

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.18

基于 GprMax 的道路空洞三维探地雷达正演数值模拟

李世念¹, 王秀荣¹, 林 恬¹, 杜文强²

(1. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039; 2. 中国煤炭地质总局水文物测队, 河北 邯郸 056001)

摘要: 探地雷达(GPR)方法具有高效、高分辨率、无损探测等优势, 广泛应用在城市道路病害体探测中。三维探地雷达是近年来发展起来的新技术, 通过三维阵列天线进行三维数据采集, 对道路病害体具有更高的空间分辨率和测量精度。本文利用基于三维时域有限差分方法原理的 GprMax 3D 软件, 针对以空洞为代表的典型道路病害体, 开展充气型和充水型空洞三维探地雷达正演模拟工作, 获得两种不同填充类型空洞的三维雷达数据体, 对数据体不同方向的图像特征进行分析, 并结合工程实例, 验证了正演模拟结果的可靠性。该研究对三维探地雷达实测图像解译和提高检测结果判定的可靠性具有重要的指导意义。

关键词: 三维探地雷达; 时域有限差分(FDTD); GprMax 3D; 道路空洞; 正演模拟

中图分类号: P225.7

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)03-0132-07

Numerical simulation of 3D ground penetrating radar based on GprMax for the road cavity

LI Shinian¹, WANG Xiurong¹, LIN Tian¹, DU Wenqiang²

(1. General Prospecting Institute, China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China; 2. Hydro-geophysical Prospecting Team, China National Administration of Coal Geology, Handan, Hebei 056011, China)

Abstract: Ground Penetrating Radar (GPR) method, which has the advantages of high efficiency, high resolution and non-destructive detection, is widely used in urban road disease detection. 3D ground penetrating radar is a new technology developed in recent years. It adopts 3D array antenna for 3D data acquisition, which has higher spatial resolution and measurement accuracy for road diseases. In this paper, GprMax 3D software based on the principle of 3D time domain finite difference method is used to realize forward simulation of 3D GPR, which is aimed to detect the typical road diseases including the inflated and water-filled road cavity. The 3D GPR data of two filling type voids is obtained and the image features of different directions of the 3D data are analyzed. Combined with engineering example, the reliability of the forward simulation results is verified. This study has important guiding significance for the interpretation of 3D GPR and the improvement of the reliability of detection results.

Keywords: 3D ground penetrating radar (GPR); finite difference in time domain (FDTD); GprMax 3D; road cavity; forward simulation

收稿日期: 2019-09-17; 修订日期: 2019-11-09

基金项目: 中国煤炭地质总局科技创新项目; 浅层(0~200 m)地下空间探测技术研究(ZMKJ-2017-02); 基于光纤传感的地下工程监测关键技术研究(ZMKJ-2018-04)

第一作者: 李世念(1988-), 男, 北京人, 固体地球物理学专业, 博士, 工程师, 主要从事地球物理和光纤传感技术研究。E-mail: lishinian2007@126.com

0 前言

随着我国经济的迅速发展,作为经济发展动脉的道路建设也得到了迅猛发展。但配套的管理与维护没有相应地跟上,多地发生多起路面塌陷事件,严重影响了人民群众生命财产安全和城市运行秩序,为道路安全问题敲响了警钟。道路塌陷往往由脱空逐渐扩大而引发,具有隐蔽性、突发性、危害性,成为城市治理的重点和难点^[1]。而传统路基监测手段已很难满足大规模、高效率、高精度以及无损的道路养护监测需求。三维探地雷达作为近几年发展起来的无损探测技术,具有分辨率高、探测速度快、抗干扰能力强、异常定位准确的特点,已被广泛应用于道路地下病害探测。

三维探地雷达具有三维阵列天线排列、操作轻便高效、真三维数据体采集和更高分辨率等优点,对空洞、脱空等道路病害体具有更高的测量精度和探测效果^[2-4]。因此,开展道路病害体三维探地雷达正演模拟,分析病害体的雷达反射特征以及探地雷达波的空间传播特性,对研究探地雷达三维探测与解释技术具有重要的指导意义^[5]。

前人对道路病害体(如空洞、脱空等)的模拟多以二维探地雷达探测模拟为主^[1,5-7],而对三维探地雷达的模拟少有研究。本文通过建立道路路基下充水和充气的空洞模型,利用基于三维时域有限差分法原理的模拟软件 GprMax 3D,开展道路路基空洞模拟和电磁波三维探地正演模拟,对获取的空洞模型三维数据体进行分析,研究两种不同充填条件下空洞模型的三维探地雷达图像特征,有助于三维探地雷达实测图像解译,提高检测结果判定的可靠性,为三维探地雷达在道路空洞探测研究中积累理论经验。

1 GprMax 3D 正演模拟原理

1.1 电磁场基础理论

宏观尺度上,所有电磁现象都可以由 Maxwell 方程组来描述。Maxwell 方程组由两个旋度方程和两个散度方程构成,描述了电场和磁场之间的相互关系,方程组的微分形式如下所示:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

式中: $\mathbf{H}$ ——为磁场强度;

$\mathbf{E}$ ——为电场强度;

$\mathbf{B}$ ——为磁感应强度;

$\mathbf{D}$ ——为电位移矢量;

$\mathbf{J}$ ——为电流密度;

ρ ——为电荷密度。

此外,电场和磁场中物质的本构关系提供了物质在外部电磁场作用下的宏观特性描述^[8],其关系如式(5)所示:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}; \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}; \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (5)$$

式中: ε ——是媒质的介电常数;

μ ——是媒质的磁导率;

σ ——是媒质的电导率。

1.2 三维时域有限差分法基本原理

在 Maxwell 方程组的基础上,Kane Yee 在 1966 年提出时域有限差分法^[9](FDTD),用来计算电磁波传导问题,其原理是将 Maxwell 方程组离散化后,利用二阶精度的中心差分近似把旋度中的微分算符直接转换为差分形式,以 Yee 网格(图 1)为离散单元,在微小体积和时间内对连续电磁场进行计算,这种运算方式对 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 在时间顺序上交替抽样,符合安培定律和法拉第电磁感应定律,是针对电磁场问题本质的数值模拟。

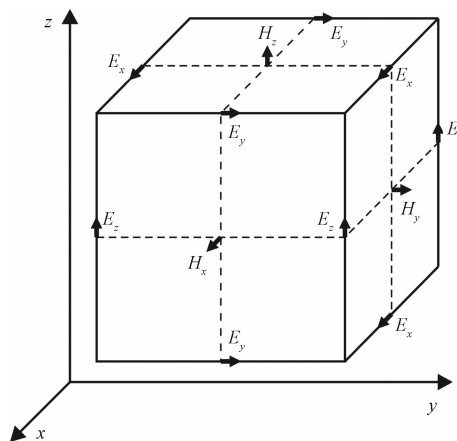


图 1 三维时域有限差分的 Yee 网格

Fig. 1 Yee grid of FDTD algorithm

在时域有限差分法中,使用 FDTD 算法是用有限差分公式代替了 Maxwell 方程组。由于空间步长 Δx 、 Δy 、 Δz 与时间步长 Δt 之间并不是相互独立的,他们之间需要满足一定的关系后,才能避免数值结果的不稳定,保证离散后的有限差分方程组收敛,其稳定性条件如式(6):

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (6)$$

同时,在时域有限差分法中,对 Maxwell 方程组离散化的近似模拟会导致电磁波发生频散现象,电磁波的相速度会随着波长改变,导致计算结果产生误差。因此,离散步长需要满足数值如式(7)中的频散条件:

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z \leq \frac{\lambda}{10} \quad (7)$$

式中: λ ——无频散介质中的电磁波长。

2 GprMax 3D 正演模拟

2.1 正演模拟流程

GprMax 3D 是一款基于时域有限差分法的探地雷达三维正演模拟软件,可以用于各向同性均匀介质中电磁波的传播规律以及电磁波与目标体的相互作用的三维模拟^[10-12]。通过编写模拟模型的输入文件程序(保存后缀为 *.in 的文件),输入程序文件路径进行仿真。计算机进行数值计算后输出关于目标体的三维探地雷达正演模拟结果(后缀为 *.out 和 *.geo 的二进制文件),并生成三维数据体和正演模拟图像。软件模拟流程如图 2 所示。

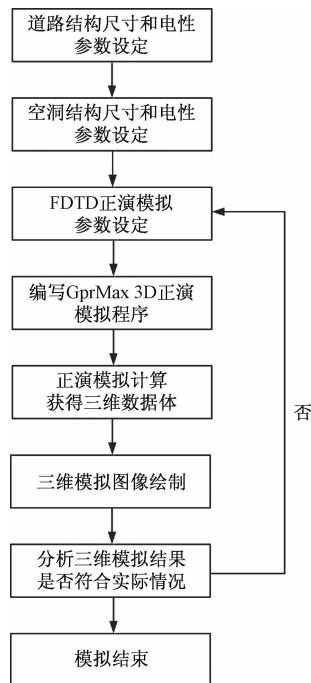


图 2 GprMax 3D 正演模拟流程图

Fig. 2 Flow chart of GprMax 3D forward simulation

2.2 道路结构模型参数

为研究道路病害特征,首先建立待测区域道路的

物理模型,确定模拟空间大小并设置相对介电常数、电导率等介质的电性参数(图 3)。模拟区域为长、宽、深度尺寸均为 1.5 m 的正方体。根据实际道路结构并参考前人工作^[13-15],把道路模型定为三层:第一层是道路面层,由厚度为 10 cm 的沥青材料构成,沥青材料相对介电常数 $\varepsilon_r = 4$,电导率 $\sigma = 0.005$ S/m;第二层为混凝土层,由厚度为 15 cm 混凝土材料构成,相对介电常数 $\varepsilon_r = 5$,电导率 $\sigma = 0.05$ S/m;第三层为土基层,由压实处理后的土壤构成并向下延伸到 1.5 m,相对介电常数 $\varepsilon_r = 12$,电导率 $\sigma = 0.1$ S/m。水的相对介电常数 $\varepsilon_r = 81$,电导率 $\sigma = 0.03$ S/m。

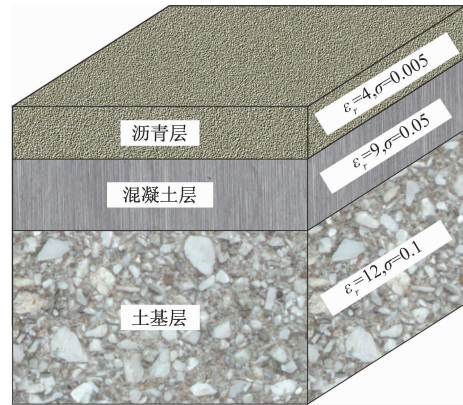


图 3 道路结构模型及相关电性参数

Fig. 3 Road structure model and electrical parameters of each layer

3 道路路基空洞三维探地雷达正演模拟

3.1 三维模型参数

根据三维探地雷达道路探测的实际,建立三维模型如下:选取位于道路土基层的充水型和充气型空洞为病害体,空洞为 0.5 m 的正方体,空洞水平投影位于模拟区域的中心位置,其中心点深度距离地表为 1 m,模拟 14 通道的三维探地雷达,激励源为 200 MHz 的 ricker 子波,空洞位置及形态、激发、接收天线和测线方向等如图 4 所示,模型详细参数如表 1 所示。

3.2 三维正演模拟结果

通过三维探地雷达正演模拟获得了道路病害的三维数据体,可以在这个数据体中任意抽取数据块或平面数据进行成像。与二维探地雷达正演模拟结果相比,三维探地雷达正演模拟获得了真三维数据,在数据量、成像方式和异常体探测精度方面都有了很大提升。本文仅在模拟获得的三维数据体中,选取沿测线方向、垂直测线方向和水平方向的切片图像进行展示(图 5~图 7)。

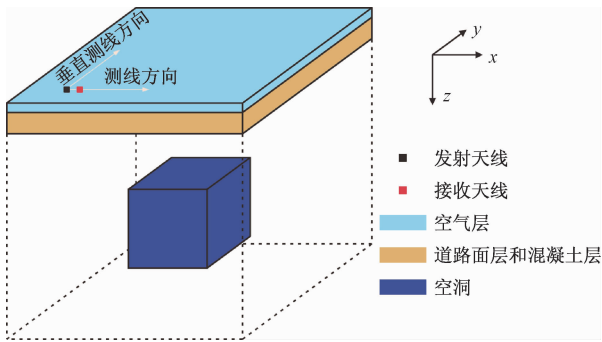


图 4 空洞空间位置和测线方向示意图

Fig. 4 Cavity location and line direction diagram

表 1 FDTD 正演模拟参数

Table 1 Forward modeling parameters of FDTD

参数类型	数值
正演模型大小/m	$1.5 \times 1.5 \times 1.5$
空间网格步长/m	$0.01 \times 0.01 \times 0.01$
时窗/ns	30
第一通道发射天线起始点坐标/m	0.10 0.10 0.08
第一通道接收天线起始点坐标/m	0.220 100.08
测线条数	14
测线间距/m	0.1
天线步进距离/m	0.02

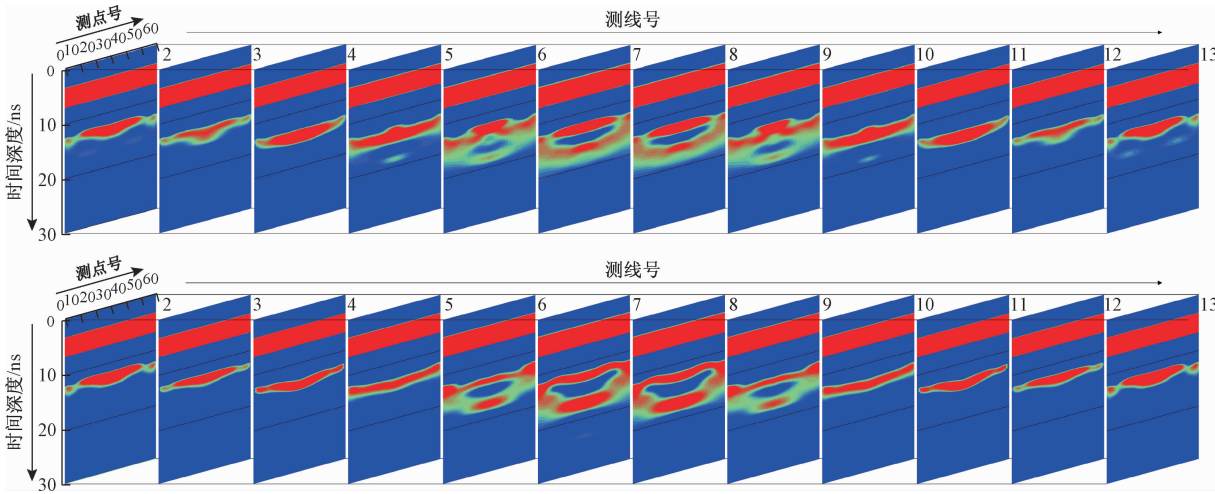


图 5 充气空洞(上)和充水空洞(下)沿测线方向切片图像

Fig. 5 Inflatable cavity (top) and water filled cavity (bottom) slice image along the measuring line

对比分析不同填充类型的空洞三维探地雷达正演模拟图像可以看出:充气空洞正演模拟结果呈现较为明显的双曲线特征,顶界面反射信号强,两侧伴有发育的绕射特征。表现为双曲线中部反射振幅最强,两端振幅较弱且伴随有多次绕射波(图 5 ~ 图 6);而充水空洞正演模拟结果并没有明显的双曲线特征,表现为强振幅的低频多次震荡,曲线两端并没有明显的绕射波特征,但图像中异常体幅度大于充气空洞(图 5 ~ 图 6)。同时由于激励电磁波从空气依次射入面层、混凝土层、土基层时,介电常数依次增大,在分界面处电磁波反射系数都为负值,在正常情况下,电磁波曲线会发生数次反向。当在土基层存在空洞时,这种反向性可能会发生改变。水的相对介电常数远大于土基层的相对介电常数,因此充水型空洞电磁波反射系数也为负值,电磁波进入充水型空洞时会发生明显反向;充气型空洞相对介电常数小于土基层的相对介电常数,电磁波反射系数为正值,电磁波进入充气型空

洞时不会发生反向。这种极性变化在水平切片图中表现较为明显(图 7)。

4 实测资料分析

为了验证三维探地雷达道路病害模拟结果,收集了探地雷达野外施工中验证的道路病害图像。图 8 为河北省张家口某路段开展道路空洞探测,现场获得的探地雷达图像。施工采用三维探地雷达,左图为三维探地雷达的平面图和剖面图,右图为复测的二维探地雷达剖面图像。经过打钻验证为充气型空洞,空洞顶深 63 cm,低深 80 cm,净深 17 cm。

从图 8 三维探地雷达剖面、复测的二维探地雷达剖面上可以看出,异常处(红线框内)顶部雷达图谱反射信号能量增强,反射波振幅明显增大,表现为似平板状形态,多次波明显,边界以及侧壁附近也伴随出现了明显的绕射波,与三维探地雷达正演模拟结果具有相同的特征。

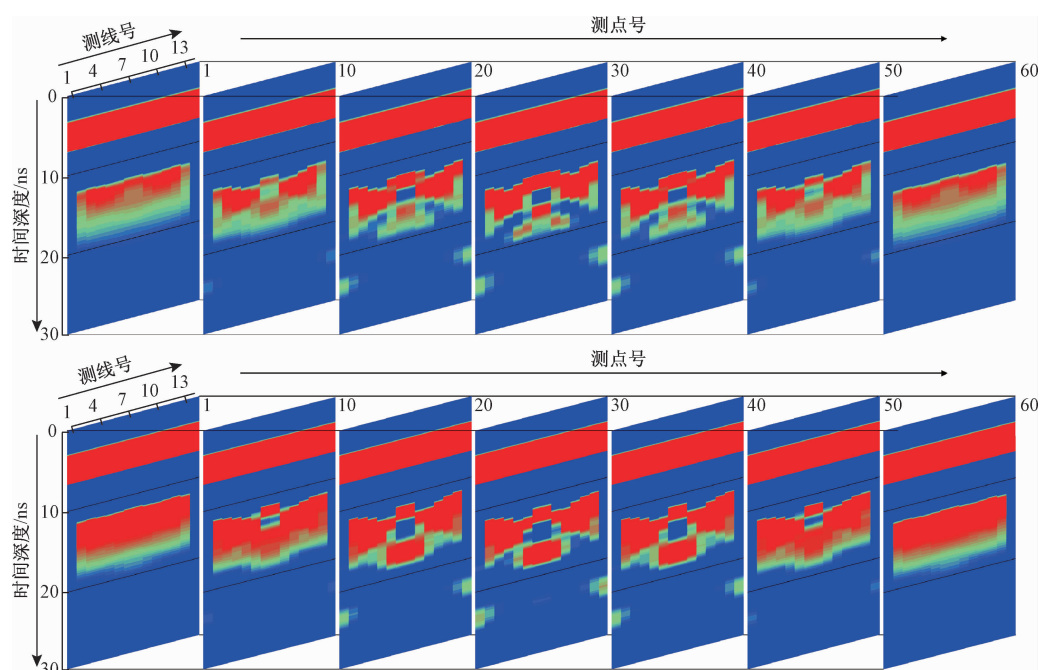


图 6 充气空洞(上)和充水空洞(下)垂直测线方向切片图像

Fig. 6 Inflatable cavity (top) and water filled cavity (bottom) slice image perpendicular to the measuring line

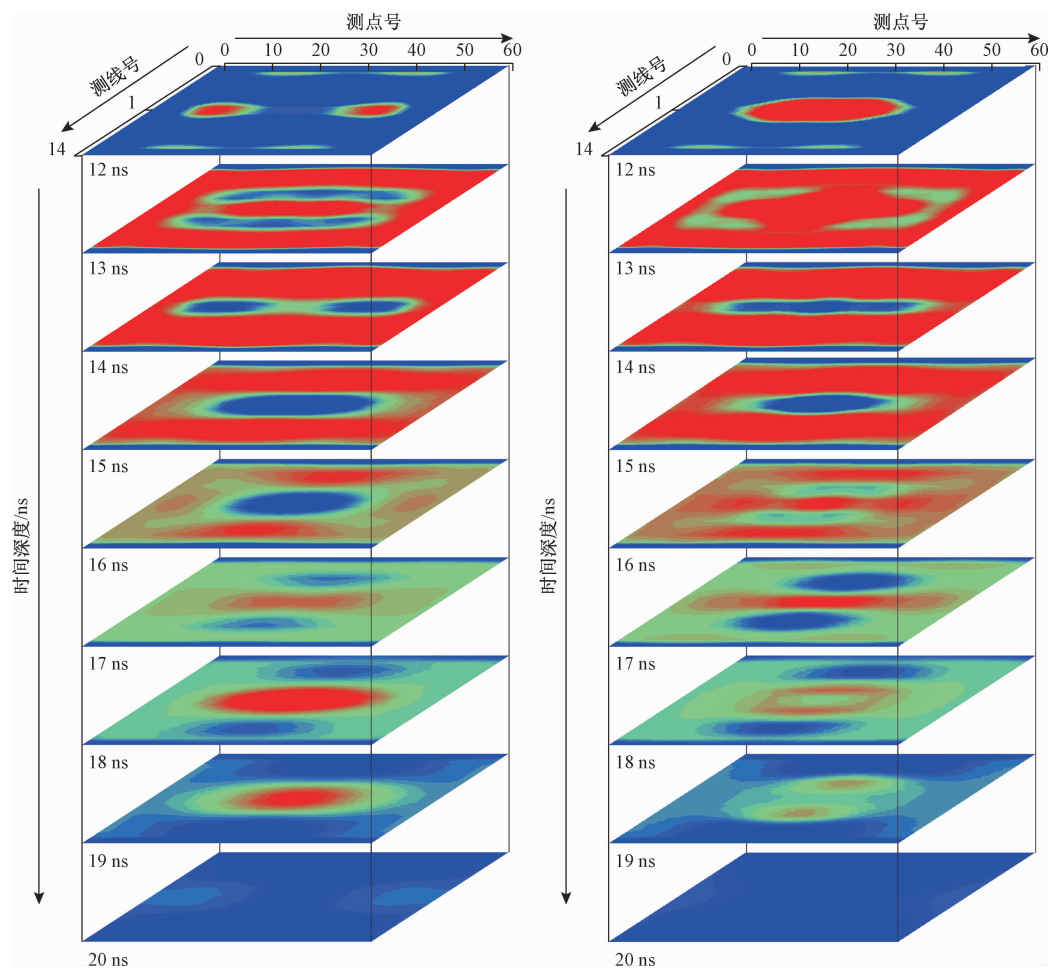


图 7 充气空洞(左)和充水空洞(右)水平方向切片图像

Fig. 7 Horizontal slice image of Inflatable cavity (left) and water filled cavity (right)

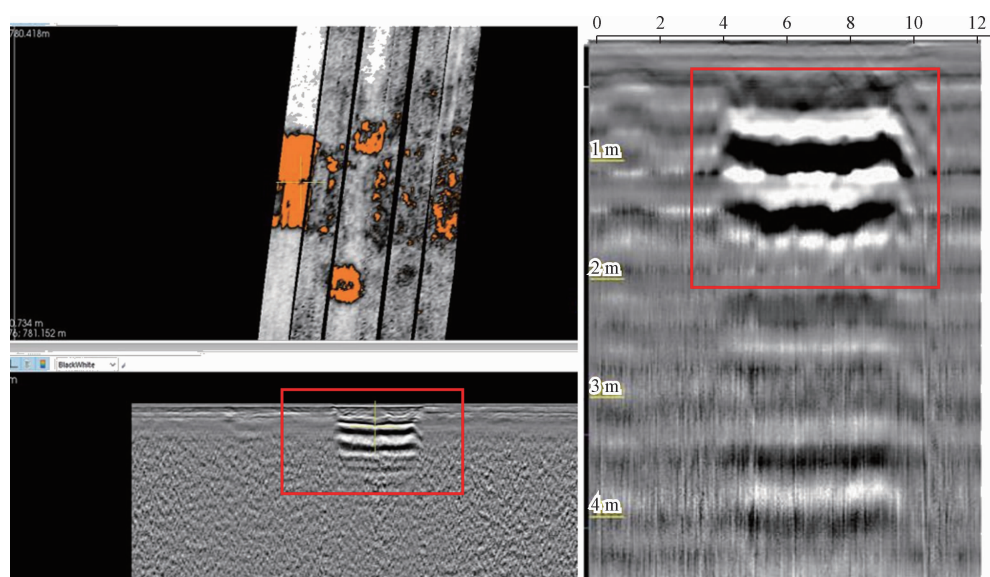


图8 探地雷达道路探测现场验证的空洞图像

Fig.8 Cavity image obtained byground detection radar

5 结论

三维探地雷达能够获取海量的三维数据,具有纵横分辨率高、异常体探测精度高等特点,应用前景十分广阔。本文对以空洞为代表的道路病害开展三维探地雷达正演模拟,获得了这两种充填类型条件下的空洞模型的三维数据体正演结果。通过对沿测线方向、垂直测线方向和水平方向三个典型方向的切片图像进行分析,研究了充水和充气两种空洞模型的三维探地雷达数据和图像特征。对三维探地雷达实测图像解译和提高检测结果判定的可靠性具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 尹光辉,冯雨宁,张怀凯,等. 基于 GprMax 软件的道路路基空洞探地雷达正演模拟[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(4): 480 - 486. [YIN G H, FENG Y N, ZHANG H K, et al. Forward simulation of ground penetration radar based on the GprMax for the roadbed cavity[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 38(4): 480 - 486. (in Chinese)]
- [2] 赵锴. 三维探地雷达在城市地下管线及周边土体病害探测中的应用[J]. 测绘通报, 2016(增刊1): 73 - 76. [ZHAO P. 3D GPR application in urban underground pipeline & surrounding soil problem detection[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(Sup1): 73 - 76. (in Chinese)]
- [3] 王秀荣,冷广昇,牛鹏程. 三维探地雷达数据的拟

地震处理技术研究[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(10): 70 - 75. [WANG X R, LENG G S, NIU P C. Study on 3D ground penetrating radar (GPR) data quasi-seismic processing technology[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(10): 70 - 75. (in Chinese)]

- [4] 王秀荣,冷丹,李世念. 基于地震属性体的三维探地雷达快速解译技术[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(7): 94 - 97. [WANG X R, LENG D, LI S N. 3D ground penetrating radar rapid interpretation technique based on seismic attribute volume[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(7): 94 - 97. (in Chinese)]
- [5] 舒志乐,刘新荣,朱成红,等. 隧道衬砌空洞探地雷达三维探测模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 551 - 559. [SHU Z L, LIU X R, ZHU C H, et al. Study of model test about 3D GPR detection of tunnel lining cavity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup1): 551 - 559. (in Chinese)]
- [6] 刘四新,蔡佳琪,傅磊,等. 利用探地雷达精确探测铁路路基含水率[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 878 - 884. [LIU S X, CAI J Q, FU L, et al. Accurate detection of moisture content of subgrade by GPR[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(2): 878 - 884. (in Chinese)]
- [7] 舒志乐,刘新荣,刘保县,等. 隧道衬砌病害探地雷达三维正演模拟及工程验证[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 46 - 53. [SHU Z L, LIU X R, LIU B X, et al. GPR three-dimensional forward

- modeling of defects in tunnel lining and engineering verification[J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 46–53. (in Chinese)]
- [8] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. [GE D B, YAN Y B. Electromagnetic wave finite difference time domain method [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. (in Chinese)]
- [9] YEE K N. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302–307.
- [10] CASSIDY N J. Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis [M]//Ground Penetrating Radar Theory and Applications. Elsevier, 2009: 141–176.
- [11] GIANNOPOULOS A. Modelling ground penetrating radar by GprMax [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(10): 755–762.
- [12] WARREN C, GIANNOPOULOS A, GIANNAKIS I. GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar [J]. Computer Physics Communications, 2016, 209: 163–170.
- [13] 卞邴. 基于 gprMax 的探地雷达在公路路基检测中的正演模拟[D]. 荆州: 长江大学, 2018. [BIAN B. Forward simulation of ground penetration radar based on gprMax for roadbed detection[D]. Jingzhou, China: Yangtze University, 2018. (in Chinese)]
- [14] 陈文翊. GPRMAX 模拟地下水位之研究[D]. 台北: 台北科技大学土木与防灾研究所, 2013. [CHEN W Y. Study on simulation of groundwater table using GPRMAX [D]. Taipei: National Taipei University on Technology, 2013.]
- [15] 尹光辉. 基于 GprMax 的道路空洞探地雷达图像正演模拟[D]. 西安: 长安大学, 2015. [YIN G H. Forward simulation of ground penetration radar based on GprMax for the road cavity[D]. Xi'an: Changan University, 2015. (in Chinese)]

(上接第 125 页)

- [21] 徐永福, 黄寅春. 分形理论在研究非饱和土力学性质中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 635–638. [XU Y F, HUANG Y C. Fractal-textured soils and their unsaturated mechanical properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 635–638. (in Chinese)]
- [22] 孙秀丽, 宋碧颖, 刘文化, 等. 基于分形理论的疏浚淤泥固化土孔隙结构量化研究[J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(2): 153–158. [SUN X L, SONG B Y, LIU W H, et al. Quantitative study of pore structure of dredged silt solidified soil based on fractal theory [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018, 58(2): 153–158. (in Chinese)]
- [23] 马新仿, 张士诚, 郎兆新. 分形理论在岩石孔隙结构研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊1): 2164–2167. [MA X F, ZHANG S C, LANG Z X. Application of fractal theory to pore structure research[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Sup1): 2164–2167. (in Chinese)]
- [24] 高峰, 谢和平, 赵鹏. Weibull 模量和岩石强度的分形性质[J]. 科学通报, 1993, 38(15): 1435–1438. [GAO F, XIE H P, ZHAO P. Weibull modulus and rock strength fractal characteristics[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(15): 1435–1438. (in Chinese)]
- [25] XIE, H. SANDERSON, D. J. Fractal effect of rapidly propagating cracks[J]. Nonlinear Mech, 1993(S1): 2164–2167.