

# 探地雷达技术在道路路基病害探测中的应用

谢昭晖<sup>1,2</sup>, 李金铭<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 北京市勘察设计研究院, 北京 100038)

**[摘要]** 文章首先简要叙述探地雷达的工作方法和技术特点, 介绍了探地雷达图像的分析处理过程(编辑标记、地形高程改正、距离修正、去除干扰信号和进行数字信号处理等), 重点研究了道路路基存在较大空洞和不规则孔洞、地层软弱区、地层松散区、雨水或者地下水入侵路基层、路基产生沉陷、断层或裂缝等主要病害的探地雷达图像特征。文章还列举了两个应用工程实例, 并论述了探地雷达在道路路基病害探测中应用的可行性和优越性。

**[关键词]** 探地雷达 路基质量 病害图像 探测

**[中图分类号]** P631.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2007)05-0092-04

## 0 前言

随着国家对道路交通等基础设施建设的投入加大, 近几年我国道路建设规模和速度都达到世界第一。一方面我国高等级公路建设突飞猛进, 高速公路的通车里程已跃居世界第二, 另一方面, 城市道路建设也日新月异, 仅北京每年新修或改造道路就达50多条。然而由于道路建设工期安排不合理、施工质量欠佳、道路沿线地质条件复杂、公路选线不合理等多种原因, 道路路面或路基发生病害的路段也大范围产生, 因此道路路基质量检测越来越受到建设方、监理方和设计人员的重视。传统探测道路路基病害的方法主要是钻孔或开挖, 即在路面上钻孔取芯进行探测, 该法最大的优点是直观, 但其缺点也很明显: ①对路面具有一定的破坏性; ②只能以点代面、检测精度较低, 无法准确确定病害的形态和分布范围, 不能全面评价路基质量; ③检测速度慢, 周期长, 费时费力。而用探地雷达技术对道路路基病害进行探测则具备传统方法无法实现的优质高效的特点, 如: ①不破坏路面; ②具有很高的分辨率, 检测质量可靠; ③快速移动、快速采样和实时显示等, 工作效率高。

自20世纪90中期开始, 国内外工程技术人员在利用探地雷达技术对道路路基质量检测领域进行了一些研究探索, 主要包括沥青层厚度检测、公路基

层和路基质量检测 and 路基病害(路基下沉、翻浆、孔洞、软弱体、裂缝等)检测等<sup>[1,2,5,8,11]</sup>。其中杨天春等人在用探地雷达检测道路厚度结构的同时, 还将探地雷达的道路厚度检测技术与常规的钻孔取芯方法进行对比分析<sup>[10]</sup>。李大心、王惠濂等人进行了从探测理论、探测方法到图像资料解释等较为系统的应用研究<sup>[3,6,7,9]</sup>。近年来, 我们利用先进的探地雷达技术对道路路基病害的探测进行了进行一些研究和实践, 取得了很好的检测效果。

## 1 工作方法和技术

探地雷达通过各种频率的天线向地下发射十几MHz~几千MHz的高频电磁波。根据要探测的对象和深度选择不同的天线或天线组合: 如果探测深处目标体, 通常使用频率较低的天线; 如果需要探测浅处目标体, 通常使用频率较高的天线, 以获得很高的分辨率。理论研究表明, 探地雷达的垂直分辨率可以达到 $\lambda/4$  ( $\lambda$ 为电磁波在地层中传播的波长)<sup>[4,5]</sup>。例如, 当地层电磁波速 $v=0.1\text{m/ns}$  (相对介电常数 $\epsilon=9$ )时, 400MHz天线的子波波长 $\lambda=0.25\text{m}$ , 可分辨的最薄地层的厚度为0.06m, 如果采用900MHz天线探测, 则可分辨的最薄地层的厚度为3cm, 所以我们不仅可以利用900MHz以上高频雷达天线来探测公路路面沥青层的厚度, 而且也可以将低于100MHz的雷达天线来探测路基岩土层的

**[收稿日期]** 2007-04-02; **[修订日期]** 2007-05-10。

**[第一作者简介]** 谢昭晖(1965年—), 男, 1987年毕业于原武汉地质学院, 获学士学位, 在读博士研究生, 教授级高工, 现主要从事岩土工程勘察、工程物探和地基检测研究应用工作。

结构、路基病害,进行公路路基质量的检测。

在道路路基病害检测中一般使用100~900MHz的屏蔽天线,但在探测埋深较大(大于20m)的溶洞或地下采空区时,则常常使用十几~几十MHz的棍状组合天线(MLF)。雷达测线布设一般沿公路路面进行,线距和点距要视工程性质和探测对象的几何形态而定。实际探测中根据现场测试信号质量,合理选择时窗、增益的大小和叠加次数,以消除各种电磁干扰,获得较好的测试效果。

## 2 雷达图像的处理与成果解释

### 2.1 道路路基结构与主要病害表现

道路的结构从上到下一般分为面层(厚度约15cm)、基层(厚度约30cm)、垫层(厚度约25cm)和路基。公路路基往往由于人类地下作业活动(采矿、开挖地铁等)、路基下面存在不良地质构造、地质病害、地基土软弱、回填土压实度不够、承载力不足、地下管线渗漏、地下水入侵等原因导致路基土质松散、地层产生过量下沉,并逐步形成脱空、空洞和裂缝等路基病害。公路路面在车辆荷载的反复作用下会逐渐损坏,导致路面开裂、翻浆甚至失稳而发生坍塌、沉陷。

### 2.2 探地雷达图像的分析处理过程

野外采集获得的雷达图像在室内一般进行下列处理,编辑标记、调整水平比例、进行地形高程修正和距离修正。有时需消除水平系统噪声、多次波、衍射或高频噪声干扰,必要时采用一些数字处理技术:如增益调整、颜色变换、组合数字滤波、反褶积、希尔伯特变换、偏移、静校正和多种数学计算功能(如:加、减、开方、对数...等)。数字滤波又分有限脉冲响应滤波(FIR)和无限脉冲响应滤波(IIR)。常用的是有限脉冲响应滤波(FIR)技术,以获得明显直观的探地雷达检测图像,然后结合道路路基的工程地质结构和施工特点进行雷达探测结果解释。

### 2.3 道路路基结构和病害的雷达图像特征分析

我们知道,对于非磁性物质,电磁波的反射特性仅仅与介质的介电常数有关,反射系数的大小取决于界面上下各层的介电常数的差异。由于公路及路基大多数为层状结构,所以探地雷达反射波图像的特征表现为明显的层状介质的反射波特性,但当结构层或路基损坏时,图像中连续的层状反射波出现扭曲、变形。路基中的地层松散区、空洞、脱空等病害在雷达图像中也有明显的反射信号,主要路基病害的图像特征分述如下:①地层松散区的图像特征

为没有明显的路基层状结构反射,反射波形杂乱、反射信号强弱不均等;②较大的空洞表现为较明显的洞穴型双曲线反射波组,有的空洞会产生绕射波,而不规则空洞的形态则各异;③当雨水或者地下水沿着裂缝侵入到路基的某层时,使得其含水量明显增多,由于水的相对介电常数为81,故该层与其上下地层的介电常数的差异会增大,此时的雷达图像可见明显的高含水性反射波的特点;④当路基岩土产生沉陷时,沉陷带与周围地层产生错动,形成断层或裂缝,在雷达图像中表现为明显的反射同相轴不连续,出现错位或断开。图1是北京地铁5号线某已知土层空洞的探地雷达图像,从图像上看,空洞反射波与周围土层差别十分明显,可以准确解释出空洞的分布范围和形态特征。

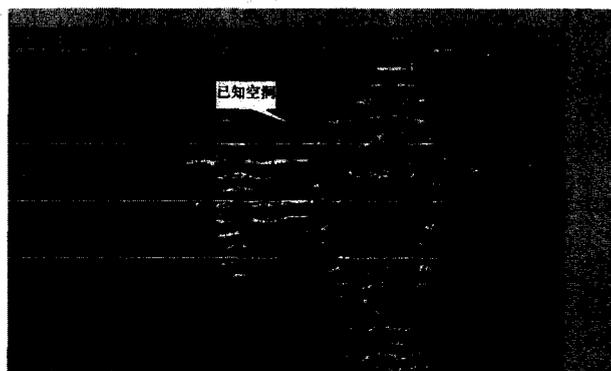


图1 已知空洞的探地雷达图像  
(空洞顶距地面0.8m,洞宽约2.6m,高度约5.8m)

## 3 探测工程实例

### 3.1 G108国道K125~K129病害路段

G108国道K125~K129路段位于北京房山区蒲洼乡东村和芦子水村,K125~K129路段中的K125+400~500,K125+600~800,K127+000~220,K128+400~600等四处路段路基病害高度发育,自20世纪80年代后期以来,多次发生了大面积垂向和侧向变形。据初步测量,路基最大沉陷深度已达4m,路基沿坡向的侧向变形达2m,发生变形的路段共有3段,累计长约1km。在每年雨季期间,路基的沉陷、变形活动尤为强烈,在沉陷、变形最严重的路段(K125+400~700),路基两侧山体地面发育了大量的地裂缝,并沿山坡方向存在推移趋势,如不及时采取有效措施,将严重影响108国道的畅通和行车安全。

受北京市公路局委托,我们于2000年7月对该

路段路基地质病害进行工程地质调查,以查明形成病害路段的地质构造及产生灾害的主要原因,并提出初步的防治对策。探测该段病害公路时采用了100M、400M 屏蔽天线和 MLF 低频组合天线。

屏蔽天线采用连续采样测量方式,低频组合天线采用点测多次叠加的工作方式,以便查明路基下较深部地层的构造。图2是 K127 + 192 ~ 207 段雷达探测路基形态剖面图;图3是 K128 + 436 ~ 444 段雷达探测路基形态剖面图。

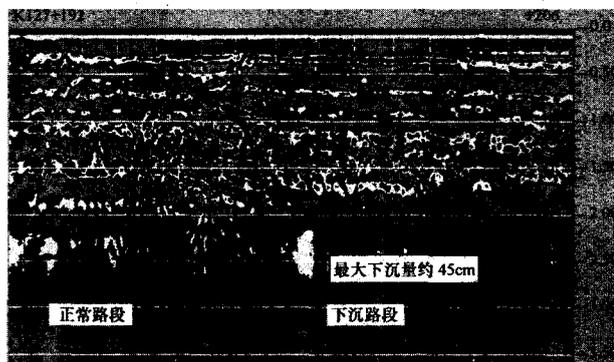


图2 K127 + 192 ~ 207 段雷达探测剖面图

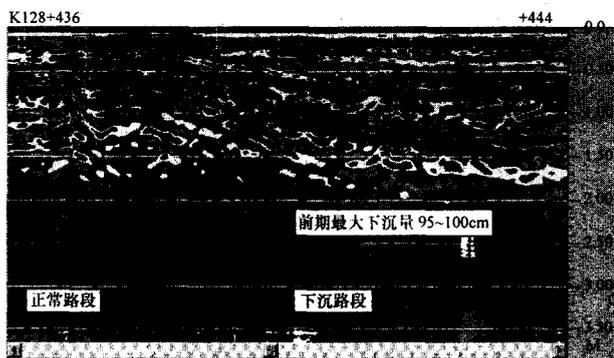


图3 K128 + 436 ~ 444 段雷达探测剖面图

从图2可以看出,路基填土从上到下可分为4~5层,在该路段中的 K127 + 192 ~ 195 为正常路段,而 K127 + 195 以后的路基则逐渐出现明显下沉,下沉最大的一层,沉降量达到45cm,见图中两黑箭头所标明。下沉路段可以清楚看到下沉-回填-下沉-回填的多次反复过程。

从图3可以看出,在该路段中的 K128 + 438 之前为正常路段,K128 + 438 之后路基明显开始下沉,且下沉量越来越大。路基填土从上到下可分为3个明显的下沉标志层,最上面的标志层(最新的一次下沉)下沉达35~40cm,最早标志层,即下沉最大的一层,沉降量已达到95~100cm,第二下沉标志层的下沉量为80cm。分别见图中三组箭头所标明。该

下沉路段下沉-回填-下沉-回填的多次反复过程也十分清楚。

G108 国道 K127 + 000 ~ 220, K128 + 400 ~ 600 路段的探测结果与北京市公路局反映的下沉量完全相符,可见探地雷达探测道路路基病害的分辨率和探测精度都很高。

### 3.2 北清路软弱路基段病害探测

北清路西起北安河乡,东至八达岭高速公路辛庄桥立交,全长16.1km,是北京市三条新景观大道之一。该路沿线途经温泉乡中心镇、永丰科技园、航天城、中关村生命科学园、北安河乡等城镇和开发区。北清路的主路为上三下六车道,宽度32m,两侧为辅路,主路与辅路之间为14m宽的绿化带,在辅路及绿化带不同深度内铺设了各种地下管线。

主路路面结构组合自上而下为:改性沥青碎石混合料(SMA),厚4cm;密级配粗粒式沥青混凝土,厚5cm;开级配粗粒式沥青混凝土,厚6cm;石灰粉煤灰砂砾混合料,厚30cm;天然级配砂砾,厚30cm;总厚度为75cm。

北清路软弱路基路段(K3 + 480 ~ 700, K6 + 618 ~ 770)沿线通过的地带原分布有大量的鱼塘、水坑、水渠及农田地等,建成后不久部分路面即出现不同程度的开裂、下沉变形现象。由于路基下面主要是回填土,容易产生病害。经分析回填土方压实度不够是造成路基下沉、病害发育的主要原因,故需采用探地雷达查明病害路段回填土层的剖面形态和分布范围,为病害治理创造条件。

图4是在 K3 + 600 附近 IV 剖面探测回填管沟的雷达图像,图5是在 K6 + 682 附近探测的雷达剖面图像。两剖面测试时均采用200MHz 天线。

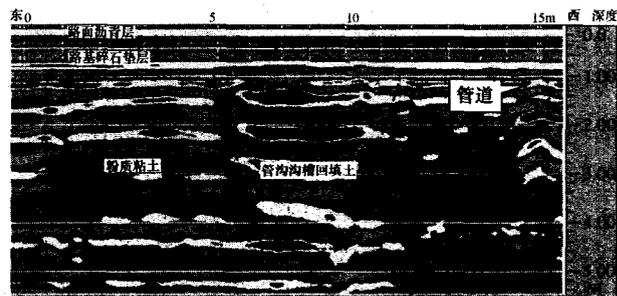


图4 K3 + 600 附近 IV 剖面雷达探测成果图

图4所示的IV剖面,东西方向测试,长度约15m,雷达图像清晰地反映出明挖市政管线的位置(东起5~11m 范围为管沟)、深度及形态。图像中市政管沟处路面沥青层、路基碎石垫层及以下的人

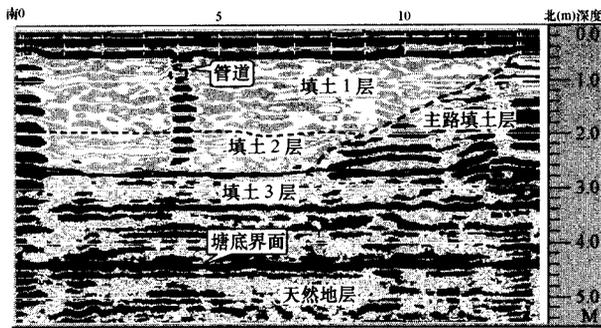


图5 K6+682附近雷达探测成果图

工填土和天然土层界面清楚,而且中部都存在明显下弯,说明在回填后由于回填土层的再压缩又产生了明显的下沉,沟槽内、外探地雷达反射界面明显不连续,土质(孔隙比或含水量)差异较大。此外雷达图像清晰地表明剖面西端有一条管线,埋深约1.2m。

图5所示的K6+682附近探测剖面为南北方向,该路段的路基为在鱼塘上填土方筑成,雷达图像表明,剖面在深2.6~2.7m处存在明显反射界面,为上部回填土层底面反射。在该层内靠主路一侧存在倾斜反射面,推测为主路与绿地不同回填土质的接触带。在上部填土反射面以下清楚可见代表原鱼塘底面的连续反射界面。该界面埋深约4.4~4.5m之间,与原地形图中的标高相符。塘底界面以下即为天然地层。在剖面南侧4m处埋设有市政管道,埋深约0.7m。

#### 4 结语

由上述分析和列举的应用实例可以看出,公路

路基的各种病害在探地雷达图像中具有明显特征和规律。采用探地雷达技术对公路路基质量进行质量检测,不仅无须破坏公路路面、实现真正意义的“无损”检测,而且能够快速准确地圈定公路路基病害范围,查找出公路产生病害的根本原因,为公路病害的治理和修复提供依据。因此,探地雷达技术是进行公路路基质量检测的最理想的地球物理方法。

在本项探测技术研究中,陈昌彦、钟和、白朝旭、陈义军和吴学方等同志共同参与,在此一并表示衷心的感谢。

#### [参考文献]

- [1] T Saarenketo, T Scullion. Road evaluation with ground penetrating radar, *Journal of Applied Geophysics* [J]. 2000, 43(2-4): 119-138.
- [2] 肖都. 探地雷达在城市公路结构检测中的应用[J]. *地质与勘探*, 2005, 41(增刊).
- [3] 李大心. 探地雷达方法及应用[M]. 北京:地质出版社, 1994.
- [4] 谢昭晖. 不同地下目标体的探地雷达图像特征研究[J]. *地质与勘探*, 2005, 41(增刊)
- [5] 谢昭晖, 白朝旭, 陈义军. 探地雷达在公路路基质量检测中的应用[J]. *勘察科学技术*, 2005, 5.
- [6] 李大心. 公路工程质量的探地雷达检测技术[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1996, 21(6).
- [7] 探地雷达专辑[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1993, 18(3).
- [8] 薛建, 田钢, 谭笑平, 等. 地质雷达在高速公路质量检测中的应用[J]. *世界地质*, 1997, 16(2): 100-104.
- [9] 邓世坤. 探地雷达用于深圳湾软基处理工程中的质量检测[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(1): 133-135.
- [10] 杨天春, 吕绍林, 王齐仁. 探地雷达检测道路厚度结构的应用现状及进展[J]. *物探与化探*, 2003, 27(1).
- [11] 赵永辉, 万明浩, 吴健生, 等. 高速公路软弱路基施工质量综合检测研究[J]. *物探与化探*, 2002, 26(1).

## APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR TECHNIQUE IN THE DETECTION OF ROADBED DISEASE

XIE Zhao-hui<sup>1,2</sup>, LI Jin-ming<sup>1</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083; 2. Beijing Geotechnical Institute, Beijing 100038)

**Abstract:** Exploring methods and technical characters of Ground Penetrating Radar (GPR) are simply narrated. Process of image analysis and manipulation, including editing marks, revising terrain, modifying distances, eliminating interferential signals and dealing with digital signals are then introduced. It is emphasized that Geo-radar images of disease roadbeds with bigger or irregular cavity, weak or loose stratum, invaded by rain and groundwater, and affected by sink, fault or slit, are discussed. Two application project examples are illustrated to show availability and superiority of GPR in the detection of roadbed diseases.

**Key words:** ground penetrating radar, quality of roadbed, disease geo-radar image, detection