

[理论物理学与应用物理学研究]

# 探地雷达在隧道无损检测中的应用与分析

白运, 陈小红, 郭彦刚, 郝霁昊

(成都理工大学 信息工程学院, 四川 成都 610059)

**摘要:**探地雷达能够有效探测隧道混凝土衬砌体内存在的空洞及不密实等缺陷,在隧道施工质量检测工程中具有重要应用。以A地区高速公路某隧道段的混凝土衬砌质量检测为例,研究了检测过程中测线布置、测试仪器参数选择等重要问题,通过对隧道衬砌厚度及缺陷的实际检测和数据分析,得到了隧道质量检测的正确结果,论证了探地雷达方法在隧道无损检测中的可行性和有效性。

**关键词:**探地雷达;无损检测;隧道;衬砌厚度质量检测

中图分类号:P631.5;P416 文献标识码:A 文章编号:1672-2914(2010)06-0023-04

## Application of Ground Penetrating Radar to Detection of Tunnel Lining Quality

BAI Yun, CHEN Xiao-hong, GUO Yan-gang, HE Ji-hao

(College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:**Ground penetrating radar has great value in tunnel engineering quality inspection for its can effectively detect the defects in the body of concrete tunnel lining such as voids and non-dense. This paper taking quality inspection of concrete lining which is part of speedway of A area as an example, study the important issue in the detection process such as layout survey line and chose equipment parameters, through the actual testing and data analysis of the thickness and defects of tunnel lining, obtained the correct result of tunnel detection, demonstrate the feasibility and effectiveness in non-destructive testing tunnel of the GPR.

**Key words:**ground penetrating radar;non-destructive detection;tunnel;depth of lining quality testing

从“十一五”规划开始以来,我国基础设施发展迅速,尤其是公路和铁路建设,已经开始从经济发达的平原向地质环境复杂的山区延伸,隧道施工也随之越来越多。隧道衬砌一般采用复合式衬砌,即岩体开挖之后先喷上混凝土初期支护,然后做钢筋混凝土二衬。隧道衬砌作为永久性的重要结构物,其使用寿命应有相当的可靠性,为使其能够长期安全的使用,要求初期支护与二次衬砌之间密实,并且有抗渗、抗侵蚀、抗病害的功能。而在隧道施工中,由于超挖、回填及混凝土振捣不实造成衬砌结构与围岩脱空、衬砌内存在松散欠实以及空洞等,或者由于偷工减料,钢筋及钢拱架间距明显增大,及时发现和处理

这类质量问题是保证隧道安全施工和确保以后正常运营的关键<sup>[1-4]</sup>。

采用传统的检测方法(钻空检测法)费时费力且是有损检测,进行大量系统性测试是几乎不可能的,而采用探地雷达方法的优点是无损、检测迅速、一次性检测信息量大(包含厚度、密实度、衬砌背后接触、回填状况等)<sup>[5-7]</sup>。隧道质量检测的最主要的两个指标是强度和厚度,本文以A地区高速公路某隧道段的混凝土衬砌质量检测为例,研究检测过程中测线布置、测试仪器参数选择等重要问题,通过对隧道衬砌厚度及缺陷的实际检测和数据分析,探讨探地雷达方法在隧道无损检测中的可行性和有效性<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2010-09-20

作者简介:白运(1983-),男,陕西咸阳市人,成都理工大学硕士研究生,研究方向为地球物理资料处理。

### 1 检测原理

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)方法是一种用于确定地下介质分布的广谱电磁波技术。其利用天线向地下发射电磁脉冲,并接收由地下不同介质界面的反射波。电磁波在介质中传播时,其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性质(如介电常数  $\epsilon_r$ )及几何形态的变化而变化。其测试原理和基本组成如图 1 所示<sup>[2]</sup>。

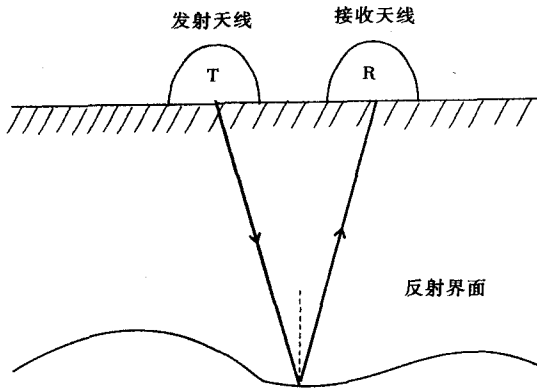


图 1 探地雷达工作示意图

根据接收到的回波时间、幅度和波形等信息,可判定地下介质的结构与埋藏体的位置与形态。

脉冲波的走时为:

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

式中,  $t$ : 脉冲波走时(ns);  $h$ : 目标深度(m);  $x$ : 发射天线与接收天线的距离(m);  $v$ : 电磁波波速(m/ns)。

当发射天线和接收天线相距很近时, 检测目标深度的计算公式为:

$$h = \frac{t}{2} \cdot v \quad (2)$$

根据电磁波理论,对于非磁性介质,电磁波的反射特性(即反射系数)仅与介质的介电常数有关,反射系数的大小又决定了反射波能量的大小,即反射波形的明显程度。根据经验资料及现场试验结果分析<sup>[3]</sup>,初期支护、衬砌层、隧道围岩和空洞的介电常数存在一定差异(见表 1),这种物性差异刚好满足探地雷达检测的地球物理条件。

表 1 介质相对介电常数值

介质类型	相对介电常数( $\epsilon_r$ )
砂岩	4.0~6.0
灰岩	6.0
初期支护	6.4
空洞	1.0

### 2 检测方法

#### 2.1 测线布置

首先要对工点进行测点布置,即里程标记,每 5 m 作一个测量标记。对隧道左线 LK24+170—LK24+290 和右线 K24+250—K24+390 段分别布置了 5 条测线,在隧道左边墙(距水沟盖板面 1.5 m 高处)、左拱腰、拱顶、右拱腰和右边墙(距水沟盖板面 1.5 m 高处)位置分别布置 LP-1、LP-2、LP-3、LP-4 和 LP-5(图 2)。工作累计完成测线长度 750 m。

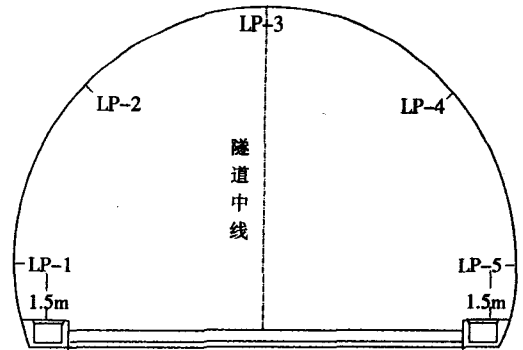


图 2 雷达检测剖面布置示意图

#### 2.2 采用的仪器及参数选择

采用美国“地球物理测量系统公司”(Geophysical Survey Systems Inc)制造的 SIR-20 型地质雷达及 400 MHz 和 900 MHz 高频屏蔽天线,天线采取两种以上频率,保证浅部、深部异常都可以被发现。

1) 天线的中心频率。通常,把探测时所采用的天线中心频率称为探测频率,而其实际的工作频率范围是以探测频率为中心的频带。探地雷达的中心频率和所要达到的最大探测深度、最小分辨率有直接关系,所以在选择探地雷达天线的中心频率时,要兼顾其最大探测深度和最小分辨率,同时还要考虑天线的尺寸是否符合测试地点的需要。一般来说,在满足分辨率和测试地点的需要后,应尽量降低天线的中心频率。天线中心频率可由式(3)初步选定:

$$f = \frac{75}{x\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

其中,  $x$ : 空间分辨率(m);  $\epsilon_r$ : 背景场的相对介电常数(工区的相对介电常数见表 1)。

2) 时窗选择取决于最大探测深度  $d_{max}$  (单位 m) 与地层电磁波速度  $v$  (单位 m/ns)。时窗  $W$  (单位 ns) 可由式(4)估算

$$W = 1.3 \frac{2d_{max}}{v} = 1.3 \frac{2d\sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad (4)$$

其中,  $\epsilon_r$ : 背景场的相对介电常数;  $v$ : 电磁波在空气中的传播速度(本工区为 0.137m/ns)。为地层速度与目标深度的变化所留出的余量,式(4)中时窗的选用值增加 30%。

3) 采样率是记录的反射波采样点之间的时间间隔。采样率由尼奎斯特(Nyquist)采样定律控制,即采样率至少应达到记录的最高频率的 2 倍。采样率  $\Delta t$  (单位 ns)由式(5)计算

$$\Delta t = \frac{1000}{6f} \quad (5)$$

其中,  $f$ : 天线中心频率(MHz)<sup>[3]</sup>。

SIR 雷达系统建议采样率为天线中心频率的 10 倍,其采样率用记录道的样点数表示,即

$$\text{样点数/扫描} = (\text{时窗/发射脉冲宽度}) \times 10。$$

为满足检测深度和精度的要求,根据以上理论 400 MHz 天线采集数据时记录长度为 30 ns,用 900 MHz 天线采集数据时记录长度为 20 ns。采样率均为 512 样点数扫描。

### 2.3 检测数据分析及处理

#### 2.3.1 数据处理

雷达数据处理的目的是压制随机的和规则的干扰波,最大限度地提高雷达剖面的信噪比,提取电磁回波各种有用参数,用来解释不同介质的物理特征。如基于频率不同产生的改善应用于各种反褶积技术,确定性反演滤波、递归滤波、最小平方滤波和子波处理等。数据处理的另一目的是将数据元素重置以补偿由于来自不同方向的反射迭加产生的空间畸变,如偏移处理等。图 3 是探地雷达数据资料处理的主要流程。

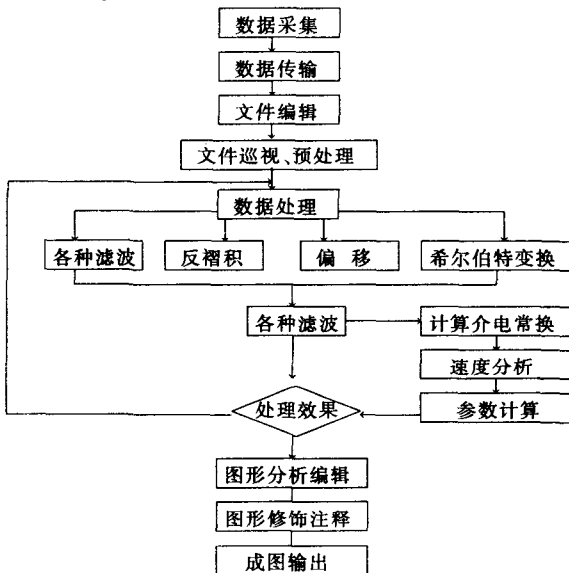


图 3 探地雷达数据资料处理流程图

本次探地雷达采集的野外数据,采用“RADAN FOR WINDOWS NT”软件包进行处理,处理流程为“数据传输到计算机→文件头编辑→水平均衡→数字滤波→能量均衡→时深转换→注释→文件编辑→输出雷达时间(或深度)剖面图。将雷达时间(或深度)剖面图作为资料解释的基本图件。

#### 2.3.2 资料解释原则

探测图像是电磁波辐射范围内所有介质散射、反射信号的综合反映,反映了地下介质的电性分布,仅仅依靠时间剖面图的解释结果是不确定的,因此探地雷达资料解释工作必须结合被埋设目的体区域、特性、现场探测记及浅地层地质情况等资料进行。通常是在数据处理后所得到的雷达图像剖面中,通过对同相轴的追踪,根据反射波组的波形与波振幅强度特征,来确定反射波组的地质含义进一步解释混凝土衬砌厚度和判识空洞、不密实带等的存在。

### 3 雷达剖面结果分析

#### 3.1 衬砌层与围岩或回填层的分界面

隧道左线 LK240+170—LK240+270 段,在雷达时间剖面图上,从上至下第一组连续性较好、能量较强的反射波组一般对应了衬砌层与围岩或回填层的分界面(图 4)。正常地段雷达剖面图像特征:探地雷达堆积图中未出现明显绕射波,反射波同相轴连续且平行,说明地下煤质较均匀连续,未出现明显的空洞或疏松情况。

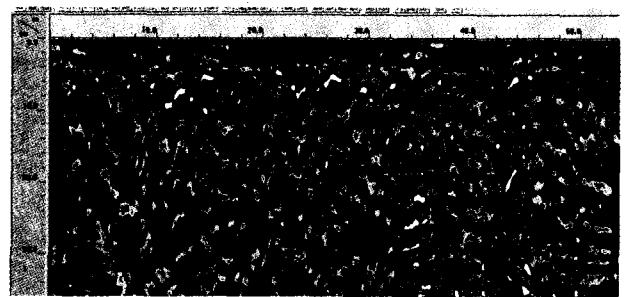


图 4 衬砌层与围岩或回填层分界面的雷达图像

#### 3.2 空洞或不密实带

在左线 LK24+175 段,雷达时间剖面图上,双曲线异常一般对应了回填层中或衬砌层与围岩之间的单个空洞;凌乱的团块状或条带状强反射一般对应了范围较宽的空洞或脱空区,凌乱的团块状或条带状较强反射一般对应了不密实带,包括衬砌层中和回填层中的不密实带(图 5)。

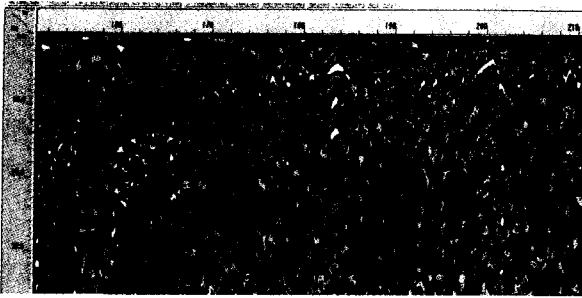


图 5 衬砌层内部不密实带的雷达图象

LK24+170—LK24+290 和右线 K24+250—K24+390 各测线部位的混凝土初期支护与围岩接触较为致密, 仅在左线 LK24+170—LK24+290 段 LP-3 测线(拱顶)的 LK24+175 附近有空洞存在。3) 由于初期支护表面凹凸不平, 加上锚杆和钢筋等干扰, 检测结果可能存在一定误差。4) 本次检测发现缺陷主要存在于隧道拱顶, 建议对检测发现的空洞缺陷及欠实缺陷进行注浆处理。5) 检测段二次衬砌平均厚度均大于设计厚度值。

### 4 结论

1) 由于探地雷达分辨率以及灵敏性高, 收到的干扰因素也比较多, 要消除这些干扰则要靠仪器参数设置以及后续数据处理, 必要时可以考虑使用其他物探方法检测。

2) 此次检测对隧道部分地段空洞和不密实带的水平位置进行了准确测量, 得到空洞和不密实带的大致位置, 为进一步的空洞治理, 灾害防治提供了更加翔实的资料。

3) 此次工作遇到的杂波干扰比较大, 主要有以下几种: 天线快速运动时往往使天线贴壁不良, 有较弱的多次波出现。地下介质不均匀形成一些无规律的杂波。隧道内电缆、钢管派架等对雷达数据也形成较大干扰, 数据处理时要格外小心滤波, 剔除干扰。

探地雷达正处于发展阶段, 尽管还有很多需要研究的内容, 但它操作简单, 性能良好, 使用安全可靠, 具有很好的推广应用价值。相信随着科技的发展, 人们在仪器和处理手段方面不断改进、完善的基础上, 探地雷达在未来的工程检测中, 将发挥更大的作用, 将显示出更加广阔的前景。

### 参考文献:

[1] 钟世航. 隧道衬砌质量的检测[J]. 现代隧道技术, 2001, 32(4): 20-21.  
 [2] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 86-93.  
 [3] 曾招发, 刘四新. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 91-212.  
 [4] 钟世航. 隧道衬砌质量的检测[J]. 现代隧道技术, 2001, 32(4): 20-21.  
 [5] 刘敦文, 黄仁东. 应用探地雷达技术检测隧道衬砌质量[J]. 物探与化探, 2001, 11(5): 21-22.  
 [6] 王法刚, 肖国强, 尹健民. 探地雷达在隧道衬砌混凝土质量检测中的应用[J]. 岩土力学, 2003, 10(7): 11-25.  
 [7] 王惠廉. 探地雷达目的体物理模拟研究结果[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1993, 18(3): 3-14.

### 3.3 钢筋干扰区

隧道右线 K24+380~+390 段, 由于部分地段存在钢带或钢筋, 对雷达图像形成较强干扰, 如图 6 所示, 钢筋的强信号与脱空区强信号混杂在一起, 不易区分, 影响判释精度。

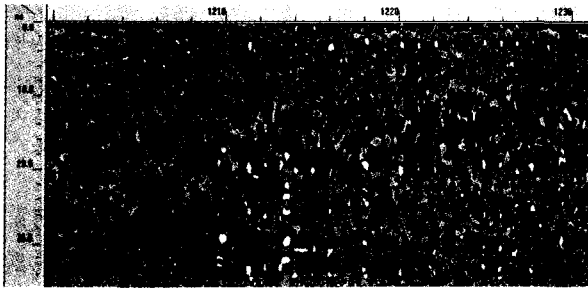


图 6 钢筋干扰区的雷达图象

### 3.4 轨拱架屏蔽区

LK24+280~+290 段, 采用了临时钢拱架支护措施, 钢拱架对雷达波形成了强烈的屏蔽效应, 雷达时间剖面图上已完全不能反映混凝土及其内部情况(图 7)。

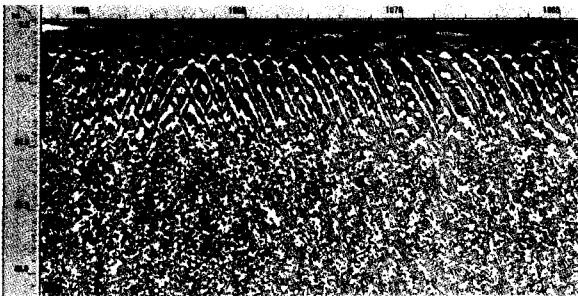


图 7 钢轨拱架屏蔽区的雷达图象

### 3.5 检测结果

从检测结果可知: 1) 隧道左线 LK24+170—LK24+290 段各测线部位的初期支护厚度达到了设计厚度要求, 右线 K24+250—K24+390 段各测线部位的初期支护厚度达到了设计厚度要求。2) 左线段