

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.007

# 道路碎石垫层异常缺陷的探地雷达响应特征

魏奎烨<sup>1</sup>, 宋新江<sup>1</sup>, 周松<sup>1</sup>, 张宏兵<sup>2</sup>

(1. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 采用探地雷达技术探测碎石垫层异常, 研究碎石垫层脱落、碎石垫层层间具有密实-疏松界面、碎石垫层厚度变化及碎石垫层由松散块石充填4种异常的探地雷达响应特征。时域剖面评价、钻探资料验证、典型单道波形时域及频谱对比分析表明: 碎石垫层脱落表现为同相轴的缺失, 碎石垫层层间弱反射的反相性, 谱能量分布在整个频率范围, 且在550~800 MHz出现较强信号; 碎石垫层层间存在密实-疏松界面表现为碎石垫层层间存在同相轴, 谱能量集中在中低频区, 能量峰较多; 碎石垫层厚度变化表现为上下界面反射波时间差的大小(同相轴的上凸或下拉); 碎石垫层由松散块石充填表现为强振幅复合波(同相轴杂乱, 具有小绕射弧), 谱能量峰叠加严重, 峰值较大。

**关键词:** 探地雷达响应特征; 碎石垫层异常; 垫层脱落; 密实-疏松界面; 松散块石充填; 混凝土道路

**中图分类号:** U416.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2015)02-0133-06

## Characteristics of ground-penetrating radar response to abnormal defects of road gravel cushion

WEI Kuiye<sup>1</sup>, SONG Xinjiang<sup>1</sup>, ZHOU Song<sup>1</sup>, ZHANG Hongbing<sup>2</sup>

(1. Anhui and Huaihe River Water Resources Institute, Bengbu 233000, China;

2. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Ground-penetrating radar (GPR) technology was used to detect the abnormality of a gravel cushion, and the characteristics of GPR response to four abnormal defects, including gravel cushion shedding, gravel cushions with dense and loose interfaces, a gravel cushion with varied thickness, and a gravel cushion filled with loose rock, were studied. Through temporal profile evaluation, drilling data validation, and comparative analysis of a typical single-channel time-domain waveform and its frequency spectrum, the results show the following: the typical single-channel waveform for gravel cushion shedding is characterized by an absence of the event on the profile, the reverse phase of the weak reflection of the interlayer, spectral energy distributed over the whole frequency range, and strong signals appearing in the 550 to 800 MHz bands; the typical single-channel waveform for the gravel cushions with dense and loose interfaces presents the event on the profile, spectrum energy that concentrates in the low-frequency area, and more energy peaks; the typical single-channel waveform for a gravel cushion with varied thickness shows the time difference in reflected waves between the upper and lower interfaces (upward convex event or pull-down event); the typical single-channel waveform for a gravel cushion filled with loose rock shows strong-amplitude complex waves (a random event with a diffraction fringe), significant energy peak superposition, and a higher peak.

**Key words:** response characteristics of GPR; abnormality of gravel cushion; cushion shedding; dense and loose interface; loose rock filling; concrete road

探地雷达(GPR)技术是近几十年发展起来的一种新的工程检测手段,其在工程应用中具有抗干扰、效率高等优点,已在道路、水利工程等检测中广泛应用<sup>[1-6]</sup>。由于道路多具有层状结构,因此以实际发射的脉冲

子波为基础,采用复介电常数模拟探地雷达脉冲波在道路中传播的反射曲线<sup>[7]</sup>,从反射曲线中提取时间、介电常数等参数,进而检测路面结构层的厚度<sup>[8-9]</sup>。由于介质的复杂性,需要进一步研究介质的介电常数、相位系数、吸收系数对反射曲线的影响<sup>[10]</sup>;同时探讨了不同天线频率、横向电磁波速度不均匀、接触式天线垂直颠簸对基层厚度检测精度的影响<sup>[11]</sup>。道路路基常见的病害有路基下存在孔洞、地层软弱区、路基沉陷、断层、裂缝等,部分学者通过理论分析、数值模拟、物理模拟及现场试验等手段研究了病害的图像特征<sup>[12-16]</sup>。

笔者根据某工程实测资料,通过时域剖面评价、典型单道波形及典型单道波形振幅谱对比,分析路面下碎石垫层脱落、碎石垫层层间具有密实-疏松界面、碎石垫层厚度变化及碎石垫层由松散块石充填4种异常情况下探地雷达的响应特征,并对异常处进行开挖,以验证探地雷达用于上述4种异常缺陷探测结果的可靠性。

1 探地雷达探测原理

探地雷达利用超高频(1 MHz~10 GHz)电磁波来探测地下介质的分布,宽频带短脉冲电磁波通过发射天线向地下辐射,由于不同介质的物理特性(主要指介电常数、导电率和磁导率)存在差异,当电磁波穿过地下各地层或某一目标体时,若界面两侧电磁波物性参数不同,电磁波将在界面上发生反射和折射。反射回地面的电磁波脉冲被接收天线接收,接收信号中的电磁波波形、电磁场强度及传播路径均受介质的介电性质、几何形态的影响,即接收信号中包含地下地层和目标体的信息。因此,通过分析接收到的反射波走时、幅度及相位等波形参数,可对地下地层和目标体的性状作出一定程度的判断。

本文研究的混凝土道路分为3层:混凝土面层、碎石垫层、路基。混凝土面层厚度约为16~17 cm,碎石垫层厚度为16~45 cm,路基厚度变化范围较大。探地雷达用于道路探测的原理如图1所示,设电磁波在混凝土面层及碎石垫层中的传播速度分别为 $v_1$ 、 $v_2$ ,相对介电常数分别为 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ ,则反射脉冲时差为

$$\Delta t_i = \frac{2H_i}{v_i} = \frac{2H_i \sqrt{\epsilon_i}}{c} \quad (i = 1, 2) \tag{1}$$

式中: $H_1$ 、 $H_2$ ——混凝土面层厚度、碎石垫层厚度; $c$ ——电磁波在真空中的传播速度。

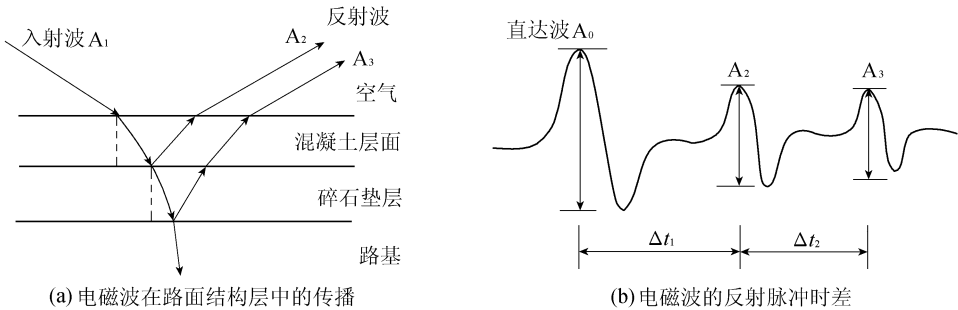


图1 GPR 道路探测原理  
Fig. 1 Principle of road detection with GPR

2 碎石垫层异常的探地雷达响应特征

根据探地雷达实测资料,重点分析路面下碎石垫层脱落、碎石垫层层间具有密实-疏松界面、碎石垫层厚度变化及碎石垫层由松散块石充填4种异常情况下探地雷达的响应特征。

2.1 碎石垫层异常实测资料分析

探测采用剖面法,选用400 MHz 频率的天线,时窗为35 ns,IIR 滤波器最低截止频率为100 MHz、最高截止频率为800 MHz。

图2中5 ns、10 ns 处具有可追索的同相轴,根据路面结构,判断5 ns 处同相轴为混凝土面层与碎石垫层界面的反射波,10 ns 处为碎石垫层与路基层界面的反射波。10 ns 处的同相轴在3.5~4.5 m 段缺失,推测该段下部碎石垫层脱落,对该处进行现场验证,验证点位置如图2所示。图2中1~2 m 同相轴较杂乱,经勘查后判断为疏松土体;3 m、4.8 m 处的绕射信号由地下管道产生。

图3中5 ns、10 ns 处可追索同相轴的判断结果同上。7 ns 处同相轴连续性较差,局部存在中断,在7.2 m 处具有错断现象,该同相轴的振幅在10~12 m 显著增加,推测为碎石垫层密实-疏松界面反射波同相轴,该

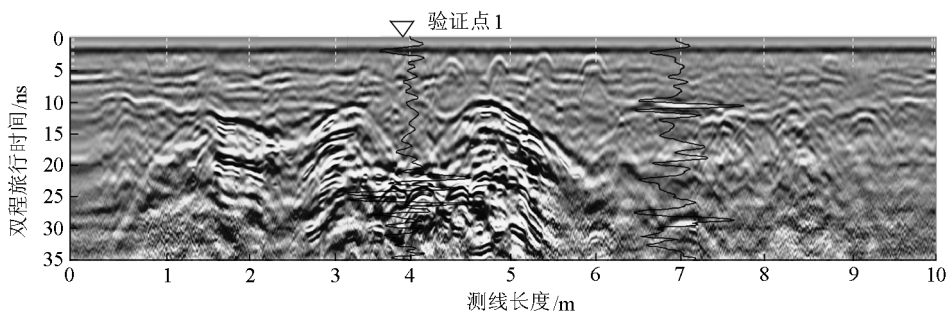


图 2 碎石垫层脱落 400 MHz 探地雷达剖面图

Fig. 2 400-MHz GPR profile for gravel cushion shedding

异常的验证点位置如图 3 所示。3 m 处的绕射信号由埋地电缆产生;7 ~ 13 m 段 13 ns 以下具有明显的小绕射弧,推测由粒径较大的骨料产生。

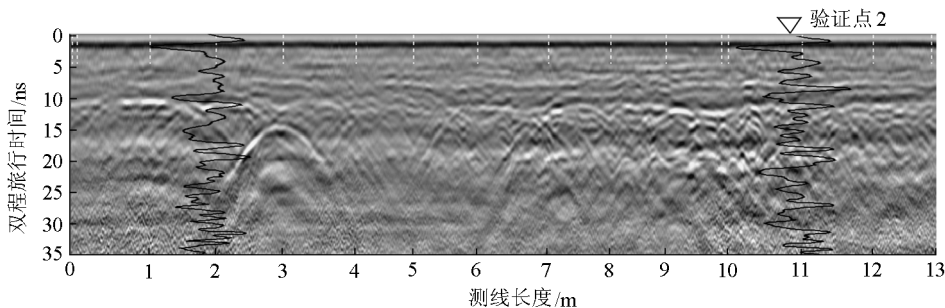


图 3 碎石垫层密实-疏松界面 400 MHz 探地雷达剖面图

Fig. 3 400-MHz GPR profile for gravel cushion with dense and loose interface

图 4 中 3 ~ 6 ns 处具有可追索的复合波同相轴,该复合波在 10.2 ~ 12.8 m 处分开,其中,复合波中的第 1 个反射脉冲(旅行时短)近似水平,第 2 个反射脉冲明显下拉。推测第 2 个反射脉冲为混凝土面层与碎石垫层界面,第 2 个反射脉冲为碎石垫层与路基层界面。11 ~ 12 m、10 ~ 20 ns 之间同相轴杂乱,且具有明显的小绕射弧,推测 10.2 ~ 12.8 m 碎石垫层厚度增加,且底部有颗粒较大骨料,验证点位置如图 4 所示。5.6 m 处绕射弧判断为埋地电缆,7.2 ~ 8.0 m 明显小绕射弧段推测由颗粒较大的骨料产生。

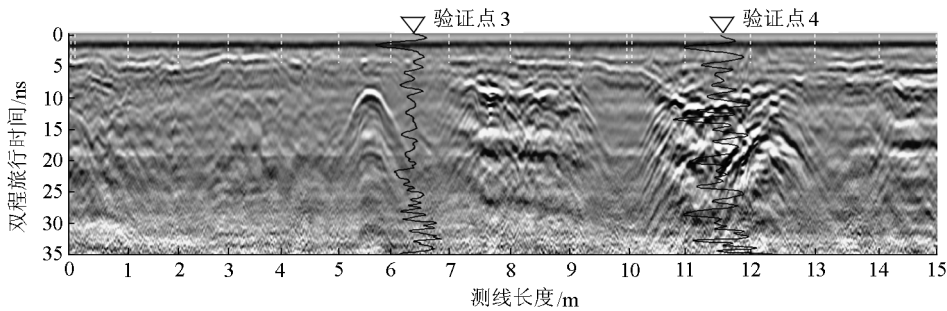


图 4 碎石垫层厚度增加及松散块石充填 400 MHz 探地雷达剖面图

Fig. 4 400-MHz GPR profile for gravel cushion with increased thickness and filled with loose rock

2.2 碎石垫层异常验证

为了明确探地雷达剖面中碎石垫层异常推测部位的具体情况,对各异常部位进行了验证。图 2 中验证点位于测线 4 m 处;图 3 中验证点位于 11 m 处;图 4 中验证点 3、验证点 4 分别位于 6.5 m、11.5 m 处。

验证点 1 的具体情况如图 5 所示,塌陷区呈不规则圆形,直径约 3.5 m,深度约 1.5 m,该区域内碎石垫层与混凝土面层完全脱落。

验证点 2 的具体情况如图 6 所示,混凝土面层厚 17 cm,碎石垫层厚约 39 cm。通过洛阳铲取土,发现碎石垫层上面约 14 cm 黏结致密;下面 25 cm 比较松散,其中夹有粒径较大碎石块及卵石。碎石垫层下土体为褐灰色,呈软塑状态。

验证点3的具体情况如图7所示(由于钻机取芯带水,因此图中碎石垫层含水量高),混凝土面层厚17 cm,碎石垫层厚约6.5 cm,碎石垫层下土体为褐灰色,呈软塑状态。与图8中碎石垫层相比,厚度明显偏小。

验证点4的具体情况如图8所示,混凝土面层厚17 cm;碎石垫层上面23 cm黏结致密,碎石垫层下面21 cm由粒径较大碎石块充填,呈松散状,黏结性较差;垫层下土体位于路面下61 cm处,土体为褐灰色,呈软塑状态。

通过验证,可以确定上述4种碎石垫层异常分别为碎石垫层脱落、碎石垫层层间具有密实-疏松界面、碎石垫层厚度变化及碎石垫层由松散块石充填。



图5 碎石垫层脱落

Fig. 5 Photograph of gravel cushion shedding



图6 碎石垫层密实-疏松界面

Fig. 6 Photograph of gravel cushion with dense and loose interface



图7 碎石垫层厚度较薄

Fig. 7 Photograph of thin gravel cushion



图8 碎石垫层厚度较大及松散块石充填

Fig. 8 Photograph of thick gravel cushion filled with loose rock

2.3 碎石垫层异常响应特征分析

通过提取异常处典型单道波形进一步研究碎石垫层上述4种异常探地雷达响应特征,如图9~11所示。

图9(a)中碎石垫层脱落的典型单道波形取自图2中4 m处,未脱落的典型单道波形取自7 m处。从图9可以看出,7 m处单道波形在10 ns处具有明显的强振幅负反射,而4 m处单道波形在10 ns反射很微弱;5~10 ns,4 m与7 m典型单道波形在相位上相反;10 ns以后的强振幅反射为目标体的反射。

由图9(b)可以看出,未脱落的典型单道波形谱能量主要集中在中低频区(小于550 MHz),而脱落的典型单道波形谱能量分布在整个频率范围,尤其是在550~800 MHz出现了较强的信号。

图10(a)中无密实-疏松界面的典型单道波形取自图3中2 m处,有密实-疏松界面的典型单道波形取自

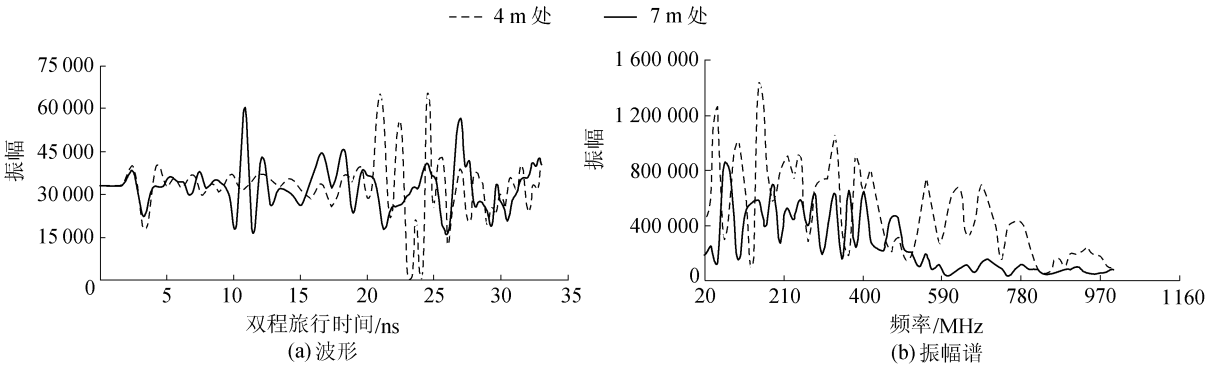


图9 碎石垫层脱落、未脱落典型单道波形及振幅谱对比

Fig. 9 Comparison of typical single-channel waveforms and amplitude spectra of gravel cushions with and without shedding

11 m 处。从图 11 可以看出,11 m 处典型单道波形在 8.5 ns 的振幅为 44 297,而 2 m 处典型单道波形在该处的振幅值为 34 995,且二者相位相反;5 ns 处二者相位相同,11 m 单道波形振幅值比 2 m 单道波形振幅值略大;11 ns 二者基本上重合。根据路面结构及验证情况,判断 5 ns、11 ns 分别为混凝土面层与碎石垫层界面反射、碎石垫层与路基界面反射,8.5 ns 处的强振幅负反射由密实-疏松界面产生。

从图 10(b)可以看出,2 m、11 m 处典型单道波形谱能量均集中在中低频区(小于 590 MHz),但 11 m 处的能量峰数多于 2 m 处的能量峰数。

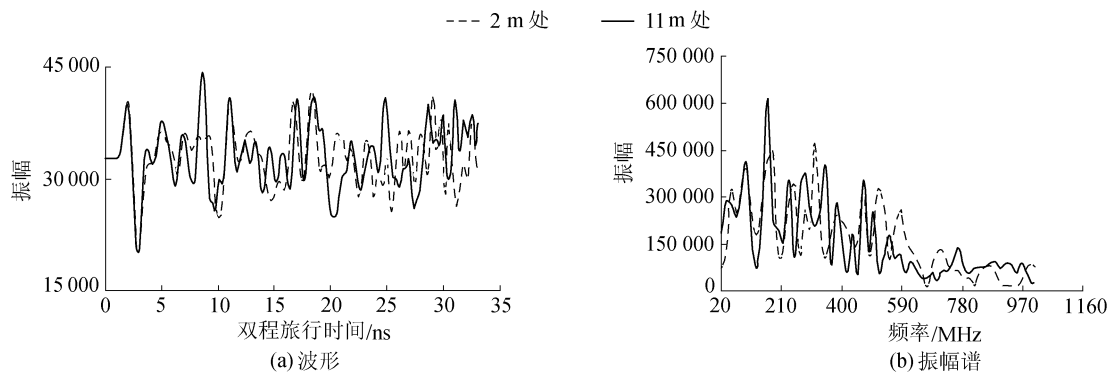


图 10 碎石垫层密实-疏松界面典型单道波形及振幅谱对比

Fig. 10 Comparison of typical single-channel waveforms and amplitude spectra of typical single-channel waveforms of gravel cushions with and without dense and loose interface

图 11(a)中典型单道波形分别为图 4 中 6.5 m、11.5 m 处的波形。6.5 m 处典型单道波形在 4.71 ns、6.15 ns 相互叠加为复合波,验证结果表明,二者分别为混凝土面层与碎石垫层界面、碎石垫层与路基层界面的反射波,二者双程旅行时间差为 1.44 ns。11.5 m 处典型单道波形 5.53 ns 为正反射波,11.07 ns 为负反射波,验证结果表明二者分别为混凝土面层与碎石垫层界面、碎石垫层与路基层界面的反射波,二者双程旅行时间差为 5.54 ns,大于 6.5 m 处的双程旅行时间差;在 11.07 ns 以后出现强振幅复合波,验证结果表明该处为松散块石的响应。

由图 11(b)可以看出,6.5 m、11.5 m 处典型单道波形谱能量均集中在中低频区(小于 590 MHz),但 11.5 m 处的能量峰值叠加较严重,且具有较大的幅度值。

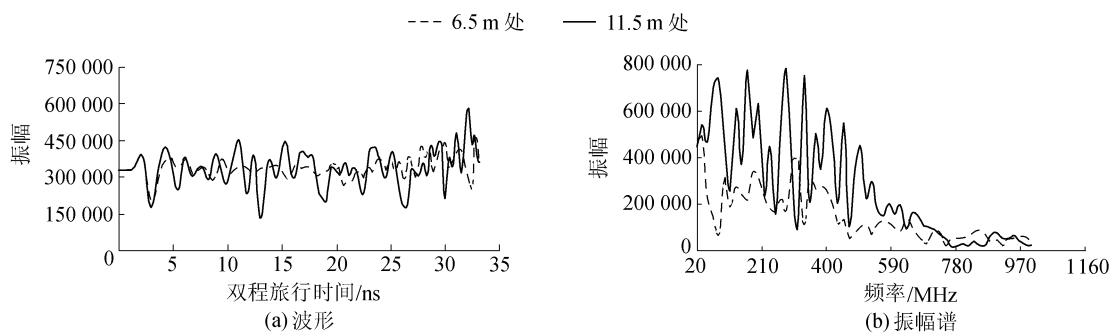


图 11 碎石垫层加厚及松散块石充填典型单道波形及振幅谱对比

Fig. 11 Comparison of typical single-channel waveforms and amplitude spectra of gravel cushions with increased thickness and filled with loose rock

3 结 论

a. 碎石垫层脱落典型单道波形表现为强反射脉冲的缺失,与未脱落部位的典型单道波形相比,二者在碎石垫层层间的弱反射相位相反,在剖面图上主要表现为同相轴的缺失;振幅谱中,脱落处的谱能量分布在整个频率范围,在 550 ~ 800 MHz 出现了较强信号。

b. 存在密实-疏松界面的典型单道波形表现为碎石垫层层间具有强振幅负反射,在剖面图上表现为碎石垫层层间具有同相轴;振幅谱中谱能量集中在中低频区(小于 590 MHz),且具有较多能量峰。

c. 碎石垫层厚度变化典型单道波形表现为上下界面反射脉冲时间差的变化,在剖面图上表现为同相轴的下拉或上凸现象。

d. 碎石垫层下由松散块石充填典型单道波形表现为强振幅的复合波,在剖面图上表现为同相轴杂乱,且具有明显的小绕射弧。振幅谱中谱能量集中在中低频区(小于 590 MHz),能量峰值叠加严重,且具有较大峰值。

#### 参考文献:

- [1] 刘敦文,徐国元,黄仁东,等. 探地雷达在公路建设中的应用研究[J]. 公路交通科技,2004,21(5):33-35. (LIU Dunwen, XU Guoyuan, HUANG Rendong, et al. Ground penetrating radar survey in highway construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(5):33-35. (in Chinese))
- [2] 张娟,台电仓,赵述曾,等. 探地雷达在水泥混凝土路面改造中的应用[J]. 公路交通技术,2007(2):29-32. (ZHANG Juan, TAI Diancang, ZHAO Shuzeng, et al. Application of ground penetrating radar in cement concrete pavement retrofitting[J]. Technology of Highway and Transport, 2007(2):29-32. (in Chinese))
- [3] 曹雪山,蔡亮,郑长江. 探地雷达在高等级公路质量检测和管理中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2002,30(3):68-71. (CAO Xueshan, CAI Liang, ZHENG Changjiang. Application of ground penetrating radar to quality inspection and management of high-grade roads[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30(3):68-71. (in Chinese))
- [4] 周正东,马良筠. 堤坝隐患检测试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2002,30(2):90-92. (ZHOU Zhengdong, MA Liangyun. Experimental study on dam anomaly detection[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2002, 30(2):90-92. (in Chinese))
- [5] 郭高轩,吴吉春. 应用 GPR 获取多孔介质水力参数研究进展[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(1):18-23. (GUO Gaoxuan, WU Jichun. Advances in estimation of hydrogeological parameters of porous media with ground penetrating radar[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(1):18-23. (in Chinese))
- [6] 徐鹏,吴中,张业伟. 信号变换处理方法在公路观测中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2008,36(1):125-128. (XU Peng, WU Zhong, ZHANG Yewei. Application of signal transform method to highway observation[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(1):125-128. (in Chinese))
- [7] 沈飏,石庆华,孙忠良. 道路铺砌层中探地雷达波传播的正演模拟及应用[J]. 石油地球物理勘探,1997,32(增刊1):135-140. (SHENG Biao, SHI Qinghua, SUN Zhongliang. Wave transmission and application of paving layer in the forward modeling of GPR[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32(Sup1):135-140. (in Chinese))
- [8] 赵燕峰,娄海. 道路探地雷达在高速公路检测技术中的应用[J]. 河南师范大学学报:自然科学版,2004,32(2):98-100. (ZHAO Yanfeng, LOU Hai. The applications and test technology with exploring land radar on expressway[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science, 2004, 32(2):98-100. (in Chinese))
- [9] 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):79-82. (YANG Tianchun, LYU Shaolin, WANG Qiren. The application and development of GPR in detection of pavement thickness and highway structures[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 27(1):79-82. (in Chinese))
- [10] 徐升才,刘峰. 探地雷达在城市道路厚度检测中的研究与应用[J]. 华东交通大学学报,2000,17(4):24-28. (XU Shengcai, LIU Feng. The research and application of GPR to detect thickness in city road[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2000, 17(4):24-28. (in Chinese))
- [11] 赵昕,黄琪,李海滨. 路面基层厚度探地雷达检测效果分析[J]. 路基工程,2009(5):81-82. (ZHAO Xin, HUANG QI, LI Haibin. Analysis on thickness of pavement base GPR detection[J]. Subgrade Engineering, 2009(5):81-82. (in Chinese))
- [12] 范跃武,李修忠,白兴盈,等. 探地雷达检测公路结构层裂缝实用方法研究[J]. 公路交通科技,2007,24(6):1-7. (FAN Yuewu, LI Xiuzhong, BAI Xingying, et al. Study on highway structure layer crack detection by ground penetrating radar[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(6):1-7. (in Chinese))
- [13] 谢昭晖,李金铭. 探地雷达技术在道路路基病害探测中的应用[J]. 地质与勘探,2007,43(5):92-95. (XIE Zhaohui, LI Jinming. Application of ground penetrating radar technique in the detection of roadbed disease[J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(5):92-95. (in Chinese))
- [14] 姜洪,王选仓. 探地雷达对路面板脱空现象检测时的信号分析与处理[J]. 公路交通科技,2010,27(1):22-27. (JIANG Hong, WANG Xuancang. Signal analysis and processing for detecting void phenomenon under concrete pavement by using ground penetrating radar[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(1):22-27. (in Chinese))
- [15] 贾辉,陈昌彦,白朝旭,等. 城市道路病害检测中常见干扰源探地雷达图像特征分析[J]. 工程勘察,2012(11):86-92. (JIA Hui, CHEN Changyan, BAI Zhaoxu, et al. Common interference GPR image and its characteristic analysis in city road disease detection[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012(11):86-92. (in Chinese))
- [16] 曾海,张东长. 地质雷达在混凝土路面板脱空检测中的应用探讨[J]. 公路交通技术,2005(3):72-74. (ZENG Hai, ZHANG Dongchang. Discussion on inspecting the hollow in concrete plane road using GPR[J]. Technology of Highway and Transport, 2005(3):72-74. (in Chinese))