

文章编号: 0559-9350(2026)05-0691-14

混凝土防渗墙弹性波CT法检测观测系统优化与应用

赵祥^{1,2}, 张清明^{1,2}, 周杨^{1,2}, 杨磊^{1,2}, 李长征^{1,2}, 李毕德^{1,2}

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

2. 水利部堤防安全与病害防治技术创新中心, 河南 郑州 450003)

摘要: 为评估不同观测系统在弹性波CT法检测混凝土防渗墙质量中的适用性, 重点分析了其对混凝土内部缺陷检测的准确性和可靠性。分别采用5种不同的观测系统, 模拟弹性波源并接收其在混凝土防渗墙中的传播信号。利用最短射线算法和高斯牛顿法重建混凝土防渗墙的内部结构。通过试验对比分析各系统在信号采集、数据处理和图像重建方面的表现。结果显示: 当防渗墙深度较浅且现有设备可全覆盖时, 固定观测系统表现优异, 其反演定位误差可控制在0.5 m以内, 信噪比高于25 dB, 检测精度高; 对于墙体深度超过现有设备覆盖范围时, 移动观测系统显出明显优势, 其中均衡优化移动观测系统更适用于大范围的快速筛查。工程实例表明, 采用均衡优化的移动观测系统可成功识别出61 m深防渗墙中的局部缺陷。本研究通过对比分析, 形成了基于定位误差、波速相对误差和信噪比等指标的观测系统定量选择标准。

关键词: 弹性波CT法; 混凝土防渗墙; 观测系统; 无损检测; 图像重建

中图分类号: TV431

文献标识码: A

doi: 10.3724/j.slx.20250513

1 研究背景

混凝土防渗墙作为水利工程的核心防渗结构, 其质量直接关系到工程安全与耐久性^[1-2]。在施工过程中, 墙体因振捣不均等问题会产生脱空、蜂窝等缺陷, 因此需采用有效的技术手段对其进行检测与评估^[3]。目前单孔声波法、穿透声波法、弹性波CT(Computed Tomography)法及地质雷达法等无损检测技术已广泛应用于此领域。张廷华等^[4]通过地质雷达与穿透声波法结合, 证实综合物探可有效反映防渗墙实际质量; 葛龙进等^[5]采用超声波CT检测低弹性模量混凝土防渗墙, 验证了防渗处理有效性; 李亮等^[6]采用钻孔取芯、孔内超声波和钻孔全景数字成像方法, 对混凝土防渗墙的质量与防渗效果进行分析, 表明采用综合手段进行比较分析, 能得出更加符合实际的评价结果; 潘纪顺等^[7]对比了地震波CT与钻孔取芯、土工试验和注水实验结果, 对比结果凸显了地震波CT技术快速无损、准确可靠的优势。弹性波CT法作为地震波CT技术的重要分支, 通过井间穿透成像, 能够直观呈现墙体内波速分布, 是检测墙体完整性、识别内部缺陷的有效方法^[8-9]。目前, 利用弹性波CT技术检测混凝土防渗墙已成为防渗墙工程质量检测的首选方法。

由于地震波速度是反映混凝土防渗墙基本物理特性的重要指标, CT技术可用于重建墙体内部的波速图像, 从而识别缺陷。CT重建方法是基于井间地震资料的初至走时进行反演, 常用的方法包括矩阵反演法^[10], 迭代法, 如代数重建法(Algebraic Reconstruction Technique, ART)^[11-12]、联合迭代重建算法(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, SIRT)^[13-14]、最小二乘QR分解法(Sparse Equa-

收稿日期: 2025-09-01; 网络首发日期: 2026-04-01

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20260331.1019.001>

基金项目: 黄河水利科学研究院科技发展基金专项项目(黄科发202214); 国家自然科学基金联合基金项目(U2243229)

作者简介: 赵祥(1992—), 博士, 主要从事堤坝安全隐患的探测与监测研究。E-mail: zx_yrihr@163.com

通信作者: 张清明(1983—), 正高级工程师, 主要从事堤坝安全监测的研究。E-mail: 499644168@qq.com

tions and Least Squares, LSQR)^[15-17]、高斯牛顿法(Gauss-Newton)^[18]等。层析成像方程通常是病态的、稀疏的,通过加入正则化,能够减少数据误差对反演结果的影响。对于混凝土防渗墙墙体内纵波速度相差较大的情况下,采用弯曲射线追踪技术,如最短路径算法,则更为合适^[19]。

然而,弹性波CT法检测结果高度依赖于观测系统的设计^[20],对于埋深较浅的混凝土防渗墙体,采用固定观测系统,即现有的仪器设备能全覆盖混凝土防渗墙检测范围;对于埋深较深的墙体,采用移动观测采集,即分段检测。现有研究多聚焦单一观测系统的应用,缺乏针对不同工况(尤其大深度墙体)的系统性对比与优化研究。本文旨在系统研究固定与移动两类共5种观测系统的性能,从信号采集、数据处理到图像重建进行全流程量化分析,重点解决“如何根据墙体深度与精度要求选择最优观测系统”这一实际应用问题,并通过数值模拟与工程实例验证,形成定量的选型标准,以提升现场检测的效率与准确性。

2 弹性波CT法原理

弹性波CT法是一种基于弹性波旅行时(Travel Time,即旅行时间)的层析成像技术。其基本原理是:在一个钻孔中激发弹性波,在另一个钻孔中接收,通过测量波从激发点传播到接收点的初至时间,根据获取的初至走时数据,通过相关算法反演重建钻孔间介质的波速分布,获得图像,重建的图像需要进行解释,以识别介质内部的缺陷、裂缝或其他不连续性^[21-24]。

对于纵波速度对比差异较大的介质,传统的直射射线法并不有效^[25-26],而弯曲射线追踪技术,如最短路径算法^[20]在这种情况下更为合适,并通常被用作计算弹性波旅行时。图1显示的是弹性波从发射到接收的最短路径示意图。在最短路径法中,通过将每个节点与其相邻节点连接起来,使用节点网格来构建图。图中的连接被分配一个长度等于沿着它的旅行时间。因此,根据费马原理,即弹性波射线遵循最小走时曲线,图1中发射和接收两点之间的最短路径可以看作是射线路径的近似。Giroux等^[27]借助辅助节点进行了更精确的正演模拟,如图1中的单元3节点、4节点等。正演问题涉及到计算射线的传播时间 t ,表示为^[28]:

$$t = \int S(l)dl \quad (1)$$

式中: S 为慢度(速度的倒数); l 为距离; dl 为从发射点Tx到接收点Rx的路径上的长度微元。式(1)表示的是弹性波从发射到接收过程中,波所需要的总时间 t ,即慢度沿着射线路径的积分。将积分函数离散化,假设成像区域内共有 n 条射线、 m 个网格单元,如式(2)所示,旅行时表示为对每个射线进行求和。

$$t_i = \sum_{j=1}^m S_j l_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中: S_j 为第 j 个单元中的慢度; l_{ij} 为第 i 条射线穿过第 j 个单元的射线长度。在编程语言中,将式(2)写成矩阵形式,即弹性波CT反演基本公式为:

$$\mathbf{t} = \mathbf{L}\mathbf{s} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{t}$ 为观测走时向量; $\mathbf{L}$ 为由各单元射线长度组成的稀疏矩阵; $\mathbf{s}$ 为模型的慢度向量。由于初至走时数据的数量通常远小于射线条数与网格单元数,该线性方程组往往是稀疏且病态的,因此需对大型

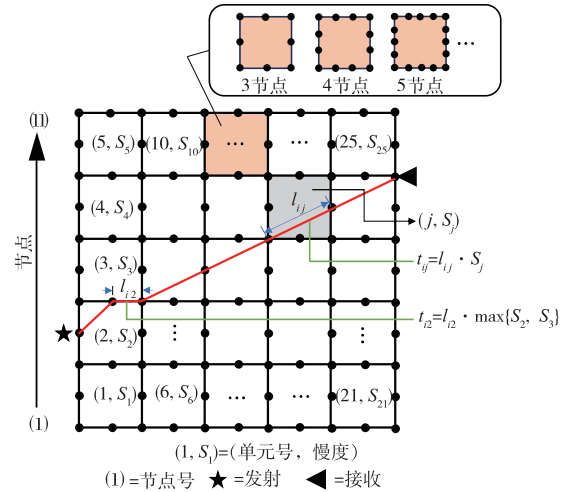


图1 网格离散化及单元和节点的编号示意

Fig. 1 Schematic diagram of mesh discretization and element/node numbering

稀疏矩阵进行求解。最常用的是最小二乘法，并通过引入正则化项进行迭代求解，当计算结果达到预设误差容限时，即终止迭代。需要注意的是，在反演过程中使用过细的网格并不总是可取的，因为这会显著增加待求未知量的数目，从而加大计算负担。最终，将反演得到的慢度值转换为纵波速度，绘制成等值线图，并据此圈定混凝土中的低速异常区域。

3 观测系统介绍

观测系统是弹性波 CT 检测混凝土防渗墙质量方案的关键组成部分，其设计直接影响检测效果。本文主要对比两类观测方式，即固定式和移动式。固定式观测系统用在现有检测设备可全覆盖钻孔深度时，一次性布设即可完成质量检测。移动式观测系统针对现有检测设备无法一次全覆盖钻孔深度条件下，需要开展分段移动检测，包括最小重叠移动观测系统、最大射线密度移动观测系统、均衡优化移动观测系统和对称滚动移动观测系统。本文共介绍 5 种观测系统，如图 2 所示。

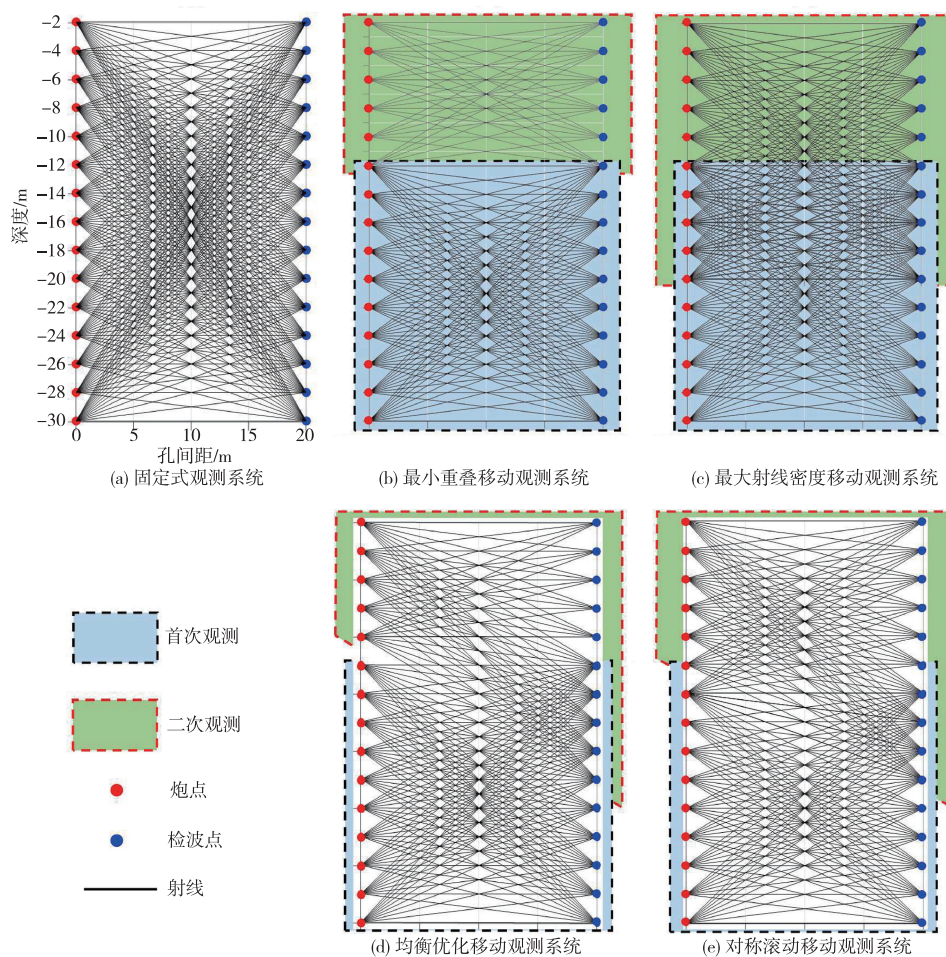


图2 固定式和移动式观测系统布置示意

Fig. 2 Schematic diagram of fixed and mobile observation system layout

3.1 固定式观测系统 固定式观测系统如图 2(a)，其布置方式为将检波器固定置于混凝土防渗墙钻孔内的特定位置，用于接收弹性波信号。在理想条件下，即仪器接收道数足以覆盖整个钻孔深度时，该系统可一次性完成整个断面的数据采集。观测系统参数信息见表 1。固定式观测系统的前提是假设现有设备的接收道数足以覆盖整个钻孔深度。然而，当现有设备接收道数有限(如 10 道、12 道或 24 道)时，该系统的应用深度受到限制，难以完成较深防渗墙的弹性波 CT 质量检测。因此，固定式系统仅适用于深度较浅、现有设备可全覆盖的防渗墙；对于深度较大的墙体，由于无法实现全覆盖观测，

需采用分段移动式检测方法。

3.2 移动式观测系统 移动式观测系统是指检波器在混凝土防渗墙钻孔内移动，并在防渗墙深度范围内分段接收弹性波信号，直至完成全深度范围的防渗墙检测。对于较深的防渗墙，现有仪器设备不能一次性完成防渗墙检测，因此需要分段进行。4种移动式观测系统见图2(b)一(e)，其特征如下：图2(b)最小重叠系统，两次观测间接收排列重叠范围最小；图2(c)最大射线密度系统，通过增加激发次数获取最高射线覆盖；图2(d)均衡优化系统，在射线密度、激发次数和重叠范围间取得平衡；图2(e)对称滚动系统，激发与接收排列以相同步长、对称方式滚动采集。

表1 图2中各观测系统参数信息对比

Table 1 Comparison of observation system parameters in figure 2

观测系统类型	深度/m	炮间距/m	道间距/m	激发次数	射线数量	射线密度/(条/m ²)
图2(a)固定式观测系统	30	2	2	15	225	0.40
图2(b)最小重叠移动观测系统	30	2	2	16	136	0.24
图2(c)最大射线密度移动观测系统	30	2	2	20	300	0.54
图2(d)均衡优化移动观测系统	30	2	2	15	150	0.27
图2(e)对称滚动移动观测系统	30	2	2	16	160	0.29

4 弹性波 CT正演模拟

4.1 模型设置 本次正演模拟基于地球物理领域 pyGIMLi (Python Library for Graphical Inversion and Modelling in Geophysics)程序完成^[29]。首先建立如图3(a)所示的数值模型，模型尺寸为宽30 m、高32 m，背景介质纵波波速设为4000 m/s。模型中设置两个圆形低速异常体(缺陷)，中心点位置分别为(7, -10) m和(12, -20) m，直径分别为6和8 m，波速分别为3000和2000 m/s。在模型中布置两个钻孔，如图3(b)所示，分别位于模型左、右两侧，其水平坐标分别为0和20 m。钻孔内炮点间距为2 m，炮点高程范围为-2 ~ -30 m；检波器间距2 m，检波点高程范围为-2 ~ -30 m。

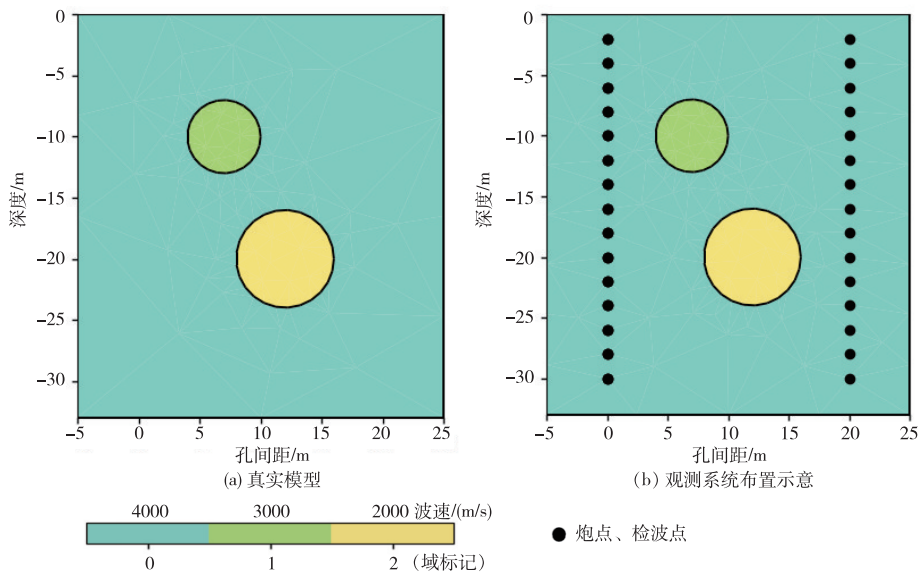


图3 正演模型

Fig. 3 Forward model

4.2 正演结果 在正演模拟中，设定一个钻孔作为发射孔，另一个作为接收孔，深度范围内共计需要激发15炮，其射线路径示意图如图4(a)所示。对模型研究区域进行网格化，采用非结构化网格进行

划分,如图4(b)所示。为提高正演计算的旅行时精度,模拟中采用5节点单元进行正演模拟。此外,为更贴近实际野外数据特征,在正演数据中加入了0.1%相对噪音和 $10\text{ }\mu\text{s}$ 的绝对噪音。通过计算炮点至检波点的最短路径与对应旅行时的比值,获取视速度数据,并据此生成模型的视速度分布图。图2(a)固定式观测系统的正演结果如图5所示,移动式观测系统考虑了现有仪器设备的限制,对于较深防渗墙,需要分段进行弹性波CT检测,图2(b)—(e)移动式观测系统的正演结果如图6—7所示。尽管4种移动式观测系统的首次观测方式相同,但由于二次观测时激发点与接收点的相对位置、移动步长及重叠区域不同,导致射线在空间中的分布密度、交叉角度及覆盖均匀性产生显著差异。这种射线空间分布的差异直接影响了视速度计算的采样范围与约束条件,从而导致正演所得的视速度分布图存在明显差异,充分反映了观测系统设计对最终成像效果的重要影响。

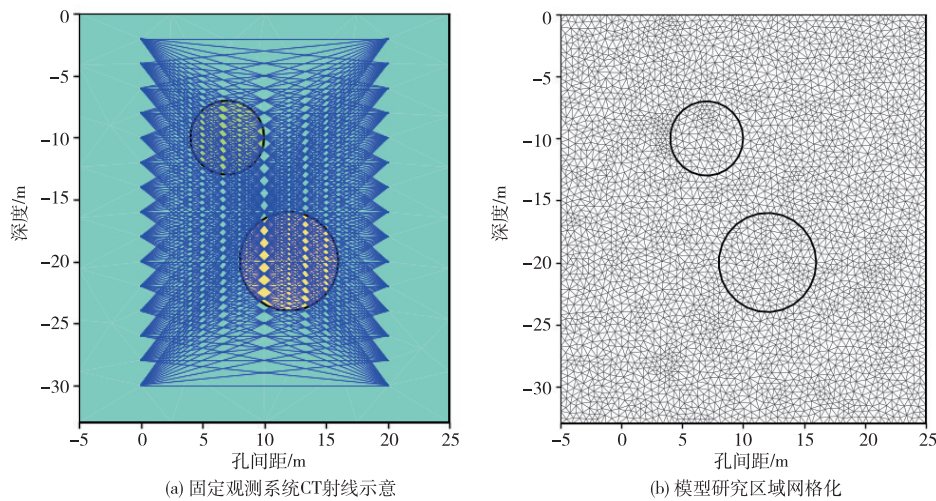


图4 正演模型射线路径和网格化图

Fig. 4 Forward model ray tracing and gridding diagram

5 弹性波CT初至走时反演

为获得较真实的波速分布,需要对走时数据进行反演,基于pyGIMLi库,利用基于Tikhonov正则化的高斯-牛顿法进行反演,获得稳定且最佳的结果。首先对研究区域进行网格剖分,采用结构化网格,网格大小为 0.5 m ,如图8(a)所示,网格单元选择3节点。发射到接收的最短路径射线图如图8(b)所示,可以看出射线会偏向波速高的区域。

通过定位误差、波速相对误差、信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)等3个指标量化反演效果。其中,定位误差为反演缺陷中心与真实中心的距离;波速相对误差= $|\text{反演波速}-\text{真实波速}|/\text{真实波速}\times 100\%$;信噪比(SNR)为有效信号与噪音的功率比。5种观测系统反演效果对比见表2,反演结果图见图9—11。固定观测系统反演结果见图9(a),可清晰区分两个缺陷区域,高值区($>4000\text{ m/s}$)与背景一致,低值区($2000\sim 3000\text{ m/s}$)则与缺陷位置吻合,定位误差仅 0.3 m ,SNR最高,但不适用于大深度的检测工作。移动式观测系统类似高密度电法中的滚动式采集方式,需要对重

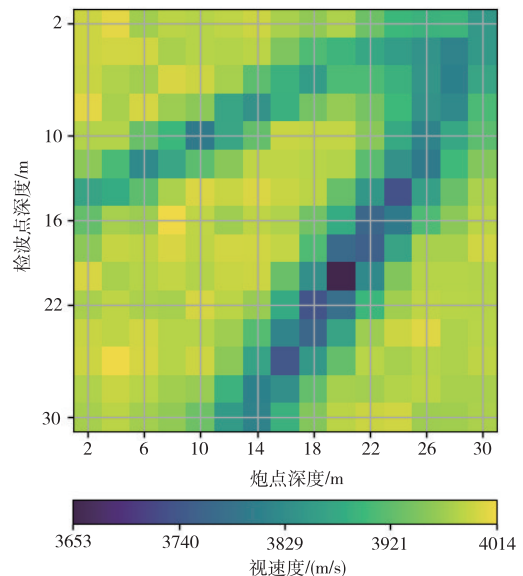


图5 固定式观测系统图2(a)的正演视速度分布

Fig. 5 Forward apparent velocity distribution for fixed observation system in Figure 2(a)

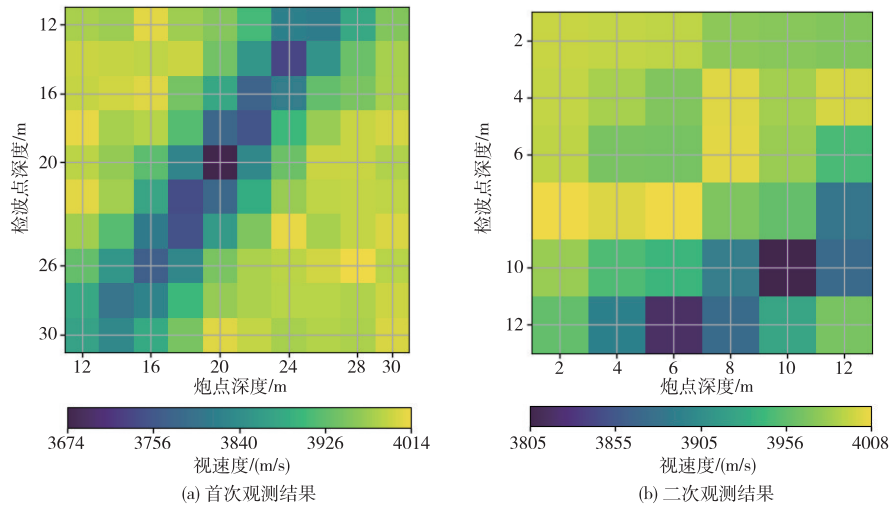


图6 最小重叠移动观测系统图2(b)的正演视速度分布

Fig. 6 Forward apparent velocity distribution for minimum overlap mobile acquisition system in Figure 2(b)

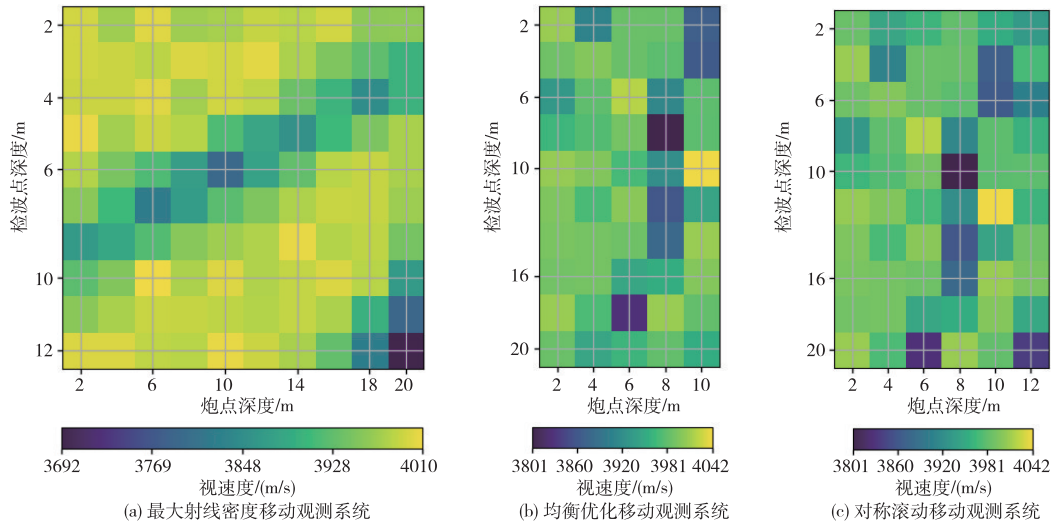


图7 移动式观测系统图2(c)–(e)二次观测结果的正演视速度分布

Fig. 7 Forward apparent velocity distribution of secondary observations for the mobile observation system in Figures 2(c)–(e)

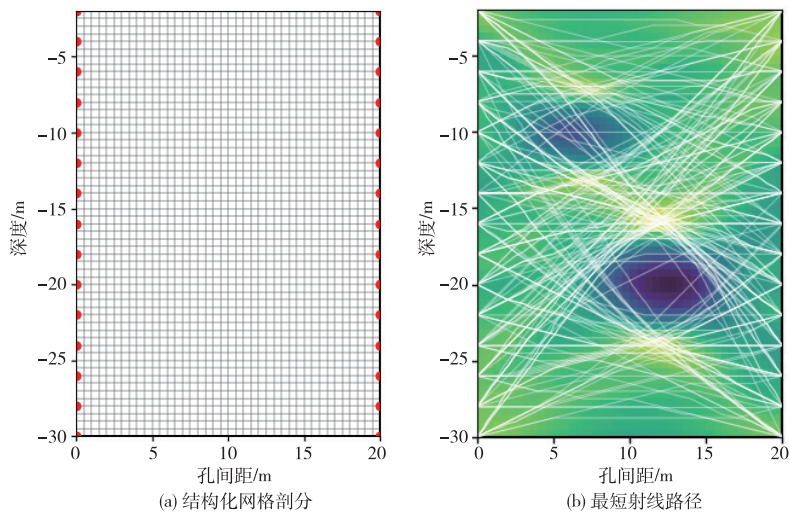


图8 固定式观测系统图2(a)网格剖分和射线路径

Fig. 8 Mesh discretization and ray tracing of fixed observation system in Figure 2(a)

复的数据进行处理和拼接。拼接一般有三种方式：一是对重复观测的数据取首次反演的结果，二是取二次反演结果，三是取两者的平均值。移动观测系统中，最小重叠移动观测系统反演结果见图9(b)，因射线数量少，仅136条，在0~10 m浅层区域缺陷边界模糊，定位误差最大，SNR最低，不适用于较为精细的检测工作；最大射线密度移动观测系统反演结果见图10，射线密度最高，达1.67条/m²，缺陷识别效果较好，反演精度接近固定系统，但激发次数多，达20次；均衡优化移动观测系统反演结果见图11(a)，平衡了射线数量与效率，缺陷轮廓较清晰，反演定位误差0.7 m，拼接误差0.5 m，综合表现最佳；对称滚动移动观测系统反演结果见图11(b)，反演结果显示浅部缺陷刻画稍弱于均衡优化移动观测系统。

表 2 5种观测系统反演效果对比

Table 2 Comparison of inversion performance among five observation systems

观测系统类型	最大定位误差/m	波速相对误差/%	SNR/dB	数据拼接误差/m
固定式观测系统	0.3	5.2	28.6	
最小重叠移动观测系统	1.2	12.5	20.3	0.8
最大射线密度移动观测系统	0.5	6.8	26.1	0.3
均衡优化移动观测系统	0.7	7.5	24.8	0.5
对称滚动移动观测系统	0.8	8.1	23.5	0.6

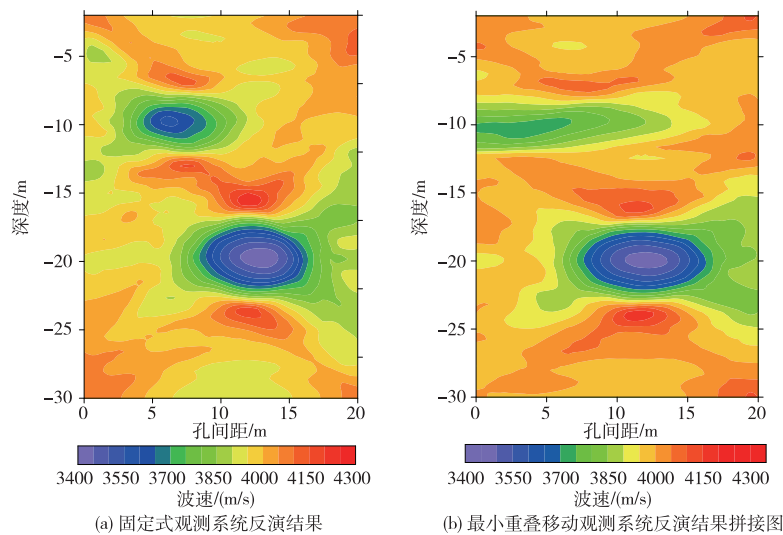


图 9 固定式和最小重叠移动观测系统反演结果

Fig. 9 Inversion results diagram for fixed and minimum overlap mobile observation systems

6 观测系统参数影响分析

观测系统本质上是射线空间分布密度、激发工作量及数据拼接策略等核心参数的集中体现，这些参数直接决定了数据质量与反演效果。基于前述正演模型和反演结果，进行5种观测系统的主要参数对检测结果影响规律的对比分析。

(1)射线密度与分布均匀性对成像质量的影响。射线密度是决定层析成像分辨率的基础物理参数。由表2和图9—11所示的反演结果可知，射线总数与平均射线密度与反演精度呈显著正相关。固定观测系统因其一次布设、全覆盖采集的特点，射线密度约0.40条/m²，射线分布最为均匀，因此其反演结果对缺陷的刻画最为清晰，定位误差最小，仅0.3 m，信噪比最高，达到28.6 dB。现有检测设备大部分为24道，道间距1 m，故当钻孔深度小于23 m时，采用固定式观测系统即可。当钻孔深度大于

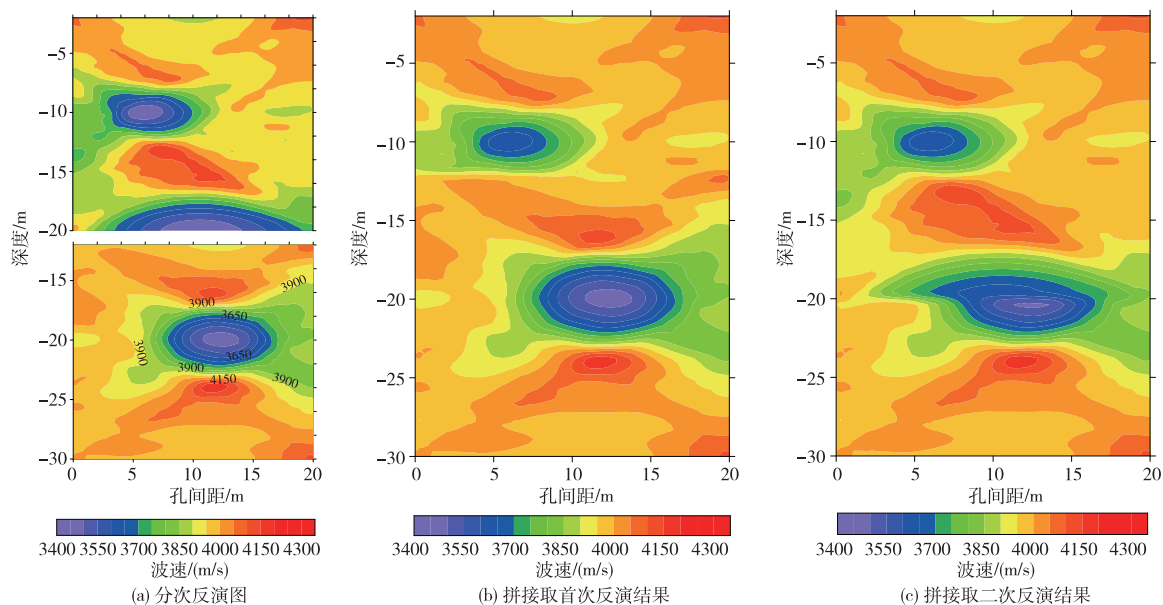


图 10 最大射线密度移动观测系统反演结果

Fig. 10 Inversion results diagram for maximum ray density mobile observation system

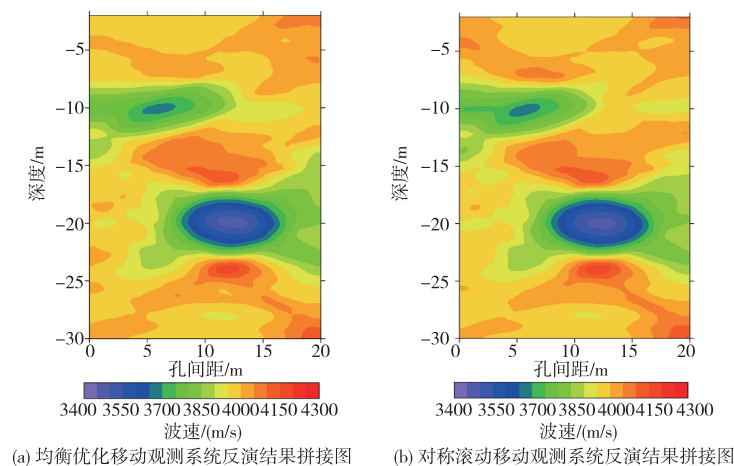


图 11 均衡优化和对称滚动观测系统反演结果

Fig. 11 Inversion results diagram for balanced optimization and symmetric rolling observation system

23 m时，便无法布设固定式观测系统，此时需要采用移动观测系统。其中移动观测系统中的最大射线密度系统通过增加激发次数获得了最高的射线密度， $0.54 \text{ 条}/\text{m}^2$ ，其反演得到的定位误差为 0.5 m ，最接近固定系统。相比之下，最小重叠移动观测系统射线数量最少、密度最低， $0.24 \text{ 条}/\text{m}^2$ ，导致其反演定位误差最大，为 1.2 m ，信噪比最低，为 20.3 dB ，缺陷边界模糊。这表明，增加射线密度是提升成像质量的有效途径。

(2) 观测方式与数据拼接误差。对于深墙检测，移动观测系统引入了“数据拼接”这一环节，这也是一个关键的系统参数。对比表 2 中移动系统的“定位误差”与“数据拼接误差”可发现，拼接误差是移动系统总误差的一个重要组成部分。例如，最小重叠移动观测系统拼接误差达 0.8 m ，而其总定位误差为 1.2 m 。这主要是由于分段观测导致不同批次数据间存在轻微的时移或定位偏差。本研究结果表明，通过优化移动观测模式可以有效抑制拼接误差。优化关键在于对重叠区域进行量化设计。对于重叠范围应设置一个有效区间，其下限需保证形成足够的射线交叉，建议不小于检波器间距的 $3 \sim 5$ 倍，以避免约束不足；其上限则取决于效率权衡，当重叠超过单个排列长度的 $1/2$ 时，其对精度提升的边际效益将显著降低。对于射线交叉质量，采用射线交叉角度和射线交叉密度作为评价指标。角度

越大、密度越高，对介质的约束越强，反演越稳定。均衡优化和对称滚动移动观测系统通过设计更大的重叠区域和更优的射线交叉，将拼接误差降低至 0.5 和 0.6 m，从而获得了优于最小重叠移动观测系统的综合反演效果。

(3) 激发次数与检测效率的权衡。激发次数是决定现场工作效率和成本的关键参数。从物理原理上，增加激发次数能够提升射线密度和空间覆盖均匀性，从而为反演提供更多约束，是提高成像质量的有效途径。本研究结果印证了这一点：图 2(c) 最大射线密度移动观测系统通过最多激发次数 20 次获得了移动系统中最高的射线密度 0.54 条/m² 和最佳的反演精度定位误差 0.5 m。然而，激发次数对精度的提升存在边际效益递减效应。如图 2(c) 最大射线密度移动观测系统与图 2(d) 均衡优化移动观测系统对比所示，前者激发次数增加 33%，但定位误差仅改善 0.2 m。这表明，超出一定范围后，精度提升的代价是效率的显著下降。因此，观测系统优化的核心并非追求极限精度，而是寻求特定精度要求下的效率最优解。在本研究设定条件下，均衡优化移动观测系统(图 2(d)) 以 15 次激发实现了 0.7 m 的定位误差，在精度与效率之间取得了最佳平衡，是更具工程实用价值的推荐方案。

(4) 基于多目标优化的观测系统设计理论。本研究结果表明，观测系统的优化本质是一个多目标优化问题，其核心是在成像精度、检测效率和经济成本之间寻求最优解。通过对 5 种系统的对比，可以提炼出以下定量关系，为观测系统设计提供理论依据。① 射线层析成像的精度主要受射线路径几何分布的控制。本研究证实，存在一个临界射线密度，约 0.40 条/m²，超过此值后，其对定位精度的提升效益显著降低。因此，优化的目标并非盲目追求最高射线密度，而是使系统密度略高于临界值，以实现精度与效率的最佳匹配。② 对于移动观测系统，抑制数据拼接误差是关键。本研究揭示，拼接误差的大小主要取决于重叠区域内的有效独立射线数。有效独立射线数是指在该区域内路径差异显著、能为反演提供独特约束的射线条数。它不同于射线总数，更强调射线的空间分布多样性，特别是交叉角度。如图 2(b) 所示的最小重叠移动观测系统，其重叠区狭小，射线路径相似度高，有效独立射线数稀少，估算小于 10 条，导致反演算法无法有效校正不同批次数据间的系统偏差，从而产生高达 0.8 m 的拼接误差。理论分析与实验结果均表明，当该数值超过一个经验阈值，本研究建议大于 15 条时，重叠区便能形成强大的内部约束网络，从而将拼接误差稳定压制在较低水平，如均衡优化系统的 0.5 m。这为重叠范围的量化设计提供了核心准则。③ 均衡优化移动观测系统的成功在于它实现了多目标间的精巧平衡。该方案并非通过简单的对称或非对称滚动实现，而是通过优化重叠区范围与炮-检点空间布局，在重叠区最大化有效独立射线数与射线交叉角度，从而在不过度增加激发次数的前提下，显著提升深部探测的精度与可靠性。其设计理念的核心是在保证关键区域强约束的前提下，实现全局数据采集效率的最优化。

7 案例研究

7.1 研究区简况 诺木洪水库设计最大坝高 56.0 m，正常蓄水位 3406.40 m，总库容 3396×10⁴ m³，属Ⅲ等工程。大坝砂砾石基础防渗采用 0.8 m 厚现浇混凝土防渗墙，混凝土强度等级为 C25，抗渗等级为 W10，防渗墙轴线长 310.0 m，其顶部与连接板相接，墙底深入基岩 1.0 m。大坝混凝土防渗墙纵剖面见图 12。

7.2 混凝土防渗墙质量检测 根据相关规程规范^[3,28]，混凝土防渗墙的检测主要包括几何尺寸检测、墙体混凝土抗压强度检测以及墙体连续性与完整性等内容。本文重点展示了一处弹性波 CT 检测的结果，并辅以单孔声波和钻孔电视检测进行综合验证。两个钻孔的设计桩号分别为 F0+237.12 m 和 F0+256.58 m，实测孔距为 19.8 m，孔深分别为 61.0 和 57.0 m。因钻孔深度超过本次检测设备的最大覆盖范围，因此需要采用移动观测系统，各观测系统参数信息见表 3。综合考虑数值模拟的正反演结果以及现场检测效率需求，本次弹性波 CT 的检测优选均衡优化移动观测系统，相应设备与布置方式见

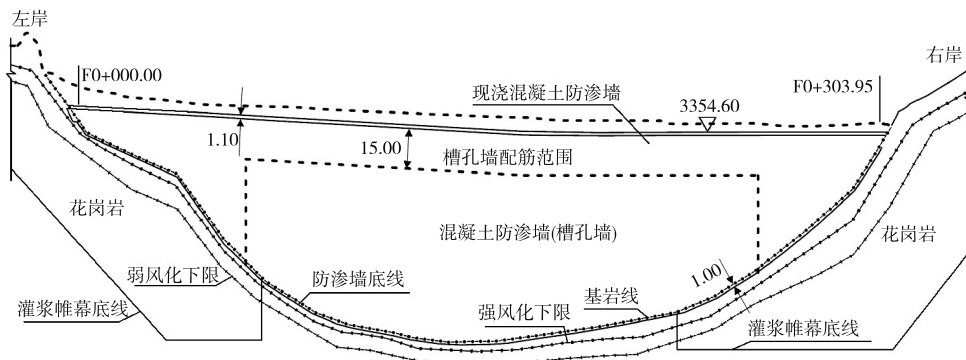


图 12 大坝混凝土防渗墙纵剖面图(单位: m)

Fig. 12 Longitudinal section drawing of dam concrete cutoff wall(Unit: m)

图 13。具体采集参数如下：以 F0+237.12 m 孔为激发孔，F0+256.58 m 孔为接收孔，检波器间距 1 m，24 道接收，炮点间距 1 m，采样率 1024，采样间隔 0.1 ms，激励源采用电火花震源，电压达到 8000 V 触发，检测过程中孔中需充满水。弹性波 CT 与单孔声波现场测试布置示意图 14。此外，在两个钻孔位置分别进行了单孔声波检测与钻孔全景成像。单孔声波采用一发双收，孔内注满清水后，以 0.2 m 为步距从孔底向上进行测试。钻孔全景成像探头由电机控制，以 2 m/min 的速度从孔口匀速下放至孔底。

表 3 现场弹性波 CT 检测各观测系统参数信息对比

Table 3 Comparison of parameter information across different observation systems for field elastic wave CT

观测系统类型	激发孔深/m	接收孔深/m	炮间距/m	道间距/m	激发次数	射线数量
最小重叠移动观测系统	61	57	1	1	63	1512
最大射线密度移动观测系统	61	57	1	1	100	2400
均衡优化移动观测系统	61	57	1	1	62	1488
对称滚动移动观测系统	61	57	1	1	65	1560

7.3 检测成果分析 提取弹性波射线的初至时间后，根据所选观测系统将其输入至第 5 节反演的程序中进行处理。反演计算完成后输出波速分布信息，并据此绘制波速等值线图。单孔声波和弹性波 CT 检测结果见图 15。桩号 F0+237.12 m 处钻孔的波速范围为 3846 ~ 5208 m/s，平均波速为 4351 m/s，以 3600 m/s 作为混凝土低限值，经计算该孔混凝土声速变异系数为 4.9%，根据规范^[30]，判断该孔内混凝土均质性较好、质量合格；然而，在桩号 F0+256.58 m 处钻孔中，波速范围为 2427 ~ 4808 m/s，平均波速为 4351 m/s，但计算的混凝土声速变异系数为 8.3%，表明该孔内混凝土均质性较差；从弹性波 CT 成果图中可以看出弹性波波速主要分布在 3800 ~ 5150 m/s，其中在桩号 F0+256.58 m 钻孔附近，0 ~ 32 m 深度范围内，局部波速小于 3600 m/s，推测在该钻孔深度段的钻进过程中，钻机扰动导致墙体孔壁局部混凝土松动脱落。此外，内部钢筋的存在也会对波速测量结果产生影响，导致波速局部降低，检测结果和该孔的单孔声波测试结果发现该深度范围混凝土波速降低较为吻合。对照钻孔取芯、钻孔全景成像及声波测试结果，综合判断在该检测范围段混凝土防渗墙墙体连续性和完整性较好。

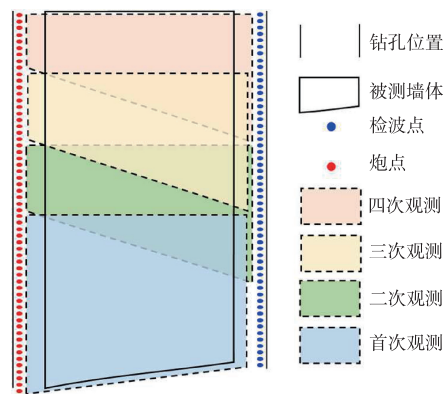


图 13 现场弹性波 CT 检测观测系统布置示意

Fig. 13 Schematic diagram of observation system layout for field elastic wave CT detection

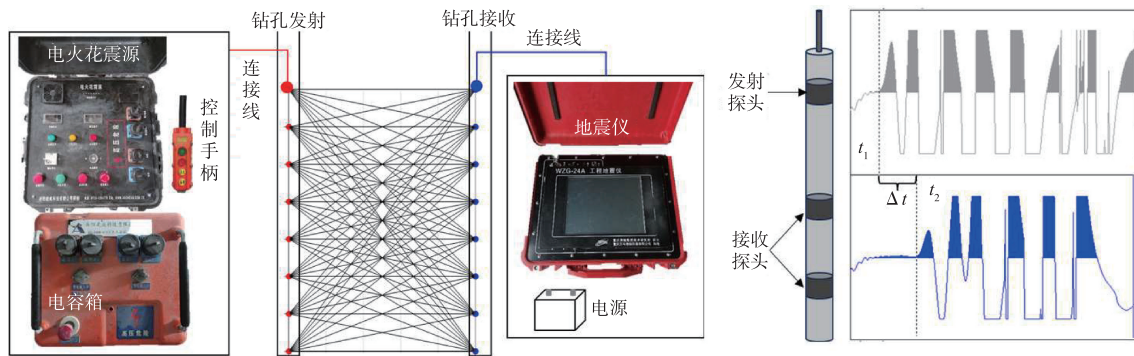


图 14 弹性波 CT 和单孔声波现场测试示意

Fig. 14 Schematic diagram of elastic wave CT and single-hole acoustic wave field test

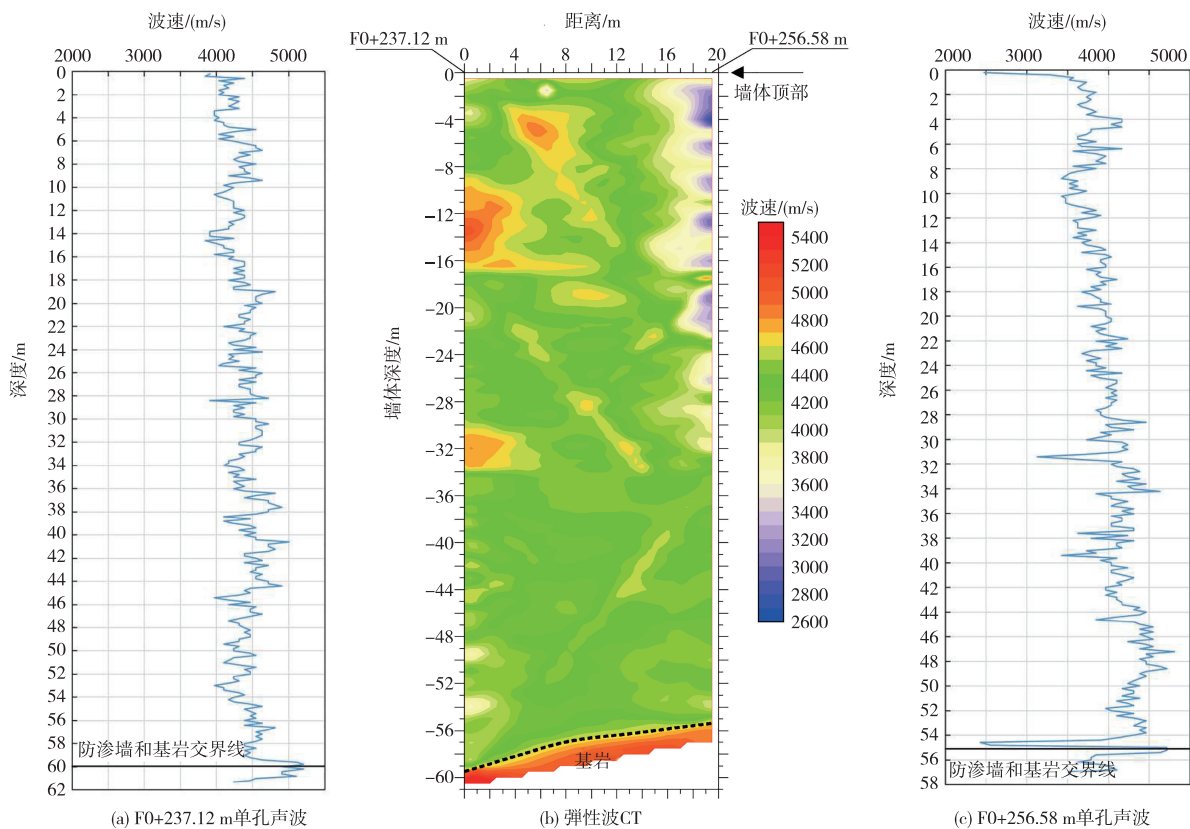


图 15 弹性波 CT 和单孔声波检测成果

Fig. 15 Diagram of results from elastic wave CT and single-hole acoustic wave

8 结论

通过系统性的数值模拟与工程验证，本研究针对混凝土防渗墙弹性波 CT 检测，得出以下核心结论：(1) 确立了以检测深度与设备最大覆盖深度为判据的观测系统分级选型原则。当墙体深度不超过设备一次覆盖能力时，应优先采用固定式观测系统，其定位误差可控制在 0.5 m 以内，适用于高精度检测。(2) 揭示了移动观测系统临界射线密度(约 0.40 条/ m^2)与有效独立射线数阈值(>15 条)的关键作用。前者定义了精度提升的边际效益拐点，后者是控制数据拼接误差(可压制至 0.5 m)的核心量化指标。(3) 通过多目标优化对比，证明均衡优化移动观测系统综合性能最佳。其在模型试验中以最少激发次数(15 次)实现了 0.7 m 的定位误差，并在诺木洪水库 61 m 深防渗墙的检测中成功应用，验证了该

设计在效率与精度间的优越平衡性。以上结论为混凝土防渗墙的弹性波 CT 检测提供了从系统选型到参数设计的定量化依据。

参 考 文 献:

- [1] 邹德高, 屈永倩, 孔宪京, 等. 深厚覆盖层上土石坝防渗墙损伤开裂精细化分析及防渗功能评价[J]. 水利学报, 2024, 55(2): 147–157. (ZOU D G, QU Y Q, KONG X J, et al. Refined failure analysis and functional evaluation of cutoff walls of rockfill dams on deep overburden[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(2): 147–157. (in Chinese))
- [2] 张文兵, 李青铭, 李明超, 等. 考虑渗流溶蚀耦合效应的土石坝防渗墙长期服役性能研究[J]. 水利学报, 2025, 56(10): 1314–1325. (ZHANG W B, LI Q M, LI M C, et al. Study on the long-term service performance of anti-seepage walls of earth-rock dams under coupled effect of seepage and calcium leaching[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(10): 1314–1325. (in Chinese))
- [3] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程勘探规程 第1部分: 物探: SL/T 291.1—2021[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for Exploration of Water Resources and Hydropower Projects Part 1: Geophysical Exploration: SL/T 291.1–2021[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2021. (in Chinese))
- [4] 张廷华, 蒋景东, 李卓, 等. 何家沟水库大坝“台阶式”混凝土防渗墙质量综合物探检测与评价[J]. 水电能源科学, 2023, 41(1): 96–99, 9. (ZHANG T H, JIANG J D, LI Z, et al. Comprehensive geophysical detection and evaluation of quality of “stepped” concrete cut-off wall of hejiagou reservoir dam[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(1): 96–99, 9. (in Chinese))
- [5] 葛龙进, 曾程, 胡允楚, 等. 柏峰水库主坝混凝土防渗墙防渗处理效果分析[J]. 中国农村水利水电, 2019 (2): 155–158.
- [6] 李亮, 徐复兴, 高建华. 广西澄碧河水库混凝土防渗墙质量检测与评价[J]. 人民长江, 2011, 42(22): 65–67. (LI L, XU F X, GAO J H. Quality check and evaluation of concrete cut-off wall of Chengbi River Reservoir [J]. Yangtze River, 2011, 42(22): 65–67. (in Chinese))
- [7] 潘纪顺, 宋朝阳, 冷元宝, 等. 地震波 CT 在混凝土防渗墙质量检测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2016, 25(3): 311–317. (PAN J S, SONG C Y, LENG Y B, et al. The application of seismic wave CT to qualities detection of concrete cut-off walls [J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2016, 25(3): 311–317. (in Chinese))
- [8] 赵祥, 杨磊, 冷元宝, 等. 弹性波 CT 在高压摆喷防渗墙质量检测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2017, 26(5): 559–564. (ZHAO X, YANG L, LENG Y B, et al. The application of elastic wave CT to qualities detection of high pressure swing jet cut-off walls[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2017, 26(5): 559–564. (in Chinese))
- [9] 宋先海, 黄荣荣. 弹性波 CT 在大体积混凝土无损检测中的应用[J]. 人民长江, 2003, 34(11): 23–25. (SONG X H, HUANG R R. Application of CT elastic wave in non-destructive quality test of mass concrete [J]. Yangtze River, 2003, 34(11): 23–25. (in Chinese))
- [10] SANTAMARINA J C, FRATTA D. Discrete Signals and Inverse Problems: An Introduction for Engineers and Scientists[M]. John Wiley & Sons, 2005.
- [11] DALEY T M, MAJER E L, PETERSON J E. Crosswell seismic imaging in a contaminated basalt aquifer[J]. Geophysics, 2004, 69(1): 16–24.
- [12] PETERSON J E, PAULSSON B N P, MCEVILLY T V. Applications of algebraic reconstruction techniques to cross-hole seismic data[J]. Geophysics, 1985, 50(10): 1566–1580.
- [13] VAN DER SLUIS A, VAN DER VORST H A. SIRT- and CG-type methods for the iterative solution of sparse linear least-squares problems[J]. Linear Algebra and its Applications, 1990, 130: 257–303.
- [14] GREGOR J, BENSON T. Computational analysis and improvement of SIRT[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2008, 27(7): 918–924.

- [15] DUAN C L, YAN C H, XU B T, et al. Crosshole seismic CT data field experiments and interpretation for karst caves in deep foundations[J]. *Engineering Geology*, 2017, 228: 180–196.
- [16] RICE J R, PAIGE C C, SAUNDERS M A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1982, 8(1): 43–71.
- [17] 米宏泽, 雷振英. 井中声波 CT 技术系统及其应用[J]. *物探与化探*, 2008, 32(4): 388–391. (MI H Z, LEI Z Y. The technical system of borehole acoustic wave computer tomography and its application[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, 32(4): 388–391. (in Chinese))
- [18] QUICENO B A, MUÑOZ A M, PANIAGUA J G, et al. Optimal selection of the regularization parameter for pyGIMLi: Geophysical inversion and modeling library [C]//2022 IEEE ANDESCON. Barranquilla, Colombia: IEEE, 2022.
- [19] MOSER T J. Shortest path calculation of seismic rays[J]. *Geophysics*, 1991, 56(1): 59–67.
- [20] 余志雄, 薛桂玉, 周洪波, 等. 大坝 CT 技术研究概况与进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(8): 1394–1397. (YU Z X, XUE G Y, ZHOU H B, et al. Review on dam ct technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8): 1394–1397. (in Chinese))
- [21] 李娜, 赵燕茹. 基于 X-ray CT 技术研究混凝土内部损伤的研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(21): 21169–21177. (LI N, ZHAO Y R. Research progress of concrete internal damage based on X-ray CT technology[J]. *Materials Review*, 2021, 35(21): 21169–21177. (in Chinese))
- [22] 吕小彬, 孙其臣, 鲁一晖, 等. 基于冲击弹性波的 CT 技术的原理及在水工混凝土结构无损检测中的应用[J]. *水利水电技术*, 2013(10): 107–112. (LU X B, SUN Q C, LU Y H, et al. Fundamentals of impact elastic wave-based CT and its application to non-destructive inspection of hydraulic concrete structures[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013(10): 107–112. (in Chinese))
- [23] 徐复兴, 刘海涛, 熊友亮, 等. 基于能量衰减系数的弹性波 CT 反演[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(12): 169–172. (XU F X, LIU H T, XIONG Y L, et al. Elastic wave CT-based inversion of attenuation coefficient[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(12): 169–172. (in Chinese))
- [24] 朱昌平, 殷冬梅, 王琦. 大坝 CT 技术研究进展[J]. *声学技术*, 2007, 26(4): 646–650. (ZHU C P, YIN D M, WANG Q. Recent advances in research of dam CT techniques[J]. *Technical Acoustics*, 2007, 26(4): 646–650. (in Chinese))
- [25] CLEMENT W P, KNOLL M D. Tomographic inversion of crosshole radar data: Confidence in results[C]//Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Environment and Engineering Geophysical Society, 2000.
- [26] KARIMPOUR M, SLOB E, SOCCO L V. Comparison of straight-ray and curved-ray surface wave tomography approaches in near-surface studies[J]. *Solid Earth*, 2022, 13(10): 1569–1583.
- [27] GIROUX B, LAROUCHE B. Task-parallel implementation of 3D shortest path raytracing for geophysical applications[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 54: 130–141.
- [28] 中华人民共和国水利部. 水利工程质量监测技术规程: SL 734—2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical Code for Quality Detection of Water Projects: SL 734–2016[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. (in Chinese))
- [29] RÜCKER C, GÜNTHER T, WAGNER F M. pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 109: 106–123.
- [30] 中华人民共和国国家能源局. 大坝混凝土声波检测技术规程: DL/T 5299—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013. (National Energy Administration of the People's Republic of China. Technical Code for Inspection Concrete of Dam by Sonic Method: DL/T 5299–2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013. (in Chinese))