

doi: 10.11720/wtyht.2022.1313

韩佳明,牛宇凯,刘明明,等.地下方形空洞地质雷达成像机理研究[J].物探与化探,2022,46(3):685-692.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1313

Han J M, Niu Y K, Liu M M, et al. Ground penetrating radar imaging mechanisms of underground square cavities[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 685-692. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1313

地下方形空洞地质雷达成像机理研究

韩佳明, 牛宇凯, 刘明明, 郭亚南, 金超

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 由于地理因素和历史等原因, 城市地下方形空洞“多”、“密”、“乱”的状况越来越严重, 地质雷达方形空洞扫描图像解析并不明确。基于地质雷达扫描探测全过程, 将雷达紧贴地面扫描地下方形空洞的图像对称轴左侧细分为 3 个阶段, 建立各阶段水平距离与回波延时之间的关系, 系统分析不同埋深、不同大小条件下方形空洞地质雷达扫描图像的变化情况, 结合探测实例实现地下方形空洞地质雷达成像机理的科学解释。总结出均匀介质中地下方形空洞雷达扫描图像对称轴左侧 3 个阶段分别为斜率不变的连续直线, 单调递减的连续凹曲线和与水平距离无关的连续水平直线; 随着埋深与空洞大小的增大, 曲线图像趋于缓和, 曲线的特征体现出张开弧度增大的趋势。

关键词: 方形空洞; 地质雷达; 探测; 成像机理; 图像解释

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)03-0685-08

0 引言

随着我国基础建设的不断发展, 老城区不断进行翻新改造, 隐伏在城市道路下的空洞不断发育, 最终导致道路坍塌, 严重影响工程建设和城市的交通安全^[1]。当前道路坍塌灾害呈现范围较广, 损失严重等特点。基于以上原因, 在城市进行工程施工时, 尤其在地下空洞多而复杂的市区, 提前进行空洞的探测和识别已刻不容缓^[2]。地质雷达作为一种对地下管线、空洞进行探测的重要方法, 在探测过程中会常常出现扫描图像解析不明确的问题, 因此对地质雷达扫描图像进行细化分析就显得尤为重要。

地质雷达 (ground penetrating radar, GPR), 是一种利用高频无线电波来确定介质内部物质分布规律的地球物理探测方法, 在地下传播过程中, 通过对电磁波回波的研究和分析, 就可以获得地下目标体的几何形态与空间位置^[3-5]。众多学者对雷达扫描图像进行了大量研究, 姜化冰^[6]通过对不同深度、不同尺寸方形空洞进行正演模拟, 分析深度以及尺寸因素带来的空洞目标雷达图谱的变化; 尹光

辉^[7], 李世念等^[8]通过编写 GprMax 程序研究不同参数对探地雷达正演模拟图像结果的影响, 总结了不同条件下的正演模拟图像特征, 给出判断空洞类型的理论判据; 李政^[9]用 Matlab 语言编制模拟程序, 研究电磁波的传播特性和几种地电模型的成像规律, 通过对正演结果的分析可以为反演提供依据, 提高图像的解释水平; 韩俊涛^[10]对不同条件下的路基方形空洞病害模型进行正演模拟研究, 分析了各种不同路基病害的特征, 对使用地质雷达探测下方的目标体异常具有非常好的指导意义; 刘胜峰^[11]通过空洞雷达探测实验得出, 雷达对水平方向空洞大小是可以取得满意效果的, 对垂直方向的空洞深度的探测精度也可以满足工程探测要求的精度; 陈婕^[12]通过 GprMax3.0 计算原理, 得到方形空洞的边缘平直且有直角, 电磁波在遇到方形空洞的边缘时的反射会比圆形空洞更加强烈, 并在直角处会有绕射现象, 因此会出现曲线交叠的情况。

综上所述, 大量学者分析地质雷达扫描图像主要是基于方形空洞模型进行研究, 对扫描曲线并没有进行细化分析。本文通过分析地质雷达天线紧贴地面水平移动过程中电磁波回波接收情况, 将扫描

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51808444)

第一作者: 韩佳明 (1977-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事岩土工程监测与监控研究工作。Email: 375224692@qq.com

图像对称轴左侧细分为 3 个阶段,建立各阶段水平距离与回波延时之间的关系,研究不同大小的方形空洞在不同埋深条件下电磁波的传播规律与图像的成像机理,最后结合探测实例验证了规律的准确性与实用性。

1 地下方形空洞成像全过程研究

1.1 方形空洞成像原理

地质雷达的发射天线在某一位置向地下发射固定中心频率的电磁波脉冲,电磁波向地下传播遇到介电性质有差异的介质产生反射信号,带有电磁信息的反射波被接收天线接收,这样的一次发射和接收过程形成一道回波信号。然后将地质雷达系统移至相邻的下一位置发射和接收形成下一道回波信号。通过信号处理机将接收到的无数条回波信号储存于终端主机中。最后利用成像软件将无数条发射波信号数值分析后转化形成方形空洞的探测曲线^[13-14]。

在实际探测中,地质雷达发射的信号在二维平面中形成一个扇形面,如图 1 所示。当地质雷达在位置 1 时,由于雷达天线扫描区域是一个扇形面,扇形弧长与方形空洞相交于 B 点,从而可以探测到 B 点的方形空洞,而在时域记录中,对 B 点探测形成的方形空洞反射特征曲线于 A 位置显示;当地质雷达移动至位置 2 时,对方形空洞的探测就属于垂直探测,对 B 点探测形成的方形空洞反射特征曲线于 B 位置显示;同理,当地质雷达移动至位置 3 时,对 B 点探测形成的方形空洞反射特征曲线则在 C 位置显示^[15-17]。

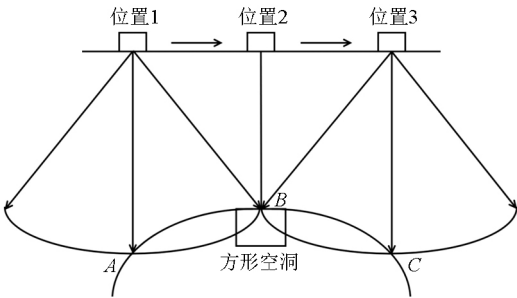


图 1 地质雷达方形空洞成像原理

Fig.1 Imaging principle of geological radar square cavity

1.2 方形空洞成像曲线阶段划分

当雷达紧贴地面探测时,假设天线收发同置,电磁波在地下均匀介质中传播,传播路径较为简单,经过方形空洞反射回到接收天线。

如图 2 所示,方形空洞中心在雷达探测线上的

投影点为 x_0 , t_0 为 x_0 处对应的方形空洞回波延时,其他雷达探测水平位置为 x_i ,对应的方形空洞回波延时为 t_i ,其中 x_1 为雷达发射信号形成的最大扇形面与方形空洞刚接触时 A 点所对应的水平位置, x_2 为最大扇形面与方形空洞左上角接触时 B 点对应的水平位置, x_3 为方形空洞 B 点在雷达探测线上的水平位置,方形空洞长边长为 $2a$,短边长为 b ,发射天线电磁波的波束角为 2θ ,假设介质是均匀的,因此波速 v 是常数。

根据图 2 可知,方形空洞地质雷达扫描图像是以 x_0 -C 为对称轴的轴对称图形,因此只需分析对称轴左侧图像即可。将地质雷达紧贴地面扫描方形空洞形成的关于水平距离与回波延时之间关系的曲线对称轴左侧划分为以下 3 个阶段:

- 1) 第一阶段从地质雷达发射信号形成的最大扇形面与方形空洞刚接触时对应水平距离 x_1 点到最大扇形面与方形空洞 B 点刚接触时对应水平距离 x_2 点;
- 2) 第二阶段从地质雷达发射信号形成的最大扇形面与方形空洞刚接触时对应水平距离 x_2 点到方形空洞 B 点正上方对应水平距离 x_3 点;
- 3) 第三阶段从方形空洞 B 点正上方对应水平距离 x_3 点到方形空洞 C 点正上方对应水平距离 x_0 点。

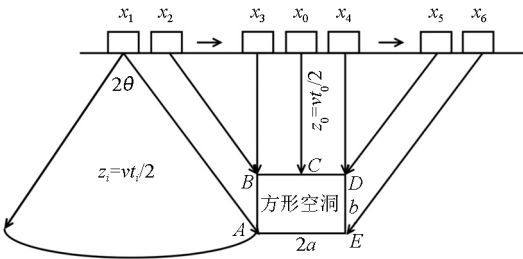


图 2 地质雷达方形空洞扫描曲线阶段划分

Fig.2 Phase division of scanning curve of geological radar square cavity

1.3 方形空洞成像曲线方程

1.3.1 方形空洞成像第一阶段曲线方程

方形空洞扫描曲线的第一阶段如图 3 所示,雷达电磁波在方形空洞表面反射后被接收天线接收,根据方形空洞扫描曲线原理图 3 中的直角三角形 ABC,则有以下等式:

$$z_i \cdot \sin\theta = x - a, \tag{1}$$

式中, $z_i = v \cdot t_i/2$, x 为 x_i 到 x_0 的水平距离,将 z_i 代入式(1)可得第一阶段方程:

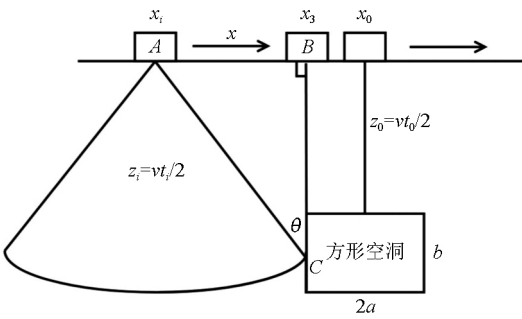


图 3 地质雷达方形空洞第一阶段曲线形成原理

Fig.3 The first stage curve formation principle diagram of geological radar square cavity

$$t = 2x / (v \cdot \sin\theta) - 2a / (v \cdot \sin\theta), \quad (2)$$

由式(2)可知,第一阶段是以水平距离 x 为自变量,回波延时 t 为因变量的一般直线方程。

1.3.2 方形空洞成像第二阶段曲线方程

方形空洞扫描曲线的第二阶段如图 4 所示。对于图 4 中的直角三角形 ABC ,根据三角形勾股定理,则有以下等式:

$$(x - a)^2 + z_0^2 = z_i^2, \quad (3)$$

把 $z_0 = v \cdot t_0/2, z_i = v \cdot t_i/2$ 代入式(3)可得第二阶段曲线方程:

$$\frac{t_i^2}{t_0^2} - \frac{(x - a)^2}{(vt_0/2)^2} = 1. \quad (4)$$

由式(4)可知,第二阶段是以水平距离 x 为自变量,回波延时 t_i 为因变量的双曲线方程。其中双曲线的对称中心坐标为 $(-a, 0)$,实半轴长 $d = t_0$,虚半轴长 $e = vt_0/2$ 。

1.3.3 方形空洞成像第三阶段曲线方程

方形空洞扫描曲线的第三阶段如图 5 所示。由于接收天线接收信号时间与水平距离无关,则有以下等式:

$$z_i = z_0, \quad (5)$$

把 $z_0 = v \cdot t_0/2, z_i = v \cdot t_i/2$ 代入式(5)可得第三阶段方程:

$$t_i = t_0, \quad (6)$$

由式(6)可知,第三阶段是随着水平距离 x 变化,回波延时 t_i 不变的水平直线方程。

1.4 方形空洞成像全过程分析

由于雷达扫描图是以雷达天线水平移动距离为横轴,且向右为正,以电磁波回波延时为纵轴,且向下为正。根据式(2)可知,第一阶段雷达扫描图像的斜率 k 与截距 c 分别为:

$$\begin{cases} k = 2 / (v \cdot \sin\theta), \\ c = - 2a / (v \cdot \sin\theta). \end{cases} \quad (7)$$

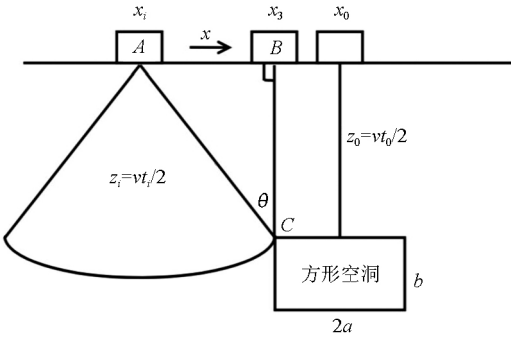


图 4 地质雷达方形空洞第二阶段曲线形成原理

Fig.4 The second stage curve formation principle diagram of geological radar square cavity

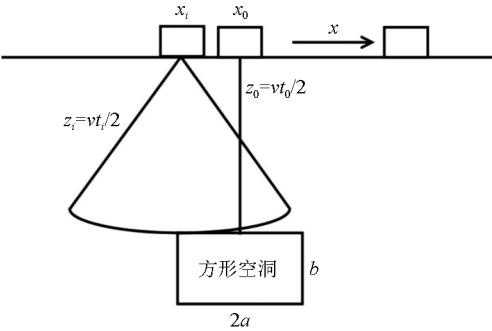


图 5 地质雷达方形空洞第三阶段曲线形成原理

Fig.5 The third stage curve formation principle diagram of geological radar square cavity

根据式(7)可知,在均匀介质中,第一阶段雷达扫描图像在雷达扫描图所处坐标系中为斜率不变,截距与方形空洞长边长 a 有关的一般直线。

第二阶段对式(4)中 x 进行求导,可得到:

$$t'_x = \frac{4(x - a)}{v^2 t_i}, \quad (8)$$

$$t''_x = \frac{(2vt_i)^2 - [4(x - a)]^2}{v^4 t_i^3}, \quad (9)$$

根据式(8)可知 $t'_x < 0$,由式(9)可知 $t''_x > 0$,所以第二阶段雷达扫描图像在雷达扫描图所处坐标系中为单调递减的凹函数。

根据式(6)可知,第三阶段雷达扫描图像在雷达扫描图所处坐标系中为回波延时与水平距离无关的水平直线。

综上所述,当目标体为方形空洞且雷达紧贴地面工作时,雷达扫描图在以水平移动距离为横轴,回波延时为纵轴建立的坐标系中,方形空洞雷达扫描图呈现对称性的特征。取对称轴左侧为研究对象,将图像细分为 3 个阶段。其中第一阶段为一条斜率不变的连续直线,第二阶段为一条单调递减的连续凹曲线,第三阶段为一条与水平距离无关的连续水平直线。对称轴右侧图像与左侧对称分布。

2 方形空洞埋深与大小对雷达扫描曲线的影响分析

2.1 方形空洞雷达扫描曲线影响参数分析

由于曲线的曲率公式为 $K = \frac{|t''_x|}{(1+t'^2_x)^{\frac{3}{2}}}$, 而雷达第二阶段扫描曲线中 t'_x 无限趋于零, 所以曲线的曲率近似通过 $|t''_x|$ 来判断。

地质雷达扫描天线发射信号形成的扇形面与方形空洞刚接触时, 如图 6 所示。根据图 6 中直角三角形 ABC , 则有以下等式:

$$x - a = (z_0 + b) \cdot \tan \theta, \tag{10}$$

式中, x 为雷达扫描曲线对称轴左侧水平最大距离。把 $z_0 = v \cdot t_0 / 2$ 代入式 (10) 可得扫描曲线的水平距离最大范围为:

$$x_{\max} = 2 \cdot [(vt_0/2 + b) \cdot \tan \theta + a]。 \tag{11}$$

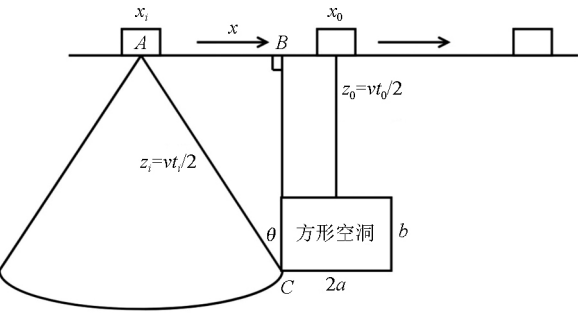


图 6 扫描曲线最大水平距离示意

Fig.6 Diagram of maximum horizontal distance of scanning curve

其中曲线第二阶段水平距离, 如图 7 所示。根据图 7 中直角三角形 ABC , 则有以下等式:

$$x = (vt_0/2) \cdot \tan \theta。 \tag{12}$$

曲线第三阶段水平距离, 由图 5 可知, 水平距离为方形空洞长边长的一半, 即:

$$x = a, \tag{13}$$

根据式 (11)、式 (12) 和式 (13) 可知, 雷达扫描曲线对称轴左侧三个阶段的水平距离分别为:

$$\begin{cases} x_1 = b \cdot \tan \theta, \\ x_2 = (vt_0/2) \cdot \tan \theta, \\ x_3 = a。 \end{cases} \tag{14}$$

由式 (14) 可知, 雷达扫描曲线第一阶段水平距离与方形空洞短边长 b 有关; 第二阶段水平距离与方形空洞垂直探测时回波延时 t_0 有关; 第三阶段水平距离与方形空洞长边长 a 有关。

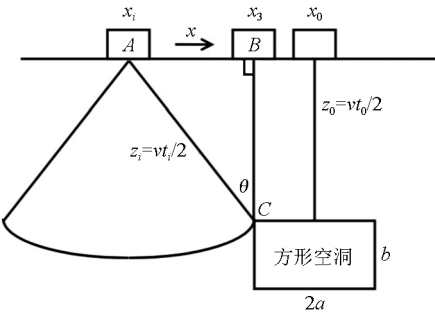


图 7 扫描曲线第二阶段水平距离示意

Fig.7 Horizontal distance diagram for the second phase of scanning curve

2.2 方形空洞埋深对成像的影响分析

方形空洞的深度位置信息具有重要的意义, 方形空洞随着深度的增加或者减小, 地质雷达探测成像特征必然发生一些形态上的变化, 通过对成像形态的具体变化进一步分析, 研究地质雷达针对不同深度的方形空洞雷达图像的差异。

随着方形空洞埋深的增大, 代表电磁波传到空洞表面的时间增多, 代表以上各式中 t 与 t_0 值变大, 根据式 (7) 可知, 雷达扫描曲线第一阶段斜率与截距保持不变; 根据式 (9) 可知, 雷达扫描曲线第二阶段 $|t''_x|$ 减小, 说明曲线的弯曲程度逐渐变小; 根据式 (6) 可知, 第三阶段雷达扫描曲线在坐标系中向下平移。根据式 (11) 可知, 曲线的最大水平距离随埋深的增大而增大。根据式 (14) 可知, 第一、第三阶段水平距离不变, 第二阶段水平距离随埋深的增大而增大。因此整体对比可以得出如下结论: 随着方形空洞埋深增大, 曲线第二阶段的曲率减小, 曲线弯曲程度变小, 水平方向距离逐渐增大, 曲线图像趋于缓和, 曲线的特征体现出张开弧度增大的趋势。

2.3 方形空洞边长对成像的影响分析

方形空洞的大小同样具有重要的意义, 方形空洞随着边长的增加或者减小, 地质雷达探测成像特征必然发生一些形态上的变化, 通过对成像形态的具体变化进一步分析, 研究地质雷达针对不同边长的方形空洞雷达图像的差异。

随着方形空洞长边的增大, 代表各公式中 a 值变大。根据式 (7) 可知, 雷达扫描曲线第一阶段斜率保持不变, 截距增大; 根据式 (9) 可知, 雷达扫描图的第二阶段 $|t''_x|$ 增大, 说明曲线的弯曲程度逐渐变大; 根据式 (6) 可知, 第三阶段雷达扫描曲线在坐标系中纵轴保持不变。根据式 (11) 可知, 曲线的最大水平距离随长边的增大而增大。根据式 (14) 可知, 第一、第二阶段水平距离不变, 第三阶段水平距

离随长边的增大而增大。

随着方形空洞短边的增大,代表各公式中 b 值变大。根据式 (7) 可知,雷达扫描曲线第一阶段斜率与截距保持 $|t_x''|$ 不变;根据式 (8) 可知,雷达扫描图的第二阶段不变,说明曲线的弯曲程度不变;根据式 (6) 可知,第三阶段雷达扫描曲线在坐标系中纵轴保持不变。根据式 (11) 可知,曲线的最大水平距离随短边的增大而增大。根据式 (14) 可知,第二、第三阶段水平距离不变,第一阶段水平距离随短边的增大而增大。

因此整体对比可以得出如下结论:随着方形空洞边长增大,曲线弯曲程度变化不大,水平方向距离逐渐增大,曲线图像趋于缓和,曲线的特征体现出张开弧度增大的趋势。

3 探测实例

地质雷达探测工程位于西安市区某工地区域,为避免地下空洞对周围环境和施工安全造成不良影响,根据任务要求及工程特点,地下空洞探测工作采用 GSSI 美国劳雷地质雷达,使用了其 3207A 型

探测天线,天线的频率分别采用 100 MHz 和 400 MHz。

以下是测区范围内经过 GSSI 美国劳雷地质雷达在现场探测的不同方形空洞的雷达扫描图,结合上文提到的扫描图像分析原理与方法,对不同方形空洞进行分析。

图 8 和图 9 为测线中长边为 2 m,短边为 0.5 m 的方形空洞的实测和理论计算扫描图像,由于理论分析时假设雷达紧贴地面探测且电磁波在地下均匀介质中传播,而实际探测时地下方形空洞与地面并不一定平行且地面与方形空洞之间介质是不均匀的,所以导致实际探测中两端点高度不一致,扫描图像中间并不水平。对比分析 1、2 号方形空洞,2 个空洞与地面并不平行,左端距地面更近,空洞与地面之间的黄土介质不均匀程度大致相同,所以扫描图像中间不平整程度基本相同。由于 2 个方形空洞处于相同的黄土介质中,波速 v 相同,而 1 号方形空洞扫描曲线顶点处于 2 ns 处,2 号方形空洞扫描曲线顶点处于 14 ns 处,所以 2 个方形空洞的埋深逐渐增大。对比分析可知,相同大小的方形空洞随着埋深增大,方形空洞扫描曲线弯曲程度逐渐变小,曲线第

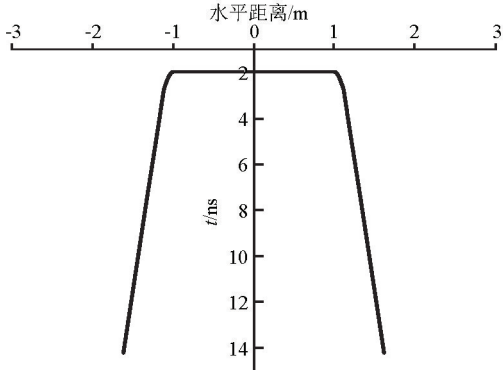
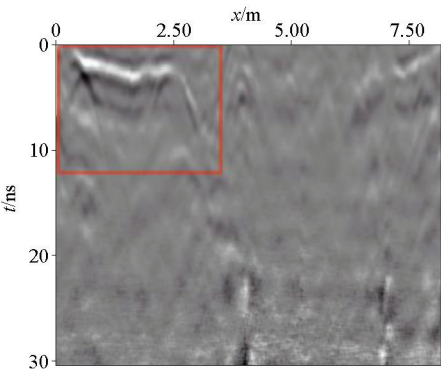


图 8 1 号方形空洞地质雷达实测与理论扫描

Fig.8 Field measurement and theoretical scanning map of No.1 square cavity geological radar

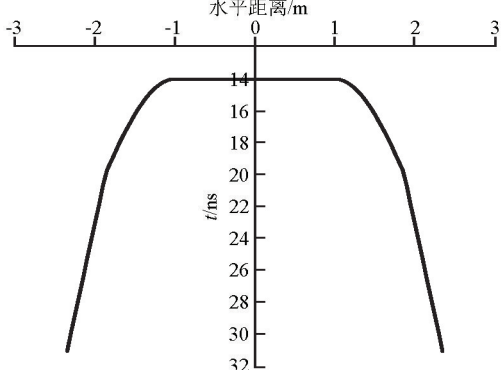
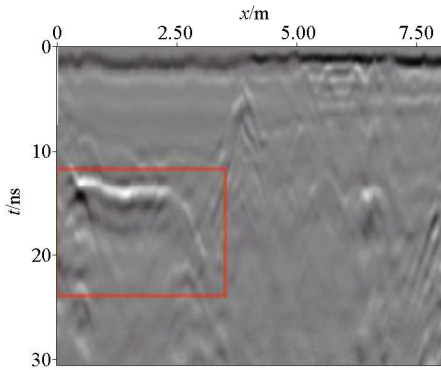


图 9 2 号方形空洞地质雷达实测与理论扫描

Fig.9 Field measurement and theoretical scanning map of No.2 square cavity geological radar

二阶段水平方向距离逐渐增大,曲线图像趋于缓和,曲线的特征体现出了张开弧度增大的趋势。

图 10 为测线中长边为 5 m,短边为 1 m 的方形空洞的实测和理论计算扫描图像,图 11 为测线中长边为 14 m,短边为 1 m 的方形空洞的实测和理论计算扫描图像,对比分析 3、4 号方形空洞,3 号空洞与地面保持平行,4 号空洞与地面并不平行,右端距地面更近,4 号空洞相比 3 号空洞与地面之间的黄土介质不均匀程度更大,所以扫描图像中间不平整程

度 4 号空洞相比 3 号空洞更大。由于 2 个方形空洞处于相同的黄土介质中,波速 v 相同,3 号和 4 号方形空洞扫描曲线顶点处于 4 ns 处,所以 2 个方形空洞的埋深相同。对比分析可知,相同埋深的方形空洞随着长边 a 增大,方形空洞扫描曲线弯曲程度几乎不变,曲线第三阶段水平方向距离逐渐增大,曲线图像趋于缓和,曲线的特征体现出了张开弧度增大的趋势。

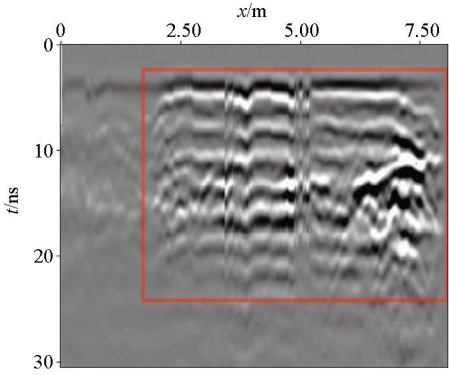


图 10 3 号方形空洞地质雷达实测与理论扫描

Fig.10 Field measurement and theoretical scanning map of No.3 square cavity geological radar

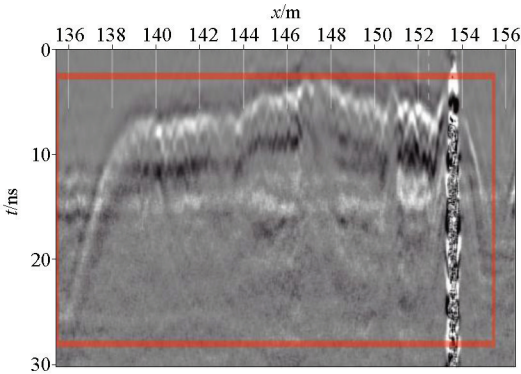


图 11 4 号方形空洞地质雷达实测与理论扫描

Fig.11 Field measurement and theoretical scanning map of No.4 square cavity geological radar

图 12 为测线中长边为 5 m,短边为 0.4 m 的方形空洞的实测和理论计算扫描图像,图 13 为测线中长边为 5 m,短边为 0.8 m 的方形空洞的实测和理论计算扫描图像,对比分析 5、6 号方形空洞,2 个空洞与地面并不平行,右端距地面更近,5 号空洞相比 6 号空洞与地面之间的黄土介质不均匀程度更大,所以扫描图像中间不平整程度 5 号空洞相比 6 号空洞更大。由于方形空洞处于相同的黄土介质中,而且扫描曲线顶点都处于 24 ns 处,所以二个方形空洞的埋深相同。对比分析可知,相同埋深的方形空洞随着短边 b 增大,方形空洞扫描曲线弯曲程度不变,曲线第一阶段水平方向距离逐渐增大,曲线图像趋于

缓和,曲线的特征体现出了张开弧度增大的趋势。

4 结论及讨论

本文基于地质雷达电磁波的传播规律研究地下方形空洞的成像机理。对不同埋深、不同大小方形空洞的成像规律进行了分析与归纳。具体结论如下:

1) 雷达扫描图像在以水平移动方向与回波延时建立的坐标系中,扫描曲线呈现对称性特征,将对称轴左侧细分为 3 个阶段,图像在对称轴左侧的第一阶段为斜率不变的连续直线,第二阶段为单调递

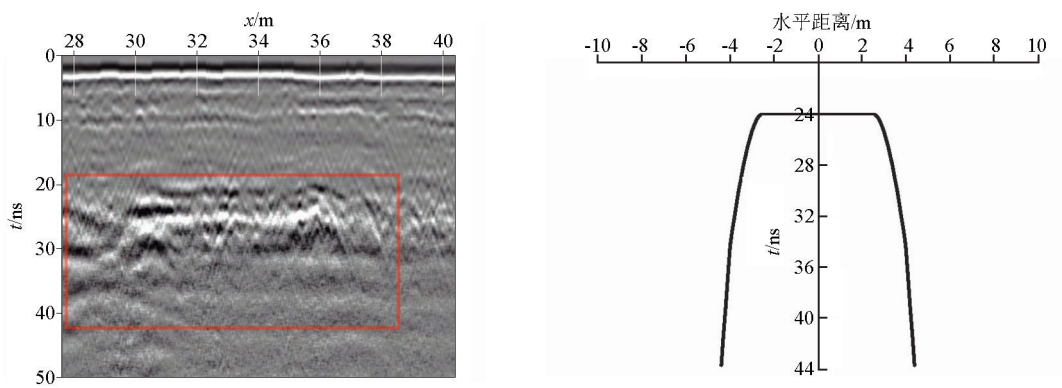


图 12 5 号方形空洞地质雷达实测与理论扫描

Fig.12 Field measurement and theoretical scanning map of No.5 square cavity geological radar

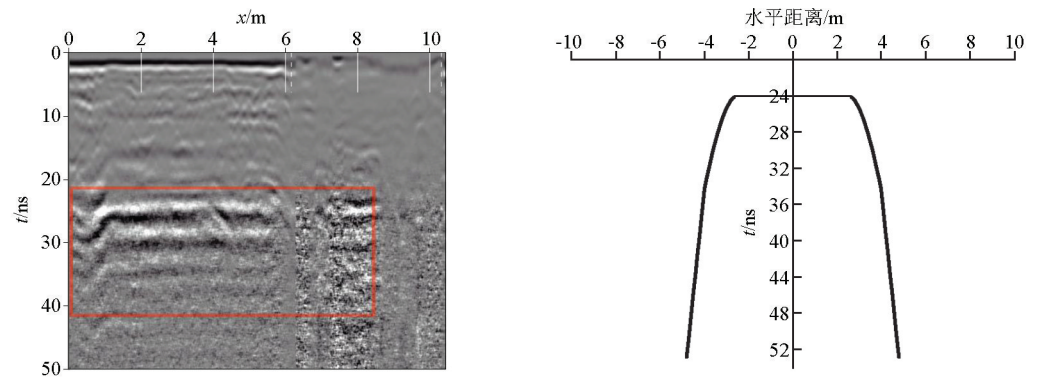


图 13 6 号方形空洞地质雷达实测与理论扫描

Fig.13 Field measurement and theoretical scanning map of No.6 square cavity geological radar

减的连续凹曲线,第三阶段为与水平距离无关的连续水平直线。

2)考虑方形空洞深度逐渐变化的情形下,地质雷达对方形空洞的整体成像的变化趋势。随着方形空洞深度的增大,曲线曲率减小,曲线弯曲程度变小,曲线水平方向距离增大,曲线图像趋于缓和,曲线的特征体现出张开弧度增大的趋势。

3)考虑方形空洞大小逐渐变化的情形下,地质雷达对方形空洞的整体成像的变化趋势。随着方形空洞边长的增大,曲线弯曲程度变化不大,曲线水平方向距离增大,曲线图像趋于缓和,曲线的特征体现出张开弧度增大的趋势。

致谢:感谢所有参与地质雷达现场探测的工作人员!

参考文献 (References) :

[1] 郭士礼,段建先,张建锋,等.探地雷达在城市道路塌陷隐患探测中的应用[J].地球物理学进展,2019,34(4):1609-1613.
Guo S L, Duan J X, Zhang J F, et al. The application of ground penetrating radar in the detection of hidden dangers of urban road collapse [J]. The Progress of Geophysics, 2019, 34(4): 1609-1613.
[2] 韩佳明,仲鑫,景帅,等.探地雷达在黄土地区城市地质管线探测中的应用[J].物探与化探,2020,44(6):1476-1481.

Han J M, Zhong X, Jing S, et al. Application of ground penetrating radar in urban geological pipeline detection in loess area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1476-1481.
[3] 刘澜波,钱荣毅.探地雷达:浅表地球物理科学技术中的重要工具[J].地球物理学报,2015,58(8):2606-2617.
Liu L B, Qian R Y. Ground penetrating radar: An important tool in shallow geophysical science and technology [J]. Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2606-2617.
[4] 陈义群,肖柏勋.论探地雷达现状与发展[J].工程地球物理学报,2005,2(2):149-155.
Chen Y Q, Xiao B X. On the status and development of ground penetrating radar [J]. Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(2): 149-155.
[5] 胡群芳,郑泽昊,刘海,等.三维探地雷达在城市市政管线渗漏探测中的应用[J].同济大学学报:自然科学版,2020,48(7):972-981.
Hu Q F, Zheng Z H, Liu H, et al. The application of three-dimensional ground penetrating radar in urban municipal pipeline leakage detection [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2020, 48(7): 972-981.
[6] 姜化冰.探地雷达地下空洞目标探测研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
Jiang H B. Research on the detection of underground cavity target by ground penetrating radar [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2016.
[7] 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 modeling of road cavity GPR images based on GprMax [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [8] 李世念,王秀荣,林恬,等.基于 GprMax 的道路空洞三维探地雷达正演数值模拟[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(3):132-138.
- Li S N, Wang X R, Lin T, et al. Forward numerical simulation of 3D GPR for road cavity based on GprMax [J]. Journal of Geological Disasters and Prevention of China, 2020, 31(3):132-138.
- [9] 李政.探地雷达在公路隧道中的应用研究[D].南宁:广西大学,2014.
- Li Z. The application of ground penetrating radar in highway tunnels [D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [10] 韩俊涛.铁路路基病害的地质雷达正演模拟与探测方法研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- Han J T. Research on forward modeling and detection method of geological radar for railway subgrade diseases [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [11] 刘胜峰.地质雷达应用于公路隧道衬砌无损检测的实验研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.
- Liu S F. The experimental study on the application of geological radar in the nondestructive testing of highway tunnel lining [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2007.
- [12] 陈婕.基于 GprMax3.0 的探地雷达混凝土空洞目标正演模拟与试验分析[D].长沙:长沙理工大学,2018.
- Chen J. The forward simulation and experimental analysis of GPR concrete cavity target based on GprMax3.0 [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2018.
- [13] 刘栋.探地雷达在公路工程检测中的应用研究[D].沈阳:东北大学,2008.
- Liu D. Research on the application of ground penetrating radar in highway engineering detection [D]. Shenyang: Northeast University, 2008.
- [14] 钟声.钻孔雷达与数字摄像动态勘察技术若干关键问题研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008.
- Zhong S. Research on key issues of borehole radar and digital camera dynamic survey technology [D]. Wuhan: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics), 2008.
- [15] 张永山.探地雷达异物目标探测与数据处理研究[D].太原:中北大学,2012.
- Zhang Y S. Ground penetrating radar foreign object detection and data processing research [D]. Taiyuan: North Central University, 2012.
- [16] 张海如.探地雷达信号后处理关键技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2016.
- Zhang H R. Research on key technologies of ground penetrating radar signal postprocessing [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2016.
- [17] 吕高.黄土填方介电参数特性及地质雷达回波的正演与解译研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- Lyu G. Dielectric parameter characteristics of loess filling and forward modeling and interpretation of geological radar echo [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.

Ground penetrating radar imaging mechanisms of underground square cavities

HAN Jia-Ming, NIU Yu-Kai, LIU Ming-Ming, GUO Ya-Nan, JIN Chao

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Owing to geographical factors and historical reasons, the urban underground square cavities show increasing number, density, and chaotic state, leading to unclear interpretation results of the ground penetrating radar (GPR) images of these underground square cavities. This study divided the left side of an image (with the symmetry axis as a boundary) of square cavities obtained from the GPR scanning close to the ground into three stages based on the whole process of ground penetrating radar scanning detection. Then, this study established the relationships between horizontal distance and echo delay of each stage. Furthermore, it systematically analyzed the changes in the GPR images of square cavities with different burial depths and sizes. Finally, this study obtained the scientific explanation of geological radar imaging mechanisms of underground square cavities based on GPR detection examples. It is concluded that the three stages of the left side of a GPR scanning image of the underground square cavities in uniform media include a continuous straight line with a constant slope, a monotonically decreasing continuous concave curve, and a continuous horizontal straight line unrelated to the horizontal distance. With an increase in the burial depth and cavity size, the curve tends to be gentle and its open radian tends to increase.

Key words: square cavity; ground penetrating radar (GPR); detection; imaging mechanism; image interpretation

(本文编辑:叶佩)