

[文章编号] 1671-9727(2007)03-0354-05

探地雷达技术在隧道衬砌质量检测中的应用

汪兴旺^{1,2} 李建华³

(1. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都 610059;

2. 核工业井巷建设公司, 浙江湖州 313000; 3. 浙江省地球物理技术应用研究所, 杭州 310014)

[摘要] 为查明隧道混凝土二次衬砌中的底界厚度、空洞、漏水、钢筋网变形等质量问题, 利用探地雷达技术, 通过对检测方法及工程检测实验的研究, 进行隧道二次衬砌中雷达波形特征参数及检测结果评价, 总结了隧道衬砌质量问题的雷达波形特征, 验证检测方法的精度和可靠性。研究表明利用探地雷达可全面查明隧道衬砌中的质量缺陷, 并具有无损、快速、广泛、精确等优点。

[关键词] 探地雷达; 隧道; 二次衬砌; 检测

[分类号] P631.325; U456.3

[文献标识码] A

隧道因其特有的结构特性和功能要求, 往往施工难度较大, 容易出现隧道衬砌开裂、渗漏, 衬砌混凝土厚度不足、强度不够, 衬砌后部脱空、回填不密实, 钢筋网、隔栅拱错断变形等质量问题。这些问题常用超声波和超声回弹法、打孔量测法和冲击回波法等检测, 但均具有一定的局限性^[1]。

通过理论分析和工程试验, 研究确定了利用美国 SIR-10 型探地雷达检测隧道二次衬砌质量中的有关参数选择方法和测线布置原则, 同时验证了检测方法的精度和可靠性。研究表明, 该方法具有无损、快速、广泛、精确的适用性特点。

1 探地雷达原理及其应用前提

探地雷达是一种用于探测地下介质分布的广谱电磁技术。其工作原理是: 采用宽频时域天线向地下介质发射高频(1 MHz~2.5 GHz)短脉冲电磁波, 电磁波在传播过程中, 遇到不同电性界面产生反射, 接收天线接收反射回来的电磁波信号并在控制计算机中保存该信息, 通过数据回放, 运用地质雷达信号处理技术, 分析和识别反射体或

界面的介质特征, 从而确定出探测目标体的精确位置。

隧道工程中所出现的质量问题主要涉及如下几个方面: (1) 衬砌的厚度是否达到设计要求; (2) 检测衬砌层是否渗水以及衬砌层与围岩之间是否有空洞或者松软介质存在; (3) 衬砌中钢筋密度或者数量是否达到设计要求。

电磁波在某一介质中传播时, 遇到不同的波阻抗界面时, 会产生反射和透射, 反射能量取决于反射系数 R :

$$R = (\epsilon_1 - \epsilon_2) / (\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (1)$$

式中 ϵ_1 和 ϵ_2 分别是反射界面两侧的相对介电常数。

由式(1)可知, 如存在混凝土衬砌体与围岩间或二次衬砌与初期支护间及衬体内部存在空洞、不密实、离析等缺陷时, 空气或者离析物与混凝土之间必然存在着很明显的介电差异, 这就为采用探地雷达进行隧道工程质量检测提供了良好的地球物理基础。

[收稿日期] 2006-06-01

[作者简介] 汪兴旺(1963—), 高级工程师, 研究方向: 地球探测与信息技术。

2 检测方法研究

测试过程中,对于浅层、薄板介质(检测范围一般在1 m左右),由于本身厚度较小,为了达到一定的精度需要较高的分辨率。根据公路隧道工程衬砌的特殊结构,一般采用500~1 000 MHz收发同置天线。在保证衬砌厚度测试精度和足够探测厚度的前提下,选取采样范围为20~60 ns。测线布设于易出现质量问题的拱顶及左、右边拱处,必要时于边墙部位增加纵向测线,里程桩号可采用测距轮或标记定位。根据实测资料结合1~2个钻孔取心(打孔量测)数据对比试验校对采集参数(采样范围、采样点数、扫描率、迭加次数等),并精确确定各层介质的介电常数或电磁波速,以期达到良好的检测结果。检测结果处理流程如图1所示。

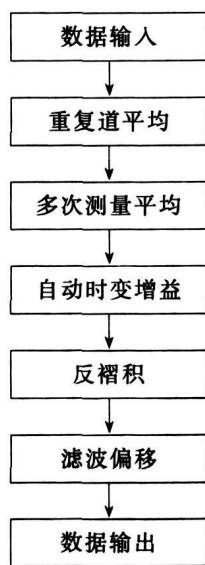


图1 数据处理流程框图

Fig.1 The flow chart of the data processing

3 工程检测试验研究

目前隧道支护大多采用锚喷初期支护二次复合衬砌体系^[3]。常见的质量缺陷主要有二次衬砌厚度不足、脱空、漏水、钢筋网错断、变形、隔栅拱变形等。本课题采用施工现场的隧道明洞部分和某些已知条件,进行仪器参数选择和校对,同时利用打孔验证方式来进一步进行仪器参数核对,确定检测数据的可靠性和精度。

3.1 仪器参数选择试验

3.1.1 岩土及混凝土的电磁波传播特性试验

根据大量测试结果的对比研究,常见介质的相对介电常数和波速见表1^[2]。

表1 介质的介电常数和波速表
Table 1 The dielectric constant of the medium and the wave speed

介质	ϵ_r	$v/\text{m} \cdot \text{ns}^{-1}$	介质	ϵ_r	$v/\text{m} \cdot \text{ns}^{-1}$
花岗岩	4	0.15	土壤	4~40	0.05~0.15
安山岩	2	0.21	空气	1	0.3
玄武岩	4	0.15	水	81	0.033
凝灰岩	6	0.12	沥青	3~5	0.13~0.18
砂岩	4	0.15	混凝土	6.4	0.12

3.1.2 天线中心频率的选择

在保证分辨率且场地条件许可时,尽量使用中心频率低的天线。天线的中心频率可由下式确定:

$$f = 150 / (X(m) \cdot \sqrt{\epsilon_r}) \quad (2)$$

式中: $X(m)$ 为空间分辨率。

根据公路隧道工程的实际情况,通过已知试块模型实验选用中心频率为900 MHz的天线^[2]。

3.1.3 时窗选择

设最大测试深度为 d_{\max} ,则时窗 W 可由下式估算:

$$W = 1.3 \times 2d_{\max} / v \quad (3)$$

多个工程测试和试验表明,时窗一般选为20~60 ns。

3.1.4 采样率的选择

对于大多数探地雷达系统,反射波的最高频率大约为中心频率的1.5倍。按尼奎斯特定理,采样速度至少要达到天线中心频率的3倍,记录波形才能更完整,对应的采样率 $\Delta t = 1000/6f$ 。

3.1.5 测线选择

从隧道衬砌横断面的连续检测中发现,拱顶及其附近易产生厚度不足和脱空等质量问题。经对比分析,这与隧道的施工工艺有关。因此,检测常布设三条纵测线,一条沿拱顶中心线布设,另2条分别沿中心线左右两侧各2~3 m布设。

3.2 隧道衬砌质量问题的雷达波形特征

经过大量现场试验和工程检测,并通过打孔验证,总结和归纳出解决各种隧道衬砌质量问题与参数选择的关系。其参数选择、典型波形特征如图2~图12和表2所示。雷达连续扫描,扫描率 30 s^{-1} 。

表 2 雷达波形特征参数及检测结果评价

Table 2 The parameter of the radar wave character and the valuation of the detected result

图序	采样范围 /ns	设计衬砌厚度 /cm	二次衬砌质量评价
3	35	60	底界均匀,厚度符合要求,混凝土充填密实
4	30	40	底界 40 cm 左右略有变化,围岩界面起伏较大,两者间的空洞充填密实
5	30	60	拱顶部位厚度有较两侧边拱部位薄的趋势,拱顶中心左侧 2 m 最薄,总体充填密实
6	30	40	底界起伏较大,12~18 m 和 33~38 m 出最薄,计算厚度仅 20 cm
7	30	40	6~10 m 处有强反射波组,厚度 32 cm,其下方 40 cm 处可见一组小波较均匀,为隔水层反映
8	35	40	10~13 m 处于 40 cm 以下有一双曲线形强反射波组,二次衬砌厚度为 40 cm,空洞高度 38 cm
9	35	40	100 cm 左右有一强反射波组,在 5~7.5 m 处错断,初期支护与围岩界面间错断处存在空洞
10	35	40	9.5~14 m 处有一明显反射波组,9.5~10 m 及 12~14 m 处呈 45°角,中间趋水平,推断存在水溶蚀通道,已对二次衬砌造成侵蚀
11	35	40	11~15 m 处强反射波组约呈 30°角,15 m 以后于 40 cm 以下反向 15°角有一强反射波组且多次反射。分析为 15~19 m 处围岩裂隙,裂隙水沿 11~15 m 处的深蚀通道对二次衬砌造成侵蚀
12	35	40	35 cm 左右呈起伏状强反射波组,4~6 m 处基本错断,推断为布筋少,起伏处钢筋网变形
13	35	40	隔栅拱有起伏,15~25 m 处变形量近 30 cm

采样点数:512;迭加次数:15。

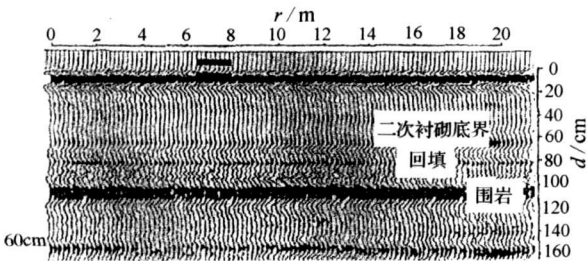


图 2 实测雷达标准波形图

Fig. 2 The measured standard wave character of radar

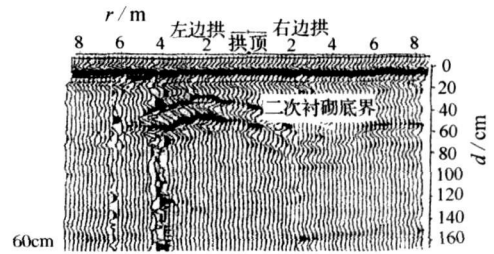


图 4 实测雷达横断面波形图

Fig. 4 The measured wave character in transverse section

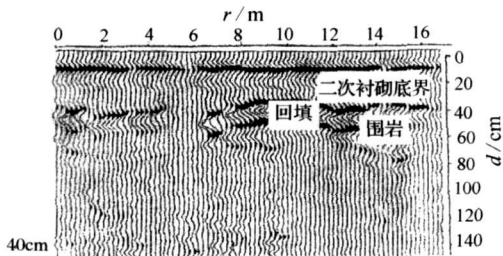


图 3 实测雷达纵断面波形图

Fig. 3 The measured wave character in lengthwise section

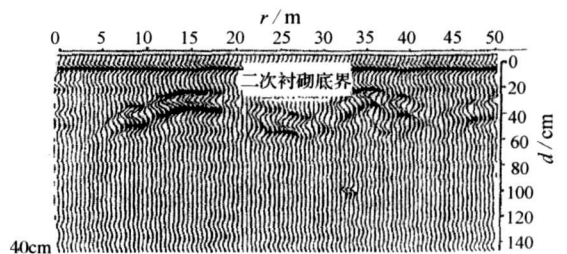


图 5 二次衬砌厚度不足

Fig. 5 Lack of thickness in second lining

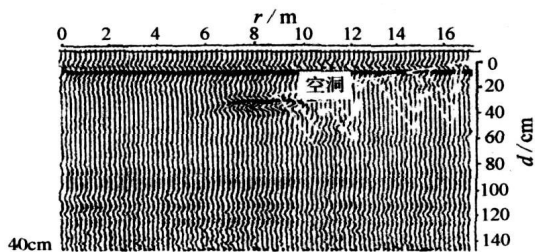


图6 二次衬砌与隔水层间脱空
Fig.6 Be bursted between water tight stratum and the second lining

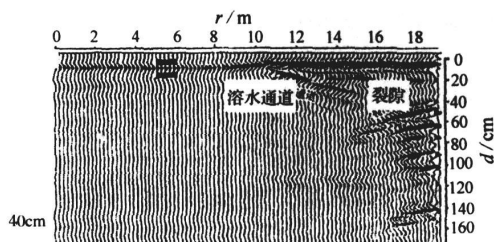


图10 裂隙漏水
Fig.10 Water loss of the crannies

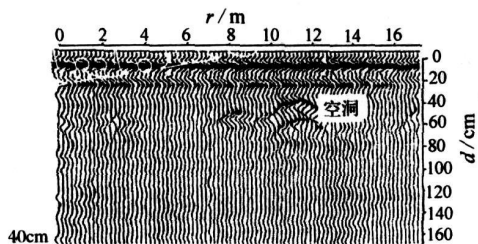


图7 隔水层与初期支护间脱空
Fig.7 Be bursted between water tight stratum and the early timbering

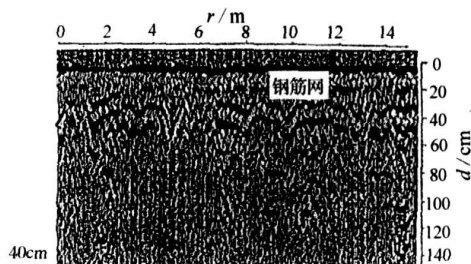


图11 钢筋网错断、变形
Fig.11 The leaps and deformation of the bar mat reinforcement

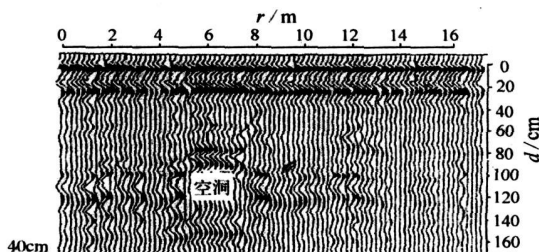


图8 初期支护与围岩间脱空
Fig.8 Be bursted between early timbering and the wall rock

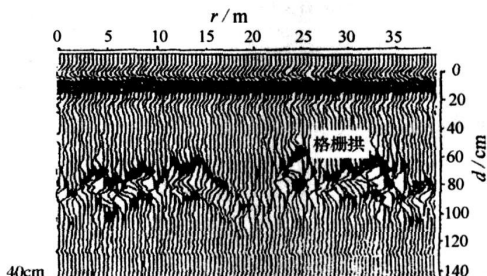


图12 隔栅拱变形
Fig.12 The fence deformation

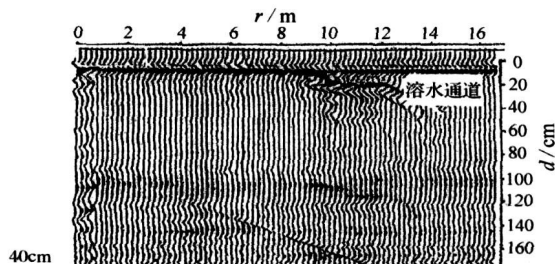


图9 水溶通道漏水
Fig.9 Water loss of the channel

3.3 检测成果验证

为了确保雷达检测资料的可靠性,验证其科学性与精度,对各类现象利用实际工程进行了大

量的打孔验证。验证结果表明,二次衬砌厚度的定量测试误差为2.4%,空洞高度的测试误差为5%,其测试精度满足工程需要。对缺陷类型的定性评价科学、准确、可靠。

4 结论

通过对探地雷达检测隧道衬砌质量技术的试验研究和工程检测验证相结合的方式,可以得出以下结论:

- a. 探地雷达检测技术具有抗干扰强、速度快、无损伤、连续性等优越性。
- b. 探地雷达检测隧道衬砌厚度和空洞可做到定量解释,且精度较高。

- c. 可区分厚度不足、脱空、漏水等质量问题。
- d. 可确定配筋、钢筋网、隔栅拱的部位, 判断其变形、错位等情况。

1998, (2): 65-67.

[2] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.

[3] 浙江省交通规划设计院. 公路隧道设计规范 JTJ026-90[S]. 北京: 人民交通出版社, 1990.

[参 考 文 献]

[1] 隋景峰. 隧道衬砌质量检测新技术[J]. 工程勘察,

The application of surveying radar technology in the quality detection of tunnel lining

WANG Xing-wang^{1,2}, LI Jian-hua³

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Nuclear Industrial Well & Tunnel Construction Company, Huzhou 313000, China;
3. Applied Institute of Geophysics Technology, Province of Zhejiang, Hangzhou 310014, China

Abstract: In order to detect the bottom thickness, cavity, leak and deformation of steel meshes in secondary lining of concrete in tunnel construction, the authors evaluate the wave character and the detected result in the second lining of the tunnel using surveying radar technology and conclude the wave character in the tunnel lining which has mass defect and tested the accuracy and reliability of this technique. The researches show that the surveying radar technology used in highway tunnel lining can roundly detect the quality of the tunnel lining and has the advantages such as non-destructivity, high efficiency, wide-use and exactness.

Key words: surveying radar; tunnel; secondary lining; detection; quality