

利用地质雷达方法进行重庆宝顶山-北山快速通道 工程隧道灌浆检测

蔡金生, 罗 利, 李岩松

(中国五冶集团有限公司, 成都 610063)

摘要: 传统的地质雷达检测方法主要用于衬砌空洞及衬砌钢筋位置检测,对隧道灌浆状态及深度无法准确判断,不能适用于隧道衬砌后灌浆质量及深度的检测,为此,研究对传统地质雷达检测方法进行改进,通过灌浆孔内增设信号反射装置,在不影响灌浆施工的情况下,增强了雷达反射波,进而识别灌浆状态及深度,达到了对灌浆质量检测的目的。通过在宝顶山隧道及龙岗隧道中的应用实例,检测结果证实了改进后的地质雷达探测方法可以对隧道衬砌及围岩灌浆状态进行判断,从而及时采取相应措施进行返工处理。

关键词: 地质雷达探测; 隧洞灌浆; 信号处理; 缺陷处理

中图分类号: U456.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)02-0111-06

随着我国经济的高速发展,高速铁路、公路建设都迎来了快速发展时期,而我国山多地广,为了提高行车车速,缩短运营距离,隧道建设必不可少。在城市周边山区修建隧道时,由于周边及山顶上分布着房屋、村落、高压电桩等构筑物,因而对隧道开挖变形有极高的要求,隧道开挖变形需要依靠喷射混凝土、注浆等措施进行控制。隧道注浆质量主要是由注浆钻孔深度和注浆量控制,但是在施工过程中传统工艺、操作方法落后导致灌浆孔钻孔深度不满足施工要求,无法保证隧道注浆质量,为此隧道灌浆深度及质量的检测显得尤为重要。现代工程领域存在多种类型的检测技术,如雷达检测技术、超声波检测技术、遥测技术等,每种检测技术具有不同的特点,需要针对工程具体情况,选取最佳的检测技术^[1]。胡富杭等^[2]采用基于公共中心点(common mid-point, CMP)的二维面波法对道路路基隐伏空洞等病害进行探测,获得了良好的效果。针对传统隧道监控量测方法中存在的测量效率低、精度有限以及需布置监控量测点等问题。李勇兵等^[3]研究了三维激光扫描技术在隧道变形监测及检测中的应用;卢斌英^[4]通过地质雷达法对顶管施工

区域高速公路路基检测,成功排除道路存在的安全隐患。地质雷达技术是一种对地下或物体内不可见的目标体或界面进行定位的电磁波技术^[5],其作为隧道施工质量无损检测的一项新技术,具有连续、高效、高精度等优点^[6],因而被广泛应用于隧道初支、二衬及隧洞围岩灌浆检测。吕春林^[7]将雷达检测技术运用到隧道初期支护检测中,选择了有效的雷达检测频率,实现了隧道初期支护的有效检测。刘和文等^[8]、蔡荣喜^[9]、李昊东^[10]利用地质雷达实现对隧道衬砌质量的高精度检测。曹绮雯^[11]利用地质雷达技术对东江水源输水隧洞灌浆质量开展检测研究,得出地质雷达检测衬砌缺陷灌浆质量是有效的。宝顶山-北山快速通道工程地处重庆大足山区,其新建的宝顶山、龙岗隧道穿越宝顶山山体,地质条件复杂,隧址区局部存在危岩、采空塌陷及节理裂隙发育等不良地质现象,隧道开挖洞顶拱部易出现掉块、坍塌。为此需在隧道施工过程中进行围岩预注浆加固、衬砌注浆等措施。为此,引入地质雷达探测技术,并对隧道灌浆检测工艺进行改良,进而分析改良后的地质雷达检测效果,研究该检测方法的可靠性,以此为类似隧道施工提供参考。

收稿日期: 2023-11-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42277461);中国中冶重大研发项目(中冶科技[2023]5号-5)

作者简介: 蔡金生(1985—),男,四川广安人,高级工程师,研究方向为土木建筑及市政技术;通信作者罗利(1978—),男,四川宜宾人,高级工程师,研究方向为市政与公路工程施工技术;李岩松(1989—),男,青海西宁人,高级工程师,博士,研究方向为隧道与地下工程施工技术。

1 地质雷达隧道检测方法和技术

1.1 地质雷达系统组成

地质雷达(ground penetrating radar, GPR)作为一种先进的无损测手段,又被称为透视雷达或者脉冲雷达。作为一种宽频带高频电磁波探测介质分布的非破坏性的探测仪器,其利用电磁波信号在物体内部传播时电磁波的运动特点进行探测。地质雷达系统主要由控制单元、发射机、接收机等主要元件及电源、光缆、通信电缆、触发盒、测量轮等辅助元件组成(图1)。

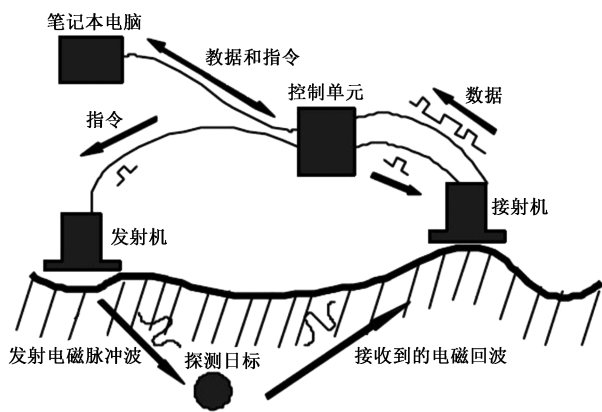


图1 雷达系统组成示意图

1.2 雷达探测灌浆方法

由于地质雷达是通过介质界面介电常数的差异来识别地层的,而混凝土与钢筋、混凝土与衬砌空洞之间介电常数差异大,灌浆岩体与未灌浆岩体介电常数差异小,故地质雷达主要用于衬砌空洞及衬砌钢筋位置检测,对灌浆状态及深度无法准确判断。为此,对传统地质雷达检测方法进行改进,在灌浆孔内增设信号反射装置,以便在不影响灌浆施工的情况下,增强雷达反射波,进而识别灌浆深度,达到对灌浆深度进行检测的目的(图2)。

地质雷达利用宽带高频时域电磁脉冲波的反射探测目标体,由于不同的介质不仅会引起电磁波的反射,而且还会使电磁波发生衰减和相位等特征的变化,隧道衬砌为层状结构,均为非磁性介质,各层介质的介电常数有明显的差异,它们之间能形成良好的电磁反射界面(图3)。

由于信号反射装置设置在灌浆孔的底部,从而增大了雷达反射波信号,收发天线朝围岩范围内发射电磁波,发射出的电磁波遇到信号反射装置产生反射,通过发射、接收电磁波之间的时间差和电磁波在岩层中的传播速度便可算出注浆状态及深度,从而判断灌浆孔钻情况是否满足要求。

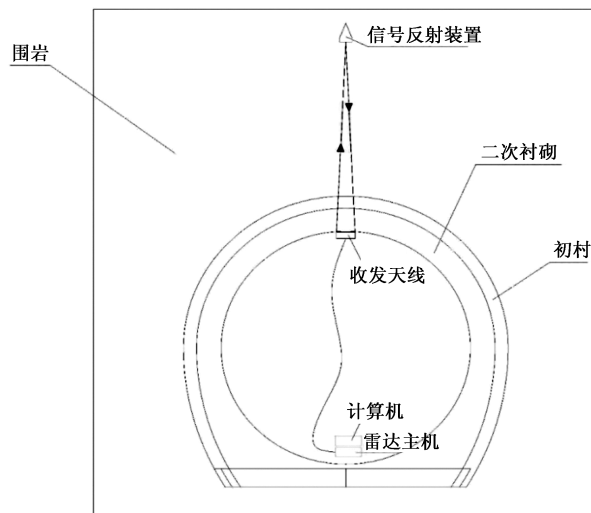


图2 隧洞灌浆深度的检测示意图

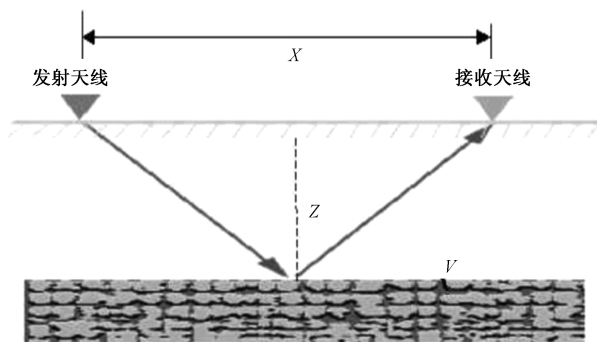


图3 反射探测示意图

目标体注浆深度计算公式为

$$t = \sqrt{4z^2 + x^2} / v \quad (1)$$

式中: t 为测得的时间值,ns; v 为地下介质中的波速,m/n; z 为反射体的深度,m; x 为两天线的距离,m。由式(1)求出反射体的深度是固定的, v 可以用宽角方式直接测量^[12]。雷达根据测得的雷达波走时,自动求出反射体的深度 z 和范围。

2 隧道灌浆检测技术

2.1 工艺流程

隧道灌浆检测工艺流程如下:钻孔→清孔→信号发射装置制作→金属反射锥制作和安装→隧道灌浆→封孔→现场地质雷达扫描→信号数据处理→不合格处复检→不合格补注浆。

2.2 信号反射装置制作与安装

信号反射装置采用金属钢管制作,如图4所示。锥尖制作完成后采用砂轮锯将锥尖与多余金属管切断分离,锥尖长度控制在20~30 cm。若灌浆孔中信号反射装置有脱落风险时,需在金属圆管外侧

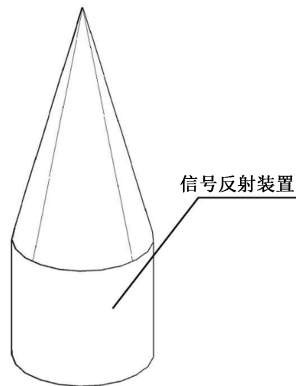


图4 信号反射装置

用可变形的软钢丝焊接金属“人”字卡扣,作用同膨胀螺丝,卡扣不妨碍信号反射装置安装,信号反射装置安装至指定深度后“人”字卡扣支撑于围岩侧壁,防止信号反射装置松脱掉落。

根据设计要求对注浆部位进行钻孔,每个注浆孔钻进完成后,采用钻机或者长杆将信号反射装置安装于注浆孔孔底。

2.3 隧道灌浆

隧道注浆浆液采用纯水泥浆,水灰比采用 2、1、0.8、0.5 四级。注浆固结体强度须达到 20 MPa,注浆压力控制在 0.3 MPa。

浆液在使用前过筛,灌浆液水灰比选择 2,浆液浓度遵循由稀到浓的原则逐级改变,浆液变换标准为:①灌浆压力保持不变而注入率持续减少,当注入率不变而压力持续升高时不得改变水灰比;②当一级注浆量达到 300 L 或者注浆时间持续 30 min 以上,而灌浆压力和注入率无明显改变时,可加浓一级水灰比。

2.4 注浆封孔

灌孔结束后,采用导管注浆法封孔,灌浆孔孔口涌水时采用全孔灌浆法封孔。全孔灌注水灰比为 0.5:1 的新鲜普通水泥浆液置换孔内稀浆或积水,灌浆压力为该孔的最大灌浆压力。

2.5 地质雷达探测

检测开始时间需在灌浆结束 7 d 后进行。检测开始前根据检测深度合理选择检测天线频率:电磁波频率越高,分辨率越高,精度也就越高,但相应探测深度越小,反之亦然。因此,在满足探测深度的情况下,尽量选取频率较高的天线以提高探测精度。

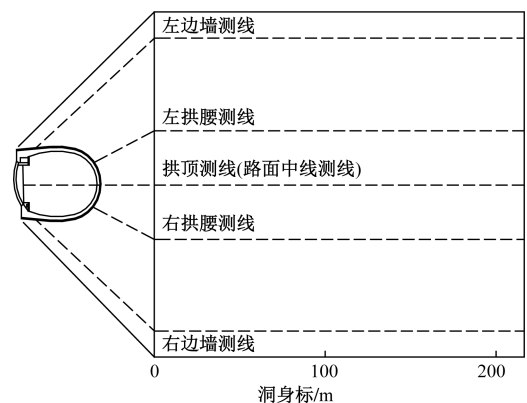
检测时将地质雷达天线紧贴衬砌,通过天线向隧道衬砌混凝土内发射高频宽带短脉冲电磁波,电磁波遇到具有不同介电特性的混凝土、围岩、金属

信号反射器界面时返回的波形会有不同,接收天线接收反射波并记录反射波的旅行时间和波形。当发射和接收天线沿物体表面逐点同步移动时,就能得到其内部介质的剖面图像(图 5)。

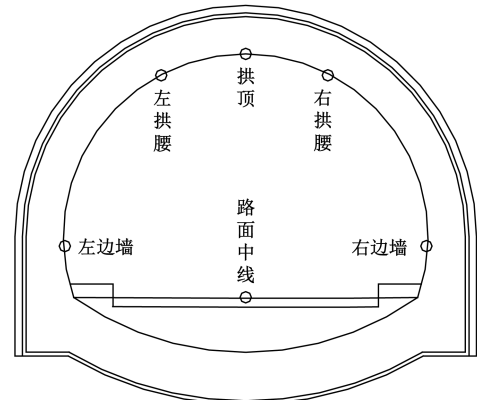
地质雷达检测工作根据隧道现场实际条件,沿隧道纵向布置 5 条测线(拱顶、左拱腰、右拱腰、左边墙、右边墙),灌浆后分析地质雷达图像变化特征,检测位置断面图如图 6 所示。



图5 地质雷达使用示意图



(a) 雷达测线纵断面布置



(b) 雷达测线横断面布置

图6 雷达测线布置

2.6 地质雷达信号处理

根据接收到波的旅行时间、幅度频率与波形变化资料,推断目标体的深度、形状等特征参数,再通过基于卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的隧道衬砌探地雷达图像自动识别软件对目标体进行快速准确的识别。

地质雷达的发射天线向检测处发射高频宽带短脉冲电磁波,电磁波遇到具有不同介电特性(介电常数 ϵ_r)的混凝土或围岩界面时有部分返回,接收天线接收反射波并记录反射波的旅行时间。由于地质雷达观测时电磁波以接近垂直角度入射到界面,发射和接收天线距离很小,且在地质雷达使用的频率范围内,通常认为电导率 $\sigma < \epsilon\omega$,故经简化反射系数 R 可简写为

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2)$$

式中: R 为反射系数; ϵ_{r1} 为介质1的介电常数; ϵ_{r2} 为介质2的介电常数。

当发射和接收天线沿物体表面移动时,就能得到其内部介质的剖面图像。根据接收到波的旅行时间、幅度频率及波形变化资料,可以推断介质的内部结构以及目标体的深度、形状等特征参数。

金属物对于电磁波属于全反射,当地层中存在金属物时,由于金属结构与水泥及均质结构对于电磁波反射不同,使得金属结构“可见”,如图7所示。

对采集到的电磁信号进行处理,具体为压制干扰信号,突出有效信号,提高信号信噪比,同时采用基于CNN的隧道衬砌探地雷达图像自动识别软件对处理后的图像进行目标体的快速识别。数据处理

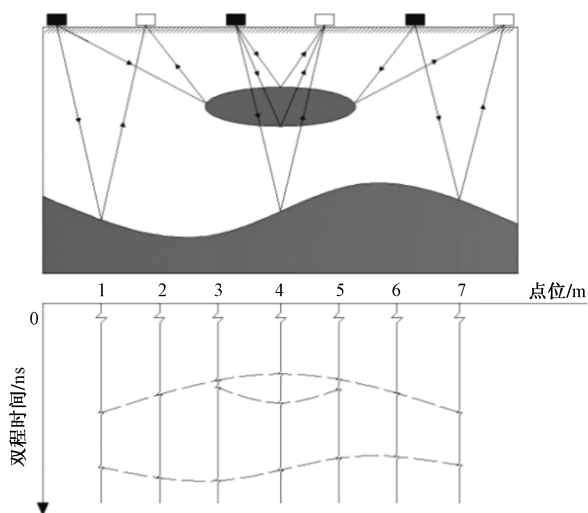


图7 检测结果与实际结构的对照

时遵循:能量先强后弱,频率先低后高的原则。在数据处理中依次进行数据输入、剔除坏道、剪切轨迹、背景剔除、奥姆斯比联合过滤、增益调节、x-interpolation处理、特殊情况下进行Migration处理,最后进行异常描述、图像输出及目标体的快速识别。处理好的信号如图8所示,对目标体的自动识别示意图如图9所示。

2.7 灌浆缺陷处理

当通过地质扫描图像发现灌浆深度不够、灌浆缺陷时,根据雷达测线行进速度及检测起点位置,判断大致缺陷位置,再据此进行复测,发现确有缺陷

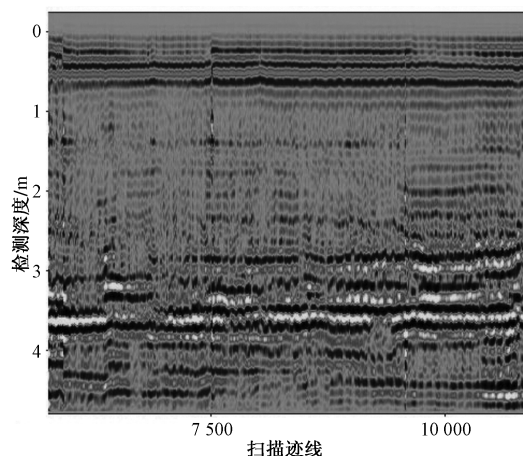


图8 处理后雷达图像

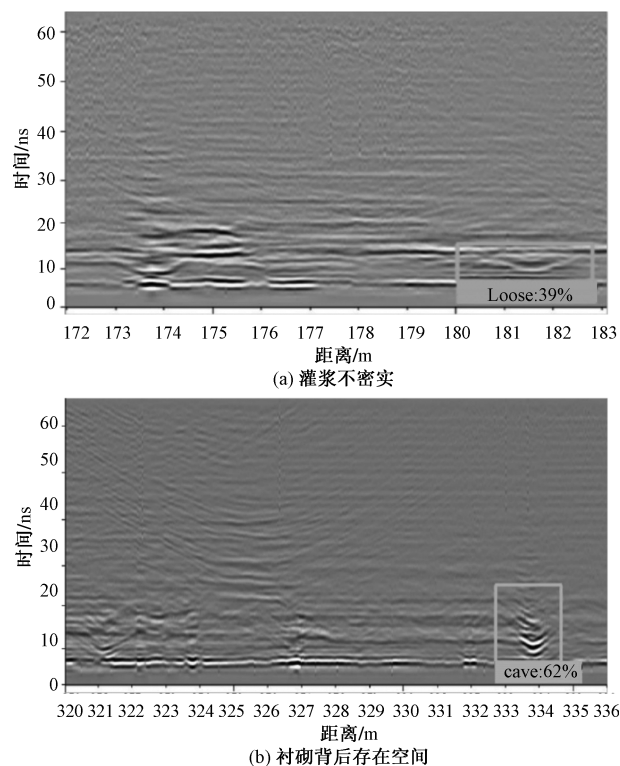


图9 目标体的快速识别示意图

时,可进一步采取钻孔复查。

对缺陷处可采用重新开孔注浆的方法进行补注浆。注浆前可对注浆孔深度采用探杆插入检查灌浆孔深度。灌浆完成后对补注浆处重新进行扫描检测,确定缺陷处二次注浆效果。

3 工程应用实例与检测结果

3.1 应用情况

宝顶山-北山快速通道工程位于重庆大足区,路线全长 7.058 km。项目共设隧道 2 座,其中宝棠隧道长 860 m,龙岗隧道长 1792.5 m。宝棠隧道左右洞间距约为 14.5~21.1 m,最大埋深约为 110 m,龙岗隧道左右洞间距约为 18.1~27.4 m,最大埋深约为 140 m。根据地质调绘成果及钻探成果,两座隧道节理裂隙局部一般发育,对隧道围岩稳定不利,隧道开挖时,围岩稳定性差。检测组于 2023 年 4 月,采用地质雷达仪圆满完成了对宝棠隧道、龙岗隧道衬砌及灌浆质量抽检工作。

宝棠隧道:左线 Z1K0+815—Z1K0+965,左线 Z1K1+310—Z1K1+510,右线 K0+880—K1+080,右线 K1+340—K1+540 段;

龙岗隧道:左线 Z2K5+120—Z2K5+320,左线 Z2K6+130—Z2K6+330,右线 K5+560—K5+760,右线 K6+210—K6+410 段;

使用仪器设备:RAMAC/GPR 地质雷达;

采集软件:RAMAC GroundVision V1。

根据《公路工程质量检验评定标准(第一册):土建工程》(JTG F80/1—2017)^[13]的规定,在本次隧道灌浆检测中布置 5 条测线(不含仰拱测线)(图 6)。天线中心频率为 500 MHz,测程为 15~30 ns;根据检测经验和现场隧道灌浆情况,确定本次介电常数取 12 F/m。

3.2 检测结果

本次检测每测线每 10 m 检测一点,计算合格率。从衬砌砌及围岩灌浆质量的检测结果来看,隧道衬砌砌及灌浆质量总体满足设计要求,但仍存在局部衬砌砌灌浆不密实、衬砌砌与初衬脱空等问题。具体检测结果如表 1 所示。

表 1 隧道衬砌砌灌浆检测情况汇总

隧道名称	检测点数	合格点数	合格率/%
宝棠隧道	105	98	93.3
龙岗隧道	146	135	92.5

检测结果显示,宝棠隧道、龙岗隧道衬砌砌及灌浆质量合格率均超过 92%。部分检测发现的问题如图 10 所示。

4 结论

本文基于项目实际状况,研究并讨论了隧道衬砌砌及围岩灌浆检测问题,选用有效雷达检测频率,

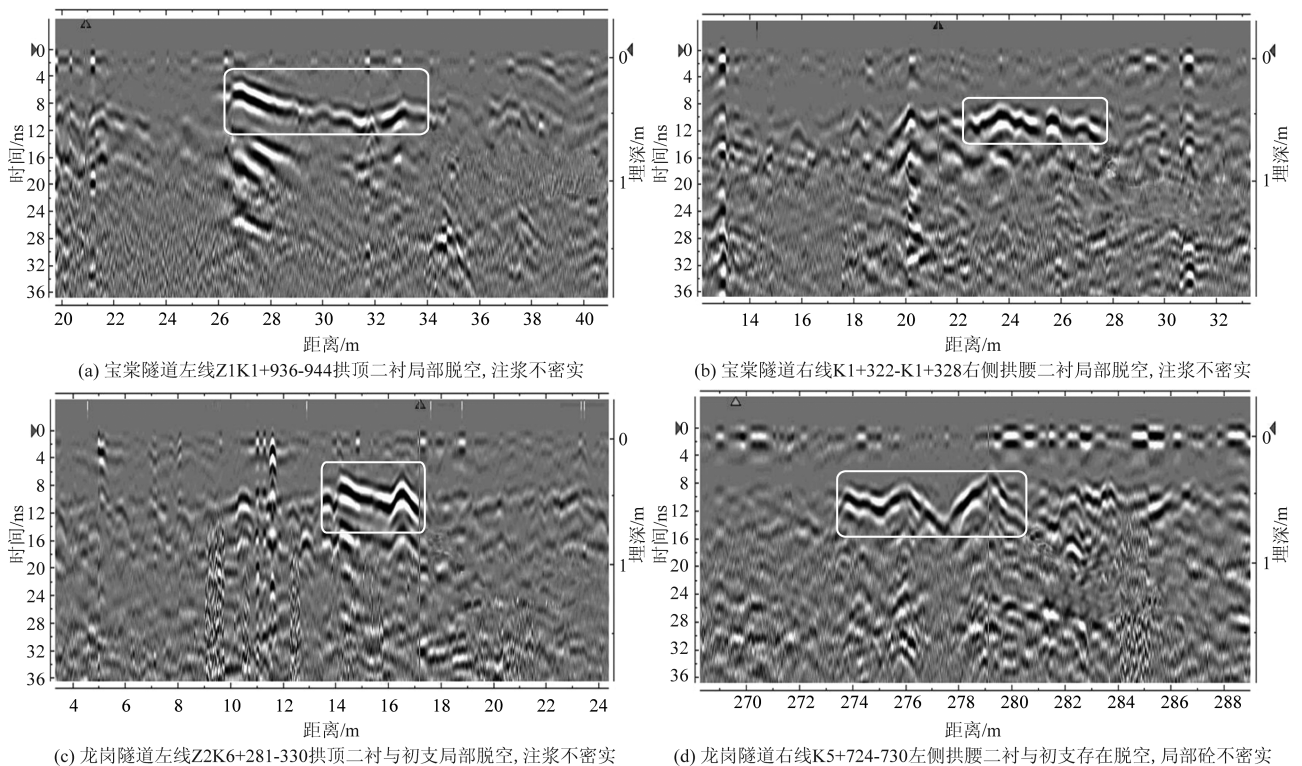


图 10 部分检测识别

确定合适隧道地质条件的介电常数及测线布置位置,局部改进地质雷达探测技术,实现了对隧道衬砌及灌浆质量问题的有效检测。结论如下。

(1)应用改进后的地质雷达探测方法可以对注浆后隧道衬砌及背后空腔灌浆状态进行判断,且效果良好。

(2)通过在灌浆孔内增设信号反射装置,可以在不影响灌浆施工的情况下,增强雷达反射波,进而识别隧道衬砌及围岩灌浆情况,达到对衬砌及围岩灌浆质量进行检测的目的。

(3)根据检测的灌浆质量即可判断灌浆孔钻孔深度是否满足要求,从而为返工处理提供依据。

本文为隧道围岩及衬砌注浆的雷达检测提供了新的思路,检测结果证实了探测方法的有效性和准确性,探测方法同样也适用于所有类似隧道的灌浆检测。

参考文献

- [1] 金超. 铁路隧道衬砌质量检测中地质雷达法的应用[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(6): 65-67.
- [2] 胡富杭, 张建智, 王平. 路基空洞二维面波响应数值模拟[J]. 科技和产业, 2021, 21(11): 301-306.
- [3] 李勇兵, 高成明, 马盈盈, 等. 三维激光扫描技术在隧道变形监测及检测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 5111-5117.
- [4] 卢斌炎. 沧榆高速顶管区地质雷达探测分析[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(8): 70-74.
- [5] 薄会申. 铁路隧道衬砌质量检测与评价地质雷达技术实用手册[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 7-8.
- [6] 吕凡. 探地雷达在隧道质量检测中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [7] 吕春林. 探地雷达检测技术在隧道初期支护检测中的应用[J]. 北方交通, 2023(6): 75-78.
- [8] 刘和文, 余湘娟, 高磊. 隧道衬砌雷达测试三维信息构建研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(33): 228-232.
- [9] 蔡荣喜. 地质雷达隧道衬砌混凝土检测精度的分析[J]. 中华建设, 2023(11): 150-155.
- [10] 李昊东. 基于地质雷达无损探测的隧道衬砌质量检测方法[J]. 交通建设与管理, 2023(3): 154-156.
- [11] 曹绮雯. 基于探地雷达技术的东江水源输水隧洞灌浆质量检测研究[J]. 水利技术监督, 2022(11): 35-40.
- [12] 杨建明. 新疆达坂隧洞灌注及灌浆质量地质雷达测试技术探析[J]. 水利规划与设计, 2012(1): 37-39.
- [13] JTG F80/1—2017, 公路工程质量检验评定标准(第一册): 土建工程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.

Using Ground Penetrating Radar Method for Grouting Inspection of the Baodingshan-Beishan Expressway Tunnel in Chongqing

CAI Jinsheng, LUO Li, LI Yansong

(China MCC5 Group Co. Ltd., Chengdu 610063, China)

Abstract: The traditional geological radar detection method is mainly used for detecting the position of lining cavities and lining steel bars. This method cannot accurately determine the status and depth of tunnel grouting, and is not suitable for detecting the quality and depth of grouting after tunnel lining. For this purpose, research was improved the traditional geological radar detection method by adding a signal reflection device in the grouting hole, which enhanced the radar reflection wave without affecting the grouting construction, thereby identifying the grouting status and depth, and achieving the purpose of grouting quality detection. It is verified through application examples in Baotang Tunnel and Longgang Tunnel that the improved geological radar detection method can judge the status of tunnel lining and surrounding rock grouting, and take corresponding measures for rework in a timely manner.

Keywords: ground penetrating radar detection; tunnel grouting; signal processing; defect handling