

doi: 10.11720/wtyht.2017.1.29

吴彦奇,刘四新,傅磊,等.探地雷达探测桥梁浅基础缺陷的正演研究[J].物探与化探,2017,41(1):183-188.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.29

Wu Y Q, Liu S X, Fu L, et al. Forward modeling on shallow bridge foundation defect detection by GPR[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(1): 183-188. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.29

## 探地雷达探测桥梁浅基础缺陷的正演研究

吴彦奇,刘四新,傅磊,李宏卿

(吉林大学 地球探测科学与技术学院,吉林 长春 130061)

**摘要:**桥梁基础作为桥梁重要的组成部分,由于长期的地质作用和外部因素总是容易出现缺陷、裂缝等桥梁基础病害。考虑到传统的探地雷达探测方法——Common-offset 法很难解决桥梁基础病害问题,提出采用特殊的 Common-source 法来探测桥梁基础病害。利用 GprMax 软件,来模拟桥梁基础的探测过程;将正常桥梁基础和缺陷型桥梁基础的正演结果进行对比,可以发现二者存在明显的差异。利用这些差异可以在实际探测过程中识别出存在病害的桥梁基础,证明利用探地雷达探测桥梁基础病害是切实可行的办法。

**关键词:**探地雷达;桥梁浅基础;GprMax;正演;病害检测

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2017)01-0183-06

### 0 引言

桥梁安全在工程建设方面是一个非常重要的课题,探地雷达作为一种非破损电磁波勘探技术,在桥梁病害探测方面也取得了越来越广泛的应用。在国外,电磁波勘探技术起步较早,经过长时间的发展,现已十分成熟,在混凝土介质中的管道、钢筋探测和道路安全检测方面都已有许多成功的案例<sup>[1-7]</sup>;国内虽然起步较晚,但发展十分迅速,在桥梁质量检测和桥梁下方地质情况的探测方面都有不错的进展<sup>[8-14]</sup>。正演方面,GprMax 软件在混凝土介质中钢筋、空洞的探测方面得到了重要的应用<sup>[15-17]</sup>。桥梁基础绝大部分是由混凝土构成,是桥梁的重要组成部分,实际使用中,桥梁基础容易受水的冲刷、侵蚀以及剪应力破坏,出现缺陷或裂缝。在病害检测工作中,由于受侧面桥墩的影响,且桥基础的水平分布范围很小,若采用 Common-offset 法沿基础走向探测,很难探测到地下有用信息。因此,本文提出用 Common-source 法对桥梁基础进行探测,并结合波场

分析来解释正演结果,以了解探地雷达在探测桥梁基础方面的适用性。利用 GprMax 软件,以时间域有限差分法为基础来模拟探地雷达探测桥梁基础的过程。桥梁的类型很多,基础类型也很多,这里仅以小桥浅基础为例,开展相应研究,希望能有益于实际工程应用。

### 1 正演模型及探测方式

结合实际情况,本文所研究的桥基础如图 1 所示。该桥梁纵向长 9 m,墩身宽 1.1 m,墩身下部的桥梁基础的上表面位于地下 0.9 m 处,桥梁基础的宽度略大于墩身的宽度,为 2.1 m,两端各多出 0.5 m,基础厚度为 0.6 m。墩身与基础由混凝土构成,介电常数 6.0、电导率为 0.001 S/m。周围的介质为湿的泥沙,介电常数 20.0、电导率为 0.1 S/m。

正演模拟时,首先考虑用探地雷达探测中常用的 Common-offset 法来对目标体进行探测。但是由于桥墩的特殊结构,我们发现,若采用 Common-offset 法进行探测并不能很好地反应地下目标体的结构

收稿日期:2016-06-24;修回日期:2016-10-29

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2013AA064603);国家自然科学基金项目(40874073、41074076)

作者简介:吴彦奇(1992-),男,吉林大学在读研究生,主要研究方向为探地雷达方法理论和应用。

通信作者:刘四新(1966-),男,山西太谷人,日本东北大学工学博士,教授,博士生导师,主要从事探地雷达、钻孔雷达及电磁波测井等的方法理论和应用方面的研究。Email:liusixin@jlu.edu.cn

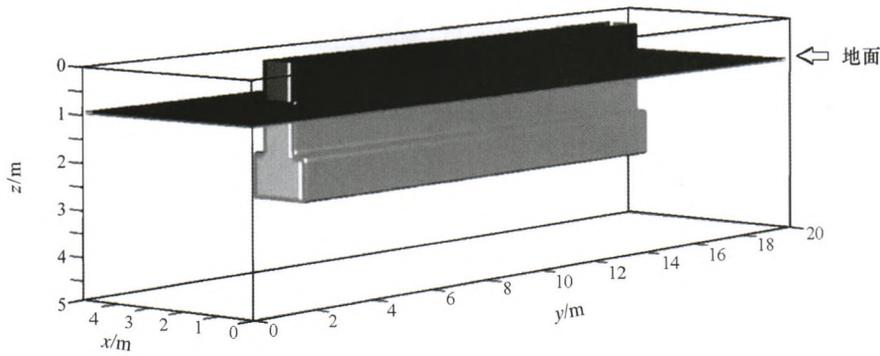


图1 桥梁浅基础模型透视图

特征。比如,当垂直于桥墩走向布置测线时,Common-offset 法并不能很好地探测桥墩正下方的基础部分;当沿着桥墩走向布置测线时,不但得不到桥墩正下方基础的信息,而且所测结果严重受侧面桥墩反射波的影响,使得有用信号无法识别。针对此种情况,提出使用 Common-source 法对目标体进行探测,将测线垂直于桥基础走向布置,这样发射和接收天线可位于桥墩两侧,增加了探测的灵活性。

## 2 正演结果与分析

采用 2 种 Common-source 测线的布置方式。第一种布置方式是发射天线紧贴桥墩,接收天线在桥墩的另一侧等间隔布置,第二种方式是天线紧贴桥墩,接收天线在桥墩的同一侧等间隔布置;2 种探测方法的测线均垂直于桥墩走向,且在桥墩中间布置。根据所探测桥梁基础的结构、病害不同,选择不同的探测方法。文中所用发射天线频率均为 300 MHz,波形为雷克子波。

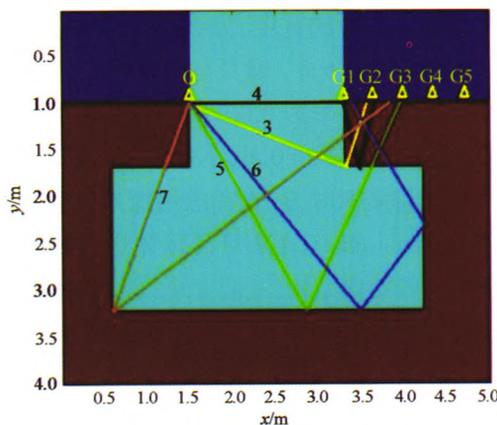
### 2.1 正常桥梁模型及正演结果

选取了 2 种不同的方法来探测正常桥梁模型,以便与不同桥梁基础病害的模拟结果进行比较。

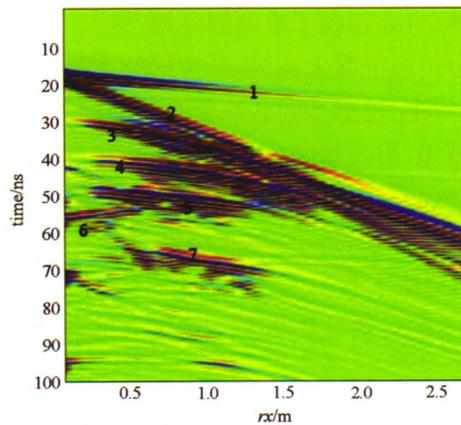
#### 2.1.1 接收天线与发射天线不在桥墩的同一侧

图 2a 所示是第一种测量方式,测线垂直于桥墩走向,并在桥墩中间布置。图中 O 表示发射天线,位于桥墩左侧,紧贴桥墩放置;G1~G4 表示接收天线,接收天线刚开始紧贴桥墩放置,之后每测量一次就向右移动 0.06 m,共测 51 次。得到的正演结果剖面如图 2b 所示。

图 2b 中的横坐标  $rx$  表示接收器与第一个接收器之间的距离(图 3~图 6 同)。图中各同相轴的意义不同。同相轴 1 的视速度最快,到达时间最早,因此表示沿空气传播的空气直达波;同相轴 2 在第一个接收天线处与同相轴 1 的时间相同,而且是一条直线,则同相轴 2 表示沿地表传播的直达波;同相轴 3~7 对应的传播路径已在图 2a 中标出,其中:同相轴 3 表示电磁波在基础上界面产生的反射波;同相轴 4 为电磁波在传播至桥墩—地面—空气 3 种介质交界点时所产生的绕射波向下传播,在基础上界面



(a) 发射接收天线不同侧时的正常基础模型



(b) 发射接收天线不同侧时正常基础的正演结果

图2 发射与接收天线不在桥墩同侧时的正演模型与结果

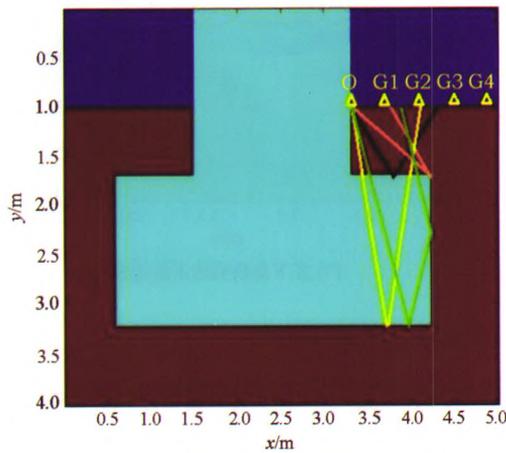
发生反射并最后被接收到所形成的同相轴;同相轴 5 表示电磁波在基础下界面发生反射并直接被接收到的反射波;同相轴 6 表示电磁波先在基础下界面发生反射,又在基础右侧面发生第二次反射所产生的反射波,由图 2a 可以看出其水平传播方向与其他折线的方向相反,因此,同相轴 6 的倾斜方向也与其他同相轴相反;同相轴 7 表示电磁波在传播至基础的左下角时经多次反射并最后被接收到的反射波。

### 2.1.2 发射天线与接收天线在桥梁的同一侧

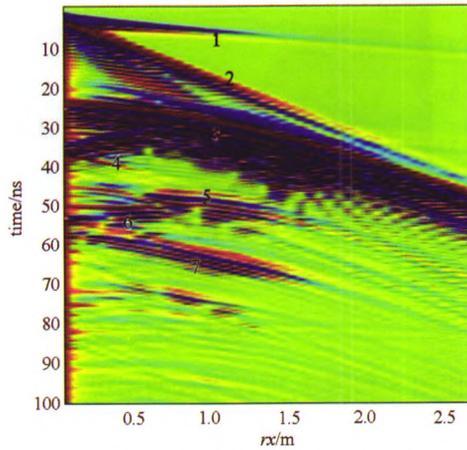
采用第二种探测方式来模拟正常桥梁模型,并采用了如图 3 所示的探测方式。图中 O 表示发射天线紧贴桥墩右侧放置,偏移距为 0.06 m, G1 ~ G4

表示接收天线,接收天线起始位置在发射天线右端 0.06 m 处,之后每测量一次就向右移动 0.06 m,一共测量 50 次,得到正演结果如图 3b 所示。

图 3b 中,同相轴 1 的视速度最快,到达时间最早,因此表示沿空气传播的空气直达波;同相轴 2 在第一个检波器处与同相轴 1 的时间相同,而且是一条直线,则同相轴 2 表示沿地表传播的直达波;其他的同相轴与图 3a 中的传播路径相对应:同相轴 3 表示基础上界面发射波,同相轴 4 表示基础右上角的绕射波,同相轴 5 表示基础下界面发射波,同相轴 6 表示电磁波依次经过基础下界面和基础右界面 2 次反射产生的反射波,同相轴 7 表示电磁波在基础上界面和地面之间产生的多次波。



(a) 发射接收天线同侧时的正常基础模型



(b) 发射接收天线同侧时正常基础的正演结果

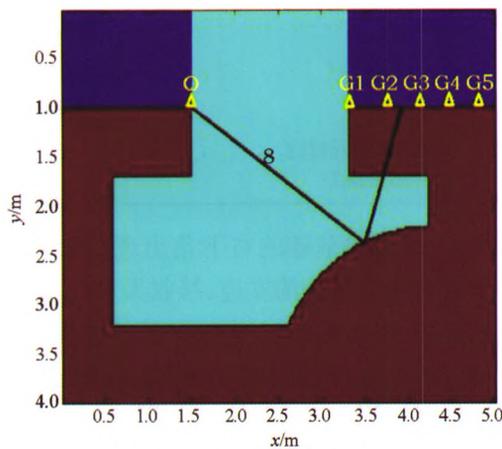
图 3 发射与接收天线在桥墩同一侧时的正演模型与结果

## 2.2 缺失型问题桥基础的正演模拟及分析

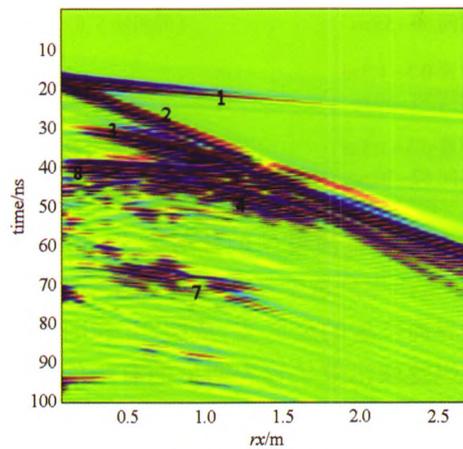
### 2.2.1 桥梁基础右端缺陷模型与正演结果

图 4 所示为基础有缺陷时的模型横截面示意,由于受到各种地质作用的影响,桥梁基础容易出现

缺失、残缺的病害,图中桥梁基础的右下角出现了严重的缺失。从桥梁缺陷的模型看,当发射天线与接收天线分别在桥墩两侧时,发射天线发出的电磁波经反射后可能会被很好地接收,而若发射天线与接



(a) 右下角缺陷的正演模型



(b) 右下角缺陷的正演结果

图 4 桥梁基础右下角出现缺陷时的正演模型与结果

收天线在桥墩同一侧,则可能得不到很好的结果。因此,针对桥梁基础的缺陷病害,采用了第一种探测方法,发射天线与接收天线的布置情况与图 2a 中正常模型的相同。

对比图 4 与图 2,可以明显发现图 4 中同相轴 5 和 6 消失了,而且出现了新的同相轴 8。其原因是由于基础右下角出现缺失,由电磁波在基础下边界反射生成的同相轴 5 和 6 也随之消失,并且电磁波

在缺陷产生的新的边界处发生反射,最后被接收生成同相轴 8,其传播路径如图 4a 所示。

### 2.2.2 桥梁基础左端缺陷模型与正演结果

由于在实际探测时,桥梁基础埋于地下,其破损情况是未知的,因此有必要对基础左端出现缺陷时的模型(源与缺陷同侧)进行模拟,模型横截面与测线布置情况如图 5 所示。

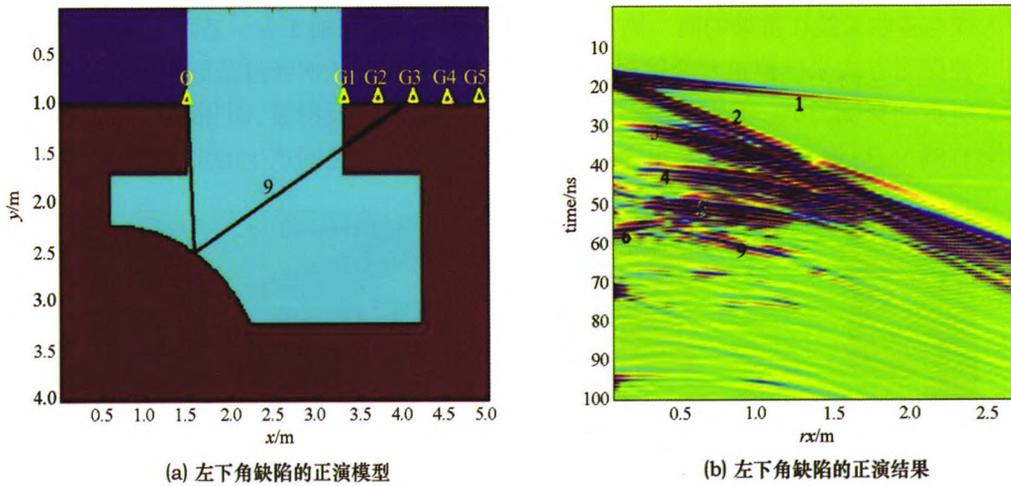


图 5 桥梁基础左下角出现缺陷时的正演模型与结果

通过对比图 5 和图 2,可以发现两图中的同相轴 1~6 是相同的。这是因为图 5 中桥梁模型的右端没有发生损坏,因此不影响同相轴 1~6 电磁波的传播路径;而由于模型左下角出现较明显的缺陷,同相轴 7 消失,并且电磁波在传播至桥梁基础缺陷的

边界处时产生反射,即同相轴 9,是电磁波在缺陷边界处产生的新的反射,其传播路径如图 5a 所示。

### 2.2.3 基础有缺陷时正演结果的分析与总结

表 1 所示是 2 种缺陷型桥梁基础模型与正常模型正演结果的比较。

表 1 缺陷型桥梁基础正演结果比较

异常出现位置	正常模型	右下角缺陷模型	左下角缺陷模型
水平位置 0~0.7 m 传播时间 40 ns	无	缺陷边界反射波 (同相轴 8)	无
水平位置 0~1.3 m 传播时间 50~55 ns	基础右下角反射波 (同相轴 5、6)	无	基础右下角反射波 (同相轴 5、6)
水平位置 0.5~1.3 m 传播时间 55~60 ns	无	无	缺陷边界反射波 (同相轴 9)
水平位置 0.5~1.5 m 传播时间 62~70 ns	基础左下角反射波 (同相轴 7)	基础左下角反射波 (同相轴 7)	无

通过以上 3 个正演模型的分析可以发现,利用探地雷达探测桥梁基础的缺陷病害时,通过观察基础下界面产生的反射波,从图 2b 和图 4b 的对比中是可以提取出效果较为明显的有用信息的;但同时也应该注意到图 2b 和图 5b 的相似度其实是很高的,很难提取到有用信息。实际情况中,我们并不知道病害出现在那一侧,因此需要分 2 次对桥梁基础进行探测。假设桥梁基础出现如图 4a 所示的

病害,即桥梁基础的右下角出现缺陷。第一次探测发射天线在基础的左边,接收天线在基础的右边,得到如图 4b 所示的探测结果;第二次探测发射天线在基础的右边,接收天线在基础的左边,这样得到的探测结果实际上是与图 5b 相同的。比较图 4b 和图 5b 可以看出,两次探测结果实际上是有非常明显的差异的,这样虽然图 2b 和图 5b 十分相似,我们反而可以用图 5b 来完成与图 4b 的对比,并分析出地下

桥梁基础的缺陷情况。

### 2.3 裂缝型桥基础的正演模拟及分析

桥梁基础不仅容易受地质作用影响而出现残缺,也容易在剪应力作用下发生破裂出现裂缝。裂缝中介质设为空气,横截面如图 6a 所示,其中裂缝宽度为 0.02 m。考虑到图 6a 中裂缝的角度,若采用之前发射天线与接收天线不同侧的探测方法,可能

接收不到有用信号。因此重新布置测线,采用发射天线与接收天线在桥墩同一侧的 Common-source 法进行数值模拟。

图 6a 是当桥梁出现裂缝时的模型,正演时的测线布置方式与图 3 中的相同,其中 O 表示发射天线,G1~G4 表示接收天线。图 6b 所示为裂缝型桥梁基础的正演结果。

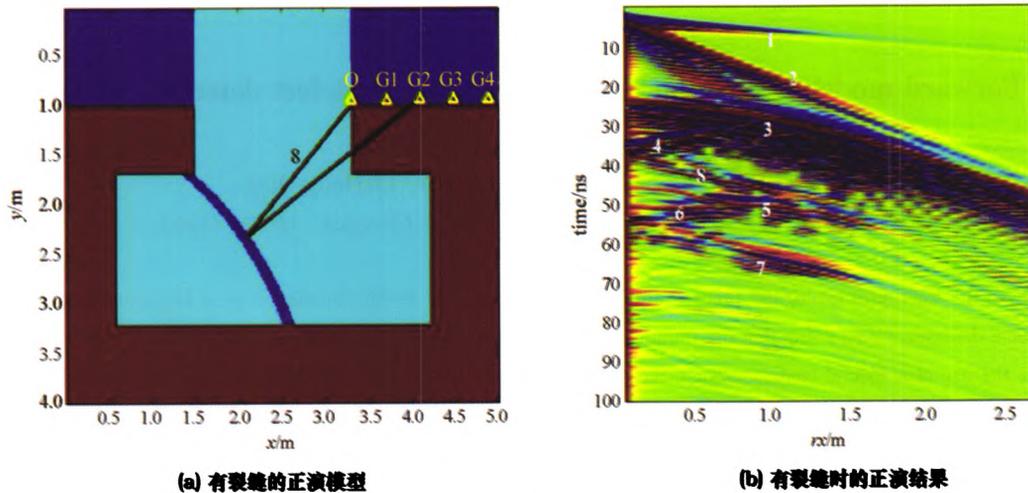


图 6 桥梁基础出现裂缝时的正演模型及结果

对比图 3 和图 6 可以发现,同相轴 1~7 大致相同,而图 6b 多生成了一个同相轴 8,异常出现在水平位置 0.2~1.2 m、传播时间 38~42 ns 处。可以判断出同相轴 8 是电磁波在裂缝处产生的反射波,如图 6a 中折线 8 所示,同时也注意到由于裂缝的宽度较小,低频信号可能对这种略显细微的结构不敏感,导致同相轴 8 所携带的信息多为高频信息,因此同相轴 8 的宽度较窄,而且强度也相对较弱;但在图 6b 中足以据此判断出桥梁基础出现裂缝的信息。在实际工作中,当桥梁基础出现类似图 6 所示的裂缝时,也可以利用探地雷达 Common-source 法测量出桥梁基础中出现的裂缝。

### 3 结语

以上运用 2 种 Common-source 探测方式对正常模型、桥梁基础缺陷模型、剪应力破坏模型进行了数值模拟,通过分析剖面图的异常波形的分布以及各道的电场波形图的差异,来判定桥梁基础及其病害出现的精确方位。通过对病害模型与正常模型所得正演结果进行比较,可以看到在桥梁出现病害的区域产生了较为明显的异常信号,证明在探测桥梁基础病害方面,探地雷达是切实可行的有效探测方法。但要想将该方法运用于实际,还需要更多的理论研

究和实际经验为将来的探测工作提供依据。

### 参考文献:

- [1] Daniels D. ERA technology's surface penetrating Radar[J]. Structural Survey, 1994, 12(4): 21-23.
- [2] Peters L, Daniels J, Young J. Ground penetrating radar as a subsurface environmental sensing Tool[J]. Proceedings Of The IEEE, 1994, 82(12): 1802-1821.
- [3] Shaw P, Bergstrom J. In-situ testing of reinforced concrete structures using Stress waves and high-frequency ground Penetrating radar[J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2000, 42(7): 454-457.
- [4] Ivashov S, Makarenkov V, Masterkov A, et al. Concrete floor inspection with help of subsurface rada[C]//Proceedings of SPIE-The international Society for Optical Engineering, 2000.
- [5] Grote K, Hubbard S, Yrubln. GPR monitoring of volumetric water content in soil applied to highway construction and maintenance [J]. The Leading Edge, 2005.
- [6] Pitt J. Use of impulse radar as a method for the non-destructive testing of concrete slabs[J]. Building Research & Information, 1992, 20(3): 152-156.
- [7] Scott M, Rezaizadeh A, Moore M. Phenomenology study of HEMES GPR technology for detection and identification of common bridge deck features[A]; Field Tests[C], 2001.
- [8] 曾昭发,刘四新,王者江,等.探地雷达方法原理及应用[M].北京:科学出版社,2006.
- [9] 夏才初,潘国荣.土木工程检测技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.

- [10] 吴新漩.混凝土无损检测技术手册[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [11] 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,2005.
- [12] 潘海结.探地雷达技术在桥梁结构无损检测中的应用研究[N].华东公路,2012,(1):49-51.
- [13] 吴刚.探地雷达技术在桥梁桩基底部岩溶的探测应用[N].科技创新导报,2009,(6):68-69.
- [14] 郭士礼,蔡建超,张学强.探地雷达检测桥梁隐藏病害方法研究[J].地球物理学进展,2012,27(4):1812-1821.
- [15] 丁亮,陈璐,孙焯.基于的混凝土无损检测方法[J].黑龙江大学自然科学学报,2013,30(6):819-826.
- [16] 肖都,李文杰,郭鹏.基于的隧道衬砌检测数值模拟及应用[J].物探与化探,2015,39(4):855-859.
- [17] Giannopoulos A. Modelling ground penetrating radar by GprMax [J]. Construction & Building Materials, 2005, 19(19):755-762.

## Forward modeling on shallow bridge foundation defect detection by GPR

WU Yan-Qi, LIU Si-Xin, FU Lei, LI Hong-Qing

(College of Geo-exploration Sci & Tech, Jilin University, Changchun 130061, China)

**Abstract:** Due to the long-term geological process and external factors, the bridge foundation as a key component of bridge always tends to get some diseases. Considering that the traditional common-offset method cannot detect bridge foundation defect very well, this paper proposes the use of a special common-source method to detect the bridge foundation defect. The forward modeling of the bridge foundation detection is realized by GprMax. The differences can be found easily by comparing the result of normal bridge foundation and that of defective bridge foundation. The result obtained by the authors is helpful to identifying the defective bridge foundation, which proves that GPR is an effective method for detecting the defect of bridge foundation.

**Key words:** GPR; shallow bridge foundation defect; GprMax; forward modeling; defect detection

(本文编辑:沈效群)