝土结构层的波速测试值,m/s; f 为裂缝与缺陷深度或混凝土结构层厚度的表征频率,kHz; λ 为混凝土结构层的几何参数,通常取0.96~0.98^[16]。需要注意的是,IE检测的为裂缝的

垂向深度,与裂缝倾斜或弯曲无关。

现场检测采用湖南芯仪SET-PI2-01冲击回波仪。测量前,将混凝土表面毛刺清除使表面平整,保证探头耦合紧密。如图2所示,加密布置测试网格,分别沿平行及垂直于裂缝走向方向每50 mm设置一条测线,测线与测线之间的交点即为测点。传感器在距震源50 mm的位置接收信号,由信号采集系统采集时域信号。为了能更准确地获取裂缝深度,每个测点测量3次并分别计算测试深度,去掉其中离差较大的值,取平均值代表裂缝深度。一个测点测试完成后,平移至下个测点重复以上步骤,直到整个网格测试完成。

2.3 UPM

UPM将发射换能器和接收换能器置于裂缝两侧,根据惠更斯-菲涅尔原理及克西霍夫绕射积分理论,超声波遇到不连续间断点(裂缝尖端)时将发生绕射,然后上行返回表面被接收^[4,7]。通过对不同测距条件下超声波绕过裂缝底端传播的初至时间进行测量并比较波形相位的变化,按下式计算裂缝的深度:

$$h_{ci} = \frac{l_i}{2} \sqrt{\left(\frac{t_i v}{l_i}\right)^2 - 1} \tag{2}$$

式中: h_{ci} 为第*i*点的裂缝深度计算值,mm; l_i 为第*i*点的超声波实际传播距离,mm; v 为不跨缝平测混凝土测试声速,m/s; t_i 为第*i*点声时,μs。式(2)适用于垂直裂缝深度的计算,即裂缝与混凝土表面垂直。测量倾斜裂缝的倾角及斜长时,可采用三角形定位法^[17]、双椭圆定位法^[18]或者三角余弦方程法^[19]。

现场检测采用海创高科HC-F800混凝土裂缝缺陷综合测试仪,从IE测试网格中选取4条测线进行UPM检测(图2),方便对两种方法的检测结果进行对比分析。开始检测前需对超声波探头进行标定以及零时校正。测试时设置发射电压为125 V,信号采样点数为1 024个,以保证超声波信号稳定,所采集到的初至波形清晰可辨。每个点的裂缝深度数据至少进行2次重复测量,以减小误差。

3 结果与讨论

3.1 GPR 检测结果

图3为主坝左2号防渗面板的GPR探测剖面。从图3可以明显看出电磁波在遇到面板内部钢筋后产生的反射、绕射以及相互之间的叠加和干涉现象,每根钢筋都出现了明显的双曲线波形特征,双曲线的顶点则与钢筋的实际位置相对应。

从图3还可以较为清晰地看到,横坐标5.6 m、21.0 m及24.2 m附近出现了较为明显的裂缝回波

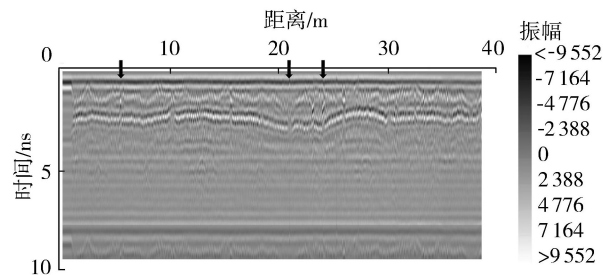


图3 主坝左2号防渗面板 GPR 探测剖面

信号(从左到右分别对应 L2-1、L2-2、L2-3 号裂缝),均为垂直裂缝。将从 GPR 剖面中判断出来的 3 条裂缝位置与前期表观调查记录的实际裂缝位置进行对比,二者基本一致。在裂缝发育区域,电磁波同相轴出现了明显错断,振幅减小,与同一深度的邻近波形相比,裂缝区域的雷达波形相位发生反转。裂缝顶端出现双曲线散射波形,且随着裂缝宽度变大散射信号随之增强,双曲线的离心率亦增大。双曲线顶点对应裂缝顶端的水平位置,两翼左右对称。由于电磁波在介质中的传播损耗、混凝土粗细骨料的散射、绕射波的叠加干扰以及背景噪声等因素影响,3 条裂缝的底端反射电磁波信号均很弱,很难识别。

L2-1 号和 L2-3 号裂缝都为空气充填,雷达剖面上除记录到来自裂缝顶端的散射双曲线回波外,还记录到了由裂缝内部不均匀颗粒物质所引起的能量较强的散射波。这是由于空气对电磁信号传播能量造成的衰减小,且空气与混凝土内部介质的分界面对 GPR 信号的反射和散射均较强,使得干燥裂缝在雷达剖面上表现为如图 3 所示的强烈高频多次波。L2-2 号裂缝中较为湿润,缝内含较多泥土等填充物,由于黏性土对高频电磁波的强吸收作用,电磁波能量衰减较快,使得含水或填充物的裂缝在雷达剖面上表现为如图 3 所示的低频振动及同相轴错断扭曲现象。

检测结果表明,采用 GPR 能够调查混凝土防渗面板中裂缝分布及基本物性形态,但由于裂缝底端回波信号不明,无法从检测剖面判断裂缝向下延伸的具体深度,需要采用其他局部精细检测方法如 IE 和 UPM 做进一步详查。

3.2 IE 检测成果

3.2.1 现场波速标定

在采用 IE 检测裂缝前先需进行混凝土内部弹性波(P 波)传播波速的标定。在待检测防渗面板裂缝旁选取密实无缺陷的混凝土区域布置测线,共选取 10 个测点,相邻测点间距 20~40 cm,冲击震源和信号接收点的偏移距设为 5 cm,对接收到的时域回波信号进行快速傅里叶变换,得出这 10 个测点的峰值频率,这些频率代表了面板底部的特征频率。已知防渗面板厚度为 50 cm,反算出每一测点对应的波

速如表 1 所示。

表 1 弹性 P 波在混凝土中不同位置的传播速度

测点 编号	板厚频率/ kHz	测试波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	测点 编号	板厚频率/ kHz	测试波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	3.833	3911	6	3.88	3959
2	3.867	3946	7	3.884	3963
3	3.909	3989	8	3.861	3940
4	3.872	3951	9	3.88	3959
5	3.874	3953	10	3.881	3960

剔除表 1 中离差较大的波速值,取其余波速的平均值作为基准波速。从表 1 可以看出,测点 1、3 的波速值较其余测点偏差较大,取另外 8 个波速的平均值 3953 m/s 为基准波速。

3.2.2 结果分析

根据 GPR 探测结果,L2-1 号和 L2-3 号裂缝都为空气充填,L2-2 号裂缝中充填了较多水分、泥土等杂物。因此重点对 L2-1 号和 L2-2 号裂缝进行 IE 检测,分析对比裂缝充填物等对该方法检测精度的影响。

3.2.2.1 L2-1 号裂缝

按图 2 所示布置 IE 测点,沿垂直于裂缝走向方向布置 31 条测线,每条测线上布置 17 个测点,所有 527 个测点组成一个测试网格将 L2-1 号裂缝包裹其中,并使其居于网格中部。全部网格数据测试完成后,得到 L2-1 号裂缝及其附近区域的 IE 检测结果如图 4 所示。

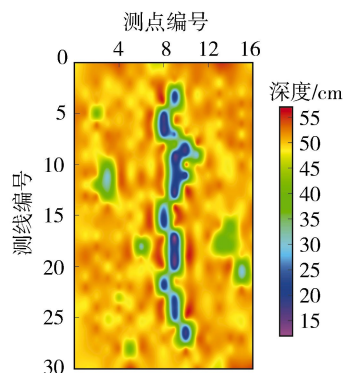


图4 L2-1 号裂缝 IE 检测结果

从图 4 可以看出:在防渗面板密实无缺陷区域,冲击回波反射位置连续且检测深度基本一致,都是面板的总厚度。检测结果表明,测试板厚在 47.78~53.45 cm 之间,平均值为 50.2 cm。以此作为背景值,计算深度低于背景值的 10% 以上的定义为异常区域。可以看出在横坐标 7~10、纵坐标 2~28 附近,一组异常带的深度值明显低于背景值,在 14.52~30.81 cm 之间,平均深度为 21.6 cm,可以判定该异常区域即是裂缝发育区。此外,在坐标(2,5)、(3,12)、(7,18)及(14,17)等几处附近,异常带的检测深度稍低于背景值,为 31.43~47.36 cm,推断这几

处混凝土内部可能存在脱空、孔洞或节理裂隙发育,存在质量缺陷。

提取部分代表性测点的时域波形数据,通过快速傅里叶变换得到频谱曲线如图 5 所示,可以看出在密实无缺陷区域(测点(2,2)),频谱曲线上只有一个明显峰值频率,为板厚频率。当混凝土内部存在孔隙或裂缝等缺陷时(测点(3,12)和(8,6)),对应测点的频谱图上出现不同的频率峰值,据此可进一步证明该区域的混凝土面板出现不密实情况,而其中最大的峰值频率表征了缺陷或裂缝的特征频率,代入式(1)可计算对应的缺陷或裂缝的深度。

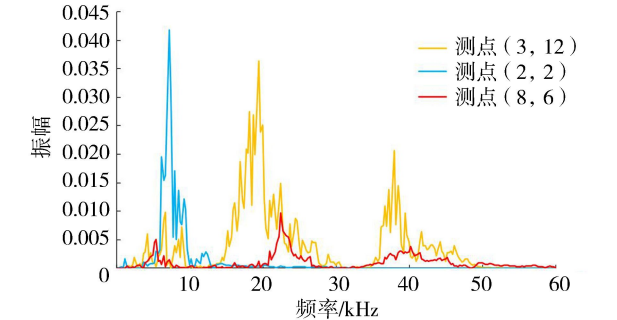


图 5 不同测点典型频谱曲线

由于混凝土内部不均匀(小孔隙或欠密实等),应力 P 波的散射干扰增加,加大了频谱图像的复杂性。随着传播路径增长,不密实区域也会造成 P 波传播能量衰减,波速较正常区域偏低,板厚频率向左发生偏移。此外,由缺陷引起的反射波比例降低,底部及其他边界引起的干扰反射波比例增加,使得回波响应的频谱成分更加复杂。

3.2.2.2 L2-2 号裂缝

沿垂直于裂缝走向方向共布置了 15 条测线,每条测线上共布置 9 个测点,共 135 个测点组成一个测试网格将 L2-2 号裂缝包裹其中,并使其居于网格中部。

图 6 为 L2-2 号裂缝及其附近区域的 IE 检测结果,可以看出,该裂缝周围附近的混凝土整体较密实,无明显缺陷存在,因此检测到的厚度较为连续,高度基本一致。测试面板厚度在 48.12 ~ 55.75 cm 之间,平均值为 52.3 cm。在网格中部横坐标 4 ~ 5、纵坐标 3 ~ 12 附近出现一组异常带,深度值明显偏低,检测深度为 23.51 ~ 36.46 cm,平均深度为 31.1 cm,为裂缝发育区。

以上结果表明,IE 检测结果不仅是对 GPR 检测结果的进一步检验,能准确识别出垂直裂缝的具体深度,还是对 GPR 的补充:受限于面板内浅层钢筋对高频电磁波传播的干扰影响,GPR 较难辨别混凝土内部钢筋下方的小孔隙或不密实等缺陷,而 IE 利用的是低频的应力 P 波,其能量高、频谱响应性

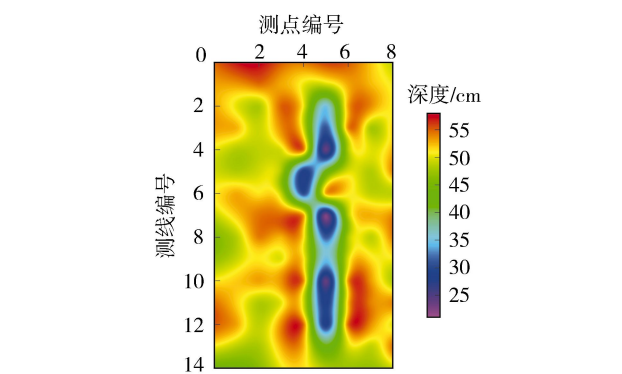


图 6 L2-2 号裂缝 IE 检测结果

能好,测试深度大,受钢筋、水分等的影响较小,适用于准确圈定缺陷位置分布等。但是作为一种局部检测方法,IE 测试时需布置很多测点组成测试网格,采集效率相对偏低。在实际工作中应根据现场情况选取合适的检测方法。

3.3 UPM 检测成果

3.3.1 现场波速标定

现场超声波速标定时,将发射和接收换能器放置于裂缝同一侧的混凝土密实区域,当两个换能器测距 l 分别为 50 mm、100 mm、150 mm 和 200 mm 时读取首波声时 t ,绘制成超声波在混凝土中传播的时距曲线如图 7 所示,经回归分析得到测距 l 与声时 t 之间的回归直线方程为

$$l = 3.2705t - 8.6007 \tag{3}$$

则不跨缝平测所得的超声波速为 3.2705 km/s。

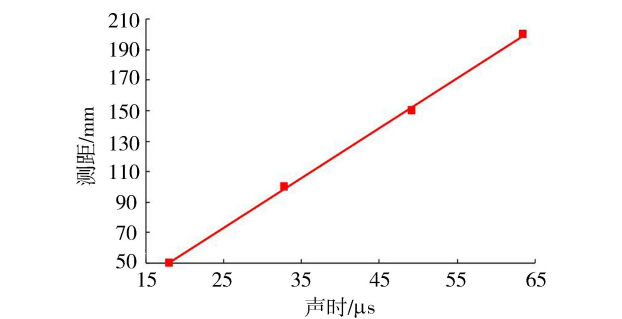


图 7 不跨缝平测超声波时距曲线

3.3.2 结果分析

按 CECS21 : 2000《超声法检测混凝土缺陷技术规程》进行测距修正后,对 L2-1 号和 L2-2 号裂缝分别进行 UPM 测量,所得裂缝深度检测结果见表 2,表中同时给出了同一测点的 IE 检测结果。为验证 UPM 和 IE 检测结果,现场对 2 条裂缝测试部位进行钻孔取芯,发现 L2-1 号裂缝在混凝土中延展较明显,基本呈闭合状态,内部干燥无杂质,芯样未裂开,实测裂缝深度为 15.24 cm 和 29.73 cm。L2-2 号裂缝宽度稍大,内部可见湿润黏土填充,芯样开裂,实测裂缝深度为 24.65 cm。

表 2 裂缝深度检测结果

裂缝	测线 编号	检测 位置	裂缝深度检测值/cm			与实际偏差/%	
			UPM	IE	钻孔取芯测量	UPM	IE
L2-1	1	(10, 27)	14. 18	14. 70	15. 24	6. 96	3. 54
	2	(8, 22)	21. 98	22. 68			
	3	(8, 15)	26. 89	28. 44	29. 73	9. 55	4. 34
	4	(9, 3)	17. 50	17. 10			
L2-2	1	(5, 4)	11. 25	23. 51			
	2	(4, 6)	15. 52	25. 88	24. 65	37. 04	4. 99
	3	(5, 9)	19. 87	30. 69			
	4	(5, 10)	20. 47	25. 11			

由表 2 可知,因为 L2-1 号裂缝内部干燥,UPM 与 IE 检测结果接近,两者的绝对误差值在 0.40 ~ 1.55 cm 之间,相对误差在 2.34% ~ 5.45% 之间。与钻孔取芯测量的实际裂缝深度相比,两种方法的测量结果基本吻合。UPM 检测结果与实际值的绝对误差在 1.06 ~ 2.84 cm 之间,相对误差为 6.96% ~ 9.55%。IE 检测结果与实际值的绝对误差在 0.54 ~ 1.29 cm 之间,相对误差为 3.54% ~ 4.34%,两种方法的测量误差均在工程要求范围之内。但 UPM 的测量精度稍逊于 IE,且随着裂缝深度增加,其测量误差有随之增大的趋势。究其原因,超声波信号频率相对较高,传播衰减快,加上受面板内密集钢筋影响,超声波产生反射、散射及折射等现象,超声 P 波的速度亦随之发生变化,导致测量结果受到干扰。而脉冲波频率相对更低,但其能量更高,衰减较慢,受钢筋等的影响较小。如孔楠楠等^[20]研究表明,混凝土中直径不超过 25 mm 的钢筋,对脉冲波速无太大影响。

L2-2 号裂缝内部被湿润黏土等杂物充填,UPM 与 IE 检测结果相差较大,两者的绝对误差值在 4.64 ~ 12.26 cm 之间,相对误差在 18.48% ~ 52.15% 之间。与钻孔取芯测量的实际裂缝深度相比,IE 检测结果与实际值较为接近,二者绝对误差仅 1.23 cm,相对误差为 4.99%。而 UPM 检测结果与实际值相差较大,绝对误差达 9.13 cm,相对误差为 37.04%。究其原因,裂缝中水分、泥土等充填物干扰了超声波传播,使超声波速减小,振幅减弱,能量衰减。而且 UPM 测量裂缝是建立在超声 P 波信号能绕过裂缝底端的基础上,充填物的存在使得超声 P 波并未能绕过裂缝底端,而是通过水分或者杂质穿过裂缝,直接到达了接收换能器,使首波声时大为减小。这些因素导致 UPM 测量湿润、含泥裂缝的结果偏小。而 IE 检测则基于弹性 P 波在裂缝及外部边界之间多次反射形成谐振,进而在频谱中表征裂缝或边界深度的频率峰值,因此受裂缝中充填物的影响较小,测试精度更高。

3.4 讨论

通过 GPR、IE、UPM 并结合钻孔取芯法对坝体防渗面板裂缝进行综合检测,确定了裂缝的形态、位置分布及具体深度:L2-1 号裂缝距面板顶边约 5.6 m,为横向垂直裂缝,长度约为 1.6m,宽度为 1.0 ~ 1.6 mm,深度为 14.18 ~ 30.81 cm,平均深度为 21.6 cm。L2-2 号裂缝距面板顶边约 21.0 m,亦为横向垂直裂缝,长度约为 0.7 m,宽度为 0.5 ~ 2.6 mm,深度为 23.51 ~ 36.46 cm,平均深度为 31.1 cm。此外,根据 IE 检测结果,还判断部分区域的混凝土内部存在孔洞、不密实等缺陷,导致防渗效果受到破坏。

GPR 具备高效快捷,覆盖范围大等优点。现场检测通过缩小 GPR 采样点距至 5 cm,实现了对防渗面板中裂缝的分布及物性形态等的有效探测。由于检测技术和环境因素干扰,GPR 较难辨别裂缝的延伸深度,需辅以其他精细检测方法详查。IE 和 UPM 均能准确检测干燥空气填充的垂直裂缝深度,且 IE 受钢筋等的影响较小,检测精度比 UPM 稍高,但倾斜裂缝的倾角和延伸长度只能通过 UPM 进行检测。当裂缝中有水分或其他填充物时,UPM 检测结果比实际值偏小很多,而 IE 检测结果与实际值更为接近。但 IE 检测的缺点是需布置很多测点,相较而言工作效率是 3 种方法中最低的,且检测的均是裂缝底部尖端至水平面投影的垂向深度。因此在实际工作中应根据现场情况及方法各自的优缺点进行综合检测。

现场检测结果表明:基于整体快速探测与局部精准测量相结合的综合方法检测混凝土裂缝是可行的,可使用 GPR 进行大范围调查,快速确定裂缝位置分布及形态规模;若裂缝干燥,可使用 UPM 和 IE 对裂缝进一步详查;若裂缝内有水或充填物,建议选择 IE 进行检测。这样在保证准确性和精准度的同时也可提高检测效率。

4 结 论

- a. 从 GPR 检测剖面上可识别混凝土防渗面板裂缝的位置分布、基本形态规模及相对宽度等特性,但很难测量到裂缝的具体深度,需要采用其他局部精细检测方法如 IE 和 UPM 做进一步详查。
- b. IE 受环境因素干扰影响较小,检测裂缝深度的精度较高,而且可以圈定混凝土内部缺陷的位置及分布情况;但相对其他两种方法,其检测效率偏低。
- c. UPM 受钢筋尤其是裂缝中水分或他填充物影响较大,适用于干燥且深度不大的裂缝的检测。
- d. 基于 GPR、IE 和 UPM 相结合的裂缝综合无损检测方法,几种方法相互补充、互为印证、对比分析,适用于大坝防渗面板裂缝的多参数多尺度的综

合检测,可满足不同的检测范围及精度要求。必要时结合钻孔取芯等方法进行观察验证,可使裂缝检测的全面性与精准度大为提高,为后期大坝的安全评估和治理加固提供科学依据。

参考文献:

[1] 吴增文. 堆石坝趾板和面板施工中混凝土工艺及质量评价分析[J]. 地下水, 2018, 40 (4) : 242-244. (WU Zengwen. Evaluation and analysis of concrete technology and quality of toe slab and face slab in rockfill dam[J]. Ground Water, 2018, 40(4) : 242-244. (in Chinese))

[2] 罗大明, 牛获涛, 苏丽. 荷载与环境共同作用下混凝土耐久性研究进展[J]. 工程力学, 2019, 36 (1) : 1-14. (LUO Daming, NIU Ditao, SU Li. Research progress on durability of stressed concrete under environmental actions [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36 (1) : 1-14. (in Chinese))

[3] 姚霄雯, 张秀丽, 傅春江. 混凝土坝溃坝特点及溃坝模式分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34 (12) : 83-86. (YAO Xiaowen, ZHANG Xiuli, FU Chunjiang. Failure characteristic and failure mode analysis for concrete dam [J]. Water Resources and Power, 2016, 34 (12) : 83-86. (in Chinese))

[4] 田晖, 辛纯涛, 张坤. 超声波单面平测法检测混凝土构件裂缝深度可靠性分析[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39 (6) : 133-136. (TIAN Hui, XIN Chuntao, ZHANG Kun. The reliability analysis on single plane detecting of ultrasonic wave for the concrete structures crack depth [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(6) : 133-136. (in Chinese))

[5] 刘兆勇, 张磊, 袁翠祥. 超声横波三维成像技术对混凝土内钢筋反映假异常的辨识[J]. 水运工程, 2021 (12) : 84-88. (LIU Zhaoyong, ZHANG Lei, YUAN Cuixiang. Identify of reflect false anomaly of steel bar in concrete by ultrasonic S-wave 3D imaging technology[J]. Port & Waterway Engineering, 2021 (12) : 84-88. (in Chinese))

[6] 罗广衡, 潘坚文, 王进廷. 瑞利波法检测混凝土表面裂缝深度的影响因素研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(9) : 165-171. (LUO Guangheng, PAN Jianwen, WANG Jinting. Study on influencing factors of detecting surface crack depth with Rayleigh wave detection method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(9) : 165-171. (in Chinese))

[7] 刘平, 关春先, 罗技明, 等. 基于冲击弹性波和超声波的混凝土裂缝深度无损检测技术方法比较[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2018, 31 (1) : 64-68. (LIU Ping, GUAN Chunxian, LUO Jiming, et al. Comparison of non-destructive testing methods for concrete crack depth based on impact elastic wave and ultrasonic wave [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2018, 31 (1) : 64-68. (in

Chinese))

[8] 卢成明, 秦臻, 朱海龙, 等. 探地雷达检测公路结构层隐含裂缝实用方法研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50 (5) : 1558-1568. (LU Chengming, QIN Zhen, ZHU Hailong, et al. Practical methods for detection of concealed cracks in highway pavement using ground penetration radar data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50 (5) : 1558-1568. (in Chinese))

[9] TARUSOV A, VANDR M, DE LA HAZA A. Condition assessment of concrete structures using a new analysis method: ground-penetrating radar computer-assisted visual interpretation [J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 1246-1254.

[10] 邓安仲, 赵启林, 李胜波, 等. 混凝土裂缝红外热成像分布式监测技术研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16 (2) : 284-288. (DENG Anzhong, ZHAO Qilin, LI Shengbo, et al. Study on distributed monitoring technology of infrared thermal image of concrete crack [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2) : 284-288. (in Chinese))

[11] KANG J M, SONG S, PARK D, et al. Detection of cavities around concrete sewage pipelines using impact-echo method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 65: 1-11.

[12] LIU P L, LIN L C, HSU Y Y, et al. Recognition of rebars and cracks based on impact-echo phase analysis [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 1-6.

[13] 冯少孔, 黄涛, 李海枫. 大型预应力混凝土立墙内裂缝检测与成因浅析[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49 (7) : 977-982. (FENG Shaokong, HUANG Tao, LI Haifeng. Detection and cause analysis of internal cracks for large scale 2-directional pre-stressed concrete walls [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49 (7) : 977-982. (in Chinese))

[14] 杨峰, 彭苏萍. 地质雷达探测原理与方法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[15] SANSALONE M J. Impact-echo: the complete story [J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(6) : 777-786.

[16] 张敬彬. 冲击回波法在预应力混凝土结构无损检测中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.

[17] 周凯. 超声波混凝土构件检测系统的研究及试验分析[D]. 长沙: 中南大学, 2007.

[18] 吴慧敏. 结构混凝土现场检测新技术: 混凝土非破损检测[M]. 2 版. 长沙: 湖南大学出版社, 1998.

[19] 晏露超. 混凝土结构裂缝的超声波平测法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.

[20] 孔楠楠, 杨智, 张今阳. 基于冲击回波理论的混凝土裂缝深度测试试验研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45 (11) : 121-124. (KONG Nannan, YANG Zhi, ZHANG Jinyang. Impact-echo theory-based experiment study on testing of concrete crack depth [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45 (11) : 121-124. (in Chinese))

(收稿日期: 2022 - 05 - 16 编辑: 熊水斌)