

地下连续墙缺陷的跨孔电磁波层析成像研究*

胡书凡¹, 赵永辉¹, 葛双成², 覃谭¹, 安聪¹

(1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 浙江水利水电学院, 杭州 310018)

摘要: 由于工程特点及施工原因, 城建和水利工程中的地下连续墙墙体可能出现断裂、裂缝、空洞、夹泥、离析等质量缺陷与病害隐患问题, 危及工程安全。针对连续墙中缺陷常呈块状分布的情况, 笔者将最小支撑聚焦泛函应用于电磁波走时层析成像中, 对地下连续墙缺陷模型的成像效果进行了研究。与最小模型泛函和最光滑泛函的成像效果相比, 该方法能够较好地突出连续墙中缺陷的边界, 缺陷的空间展布形态更加接近于真实模型。针对地下连续墙典型缺陷的物理模型, 该方法取得了理想的成像结果, 准确地揭示出了缺陷的形态和类型。基于最小支撑聚焦泛函的电磁波走时层析为地下连续墙缺陷的检测提供了一个便捷、可靠的方法。

关键词: 地下连续墙; 电磁波层析成像; 最小支撑聚焦泛函; 缺陷检测

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)01-0222-07

Research on Electromagnetic Wave Tomography for Underground Diaphragm Wall

Hu Shufan¹, Zhao Yonghui¹, Ge Shuangcheng², Qin Tan¹, An Cong¹

(1. School of Ocean & Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, P.R. China; 2. Zhejiang University of Water Resources and Electronic Power, Hangzhou 310018, P.R. China)

Abstract: Many kinds of defects and hidden diseases, including cavities, cracks, mud and segregation of concrete can be frequently found in underground diaphragm wall because of the engineering characteristics and construction technology. It might lead to serious engineering safety problems. Considering the block characteristics of most defects in the underground diaphragm wall, electromagnetic wave tomography based on the minimum supported focusing functional was proposed and discussed via numerical simulation. Compared with the tomography effects of the minimum model functional and the maximum smoothness functional, the minimum supported focusing functional can be more efficient in highlighting the boundary between the defects and the background. Furthermore, the new proposal can obtain the more exact inversion result which is more close to the real model. The proposal method was also applied to a physical model, the tomography result reveals that it is possible to locate the defect and give exact relative dielectric constant. It therefore provides a convenient and reliable approach for the defect detection of the underground diaphragm wall.

Keywords: underground diaphragm wall; electromagnetic wave tomography; minimum support focusing functional; defect detection

* 收稿日期: 2017-06-21(修改稿)

作者简介: 胡书凡(1992-), 男, 江西宜春人, 硕士生, 主要从事电磁波层析成像及瑞雷波正反演研究。

E-mail: 14_husf@tongji.edu.cn

通讯作者: 赵永辉(1974-), 男, 安徽宁国人, 副教授, 主要从事综合地球物理的教学及研究工作。

E-mail: zhaoyh@tongji.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(41774124, 41374146); 教育部留学回国人员科研启动基金

0 引言

随着我国城市建设和水利事业的发展,地下连续墙作为一种有效的支护及防渗结构,被广泛应用于工程实施中^[1-3]。地下连续墙本身的材料和结构特性以及复杂的地质条件和施工环境特点,决定了其施工难度较大,并难以避免各种质量缺陷。工程实践中常见的通病有墙体下沉,墙体本身的断裂、裂缝、空洞、夹泥和离析等,以及接缝处的渗水、漏水等现象^[4]。

目前,工程上对地下连续墙质量缺陷检测与病害隐患探测的主要方法有声波透射法^[5]、冲击回波法^[6]、钻探取芯法等方法。声波透射法在地下连续墙施工时需要沿长度方向埋设声测管,所以有轻微破损且检测实施比较繁琐^[7];冲击回波法难以对混凝土结构缺陷进行精确的检测;钻芯法对结构构件有局部破损,同时不可能大量采样,无法整体掌握地下连续墙病害现状。同样,堤坝中的防渗墙也是一种地下连续墙,且检测难题至今也未突破^[8]。

电磁波层析成像是一种快速、经济的无损检测方法,在实际工作中可根据需要使用不同频率的天线来探测不同深度和尺寸的质量缺陷。同时,借助于地下连续墙内预先埋置的测斜管即可简便、快速地对墙体进行速度成像。因此,将电磁波层析技术应用于地下连续墙的缺陷与病害识别可行性高,且因其所特有的高分辨力特性而具有重要的应用价值。

电磁波层析成像中常用的最小模型泛函(MM)和最光滑泛函(MAXSM)得到的反演结果是一个光滑解,而地下连续墙中的缺陷常呈块状分布,这将导致成像结果与真实缺陷的形状和物性差异很大,甚至难以突出一些小尺度的缺陷。本文将最小支撑(MS)聚焦泛函^[9]应用于电磁波层析成像中,采用共轭梯度反演算法对地下连续墙中的缺陷进行了走时反演,模型试算结果能够较好地揭示缺陷的空间展布形态及性质类型。同时,将该方法应用于一个地下连续墙物理模型试验的层析反演中,成像结果仍然能够较好地给出异常的位置、形态和性质类型等信息,这为地下连续墙检测提供了一种便捷、可靠的方法。

1 方法原理

一般情况下,电磁波层析成像可以简化为求解如下方程:

$$d = A(m) \tag{1}$$

式中: $m = m(r)$ 为地层模型慢度的标量函数; $d = d(r)$ 为观测的初至走时; A 代表正演算子,为一个包含每个网格单元中射线长度的矩阵。由于这个问题是病态的,因此,一般采用正则化方法使反演结果更为稳定。

基于 Tikhonov 正则化思想下的反演目标函数可以定义为:

$$P^\alpha(m) = \varphi(m) + \alpha s(m) \rightarrow \min \tag{2}$$

式中: $\varphi(m)$ 为观测数据与预测数据之差所决定的数据拟合泛函; $s(m)$ 为模型稳定泛函; α 为正则化因子,本文采用动态的自适应正则化因子^[9]。

在二范数下,式(2)可以写为如下形式:

$$P^\alpha(m) = [A(m) - d]^T \mathbf{w}_d^2 [A(m) - d] + \alpha (m - m_{\text{priori}})^T \mathbf{w}_m^2 (m - m_{\text{priori}}) \tag{3}$$

式中: \mathbf{w}_d 为数据加权矩阵; \mathbf{w}_m 为模型加权矩阵; m_{priori} 为先验初始模型。

在大多数实际应用中, \mathbf{w}_m 是一个单位阵,相当于最小模型泛函:

$$s_{\text{MM}}(m) = \int_V (m - m_{\text{priori}})^2 dv = \|m - m_{\text{priori}}\|_{L_2}^2 \tag{4}$$

也可以选择一阶差分算子作为模型加权矩阵,从而获得一个光滑解,相当于最光滑泛函:

$$s_{\text{MAXSM}}(m) = \int_V \nabla m \cdot \nabla m dv = \|\nabla m\|_{L_2}^2 \tag{5}$$

上述的最小模型泛函和最光滑泛函得到的反演结果都是一个光滑解,而很多情况下缺陷都呈块状分布,光滑的反演结果无法正确地刻画异常的位置和形态,甚至会产生虚假异常。针对这一问题,将 MS 聚焦泛函应用于层析反演中,该泛函如下所示:

$$s_{\text{MS}}(m) = \int_V \frac{(m - m_{\text{priori}})^2}{(m - m_{\text{priori}})^2 + \beta^2} dv \tag{6}$$

式中的 β 为一个常数。该泛函有一个重要的性质——它将模型参数与先验信息的非零偏差缩小到一个最小的面积。这个性质可以用来提高块

体结构的分辨率。

最后采用共轭梯度算法对两个孔间的慢度进行反演。首先给定初始模型 m_0 , 该初始模型通过行走时除以源点与接收点之间距离后求取平均值得到, 然后根据如下算法对模型进行迭代更新:

$$m_{n+1} = m_n - \tilde{k}_n^\alpha \tilde{l}_n^\alpha \tag{7}$$

式中: \tilde{l}_n^α 为目标函数的共轭梯度方向; \tilde{k}_n^α 为一个线性搜索步长。每次迭代过程中, 结合多模板快速推进算法 (MSFM)^[10] 和梯度法^[11] 进行弯曲射线追踪, 敏感核的计算采用胖射线理论^[12]。

为了便于解释缺陷的类型, 利用式 (8) 将反演得到的慢度转换为相对介电常数:

$$\varepsilon_r = (c \cdot m)^2 \tag{8}$$

式中: c 为真空中光的速度。

2 理论模型计算

本节对典型地下连续墙缺陷理论模型进行了

层析成像计算, 并将 MS 成像结果与最小模型泛函和最光滑泛函得到的反演结果进行了对比。首先利用时域有限差分算法正演得到电磁波旅行时数据, 激发源选取中心频率为 500 MHz 的 Ricker 子波。图 1(a) 和图 1(b) 给出了两组不同形态的地下连续墙缺陷模型, 模型的大小设置为 1.7 m×3.2 m。图 1(a) 为单个倾斜裂损区缺陷模型, 设计了一个 45° 倾斜的裂损区, 裂损区的大小为 1 m×0.1 m, 其中心位于模型的中间。裂损部位充满空气, 相对介电常数 ε_r 为 1, 地下连续墙的相对介电常数 ε_r 为 6。图 1(b) 为双块体缺陷模型, 在模型中存在两个块体缺陷, 大小为 0.2 m×0.2 m, 其中心在水平方向上居中, 在深度方向上分别位于 1.1 m 和 2.1 m 处。上块体 (对应孔洞类缺陷) 的相对介电常数为 ε_r 为 4, 下块体 (对应于离析类缺陷) 的相对介电常数 ε_r 为 8, 背景的相对介电常数 ε_r 为 6。

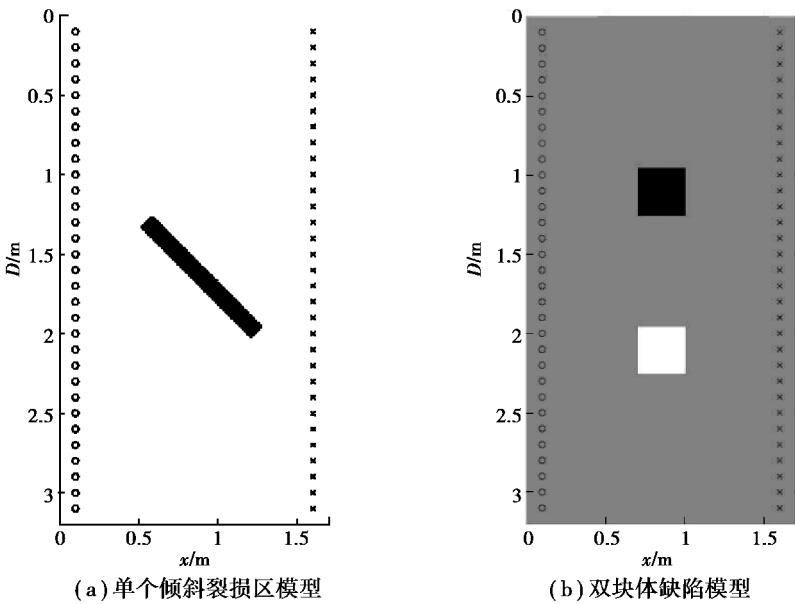


图 1 地下连续墙缺陷模型

Fig.1 Defect model of underground diaphragm wall

采用 0.01 m×0.01 m 进行网格剖分, 图中○线和×线分别代表激发天线和接收天线的移动轨迹。采集数据时, 激发天线的水平位置为 0.1 m, 在深度方向上从 0.1 m 处开始布设, 每隔 0.1 m 移动一次, 直到移动到 3.1 m 深处; 而在每个固定的发射天线位置处, 对应的接收天线也由 0.1 m 深处开始布

设, 每隔 0.1 m 移动一次, 直到移动到 3.1 m 深度处。最后采用改进的 Coopens^[13] 方法来提取初至, 总共可以得到 961 个初至走时观测值。图 2(a) 及图 2(b) 分别为两组模型条件下, 激发天线位于 2 m 深 ($T_y=2$ m) 和 1 m 深 ($T_y=1$ m) 处接收得到的波形记录和提取的初至走时。

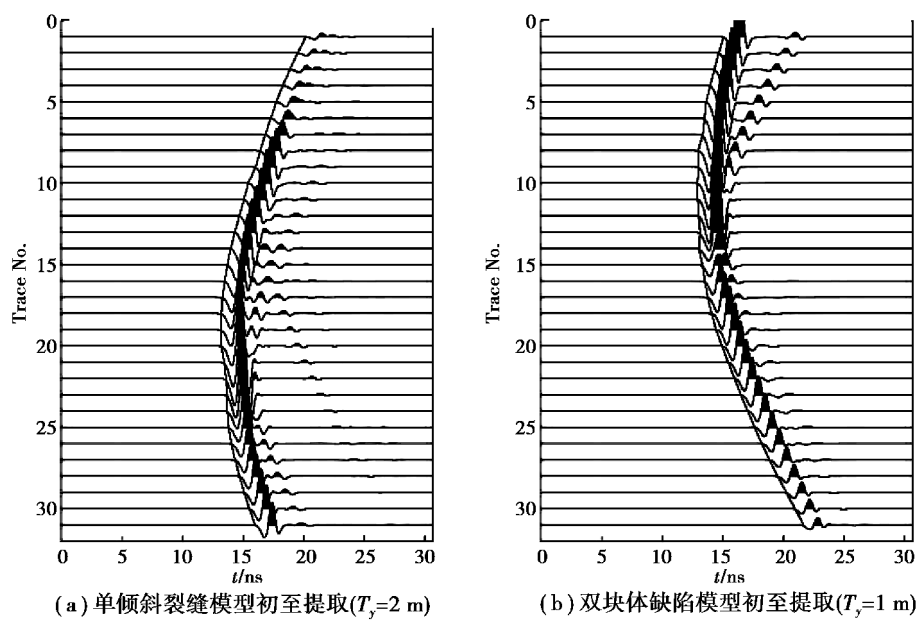


图2 电磁波波形记录和相应的初至

Fig.2 Electromagnetic waveform records and corresponding first arrivals pick-up

2.1 单个倾斜裂损区缺陷成像

图3(a)和图3(b)分别为采用传统的最小模型泛函和最光滑泛函对单个倾斜裂损区电磁波初至走时数据进行层析成像得到的结果。相对于裂损区的实际空间位置及几何尺寸,这两种反演结果中异常体都非常发散,异常体的幅值与真实值差异较大,最小模型泛函得到的反演结果中相对介电常数异常值 ϵ_r 约为3.7,最光滑泛函得到的反演结果中相对介电常数异常值 ϵ_r 约为3.6,并且异常体的两侧还存在高于背景值的虚假异常。因此,在这种

情况使用最小模型泛函和最光滑泛函难以准确地对异常体进行评价和解释。

图3(c)为使用MS泛函得到的反演结果。与前面两个反演结果不同,基于最小支撑聚焦泛函反演方法得出的相对介电常数异常体的边界非常明显,形态与真实模型非常接近。同时,异常体的相对介电常数 ϵ_r 约为1,与真实模型的物性完全一致。在长度方向上存在一些稍微低于背景值的异常,这可能是由于跨孔观测方式中灵敏度不均匀的影响。

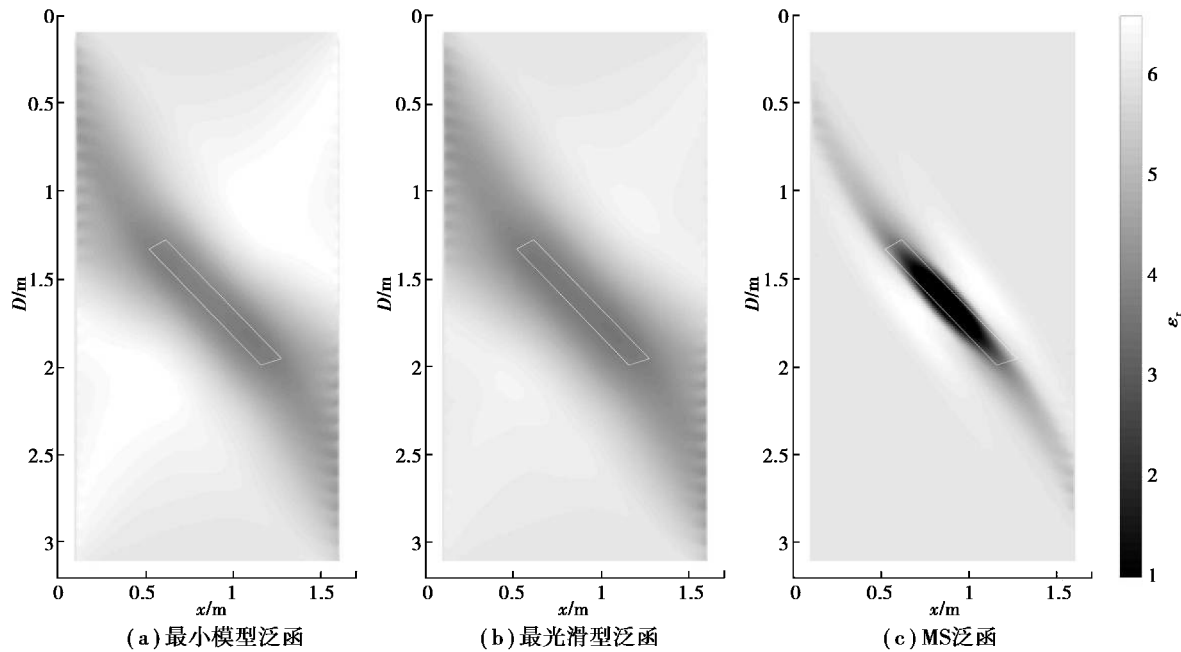


图3 对单个倾斜裂损区缺陷使用不同稳定泛函得到的成像结果

Fig.3 Tomography results by using different stabilizing functional for single oblique crack zone

2.2 双块体缺陷成像

图 4(a)和图 4(b)分别为采用传统的最小模型泛函和最光滑泛函对双块体缺陷电磁波初至走时数据进行层析成像得到的结果。最小模型泛函得到的反演结果中相对介电常数 ϵ_r 的范围为 5.4~6.4,最光滑泛函得到的反演结果中的相对介电常数 ϵ_r 的范围为 5.44~6.3,而且最光滑泛函得到的反演结果要比最小模型泛函得到的反演结果更为发散。

图 4(c)为使用 MS 稳定泛函得到的反演结

果。反演结果中的相对介电常数 ϵ_r 范围为 4.1 到 8.1,两个缺陷的边界都非常明显,这与真实模型非常接近。其中高介电常数缺陷(如充水的孔洞、裂缝或渗漏区等)的边界要较低介电常数缺陷(如孔洞、裂隙等)更为尖锐,并且高介电常数缺陷周围没有虚假异常,而低介电常数缺陷周围存在少量虚假异常,相对介电常数值约为 6.4,这说明高相对介电常数缺陷异常体要比低相对介电常数异常体更易聚焦。

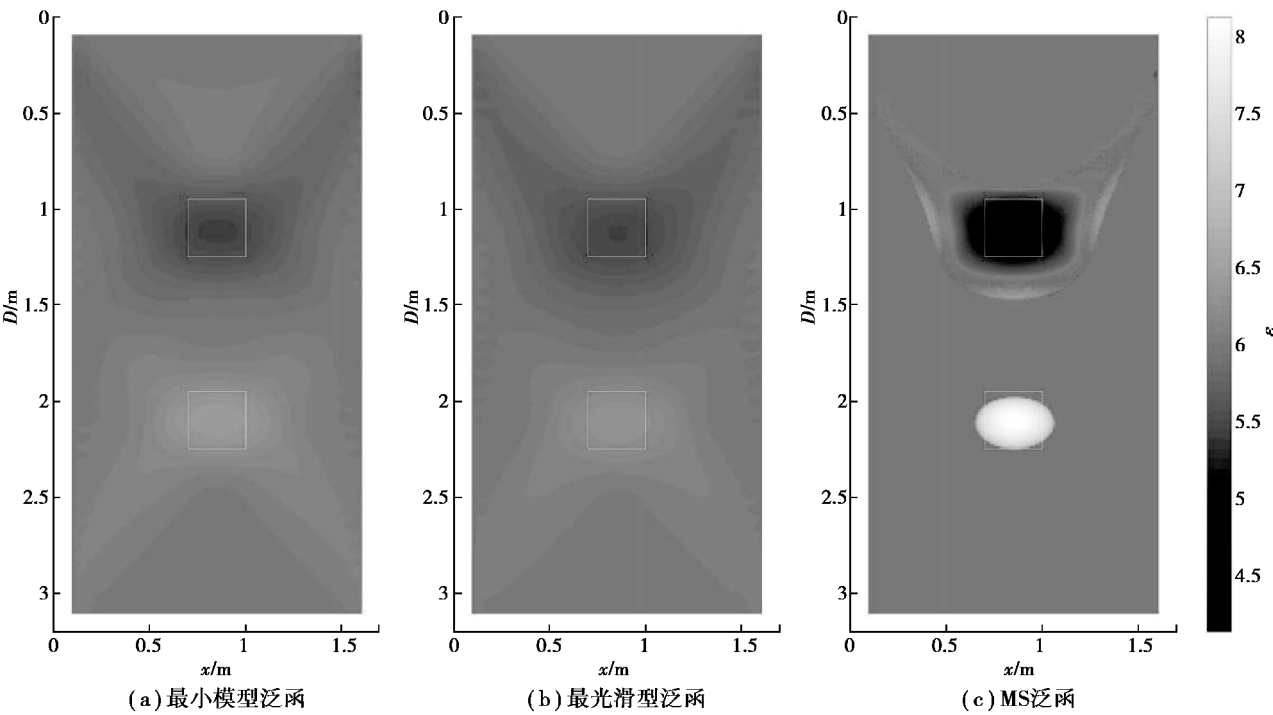


图 4 对双块体缺陷使用不同稳定泛函得到的成像结果

Fig.4 Tomography results by using different stabilizing functional for two block defects

3 物理模型试验

为验证本文所提出的基于最小支撑聚焦泛函的电磁波走时层析成像方法的有效性,将该方法应用于一个地下连续墙缺陷的物理模型试验中。该模型位于上海市新江湾城的一个实验基地,地下连续墙模型长、宽、深尺寸为 5 m、3 m、4 m。墙体材料为钢筋混凝土,混凝土强度为 C30,在混凝土内布置了参照地下连续墙实体的钢筋笼。模型照片如图 5 所示。



图 5 地下连续墙物理模型

Fig.5 Physical model of underground diaphragm wall

在连续墙的一侧布置了一个 20 cm×20 cm 的空洞缺陷,缺陷位置和发射接收天线移动轨迹如图 6 所示。采用中心频率为 500 MHz 的步进频率式钻孔雷达进行数据采集,发射天线位于孔 1 中,从 1 m 深处移动到 3.9 m,相邻之间间隔为 0.1 m;接收天线安置在孔 2 中,从 1 m 深处移动到 3.8 m,相邻之间间隔 0.1 m。最后总共得到 870 对初至旅行时数据。

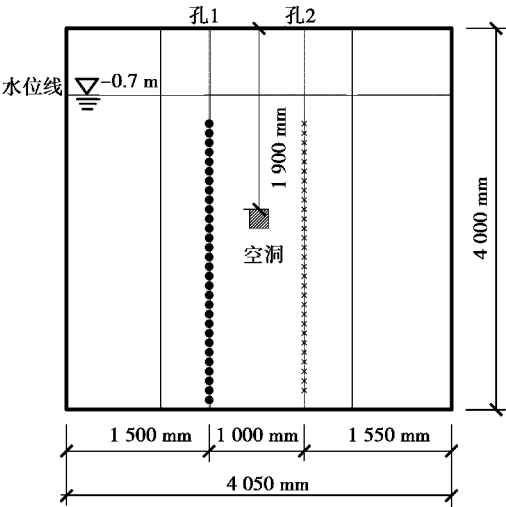


图 6 缺陷位置与发射接收天线移动轨迹示意图

Fig.6 Sketch map of defect location and transmitter-receiver array

成像结果如图 7 所示。从成像结果中可以较好地确定缺陷的位置和边界,并且根据该缺陷的相对介电常数值可以判定该缺陷中充满了水。与真实物理模型相比,在水平方向较小,而在垂向方向上稍微偏大。这可能是由于跨孔观测模式和混凝土中钢筋的影响而导致的,但仍然能够对该连续墙模型进行良好的分析评价。

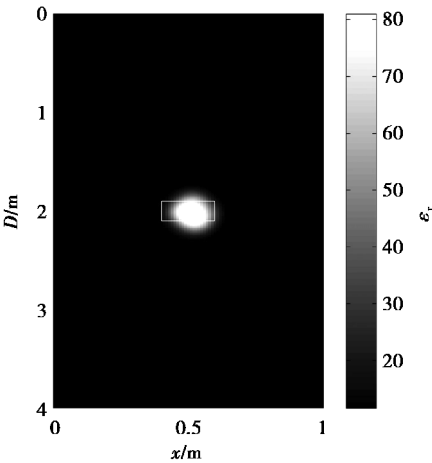


图 7 试验数据成像结果

Fig.7 Tomography result of physical model experimental results

4 结论

通过理论模型计算和物理模型试验,对电磁波层析成像应用于地下连续墙的质量检测和隐患探测效果进行了研究,得出如下结论:

- (1)最小模型泛函和最光滑泛函得到的成像结果是一个光滑解,难以对地下连续墙的质量进行评价和解释。本文将 MS 聚焦泛函应用于电磁波层析成像中,得到的反演结果能够良好地突出异常体的边界,成像结果更加接近于真实模型。
- (2)相比于介电常数低于背景值的缺陷(如孔洞、裂隙等),相对介电常数高于背景值的缺陷(如充水的孔洞、裂缝或渗漏区等)聚焦效果更好。因此,利用该方法探测高介电常数缺陷的能力更强,而地下连续墙的缺陷多引发渗漏水问题,这更加有利于缺陷电磁波层析成像的开展。
- (3)利用 MS 聚焦泛函得到的成像结果与真实模型仍然存在一些差异,这些差异可能是由于跨孔观测方式的影响,在实际地下连续墙质量检测中,还可能受到钢筋的影响。但一般情况下,这点差异对地下连续墙的质量评价不会导致明显的偏差。

参考文献 (References)

[1] 李耀良,袁芬.大深度大厚度地下连续墙的应用与施工工艺[J].地下空间与工程学报,2005,1(4):615-618. (Li Yaoliang, Yuan Fen. Application and construction techniques of great deep and thick diaphragm wall [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 615-618. (in Chinese))

[2] 肖桂元,郭维君,陈学军.特殊地质条件深基础地下连续墙施工应用研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(3):615-620. (Xiao Guiyuan, Guo Weijun, Chen Xuejun. Research of diaphragm wall constuction in deep foundation under special geological conditions[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 615-620. (in Chinese))

[3] 袁芬.基于防汛墙保护的地下连续墙施工技术[J].地下空间与工程学报,2009,5(增2):1736-1740. (Yuan Fen. Constuction techniques of diaphragm wall considering the protecting of flood prevention wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(Supp.2): 1736-1740. (in Chinese))

[4] 杨井亮.地下连续墙质量通病剖析及对策[J].铁道建筑技术,2011(7):52-55. (Yang Jingliang. Analysis and countermeasure for common quality failing of diaphragm wall [J]. Railway Construction Technology,

- 2011(7): 52-55. (in Chinese))
- [5] 杨萍, 刘康和. 地下连续墙质量检测成果分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(11): 18-20. (Yang Ping, Liu Kanghe. Analysis for the quality test results of underground diaphragm wall[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004, 31(11): 18-20. (in Chinese))
- [6] 徐教宇, 李鹏, 周燕, 等. 冲击回波法测量地下连续墙厚度及成墙质量[J]. 工程质量, 2008(2): 13-15. (Xu Jiaoyu, Li Peng, Zhou Yan, et al. Detecting thickness and quality of underground continuous wall by impact-echo technique[J]. Quality of Civil Engineering and Construction, 2008(2): 13-15. (in Chinese))
- [7] 林凤兰. 声波透射法在地下连续墙完整性检测中的应用[J]. 隧道建设, 2009, 29(6): 641-644. (Lin Fenlan. Application of cross-hole sonic in integrity detection of underground diaphragm wall[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(6): 641-644. (in Chinese))
- [8] 葛双成, 刘喜亮, 赵永辉, 等. 海塘工程隐患及防渗注浆效果检测技术应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 42-47. (Ge Shuangcheng, Liu Xiliang, Zhao Yonghui, et al. Application research of detecting technology for seawall hidden defects and grouting effect[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 42-47. (in Chinese))
- [9] Zhdanov M S. New advances in regularized inversion of gravity and electromagnetic data[J]. Geophysical Prospecting, 2009, 57(4): 463-478.
- [10] Hassouna S M, Farag A A. Multi-stencils fast marching methods: a highly accurate solution to the eikonal equation on cartesian domains[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2007, 29(9): 1563-1574.
- [11] Vidale J. Finite difference calculation of travel times[J]. Bseismolsocam, 1988, 78(6): 2062-2076.
- [12] Jensen J M, Bo H J, Christensen-Dalsgaard J. Sensitivity kernels for time-distance inversion[J]. Solar Physics, 2000, 192(1): 231-239.
- [13] Sabbione J I, Velis D. Automatic first-breaks picking: New strategies and algorithms[J]. Geophysics, 2010, 75(4): 67-76.

(上接第 71 页)

- [9] 于广云. 采动区大变形扰动土物理力学性质演变及工程响应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009. (Yu Guangyun. Physical and mechanical properties evolution and engineering response of disturbed soil in mining subsidence area with large vertical deformation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009. (in Chinese))
- [10] 乔来军, 周国庆, 商翔宇, 等. 不同含水量黄土-砂浆接触特性试验应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(增2): 1660-1664. (Qiao Laijun, Zhou Guoqing, Shang Xiangyu, et al. Study on the influence of water content on mechanical behavior of loess-sand mortar interface and its application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(Supp. 2): 1660-1664. (in Chinese))
- [11] 夏红春, 周国庆. 土-结构接触面剪切力学特性及其影响因素试验[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 831-836. (Xia Hongchun, Zhou Guoqing. Experimental study of the mechanical characteristics at a soil-Structure interface and the factors affecting them[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(6): 831-836. (in Chinese))
- [12] 王伟, 张芳, 孙斌祥. 土-结构接触面剪切试验与应力-位移模型[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1469-1473. (Wang Wei, Zhang Fang, Sun Binxiang. Tested and modeled shear stress-displacement behavior of soil-structure interface[J]. Journal of China Coal Society, 2011. 36(9): 1469-1473. (in Chinese))
- [13] 常虹, 夏军武, 孔伟, 等. 采动区扰动土-结构界面剪切特性的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 535-539. (Chang Hong, Xia Junwu, Kong Wei, et al. Experimental study on shear characteristics of disturbed soil-structure interface within mining subsidence areas[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(4): 535-539. (in Chinese))
- [14] 陈俊桦, 张家生, 李键. 考虑粗糙度的黏性土-结构接触面力学特性试验[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 22-30. (Chen Junhua, Zhang Jiasheng, Li Jian. Experimental research on mechanical characteristics of cohesive soil-structure interface by considering its roughness[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(4): 22-30. (in Chinese))
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范(GB 50007-2011)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of building foundation (GB 50007—2011)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))