 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i5.10308

Application and Analysis of Ground Penetrating Radar Method in a Tunnel Project in Liaonigg Province

Peng Wang Haibo Zhu Jialu Yuan*

China Water Northeastern Investigation,Design and Research Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130021, China

Abstact

Based on an actual tunnel project in Liaoning Province, this study conducts a comprehensive analysis of the integrated application of ground-penetrating radar (GPRchnology for advanced geological forecasting during construction and structural health monitoring during operation. The paper systematically expounds on the propagation principles of GPR electromagnetic waves, the influence mechanism of dielectric propertyfferences on reflection signals,and typical radar image characteristics. Targeting key stages of tunnel construction, detailed data acquisition schemes and analysis methods are designed. The study verifies the abili efficiently and non-destructively identify variations in lining thickness, voids, cavities, and surrounding rock degradation. This provides reliable technical support for tunnel construction quality control and defect eaemonstrating significant engineering practical value.

Keywords

ground-penetrating radar; tunnel project; lining thickness; construction quality

探地雷达法在辽宁省某隧道工程中的应用及分析

王鹏 朱海波 袁嘉潞*

中水东北勘测设计研究有限责任公司，中国·吉林 长春 130021

摘 要

本研究依托辽宁省某实际隧道工程，采用探地雷达技术，开展隧道施工期超前地质预报与运营期结构健康状态检测的综合应用分析。文章中系统阐述探地雷达电磁波传播原理、介电特性差异对反射信号的影响机制，以及典型的雷达图像特征。针对隧道施工中的关键环节，详细设计了数据采集方案和数据分析，验证了探地雷达高效、无损识别衬砌厚度变异、脱空、空洞及围岩劣化的能力，为隧道施工质量控制与病害预警提供了可靠的技术支撑，具有显著的工程实用价值。

关键词

探地雷达；隧道工程；衬砌；施工质量

1 探地雷达法检测

探地雷达技术采用双天线结构，其中一根天线向地下辐射高频宽带电磁波，另一根接收经地层界面反射的回波信号。电磁波在介质中传播时，其行进路径、信号强度及波形形态均会受到介质电性特征与几何构造的直接影响，并相应产生规律性变化。利用电磁波传播过程中的上述特性，该方法结合对接收信号的双程时间、幅值变化及波形特征的综合解析，可反演出地下介质的空间展布与构造特征，属于一种基于宽频带电磁波的地下探测技术。探地雷达技术的理论基础源于电磁波传播规律，其高频电磁波在各类介质中的传播特性均可通过麦克斯韦方程组[1]，即

$$\begin{aligned} \Delta \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial \mathrm{t}} \\ \nabla \bullet B &= 0 \\ \nabla \bullet D &= \rho_V \end{aligned} \quad (1)$$

式中，E 为电场强度 (V/m)；H 为磁场强度 (A/m)；J 为电流密度 (A/m^2)；D 为电位移 (C/m^2)；B 为磁感应强度 (T)；ρ_v 为电荷密度 (C/m^3)。

探地雷达检测原理如图 1 所示：

2 案例分析

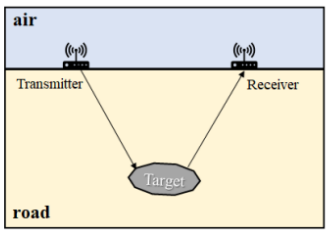
2.1 工区概况

本隧道呈东南西北向展布，进洞口里程桩号 K40+503，出洞口里程号 K41+210，隧道全长 707m，隧道分类属于中隧道。隧道平面线形位于曲线与直线段。纵断面线形 : 隧道纵坡为 -2.4%。路面横坡 : 双向 2% 横坡。初期

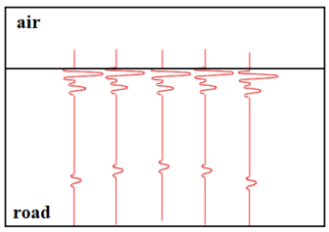
【作者简介】王鹏（1994–），男，中国吉林长春人，硕士，工程师，从事试验检测研究。

【通讯作者】袁嘉潞（2003–），男，中国吉林长春人，本科，从事试验检测研究。

支护结构厚度设计为 20cm。



(a) 探地雷达探测原理



(b)反射波信号

图 1 探地雷达原理图

2.2 设备参数

隧道掌子面的探测使用 100Mhz 的主频天线采集数据，采样频率 995MHz，采样点数为 512，天线间隔 1.0m, 采样间隔 0.1m。

初期支护检测的天线频率为 900MHz，采样点 512，采集时窗 20ns，自动迭加 10 次，距离触发探测方式，纵向探测时采样间隔为 1.00m, 有效检测深度为 1m，检测精度和深度可满足工程要求。

2.3 测线布设和采集方式

由于掌子面空间有限，在掌子面上分别沿水平方向和竖直方向各布 3 条测线，测线布置采用十字形组合，以保证探测的全面性。详见图 2.1 所示。

为了准确获取隧道喷层厚度，探明支护结构与围岩间的结合状态及可能存在的脱空或不密实现象，在隧道拱顶、两侧拱腰和边墙部位分别布设了五条纵向检测测线，详见图 2.2 所示。

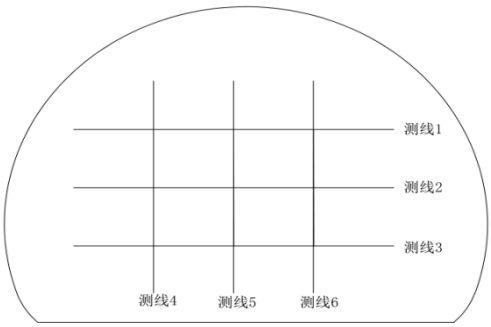


图 2.1 掌子面测线布置示意图

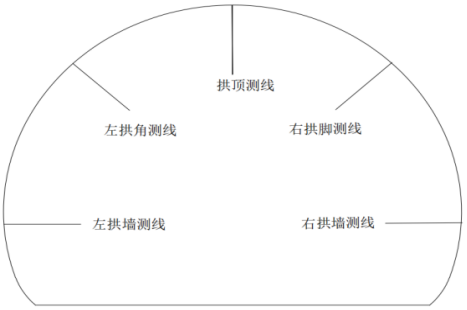


图 2.2 侧墙测线布置示意图

2.4 原始数据

为直观展示探地雷达在隧道工程中的实际探测效果，本节选取了掌子面超前地质预报与初期支护结构检测中具有代表性的原始雷达图像。图 2.3 为 K40+556 至 K40+586 段掌子面的原始探测图像，反映了掌子面前方岩体在未经处理前的电磁波反射特征，图像中可见不同深度处的反射界面及可能的异常区域。图 2.4 为 K40+870 至 K40+820 段初期支护结构的原始雷达图像，展示了衬砌内部及其与围岩接触面的原始反射信号分布情况。通过对上述原始数据的进一步处理与分析，可有效识别衬砌厚度、脱空区域及围岩变化等信息。

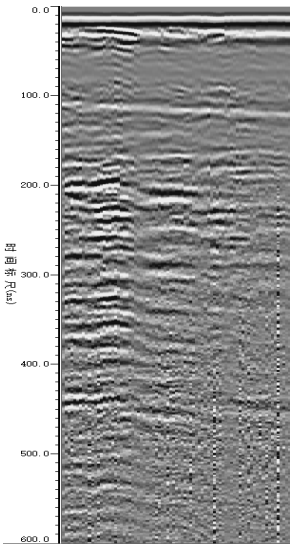


图 2.3 K40+556–K40+586 掌子面原始图像

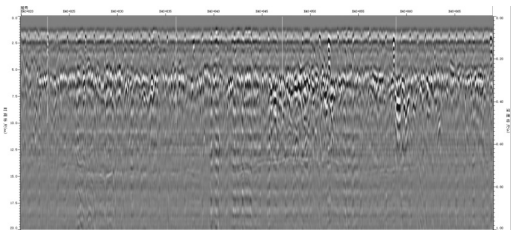


图 2.4 K40+870–K40+820 初期支护原始图像

3 数据分析与处理

3.1 雷达波形分析

在常规雷达探测过程中，雷达波由发射天线发出后，

接收天线首先接收到的是在空气中传播的直达波，随后为沿介质表面传播的表面波，最后抵达的是喷混凝土层与围岩接触界面的反射波。该反射信号的强弱主要取决于喷混凝土与围岩之间的物性差异：物性差异越显著，对应反射波能量越强；反之，差异越小则反射信号越微弱。在地质雷达图像上，喷混凝土与围岩界面通常表现为振幅较强、同相轴连续稳定的反射信号，通过读取该界面在时域上的位置，即可换算出喷混凝土的实际厚度。本隧道衬砌采用复合式结构 [2]。如下图 3.1 所示。

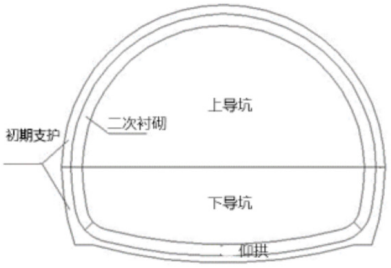


图 3.1 初期支护结构图

3.2 掌子面雷达图像数据处理与分析

首先进行带通滤波，保留有效信号频段（10MHz-2.5GHz）；然后进行滑动平均，应用并确定可以看到高频毛刺被平滑；进行背景消除，选择整体法，这步可以减去多次反射或系统固有噪声。调节增益，选择幅度补偿。使近端低增益，远端高增益。处理完雷达图像如图 3.2 所示。

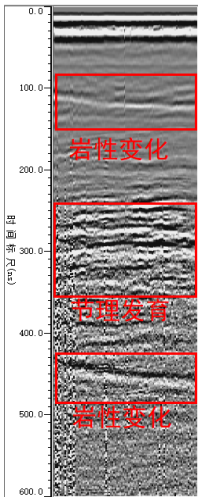


图 3.2 K40+670–K40+700 掌子面雷达图像

从图上可以明显看出，在掌子面前方 5.015~6.093m 处和 21.584~23.490m 之间分别各有一个明显异常，初步判断为为不同岩性的界面。在 12.14~17.85m 处有异常，初步判断为岩石的节理发育。同时观察图像可知，未发现强烈的负反射波，所以不存在大量充水现象。后经开挖认证，与判断相符。

3.3 初期支护雷达图像数据处理与分析

进行校正零偏，调节零点，数字滤波，背景消除，调节增益等步骤，使波形更加明显，易于图像的分析。初期支护图像处理结果如下图 3.3 所示。

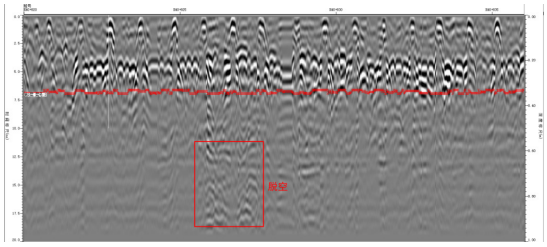


图 3.3 K40+820–K40+836 图像

根据图像可以看出，顶界面时间标尺处为 0.55ns, 底界面为红色标注层 6.46ns。根据公式混凝土厚度 = 电磁波传播时间双程时差 * 波速 /2 可以计算得出初期支护喷层厚度为 29.55cm，大于设计厚度 20cm。在测线 5.8-7.4m 有黑白相间的图像，为脱空区。

4 结语

本文于探地雷达对法隧道施工期超前地质预报（掌子面）及运营期结构检测（初期支护），全程无需破坏结构，显著优于传统钻孔取芯等有损方法。根据实际采集数据和地质情况进行分析，可以精准识别肉眼不可见的隧道结构隐患。检测过程中发现隧道衬砌内部的空洞、脱空、风化岩层等缺陷。后经实际开挖认证，验证了检测缺陷。

参考文献

[1] 钟世航,王荣.探地雷达检测隧道衬砌中的几个问题[J].物探与化探, 2002, 26(5):405-406.

[2] 冯德山,杨子龙.基于深度学习的隧道衬砌结构物探地雷达图像自动识别[J].地球物理学进展, 2020, 35(4):1552-1556.

[3] 吴刚.地质雷达在隧道初期支护质量检测中的应用[J].贵州工业大学学报:自然科学版, 2008, 37(4):222-225.

[4] 白洁.三维探地雷达在道路地下空洞检测中的应用[J].建材技术与应用, 2025(6):102-105.

[5] 谢雄耀,曾里,LAMBOT Sébastien,等.盾构隧道壁后注浆探地雷达检测系统频域矫正与模型试验[J].中国公路学报, 2025(7):223-234.

[6] 马志飞.水利工程检测中探地雷达检测技术运用研究[J].水上安全, 2025(19):61-63.

[7] 胡高才.基于探地雷达的公路路面病害快速检测方法及工程实践[J]. 2025(10):057-060.

[8] 连伟章.探地雷达检测技术在隧道初期支护检测中的应用[J].大众标准化, 2024(7):164-166.

[9] 范平.探地雷达在沥青混凝土路面面层厚度检测中的应用[J].吉林交通科技, 2025(1):24-27.

[10] 陈忠杰.探地雷达在公路沥青路面面层厚度检测中的应用探讨[J].产品可靠性报告, 2024(1):156-157.

[11] 胡祖美.探地雷达在公路改扩建检测中的运用[J].人民交通, 2023(15):0113-0115.