

# 一种结合弹性波 CT 正演模拟与钻孔注水法的 防渗墙检测方法研究

邓 扬<sup>1,2,3</sup>, 陆金琦<sup>4</sup>, 余信江<sup>1,2,3</sup>, 胡 超<sup>1,2,3</sup>

- 长江科学院 工程安全与灾害防治研究所, 武汉 430010;
- 水利部 水工程安全与病害防治工程技术研究中心, 武汉 430010;
- 国家大坝安全工程技术研究中心, 武汉 430010;
- 辽宁清原抽水蓄能有限公司, 辽宁 抚顺 113300

**摘要:** 防渗墙是水利水电工程项目中的重要部分, 随着防渗墙规模的逐渐扩大, 常规防渗墙检测方法逐渐减少; 为了增加防渗墙的检测手段, 研究提出采用弹性波 CT 正演模拟技术, 并与钻孔注水法相结合的方法; 在钻孔注水试验时, 利用弹性波 CT 正演模拟技术, 检测水流在墙体中的流动情况, 从而在检测防渗墙渗透性的同时, 完成防渗墙的完整性检测; 结果显示, 在低速或高速异常速度模型中, 走时残差的波动较大, 且完全不同; 采用围井法, 实验深度为 15 m 时, 计算得到的渗透系数为  $0.14 \times 10^{-6}$  cm/s; 采用常水头法, 深度为 15 m 时, 该方法计算得到的渗透系数为  $1.88 \times 10^{-6}$  cm/s; 说明基于弹性波 CT 正演模拟技术, 可以有效地反映防渗墙的状态; 而采用围井法检测得到的防渗墙渗透系数, 低于采用常水头注水法得到的渗透系数; 研究提出的方法可以准确地检测防渗墙的质量。

**关键词:** 防渗墙; 正演模拟; 弹性波 CT; SIRT 算法; ART 算法

## Detection Method for Anti-seepage Wall Combined Elastic Wave CT Forward Simulation with Drilling and Water Injection Technology

DENG Yang<sup>1,2,3</sup>, LU Jinqi<sup>4</sup>, YU Xinjiang<sup>1,2,3</sup>, HU Chao<sup>1,2,3</sup>

- Engineering Safety and Disaster Research Institute, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
- Research Center on Water Engineering Safety and Disaster Prevention of MWR, Wuhan 430010, China;
- National Dam Safety Engineering Technology Research Center, Wuhan 430010, China;
- Liaoning Qingyuan Pumped Storage Co., Ltd., Fushun 113300, China)

**Abstract:** simulation technology is used to detect the water flow in the wall, thereby completing the integrity inspection of the anti-seepage wall while detecting its permeability. The results show that in low-speed or high-speed abnormal speed models, the fluctuation of travel time residuals is significant and completely different. By using the enclosure method, the calculated permeability coefficient is  $0.14 \times 10^{-6}$  cm/s, with an experimental depth of 15 m. By using the constant head method and depth of 15 m, the permeability coefficient calculated by this method is  $1.88 \times 10^{-6}$  cm/s. Based on the elastic wave CT forward simulation technology, it can effectively reflect the state of the anti-seepage wall. The anti-seepage wall permeability coefficient of the enclosure method is lower than that of the constant head water injection method. The proposed method can accurately detect the quality of anti-seepage walls.

**Keywords:** anti-seepage wall; forward simulation; elastic wave CT; SIRT algorithm; ART algorithm

## 0 引言

防渗墙是水利水电工程中的重要部分, 水利水电工程中的防渗墙, 采用垂直防渗的墙体较为常见, 该种防渗墙分为两种形式, 分别是帷幕灌浆及垂直防渗<sup>[1-2]</sup>。混凝土防渗墙是结构最简单、效果最好的一种防渗结构, 在堤坝防

渗工程中应用广泛。随着混凝土防渗墙技术的不断发展, 我国水利水电工程中的防渗墙规模、也在逐渐扩大, 某些水电站中, 防渗墙的厚度达 1.4 m, 面积达到了 21 830 m<sup>2</sup>。防渗墙规模的不断增大, 导致防渗墙的检测愈发困难。正演模拟技术作为一种基于物理数学原理的仿真方法, 可以模拟地下水流、地层变化等复杂的地下环境情况, 为地下

收稿日期: 2023-09-01; 修回日期: 2023-09-18。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3005503)。

作者简介: 邓 扬(1991-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 邓 扬, 陆金琦, 余信江, 等. 一种结合弹性波 CT 正演模拟与钻孔注水法的防渗墙检测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 125-130.

工程的分析与预测提供了有力的工具。研究旨在充分利用正演模拟技术,开发出一种高效准确的防渗墙检测方法,以应对地下工程中的渗漏问题。在过去的防渗墙检测方法中,存在着依赖人工巡查、设备成本高昂以及检测结果不稳定等问题。而基于正演模拟技术的防渗墙检测方法则具备了许多优势。首先,该方法能够精确模拟地下水流的运动规律,通过模拟不同情境下的渗漏情况,提供更为全面的检测数据。其次,正演模拟技术具有较高的自动化程度,能够在较短时间内完成大量模拟计算,从而实现对防渗墙渗漏情况的快速评估。本文研究创新性地将正演模拟技术与防渗墙检测相结合,通过在模拟中引入实际地质、水文等数据,实现对渗漏情况的可视化呈现。通过不断优化模拟算法,我们旨在提高防渗墙检测的准确性和实用性,为地下工程的安全运行提供更有力的支持。

本文将正演模拟技术与实际地质、水文等数据相结合,实现了对渗漏情况的可视化呈现。通过不断优化模拟算法,提高防渗墙检测的准确性和实用性,为地下工程的安全运行提供更为可靠的支持。

## 1 国内外防渗墙检测研究现状

甘磊等人为了分析混凝土防渗墙的渗透溶蚀特性,根据流体动力学,及对流扩散方程,建立了一个混凝土防渗墙渗透溶蚀耦合分析模型,该模型综合考虑了骨料、孔隙对混凝土中钙离子的扩散系数的影响,结果显示,该模型可以反映防渗墙在溶蚀过程中的渗透特性以及孔隙率的变化情况<sup>[3]</sup>。温立峰等人为了研究坝基防渗墙的力学性状,并进行相应的统计分析,收集了全国 40 多个含有防渗墙的水利水电工程项目检测资料及项目建设信息,构建了一个实例数据库,该数据库展现了防渗墙不同性状的产生机制,并进一步研究了防渗墙基本参数,对防渗墙力学性状的影响,为后续防渗墙修筑工程的设计提供了详细的参考<sup>[4]</sup>。G Dai 等人,为了增加地下垃圾填埋场的防渗能力,制备了一种全新的防渗浆液,该浆液是在 PBFC 防渗浆液的基础上,通过实验时制备的羧甲基纤维素钠,对防渗浆液进行改性处理,作者对新的防渗浆液进行了性能测试,结果显示,该防渗浆液的 28 天渗透系数小于原防渗浆液,且其他方面的性能指标,均高于原防渗浆液<sup>[5]</sup>。Yu, Xiang 等人,为了确定大坝体心墙与覆盖层混凝土防渗墙连接部分的范围,采用有限元分析法,对坝体进行了各项数值分析,结果显示,该方法可以有效地展现混凝土防渗墙在安装过程中穿入土体的过程<sup>[6]</sup>。综上所述,无论是水利水电,还是其他相关工程项目,防渗墙的性能指标都是重中之重,防渗墙的各项性能指标,需要通过一定的检测技术,才可以进行测定。目前水利水电工程中,防渗墙的质量检测技术,在无损检测等方法中,并没有相关成果的出现,且其他检测技术的理论研究较为缺乏。正演模拟技术,是检测技术中较为常见且检测效果较好的一种检测技术,因此,研究提出采用正演模拟技术,对塑性混凝土防渗墙进行检测,以

确定防渗墙的各项性能指标。

## 2 基于钻孔注水法的防渗墙渗透性检测研究

钻孔注水法是最常用也是最有效的用于检测防渗墙渗透系数的方法。水利水电工程项目中,为了使防渗墙可以达到预期防渗作用,会在墙体修筑完毕后,对防渗墙进行渗透性检测,防渗墙的种类也是多种多样的,其中塑性混凝土防渗墙是较为常见的一种,该防渗墙具有轴线长、深埋大、强度低、壁厚薄、弹模低的特点<sup>[7-8]</sup>。防渗墙的渗透性检测中,渗透系数是墙体防渗能力的指标之一,渗透系数越弱,防渗墙的防渗效果越好。钻孔注水检测是墙体渗透性检测的常用技术,钻孔常水法是其中一种技术,该技术中,渗透系数的计算分为两种情况,第一种是防渗墙处于地下水位以下时,此时,防渗墙的渗透系数计算公式如公式(1)所示:

$$K = \frac{16.67Q}{AH} \quad (1)$$

公式(1)中, $K$ 表示实验墙段的渗透系数(cm/s), $Q$ 表示注入流量(L/min), $H$ 表示实验水头(cm), $A$ 表示形状系数(cm)。第二种是防渗墙处于地下水位以上时,此时,防渗墙的渗透系数计算公式如公式(2)所示:

$$K = \frac{7.05Q}{lH} \lg \frac{2l}{r} \quad (2)$$

公式(2)中, $r$ 表示钻孔内半径(cm), $l$ 检测墙体长度(cm)。若防渗墙处于渗透系数较小的地区时,继续采用钻孔常水法,就会耗费较多的时间,检测效率较低,此时,就可以采用钻孔降水头法,对防渗墙进行渗透性检测,采用该方法对防渗墙的渗透性进行检测时,渗透系数的计算公式如公式(3)所示:

$$K = 0.0523r^2 \times \ln(H_1/H_2)/(A \cdot (t_2 - t_1)) \quad (3)$$

公式(3)中, $b$ 表示实验套管内孔径(cm), $H_1$ 表示 $t_1$ 时的水头(cm), $H_2$ 表示 $t_2$ 时的水头(cm), $B$ 表示注水试验形状系数(cm)。除上述两种方法外,围井法也是一种常见的防渗墙渗透性检测方法,该方法中,渗透系数的计算公式如公式(4)所示:

$$K = \frac{4Q_1}{L(H+h_0)(H-h_0)} \quad (4)$$

公式(4)中, $K$ 与公式(1)中 $K$ 意义相同,但单位不同,公式(4)中 $K$ 的单位为m/d, $Q_1$ 表示稳定流量( $m^3/d$ ), $T$ 表示高喷墙平均厚度(m), $h$ 表示围井内水位与井底的距离(m), $h_0$ 表示地下水位值井底的距离(m)。公式(1)至公式(4)中的参数选择,均按照《水利水电工程注水试验规程》进行。采用围井法检测墙体渗透系数时,需对每段墙体的渗透系数,进行分段计算。防渗墙的检测,除渗透性检测外,还有完整性检测,该检测也是防渗墙修筑完成后的重要步骤<sup>[9-10]</sup>。防渗墙的检测方法通常采用以下3种方法,分别是高密度电法、电磁法及面波法。塑性混凝土防渗墙中,高密度电法,是较为常用的检测方法,该方

法具有布置简洁, 检测效率高, 检测成本低的特点, 且该方法可实现自动化采集, 但该方法检测的异常分布范围分布较广, 分辨率较低, 无法精准定位异常所在位置<sup>[15-16]</sup>。电磁法对防渗墙进行检测时, 主要分为两种方法: 1) 地质雷达法, 2) 可控源音频电磁探测法<sup>[17-18]</sup>。该方法在测量防渗墙质量时, 需要根据防渗墙的厚度, 对接收器天线进行适当的调整。第二种检测方法, 在矿产资源的勘测中, 应用广泛, 该方法通过电磁传播理论及麦克斯韦方程, 推导人工场源的电磁场公式。该方法无法对异常目标进行精细的划分。面波是地震波在传递过程中产生的一种仅在地表传递的波, 该波由地震波中的 P 波及 SV 波相互干扰形成。面波法在勘测中, 存在两种应用方式, 分别是瞬态法及稳态法, 该波在传递过程中, 不仅会沿着地表传播, 也会沿分界面传播, 瞬态法是通过外力作用, 激发一个面波, 以脉冲的方式向外传播, 稳态法则是激发产生单一频率的面波, 稳态法的勘察仪器较为笨重, 防渗墙的勘察检测中以瞬态法为主。

### 3 钻孔注水法结合弹性波 CT 正演模拟技术的防渗墙墙体检测研究

1) 基于 ART 算法的检测误差校正:

弹性波 CT 正演模拟技术是通过 CT 技术对检测目标进行检测。该方法利用外部震源激发弹性波, 并对目标进行检测, 是一种检测效率较高且检测精度较高的结构无损检测技术, 该方法原理如图 1 所示。

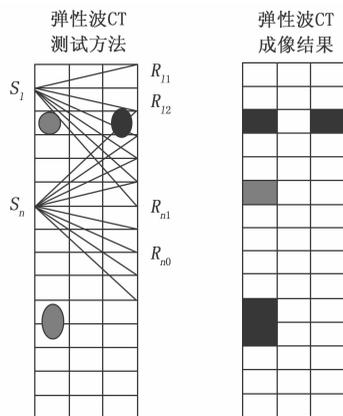


图 1 弹性波 CT 正演模拟技术原理

弹性波 CT 正演模拟技术是一种用于模拟和分析介质中, 弹性波传播的先进方法。该技术在勘探、检测等领域具有广泛的应用前景。具有高分辨率、观测结果全面、异常捕捉清晰、不会破坏检测目标结构及可在复杂地区应用的特点。是一种高效且精准的完整性检测技术, 该技术可通过观测钻孔注水法中, 水流在防渗墙内的状况, 分析防渗墙的整体质量。弹性波 CT 正演模拟技术在早期是应用于医学领域之中的, 随着该项技术的不断成熟, 其应用领域也在不断地扩大, 如今弹性波 CT 正演模拟技术, 在物理学

领域中的应用也较为常见。该方法通过人工制造的射线, 穿过检测目标内部, 从而获取检测目标的内部结构信息。通过该方法对防渗墙进行检测时, 就是利用弹性波的正演与反演, 重建检测目标的内部情况, 构造检测目标的结构图像。采用该方法检测防渗墙时, 若墙体存在缺陷, 将会导致弹性波在传递过程中出现速度的变化, 通过对比弹性波前后的速度变化, 即可判断墙体是否存在缺陷。墙体的质量越好, 弹性波的传播速度越快, 出现缺陷时, 弹性波的传播速度会出现降低。层析成像技术就是函数的 Radon 变换及逆变换。以  $f(x, y)$  表示一个二维连续函数图像, 将 Radon 变换作用于该函数时, 可以产生一个实数, 此时, 函数  $f(x, y)$  的 Radon 变换, 可定义为某条给定直线的积分值。函数的 Radon 变换公式如公式 (5) 所示:

$$P_{\theta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \alpha + y \sin \alpha - t) dx dy \quad (5)$$

公式 (5) 中,  $P_{\theta}(t)$  表示积分值,  $\delta$  表示特征函数。用弹性波 CT 正演模拟技术检测防渗墙质量时, 需在墙体两侧寻找两个钻孔, 其中一个钻孔负责发射弹性波, 另外一个钻孔接收弹性波, 弹性波在激发点及接收点之间, 按照一定的路径进行传播。该方法通过读取仪器记录数据, 记录初至波的走时数据, 并求解矩阵方程, 得到各个单元的弹射波速度。利用弹性波 CT 正演模拟技术检测防渗墙时, 最终的正演模拟方法, 构建墙体内部结构图像, 是最终检测结果的直接呈现, 因此, 需要采用合适的重建算法。目前常用的重建算法包括 ART 算法、SIRT 算法 ART 算法即为带出重建法, 该方法是通过给定一个初始值, 再利用投影值, 将误差沿映射反方向投射回去, 对误差进行校正处理。该算法在误差校正过程中, 需要对所有误差进行逐个校正, 直到满足实验需求。ART 算法可以划分为 4 个步骤, 首先是对检测目标进行区域的划分, 并设置初始慢度值  $S_j$  为 0, 其次是计算弹性波每条射线路径的走时, 第三是计算更新后的慢度值  $S'_j$ , 最后是根据慢度值的状态, 判断算法是否继续迭代, 停止迭代后, 利用最后的慢度值, 计算弹性波的速度即可。ART 算法在每一次迭代过程中, 仅需要弹性波一条射线路径的信息, 再逐个将所有射线路径迭代校正一遍, 直到负荷最终需求<sup>[19-20]</sup>, 如图 2 所示。

2) 基于 SIRT 算法的检测慢度值校正:

SIRT 算法即为联合迭代重建算法, 该算法可用于校正检测目标各个单元的慢度值。若假设监测目标的某区域的某个单元中, 存在  $n$  个射线路径,  $m$  是其中的一条路径, 以  $l_m$  表示该射线在网格内的长度, 将  $L_m$  作为该射线的总长度,  $T_m$  表示该射线的传播时间, 那么该射线通过网格单元的平均时间如公式 (6) 所示:

$$t_m = T_m \frac{l_m}{L_m} \quad (6)$$

该单元内所有射线的总时间如公式 (7):

$$T_n = \sum_{n=1}^n t_m \quad (7)$$

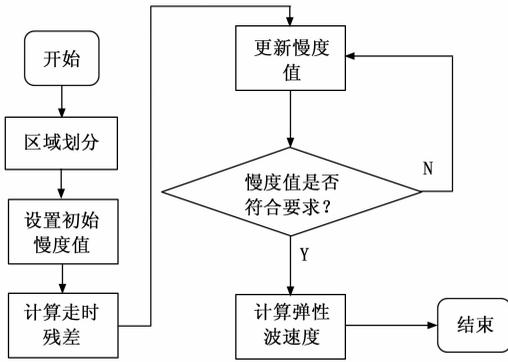


图 2 ART 算法流程

公式 (7) 中,  $T_n$  表示  $n$  条射线路径的总时间。 $n$  条射线路径的总传播距离如公式 (8) 所示:

$$L_n = \sum_{m=1}^n l_m \quad (8)$$

公式 (8)  $L_n$  表示  $n$  条射线路径的总传播距离。根据公式 (7) 及公式 (8) 可知, 该单元内的平均慢度值如公式 (9) 所示:

$$S_n = \frac{\sum_{m=1}^n t_m}{\sum_{m=1}^n l_m} \quad (9)$$

公式 (9) 中,  $S_n$  表示该网格内的平均慢度值。通过上述步骤即可获得网格内的平均速度, 即可获得平均慢度值, 根据平均慢度值, 即可计算所有射线的总传播时间, 将计算时间与实际值进行比较, 即可获得测量系统的误差值。此时, 再考虑区域内的单个网格, 那么单元格中的误差如公式 (10) 所示:

$$\epsilon = \frac{E_m l_m}{L_m} \quad (10)$$

公式 (10) 中,  $E_m$  表示一条射线路径的误差,  $\epsilon$  表示单元格中的误差。因此, 网格内的总误差如公式 (11) 所示:

$$\epsilon_n = \sum_{m=1}^n \epsilon_m \quad (11)$$

公式 (11) 中,  $\epsilon_n$  表示网格内总误差。慢度的校正值如公式 (12) 所示:

$$S'_n = \frac{\sum_{m=1}^n \epsilon_m}{\sum_{m=1}^n l_m} \quad (12)$$

公式 (12) 中  $S'_n$  表示慢度校正值。在 SIRT 算法中, 慢度值的校正以公式 (13) 进行。

$$S^{k+1} = S^k + \sum_{m=1}^n \epsilon_m / \sum_{m=1}^n l_m \quad (13)$$

公式 (13) 中,  $S^k$  表示网格第  $k$  次计算的慢度值。通过上述步骤, 对 SIRT 算法进行重复迭代计算, 直到校正后的误差满足需求。基于 SIRT 算法的温度场重建如图 3 所示。

SIRT 算法在计算过程中, 每次计算都是单独针对某个网格进行的, 因此, 在每次计算时, 每个网格之间相互不影响, 可以有效提高算法的计算精度, 而且 SIRT 算法中, 还可以加入阻尼因子, 在满足成像精度的同时, 提高算法

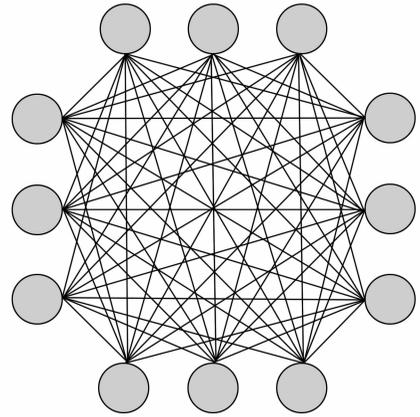


图 3 基于 SIRT 算法的温度场重建

的收敛效果。

## 4 实验与分析

### 4.1 弹性波 CT 正演检测结果分析

为了验证研究提出的基于弹性波 CT 正演及反演模拟技术的防渗墙检测技术的效果, 研究以何家沟水库大坝中的台阶式混凝土防渗墙为例, 进行了研究分析。该工程为 II 等工程, 由土石坝、河床电站、泄洪闸等部分组成, 该工程的正常蓄水深度为 1 076 m, 总容积为 4.87 亿  $m^3$ , 电站的装机容量为 90 MW。该工程的主要建筑均采用混合坝筑成, 该工程从右向左分别为右岸延伸坝、右岸连接坝、合唱电站坝、泄洪闸与土石坝连接段、土石坝。研究在 windows7 64 位系统中, 使用 MATLAB 软件进行仿真模拟实验。除使用 MATLAB 软件进行数值模拟外, 研究还使用了 Surfer 进行图片绘制, 该软件是由 Golden Software 公司设计的图片绘制软件, 研究的正演模拟成果图由该软件绘制而成。检测设备主要包括: 井间电火花震源、重庆奔腾 wzg-24a/48a 地震仪, 12 道井中串式检波器 (检波器道间距为 1 m) 以及国产测斜仪。研究布置的检测系统为单激发点、多接收点的形式, 研究还搭建了 3 种不同的防渗墙弹性波速度模型, 分别是均匀介质速度模型、低速异常速度模型、高速异常速度模型。其中, 均匀介质速度模型的速度大小为 2 500 m/s, 低速异常模型中, 异常部位的弹性波传递速度为 1 900 m/s, 高速异常模型中异常部位的弹性波传递速度为 3 000 m/s, 研究采用 SIRT 算法进行正演模拟计算, 结果如图 4 所示。

图 4 (a) 为 3 种速度模型的走时残差, 随迭代次数的变化, 可以看到, 在均匀介质中, 随着迭代校正的次数增加, 弹性波在检测目标中的走时残差在逐渐下降, 第一次迭代时, 弹性波的走时残差为 0.47 左右, 迭代次数为 9 次时, 弹性波的走时残差为 0。在低速异常速度模型中, 弹性波的走时残差波动较大, 第一次迭代时, 走时残差为 0.36 左右, 第二次迭代时, 走时残差为 0.49 左右, 第三次迭代时, 走时残差为 0.54 左右, 在第四次迭代时降至 0.38 左

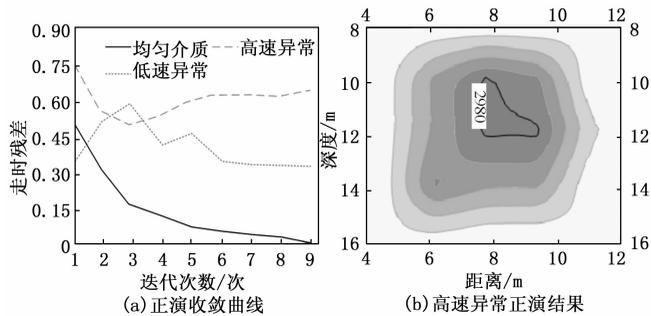


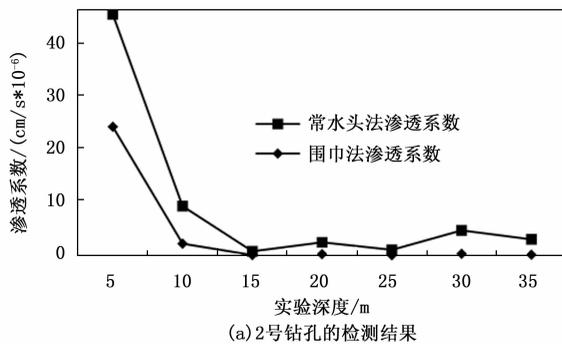
图4 收敛曲线及正演成果

右, 在第5次迭代时, 走时残差为0.42左右。在高速异常速度模型中, 弹性波的走时残差波动也较大, 第一次迭代时, 走时残差为0.75, 在第二次迭代及第三次迭代中, 弹性波走时残差均迅速下降, 第二次迭代中, 走时残差为0.56左右, 第三次迭代时, 走时残差为0.47左右。图4(b)为高速异常速度模型的正演结果图, 可以看到, 在深度为12 m左右时, 弹性波的传播速度最快为2 980 m/s以上, 检测目标的异常范围, 在深度为8 m至16 m之间, 在其余深度中, 弹性波的传播速度均处于正常范围。弹性波在高速异常介质中, 走时残差呈现出先降低在回升的趋势, 在低速异常介质模型中, 走时残差呈现出先上升在下降的趋势, 而在均匀介质中, 走时残差呈现出不断降低的趋势。

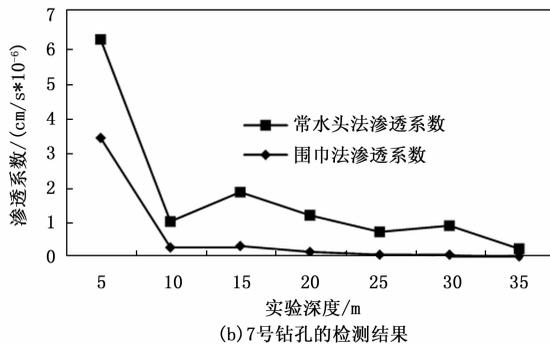
4.2 弹性波 CT 结合注水试验检测结果分析

研究设计的检测系统中, 每个接收点之间的间距为1 m, 研究共检测了8段墙体, 每一段检测墙体的深度均在40 m以上, 其中前4段上部为混凝土, 混凝土深度为4 m, 另外四段的上部为黏土, 深度为7 m。研究选取其中的几个检测区段, 分析了钻孔注水试验分析, 结果如图5所示。

图5(a)为第2号检测区段的注水试验结果, 可以看到, 常水头注水法计算的渗透系数波动较大, 2号孔实验深度为5 m时, 该实验方法计算得到的渗透系数为  $44.9 \times 10^{-6}$  cm/s, 实验深度为15 m时, 该方法计算得到的渗透系数为  $0.835 \times 10^{-6}$  cm/s, 实验深度为25 m时, 该方法计算得到的渗透系数为  $1.11 \times 10^{-6}$  cm/s。围井法计算的渗透系数, 相较于常水头注水法的深度系波动较小, 实验深度为5 m时, 该实验方法计算得到的渗透系数为  $24.01 \times 10^{-6}$  cm/s, 实验深度为15 m时, 该方法计算得到的渗透系数为  $0.14 \times 10^{-6}$  cm/s, 实验深度为25 m时, 该方法计算得到的渗透系数为  $0.11 \times 10^{-6}$  cm/s。图5(b)为第7号检测区段的注水试验结果, 可以看到, 围井法检测得到的渗透系数数值较低, 7号孔实验深度为5 m时, 常水头注水法计算得到的渗透系数为  $6.3 \times 10^{-6}$  cm/s, 实验深度为15 m时, 该方法计算得到的渗透系数为  $1.88 \times 10^{-6}$  cm/s, 实验深度为25 m时, 该方法计算得到的渗透系数为  $0.73 \times 10^{-6}$  cm/s。围井法计算的渗透系数, 相较于常水头注水法的深度系波动较小, 实验深度为5 m时, 该实验方法计算得到的渗透系数为  $3.45 \times 10^{-6}$  cm/s, 实验深度为15 m时, 该方法计算得到的渗透



(a) 2号钻孔的检测结果



(b) 7号钻孔的检测结果

图5 防渗墙钻孔注水试验结果分析

系数为  $0.32 \times 10^{-6}$  cm/s, 实验深度为25 m时, 该方法计算得到的渗透系数为  $0.07 \times 10^{-6}$  cm/s。使用弹性波 CT 检测法的部分检测结果如表1所示。相较于围井法, 常水头法的检测结果更好, 检测出的渗透系数更高, 更符合实际情况, 可以更好的帮助工作人员准备预备方案。

表1 弹性波 CT 检测防渗墙完整性的结果分析

| 序号 | 桩号              | 弹性波 CT 检测的波速分布(%) |                    |                         |                         |
|----|-----------------|-------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
|    |                 | >2 900 / (m/s)    | [0, 1 900] / (m/s) | [1 900, 2 5 00] / (m/s) | [2 500, 2 9 00] / (m/s) |
| 1  | 0+174.5~0+198.5 | /                 | 57.58              | 42.42                   | /                       |
| 2  | 0+226.0~0+250.0 | /                 | 38.49              | 33.75                   | 27.76                   |
| 3  | 0+275.5~0+299.0 | 10.68             | 30.22              | 20.29                   | 38.81                   |
| 4  | 0+318.6~0+346.5 | 0.38              | 50.31              | 29.41                   | 19.90                   |
| 5  | 0+372.1~0+396.5 | /                 | 46.00              | 24.75                   | 38.25                   |
| 6  | 0+420.5~0+443.8 | /                 | 2.68               | 8.41                    | 82.01                   |
| 7  | 0+463.0~0+488.0 | /                 | 7.25               | 12.75                   | 80.00                   |
| 8  | 0+601.0~0+626.0 | /                 | 39.25              | 60.75                   | /                       |
| 9  | 0+900.0~0+925.0 | /                 | 52.99              | 47.01                   | /                       |
| 10 | 0+925.0~0+950.0 | /                 | 53.12              | 46.88                   | /                       |

从表 1 中可以看到, 1 号钻孔中, 弹性波波速在 1 900 m/s 至 2 900 m/s 之间, 小于 1 900 m/s 及大于 2 900 m/s 的波速均未出现, 其中在 1 900 m/s 至 2 500 m/s 之间的占比为 57.58%, 在 2 500 m/s 至 2 900 m/s 之间的占比为 42.42%。2 号钻孔的波速分布大致区间在 1 900 m/s 以上, 波速全程大于 1 900 m/s, 在 1 900 m/s 至 2 500 m/s 之间的占比为 38.49%, 在 2 500 m/s 至 2 900 m/s 之间的占比为 33.75%, 在 2 900 m/s 以上的部分占比为 27.76%。3 号钻孔在各个速度区间均有分布, 其中小于 1 900 m/s 的部分占比为 10.68%, 在 1 900 m/s 至 2 500 m/s 之间的占比为 30.22%, 在 2 500 m/s 至 2 900 m/s 之间的占比为 20.29%, 在 2 900 m/s 以上的部分占比为 38.81%。4 号钻孔与 3 号钻孔的波速分布区间相似, 小于 1 900 m/s 的部分占比为 0.38%, 在 1 900 m/s 至 2500m/s 之间的占比为 50.31%, 在 2 500 m/s 至 2 900 m/s 之间的占比为 29.41%, 在 2 900 m/s 以上的部分占比为 19.90%。5 号钻孔的波速仅分布在 3 个区间, 在 1 900 m/s 至 2 500 m/s 之间的占比为 46.00%, 在 2 500 m/s 至 2 900 m/s 之间的占比为 24.75%, 在 2 900 m/s 以上的部分占比为 38.25%。3 号桩及 4 号桩存在低速分布区, 防渗墙连续型较差, 2、3、4、5、6、7 号桩存在高速分布区, 表明防渗墙介质连续型较差, 而 1、8、9、10 号桩不存在低速异常区及高速异常区, 防渗墙连续性较好, 且完整性较好。

## 5 结束语

为了增加防渗墙的质量检测技术, 研究提出了基于弹性波 CT 检测的正演模拟技术与钻孔注水法结合的防渗墙质量检测技术。弹性波 CT 检测技术用于检测防渗墙是否出现缺陷, 采用该方法检测防渗墙的完整性时, 与正演模拟技术相结合, 以提高检测准确率及效率。钻孔注水法用于检测防渗墙的渗透性。结果显示, 基于弹性波 CT 检测的正演模拟技术, 可以有效地区分防渗墙的各种异常及正常状态, 在正常状态下, 随着迭代次数的增加, 走时残差在不断降低, 在低速异常状态下, 走时残差会出现陡升豆浆现象, 如第一次迭代时, 走时残差为 0.36 左右, 第三次迭代时, 走时残差为 0.54 左右, 在第四次迭代时, 走时残差迅速下降, 降至 0.38 左右。高速异常状态下, 走时残差会出现陡降现象, 如第一次迭代时, 走时残差为 0.75, 第三次迭代时, 走时残差为 0.47 左右。钻孔注水围井法测量的防渗墙渗透系数更低, 实验深度为 5 m 时, 常水头注水法计算得到的渗透系数为  $6.3 \times 10^{-6}$  cm/s, 围井法实验深度为 5 m 时, 计算得到的渗透系数为  $3.45 \times 10^{-6}$  cm/s。研究设计了采用弹性波 CT 检测正演模拟技术, 用于防渗墙的完整性检测, 但该方法存在一定的误差, 这些误差可进一步消除。

## 参考文献:

[1] 刘 达, 谢为江, 胡松涛, 等. 大孔径螺旋钻孔高喷防渗墙

施工方法研究 [J]. 人民长江, 2023, 54 (5): 189-195.

- [2] 徐晓兵, 韩小凡, 邓 彪, 等. 渠式切割水泥土连续墙 (TRD) 在赣江某综合整治工程中的应用 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (10): 144-151.
- [3] 甘 磊, 陈官运, 沈振中, 等. 堤坝混凝土防渗墙渗透溶蚀演化规律研究 [J]. 水利学报, 2022, 53 (8): 939-948.
- [4] 温立峰, 李炎隆, 柴军瑞. 坝基混凝土防渗墙力学性状的统计分析 [J]. 水利学报, 2021, 52 (2): 241-254.
- [5] DAI G, ZHANG Z, SHI G, et al. Study on anti-seepage slurry of landfill site modified by sodium carboxymethyl cellulose [J]. International Journal of Modern Physics B, 2019, 33 (31): 1950377-1950387.
- [6] YU X, WANG G, WANG Y, et al. Large deformation performance of the anti-seepage system connection part in earth core dam built on thick overburden [J]. Geomechanics and engineering, 2022, 29 (6): 683-696.
- [7] 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.
- [8] 李林恩, 鲁 舟. 高水头差船闸围堰防渗墙塑性混凝土试验研究 [J]. 水运工程, 2023 (1): 180-185.
- [9] 赵 祥, 张宏兵, 冷元宝, 等. 电流密度法在高聚物防渗墙完整性检测中的应用 [J]. 人民黄河, 2022, 44 (7): 125-127.
- [10] 陈敏芬, 马 骏, 马良伟. 排涝闸站高喷防渗墙在复杂地质条件下的应用 [J]. 灌溉排水学报, 2022, 41 (s1): 62-65.
- [11] 白 露. 基于 IP 集群数据挖掘的网络行为异常检测系统 [J]. 微型电脑应用, 2023, 39 (6): 153-155.
- [12] 罗 术, 金俊俊, 甄大勇等. 基于数值模拟分析的弹性波 CT 岩溶探测能力研究与应用 [J]. 工程地球物理学报, 2023, 20 (3): 330-336.
- [13] 王晓东, 刘敬东, 王国彪, 等. 基于数据挖掘技术的滤棒质量缺陷可视化检测方法 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38 (9): 110-112.
- [14] 张海波, 龙志辉. 桥梁检测弹性波 CT 技术应用分析 [J]. 运输经理世界, 2022 (32): 122-124.
- [15] 蔡丹丹. 弹性波 CT 技术在桥梁检测中的应用 [J]. 交通世界, 2022 (31): 156-158.
- [16] 肖文凯, 何英杰. 基于深度学习的焊缝图像边缘识别相似度检测 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38 (12): 124-127.
- [17] 刘 盼. 弹性波 CT 无损检测法在水工混凝土防渗墙检测中的应用 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50 (9): 141-142.
- [18] 王敦显, 张想想, 陈文学, 等. 基于弹性波 CT 与 GPR 的岩体综合病害识别及三维地质建模 [J]. CT 理论与应用研究, 2022, 31 (2): 149-162.
- [19] 扈本娜. 弹性波 CT 在混凝土防渗墙无损检测中的应用 [J]. 水科学与工程技术, 2021 (6): 80-83.
- [20] 杨 晨. 桥梁混凝土结构无损检测中弹性波 CT 检测技术的应用分析 [J]. 工程技术研究, 2021, 6 (24): 34-36.