

文章编号:1674-599X(2022)03-0040-08

含水空洞的探地雷达正演模拟与试验研究

凌同华,刘芳,何文超,周智辉

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:针对隧道检测中识别不同含水率充填介质空洞的问题,采用GPRMAX软件对隧道衬砌背后充填不同含水率的黄土介质的空洞进行正演模拟,并将所得结果与模型试验的地质雷达时间剖面图进行对比分析。研究结果表明:探地雷达可以探测衬砌背后的空洞,观测其位置及大小;矩形空洞地质雷达反射波呈顶部扁平的双曲线特征,且充填介质的含水率对成像产生了影响。当充填介质含水率小于10%时,多次波反射较弱,充填介质含水率越低,成像双曲线特征越明显;当充填介质含水率高于20%时,成像双曲线特征及多次波反射随着含水率的增大逐步增强。该研究成果可为隧道衬砌结构背后缺陷内充填物的赋水状态的质量判断提供参考。

关键词:衬砌;空洞;含水率;探地雷达;时域有限差分法;GPRMAX正演模拟

中图分类号:U451

文献标志码:A

Forward simulation and experimental study of GPR for water-bearing cavity

LING Tonghua, LIU Fang, HE Wenchao, ZHOU Zhihui

(School of Civil Engineering, Changsha University of Sciences & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at the disease judgment and recognition problem of hole filling with different moisture content in tunnel quality testing, the GPRMAX software was used to forward model the hole filled with different moisture content loess behind the tunnel lining. And the geological radar time profile collected in the model test were compared. The results show that the GPR can be used to detect the cavity and observe its location and size. The GPR reflected wave of rectangular hollow shows hyperbolic features of top flat. The moisture content of filling medium has impact on imaging. When the filling medium moisture content is below 10%, the content is lower, the imaging characteristic of hyperbolic is more obvious, multiple wave reflection is weak. when it is higher than 20%, both the imaging characteristic of hyperbolic and multiple wave reflection are gradually enhanced with the increase of moisture content. The research can provide basis and reference for judging the water-bearing state of the filling material behind the lining in the quality defect of the tunnel.

Key words: lining; cavity; moisture content; ground penetrating radar; difference time domain; GPRMAX forward modeling

截至2018年底,中国隧道建设总长为36 103 km。其中,隧道建设项目的高速铁路合计83条,总长度为18 132 km^[1]。近五年,中国有大量的铁路、公路隧道相继建成并投入运营。经统计,投入运营的铁路及公路隧道年均长度超过2 000 km。仅2018年

投入运营的城市轨道交通长度就有734 km,2019年城市轨道交通长度大幅度增加,达1 710 km^[2]。随着隧道大规模投入运营,对已运营隧道的质量检测和维修也变得尤为重要。其中,隧道衬砌中的空洞是隧道工程的常见病害,威胁隧道的运营安全。

收稿日期:2021-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078061、51678071);湖南省研究生科研创新项目(CX20200842)

作者简介:凌同华(1968—),男,长沙理工大学教授,博士。

衬砌背后的空洞具有较强的隐蔽性。因此,在不损害隧道衬砌结构的前提下,利用地质雷达对其进行探测,确定空洞位置并制定相应的治理方案^[3]。由于受检测仪器自身条件的限制,存在不均匀介质或强电性材料,以及现场复杂环境的干扰等影响,雷达图像常出现强振幅干扰信号。强振幅干扰信号的存在,会影响图像中弱目标信号的识别与判断,而正演数值模拟则能为实测雷达时间剖面图的判别提供参考^[4]。时域有限差分法(finite difference time domain,简称为FDTD)正演是研究雷达响应规律的可靠方法之一,该方法提高了隧道衬砌雷达图谱解释的准确性^[5]。GPRMAX是一款基于FDTD原理的地质雷达正演模拟软件,被广泛应用于工程实践中^[6],不少学者也对此进行了大量研究^[7-9]。孙忠辉等人^[10]通过正演模拟与模型试验相结合,得出了空洞和积水的雷达响应规律。李兴等人^[11]结合MATLAB软件,基于FDTD法对不同电导率的积水空洞开展探地雷达二维正演模拟,分析其正演得到的B-scan、A-scan图谱,得到积水空洞的响应特征。张胜等人^[12]提出了小波时能密度法,该法在空洞充填物定量识别的实际应用效果优于传统方法结果。因此,探究空洞中充填介质对空洞探测的影响是目前空洞研究的热门课题。本研究采用GPRMAX软件进行正演模拟计算,结合室内模型试验进行分析,以期对隧道衬砌空洞的检测与判别提供科学依据。

1 原理

1.1 探地雷达基本原理

地质雷达由主机、天线和配套软件等组成。地质雷达通过天线发射高频电磁脉冲波,利用不同地下介质对电磁反射的差异,根据接收图像的幅值、异常信号分布情况和频率等特征,分析和推断探测目标的形态和属性。电磁理论是地质雷达技术应用与发展的基础。目前,地质雷达设备向轻巧化、便携化发展,雷达系统的分辨率和探测深度不断提高,应用范围也不断扩大。地质雷达探测原理如图1所示。其中,T为发射波,R为接收波。

1.2 FDTD基本原理

时间域有限差分法以差分法原理为基础,根据麦克斯韦(Maxwell)方程,利用二阶精度的中心差

分,把旋度方程中的微分算符近似转换为差分形式。该法在一定体积内获取某段时间的连续电磁场数据,模拟电磁波逐步传播过程,以及与目标物体相互作用的过程。麦克斯韦的2个旋度方程为:

$$\begin{cases} \nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E \\ \nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} - \sigma_m H \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∇ 为哈密顿算子; H 为磁场强度,A/m; E 为电场强度,V/m; ε 为媒质的介电常数; σ 为电导率,S/m; t 为时间,s; μ 为相对磁导率,H/m; σ_m 为等效磁导率,W/m。

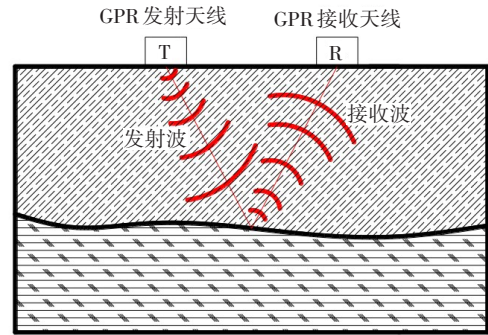


图1 地质雷达探测原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of GPR detection principle
二维电磁波的时域有限差分方程可表示为:

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i,j) = & CA \times E_x^n(i,j) + \\ & CB \times \frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2,j) - H_y^{n+1/2}(i-1/2,j)}{\Delta x} \\ & CB \times \frac{H_x^{n+1/2}(i,j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i,j-1/2)}{\Delta y} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2}(i,j+1/2) = & CP \times H_x^{n-1/2}(i,j+1/2) - \\ & CQ \times \frac{E_z^n(i,j+1) - E_z^n(i,j)}{\Delta y} \\ H_y^{n+1/2}(i+1/2,j) = & CP \times H_y^{n-1/2}(i+1/2,j) + \\ & CQ \times \frac{E_z^n(i+1,j) - E_z^n(i,j)}{\Delta x} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{cases} CA = \frac{2\varepsilon(i,j) - \sigma(i,j) \times \Delta t}{2\varepsilon(i,j) + \sigma(i,j) \times \Delta t} \\ CB = \frac{2\Delta t}{2\varepsilon(i,j) + \sigma(i,j) \times \Delta t} \\ CP = \frac{2\mu(i,j) - \sigma_m(i,j) \times \Delta t}{2\mu(i,j) + \sigma_m(i,j) \times \Delta t} \\ CQ = \frac{2\Delta t}{2\mu(i,j) + \sigma_m(i,j) \times \Delta t} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_x 为x方向的电场强度; H_x 和 H_y 分别为x和y方向上的磁场强度; Δx 和 Δy 为空间离散步长; Δt 为

时间步长; n 为时间步数; (i,j) 为节点坐标。

为了保证离散后时域有限差分方程组解的稳定收敛性,要求时间步长 Δt 和空间步长 Δx 、 Δy 满足关系式(5):

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{(\frac{1}{\Delta x})^2 + (\frac{1}{\Delta y})^2}} \tag{5}$$

式中: c 为电磁波在真空中光速, $c=3\times 10^8$ m/s。

1.3 GPRMAX 正演模拟

GPRMAX 软件由 GIANNAKIS 等人^[13]研发,利用 FDTD 原理的 Yee 元细胞,求解三维麦克斯韦方程组,通过时间步长分析电场和磁场的传播规律,以及它们在介质空间上的分布规律,从而得到探地雷达正演模拟图谱。采用 GPRMAX 进行探地雷达正演数值模拟时,需要建立仿真模型。仿真模型的命令参数包括模型参数、介质参数、时间、空间步长、激励源的种类、位置、移动步长及边界的吸收条件,将此命令文件输入 GPRMAX 软件,运行窗口进行计算。采用 MATLAB 软件读取数据,处理后得到 2 个二进制文件数据,最终获得模型地电图和探地雷达正演模拟时间剖面图。

2 衬砌背后空洞正演模拟

利用计算机进行 GPRMAX 正演模拟,可以有效地模拟隧道衬砌背后空洞的地质雷达扫描波形图,为实测剖面图提供判别依据,提高探测效率和判断精度。本研究采用的计算模型的水平距离为 2.0 m,探测深度为 0.9 m,最上层为 5 cm 厚的空气层,单元格大小为 0.002 m(长)×0.002 m(宽),测深时间为 12~22 ns,目标体形状为矩形,尺寸为 20 cm(长)×20 cm(宽),埋设深度为 15 cm。背景介质为混凝土,相对介电常数为 6.0,电导率为 0.001 s/m,模型地电图如图 2 所示。

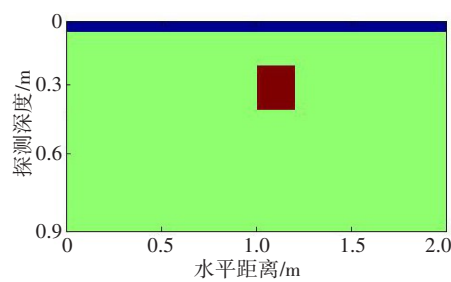


图2 模型地电图
Fig. 2 Goelectric map of the model

各方案的目标体充填介质、相对介电常数及电导率^[14]见表 1。

表 1 空洞模型方案设计表
Table 1 Design table of cavity model

方案编号	充填介质	相对介电常数	电导率/ (s·m ⁻¹)
1	空气	1.0	0.00
2	含水率 10% 的黄土	5.0	0.02
3	含水率 20% 的黄土	11.0	0.04
4	含水率 30% 的黄土	17.0	0.05
5	含水率 40% 的黄土	22.0	0.06
6	含水率 50% 的黄土	28.0	0.06
7	含水率 60% 的黄土	35.0	0.07
8	含水率 70% 的黄土	42.0	0.08
9	含水率 80% 的黄土	52.0	0.08
10	水	81.0	0.03

选取主频为 500 MHz 的 Ricker 子波,收发间距为 0.02 m,道间距设为 0.01 cm,通过 190 道计算步,得到 2 968 个采样点。

充填不同含水率黄土介质的空洞成像结果如图 3 所示。考虑地质雷达检测与识别充填不同含水率介质目标体的问题。地下水易造成空洞中充填不同含水率的介质,从而导致其介电常数出现差异。通过对不同含水率的目标体进行地质雷达成像模拟,得出结论:①所有的空洞正演模拟扫描图像均为开口向下的双曲线波形。反射振幅最大处在双曲线的顶部,两端振幅较弱。②含水率的不同导致目标体的成像效果存在明显差异。对于充填物为空气的目标体,成像的双曲线特征和多次反射波现象都比较明显。对于 10% 含水率充填物的目标体,其成像双曲线特征较为明显,存在较弱的多次波反射现象。这是由于目标体的相对介电常数和地质环境的较为接近,导致电磁波的反射效果不明显。对于含水率为 20% 充填物的目标体,其成像

呈较弱的双曲线特征。对于含水率为30%充填物的目标体,与含水率为20%充填物的目标体相比,其成像双曲线特征更为明显。从图3(e)、3(f)还可以看出,随着充填物含水率的增加,其成像效果有明显的增强趋势,底部的多次波反射逐步增强。这是由于目标体的相对介电常数与地质环境的有差异,导致电磁波反射效果更明显,产生更加显著的

反射双曲线特征。但是从图3(g)、3(h)、3(i)可以看出,其反射波形无明显变化,成像效果相差不大,回波成像信息也类似,其成像与图3(j)所示的成像相似。为了进一步探究不同含水率充填介质对衬砌背后目标体探测扫描成像的影响,本研究提取反映空洞特征信号的第105道数据进行对比分析,结果如图4所示。

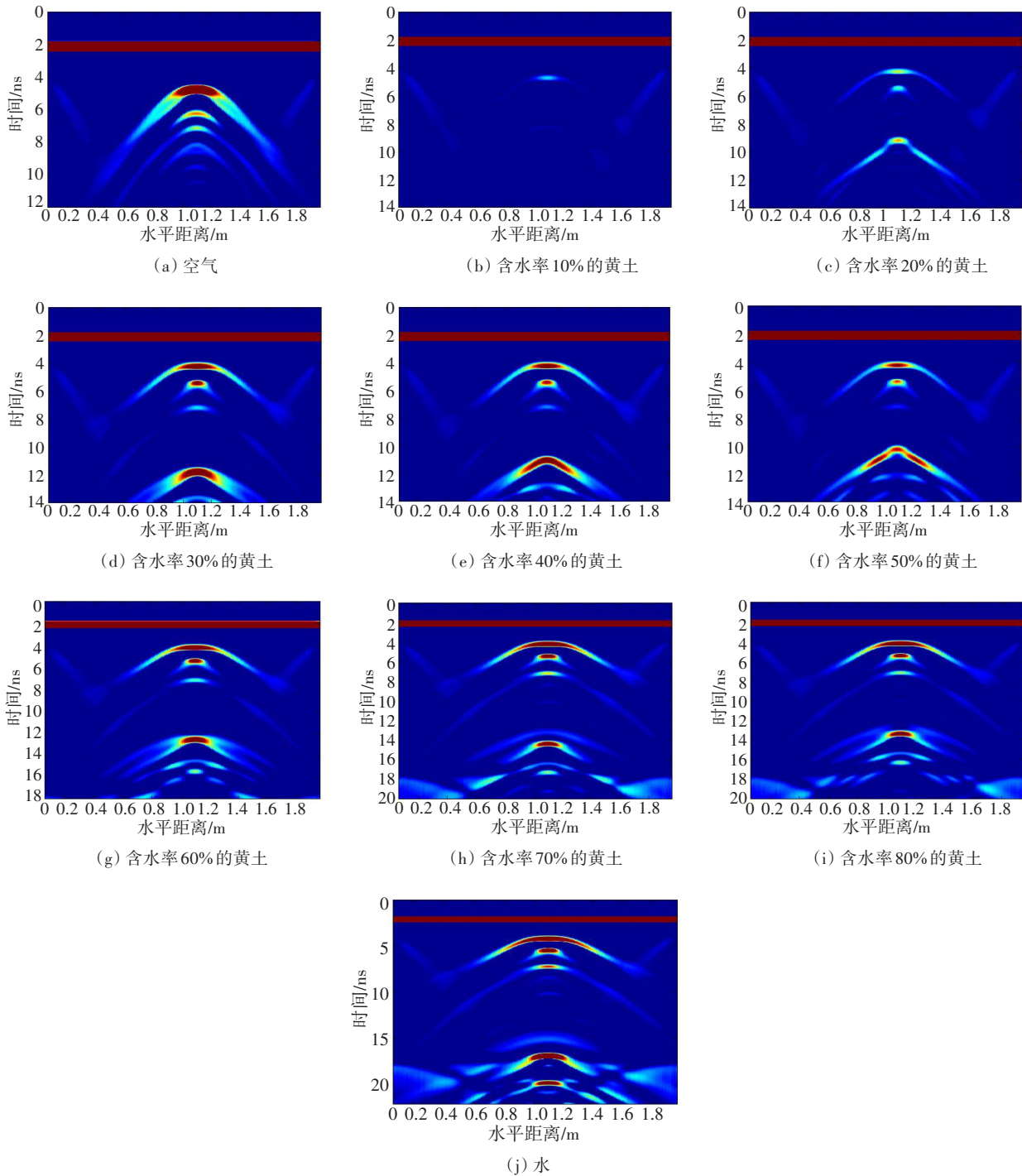
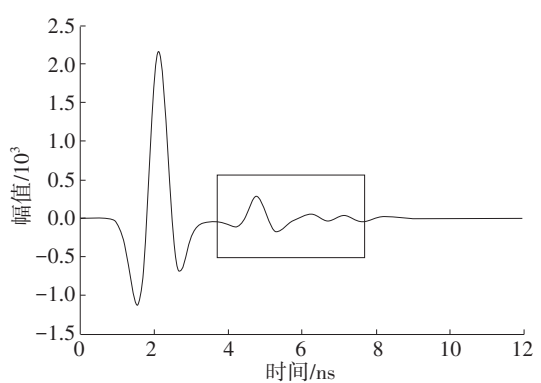
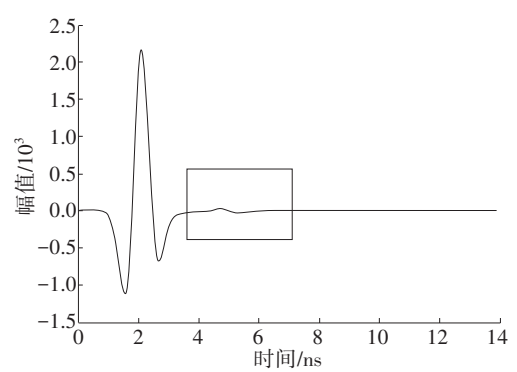


图3 衬砌背后不同含水率介质充填目标体模拟扫描图

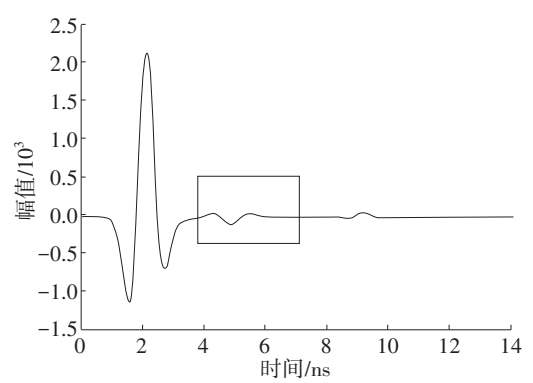
Fig. 3 Simulated scanning diagram of filling target body with different water content behind the lining



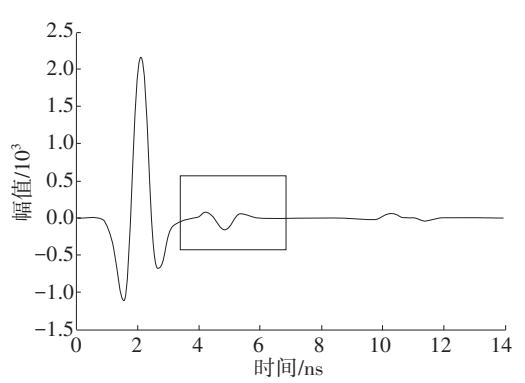
(a) 空气



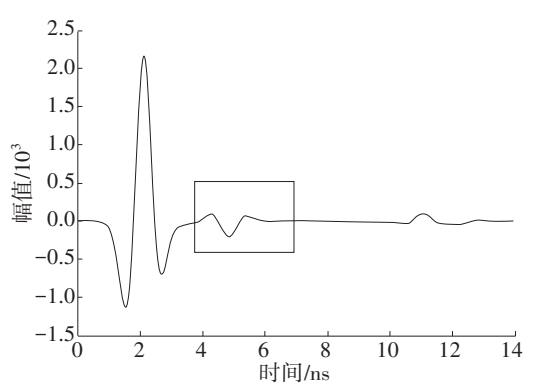
(b) 含水率为10%的黄土



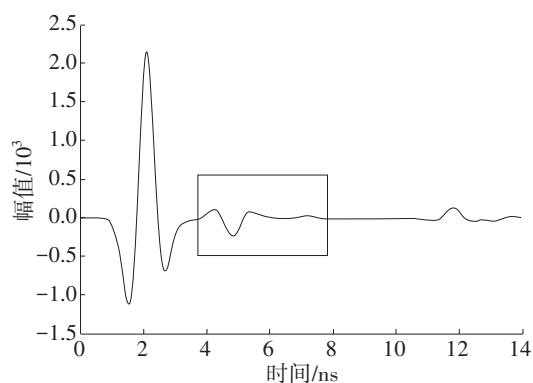
(c) 含水率为20%的黄土



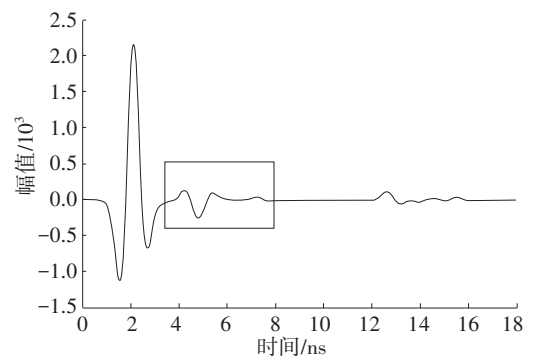
(d) 含水率为30%的黄土



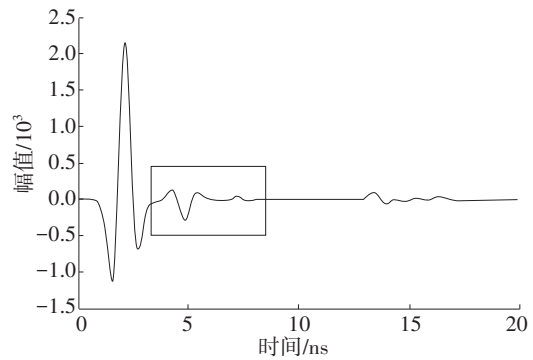
(e) 含水率为40%的黄土



(f) 含水率为50%的黄土



(g) 含水率为60%的黄土



(h) 含水率为70%的黄土

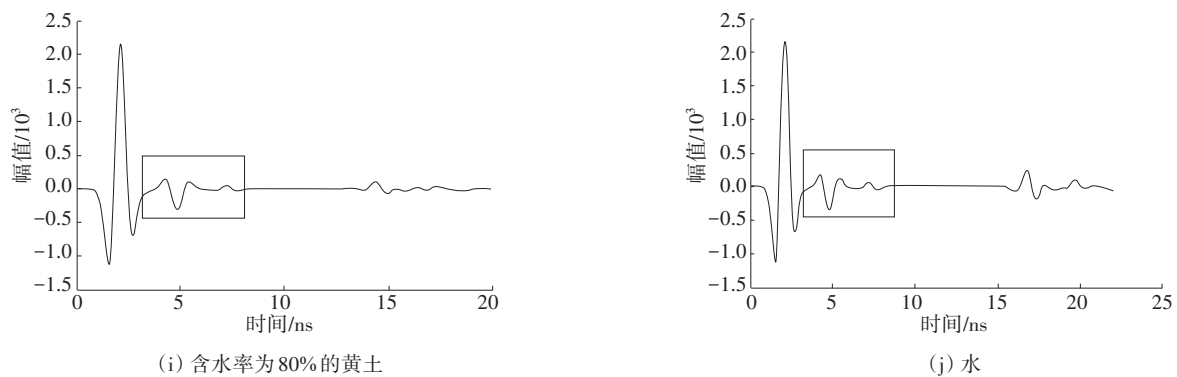


图4 第105道单列波幅对比分析

Fig. 4 Comparative analysis of amplitude of 105th channel single train

从图4可以看出,当在目标体中充空气时,波幅先为负值,波幅波动明显,电磁波呈开口向下的抛物线特征。当目标体充填介质为含水率10%的黄土时,波幅波动很小,且纵深处波幅较为平稳,即多次波反射效果不明显。当充填介质为含水率20%的黄土时,波幅先为正值,波幅波动较小。从图4(c)~4(h)还可以看出,波幅先为正值,随着含水率的增大,波幅波动逐渐增大,反射波幅逐渐减小,电磁波呈开口向上的抛物线特征,深层次多次波反射效果逐渐明显,其单列波幅走势更接近充填介质为水时单列波幅的走势。因此,随着衬砌背后空洞的充填介质含水率增加,地质雷达对空洞目标体的反射波幅识别更加明显,同时深层次多次波反射逐渐增加。

3 模型试验

3.1 模型材料

室内模型试验可以为隧道衬砌背后空洞的地质雷达扫描时间剖面图提供解释依据,为定量判断空洞的大小、形状及充填物类别提供判别依据,同时可为探地雷达正演模拟建立数值模型,提供物理基础。为验证正演模拟结果的正确性,本研究设计了室内模型试验。模型试验前,需确定模型尺寸大小与材料。地质雷达探测精度主要取决于电磁波的传播速度,而电磁波的传播速度又由衬砌的介电常数决定。因此,在选取模型材料时,应优先选择与混凝土介电常数相近的试验材料。本次模型试验材料选择相对介电常数为4~6的干砂。

3.2 模型试验设计

砂槽模型试验箱尺寸为4.0 m(长)×3.0 m(宽)×

1.5 m(高)。为使砂槽试验箱成型,在砂箱四周浇筑混凝土。沿模型砂箱宽度方向依次埋设了4个内径为20 cm×20 cm×20 cm的木箱,木箱表面埋深为15 cm,木箱下表面距模型底部115 cm,左起第1个木箱距砂箱边缘30 cm,4个木箱均间隔15 cm,充填介质依次为空气、含水率为10%的黄土、含水率为20%的黄土及含水率为30%的黄土。测线布置如图5所示。

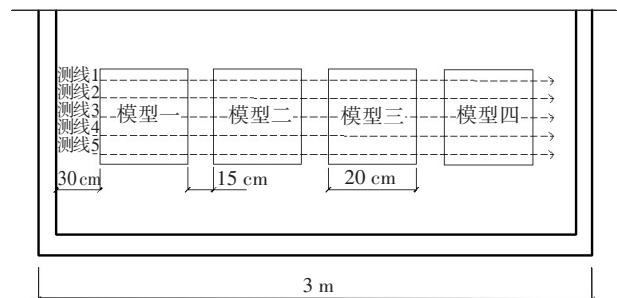


图5 测线布置示意

Fig. 5 Survey line layout

3.3 地质雷达信号分析

试验采用意大利IDS公司生产的轻质、便携、天线屏蔽及抗干扰能力强的RIS型地质雷达,对不同含水率充填介质的空洞现场进行探测。雷达天线中心频率设置为1 600 MHz,时窗选取12 ns,共384个采样点。地质雷达天线沿砂箱表面宽度方向以0.5 cm为间隔,依次移动,共采集580道信号。为避免试验所采集信号的偶然性,保证其可重复性和可靠性,本次试验对模型箱选取多条测线进行试验。利用REFLEXW软件处理地质雷达原始信号,得到处理后的目标体地质雷达时间剖面,结果如图6所示。

从图6可以看出,矩形空洞的地质雷达扫描剖面图成像呈典型开口向下的扁平双曲线特征,4个不

同属性空洞所对应的波形的波动垂向范围均为2~8 ns, 横向宽度均约为100个道距, 这反映了空洞所在位置及尺寸大小。不同空洞充填物(分别为空气、含水率为10%黄土、含水率为20%黄土)所对应的波形图有明显差异。随着含水率的增加, 其成像双曲线特征逐渐明显, 几乎不存在底部多次波反射的现象。分析比较含水率为20%和30%填充物的黄土成像图, 含水率为30%填充物成像的双曲线特征相较于含水率为20%填充物的更明显, 且含水率30%填充物成像图中开始出现多次波反射现象。空洞充填不同含水率介质时, 其扫描剖面图有差异, 随着含水率的增加, 其成像双曲线特征逐渐明显, 底部多次波反射现象也逐步增强。与正演模拟结果成像图对比分析可得: 模拟成像结果与实测剖面图相符, 不同含水率介质充填空洞成像变化规律也一致。

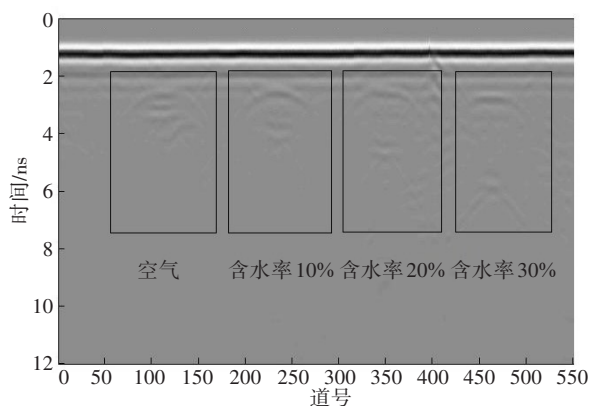


图6 室内模型的地质雷达扫描剖面

Fig. 6 GPR scan profile of the model

4 结论

为分析空洞充填物含水率变化对空洞探测的影响, 采用GPRMAX软件正演模拟结合模型试验方法对衬砌背后充填不同含水率介质空洞的地质雷达探测波形响应规律进行了研究, 得出结论:

1) 当空洞充填不同含水率的黄土介质时, 其正演模拟成像会有相应变化。当空洞充填介质含水率不高于10%时, 多次波反射较弱, 充填介质含水率越低, 成像双曲线特征越明显。当充填介质含水率高于20%时, 随着含水率的增大, 成像双曲线特征逐渐明显, 且多次波反射也逐步增强。在模型试验地质雷达扫描时间剖面图中, 空洞充填物分别为空气、含水率为10%的黄土、含水率为20%的黄土

所对应的波形双曲线特征逐渐明显, 几乎不存在底部多次波反射现象。分析比较充填物分别为含水率20%和30%的黄土成像图, 含水率为30%填充物成像的双曲线特征相较于含水率为20%填充物的更明显, 且含水率为30%填充物成像图中开始出现多次波反射现象。此结论与正演模拟结果相似, 验证了正演模拟结果的准确性。

2) 当在目标体中充填空气时, 波幅先为负值, 电磁波波动明显。当目标体充填介质的含水率小于10%时, 波幅先为负值, 波动幅值较小, 且纵深处波幅较稳定(即多次波反射效果不明显)。当充填介质含水率大于10%时, 波幅先为正值, 波动幅度很小, 随着含水率的增大, 幅值逐渐增大, 反射波幅渐渐明显, 深层多次波反射效果逐渐明显, 其单列波幅走势越接近充填物为水时的单列波幅走势。因此, 地质雷达探测为判定隧道衬砌结构背后空洞内充填介质的含水状态提供了依据。

参考文献(References):

- [1] 严金秀. 中国隧道工程技术发展40年[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(4): 537-544. (YAN Jinxiu. Achievements and challenges of tunneling technology in China over past 40 years[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 537-544. (in Chinese))
- [2] 田四明, 巩江峰. 截至2019年底中国铁路隧道情况统计[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(2): 292-297. (TIAN Siming, GONG Jiangfeng. Statistics of railway tunnels in China as of end of 2019 [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(2): 292-297. (in Chinese))
- [3] 郭有劲. 地质雷达在铁路隧道衬砌质量检测中的应用[J]. 铁道工程学报, 2002, 19(2): 71-74. (GUO Youjin. Exploration and application of geology radar for quality examination of railway tunnel lining [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002, 19(2): 71-74. (in Chinese))
- [4] 朱自强, 郭有军, 刘涛影. 地质雷达超前地质预报正演模拟及应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(1): 148-155. (ZHU Ziqiang, GUO Youjun, LIU Taoying. Advance geological forecast forward modeling of geological radar and its application [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(1): 148-155. (in Chinese))

- [5] 周黎明,付代光,张杨,等.典型不良地质体地质雷达探测正演试验研究[J].现代隧道技术,2018,55(4):47-52,58.(ZHOU Liming, FU Daiguang, ZHANG Yang, et al. Forward test of GPR detection for typical adverse geological bodies [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4):47-52, 58. (in Chinese))
- [6] 戴前伟,冯德山,王启龙,等.时域有限差分法在地质雷达二维正演模拟中的应用[J].地球物理学进展,2004,19(4):898-902.(DAI Qianwei, FENG Deshan, WANG Qilong, et al. The apply of finite difference time domain method in the Ground Penetrating Radar (GPR) two-dimension forward simulate [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(4):898-902. (in Chinese))
- [7] 周凯,胡敏.隧道穿越溶洞群对围岩及支护结构稳定性的影响[J].公路与汽运,2020(6):149-155.(ZHOU Kai, HU Min. Influence of tunnel crossing Karst group on stability of surrounding rock and supporting structure [J]. Highways & Automotive Applications, 2020 (6): 149-155. (in Chinese))
- [8] 刘新荣,舒志乐,朱成红,等.隧道衬砌空洞探地雷达三维探测正演研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(11):2221-2229.(LIU Xinrong, SHU Zhile, ZHU Chenghong, et al. Study of forward simulation for ground penetrating radar three-dimensional detection of tunnel lining cavity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11):2221-2229. (in Chinese))
- [9] 陈婕,凌同华,刘浩然,等.探地雷达混凝土空洞目标正演模拟与试验分析[J].交通科学与工程,2018,34(3):31-37.(CHEN Jie, LING Tonghua, LIU Haoran, et al. Forward simulation and experimental analysis of ground penetration radar for the underground cavities [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(3):31-37. (in Chinese))
- [10] 孙忠辉,刘金坤,张新平,等.基于GprMax的隧道衬砌地质雷达检测正演模拟与实测数据分析[J].工程地球物理学报,2013,10(5):730-735.(SUN Zhonghui, LIU Jinkun, ZHANG Xinping, et al. The tunnel lining detection forward numeral simulation and measured data analysis based on GprMax [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(5):730-735. (in Chinese))
- [11] 李兴,朱彤,周晶.隧道衬砌空洞积水的探地雷达识别研究[J].防灾减灾工程学报,2013,33(1):73-77,107.(LI Xing, ZHU Tong, ZHOU Jing. Study of ground penetrating radar detecting on tunnel lining cavity with water [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(1):73-77, 107. (in Chinese))
- [12] 张胜,何文超,黎永索,等.基于小波变换时能密度法的隧道空洞充填物识别[J].煤炭学报,2019,44(11):3504-3514.(ZHANG Sheng, HE Wenchao, LI Yongsuo, et al. Identification of tunnel cavity fillings by time-energy density analysis based on wavelet transform [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11):3504-3514. (in Chinese))
- [13] GIANNAKIS I, GIANNOPOULOS A, DAVIDSON N. Incorporating dispersive electrical properties in FDTD GPR models using a general Cole-Cole dispersion function[C]//2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). Shanghai: IEEE, 2012: 232-236.
- [14] 吕高,杨杰,李宁,等.基于地质雷达法的非饱和黄土介电特性及界面反射机理研究[J].长江科学院院报,2018,35(3):110-115.(LYU Gao, YANG Jie, LI Ning, et al. Research on dielectric property and interface reflection mechanism of unsaturated loess by ground penetrating radar [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(3):110-115. (in Chinese))

(责任编辑:罗容;校对:李脉 欧兆虎;英文编辑:陈璐)