

地质雷达在风火山隧道病害检测中的应用与结果分析*

康富中^① 江波^② 贺少辉^① 齐法琳^②

(^①北京交通大学土建学院隧道与地下工程系 北京 100044)

(^②中国铁道科学研究院基础设施检测研究所 北京 100044)

摘要 青藏铁路全线开通运营以来,对处于高寒地区的永久冻土隧道之一的风火山隧道的质量状态首次进行了无损检测。风火山隧道处于高寒永久冻土区,隧道全部处于冻岩中,两端洞口主要为砂岩与泥岩,并且为富冰冻土。受到季节性冻融的影响,隧道病害比较突出,主要表现为衬砌裂缝,漏水涌水,衬砌酥松剥落。为了准确地掌握风火山隧道衬砌结构质量状态,本文首次应用于风火山隧道衬砌结构的质量检测。该检测设备一改传统破坏式的检测方法,具有快速、简捷、无损、灵活的特点。通过对现场数据处理分析,可以精确探测衬砌厚度,查明衬砌背后存在的空洞和回填不密实区域。检测结果表明,隧道在高寒恶劣环境中,衬砌总体外观质量尚好,但是在两端洞口段有渗水现象;衬砌背后空洞缺陷等级为严重地段测线长度为20m,等级为极严重地段测线长度为98m;衬砌背后回填不密实缺陷等级为严重地段测线长度为41m,等级为极严重地段测线长度为33m。检测结果与实际病害情况基本相符。

关键词 地质雷达 隧道 衬砌 病害 无损检测

中图分类号:TU91 文献标识码:A

DETECTION AND ANALYSIS OF TUNNEL DEFECTS WITH GEOLOGICAL PENETRATING RADAR AT FENGHUO MOUNTAIN

KANG Fuzhong^① JIANG Bo^② HE Shaohui^① QI Falin^②

(^①The Department of Tunnel and Underground of Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

(^②The Testing Institute of Base-Structure of CARS, Beijing 100044)

Abstract The soundness diagnosis testing was carried out on the quality state of a tunnel at Fenghuo Mountain tunnel. This tunnel is one of the permafrost tunnels in frost soil area along the Qinghai-Tibet Railway line. The testing was done some years later after the railway was used. The tunnel is in alpine permafrost zone. The tunnel body is in the frozen rocks. At both ends of the tunnel, the dominant rocks are sandstone and shale, where the frozen soils are ice-rich. Due to the seasonal effects of freezing and thawing, defects were appear in the tunnel more and more. The defects are manifested mainly as lining cracks, leaking and gushing water, lining crisp peeling. In order to accurately understand the quality state of the tunnel lining, the geological penetrating radar technique was used to defect and quantify the defects in the tunnel field. The technique was applied to the tunnel lining structure quality inspection. The technique changed the traditional destructive testing method. The technique is fast, simple, non-destructive, and accurate. Through the in-situ data processing and analysis, the technique can accurately detect lining thickness, find out of lining and filling the empty space behind the non-dense area. The test results show the following.

* 收稿日期: 2009-11-27; 收到修改稿日期: 2010-05-24.

基金项目:铁道部重大课题:隧道衬砌状态检测技术及装备研究(2008G017-A).

第一作者简介:康富中,工程地质专业. mail: kkkangfzh@126.com

The tunnel in the frozen atrocious weather environment, the lining appearance was not damaged. Seepage was found in the openings of two ends. The lining with empty is the most serious defect level and had a measured length of 20m. The line with the secondary serious defect level had a length of 98m. The lining backfill behind the non-compact class is the third serious defect level and has a measured length of 41m. The most serious level has a line length of 33m. Test results are basically consistent with the actual defect situation. The results can provide a scientific basis for normal operation of the tunnel and reliable foundation for defect treatment in the future. Practical evidence proved the use of geological penetrating radar to make health diagnostic tests for the tunnel is feasible.

Key words Geological penetrating radar, Tunnel, Lining, Damage, Soundness diagnosis testing, Frozen ground

1 引言

在寒区建设的基础工程,如道路工程,水利工程,隧道工程,工业与民用建筑工程,输油管线,光纤通讯工程等等,每年都要受到季节冻融交替的影响,在与外部环境接触的部位往往出现不同层次的冻害。当这些工程处于地下水渗流场、应力场、温度场和湿度场多场并存的相当复杂环境中,经过周期性的反复冻融,致使结构出现不同程度的病害。加上结构在建造过程中存在的主观因素,导致建(构)筑物的一些病害更加突出,这样就会影响结构物的正常使用或者使用寿命。

为了修复结构物的病害和合理评价结构物的使用寿命,需要提早用可靠的检测技术和手段来检测结构物的病害和缺陷。近年来,地质雷达作为一种高分辨率和高准确率的结构检测设备,因其具有快速、简捷、无损、灵活的特点,在结构质量检测方面得到了很好的应用^[1~4],在隧道质量健康诊断中发挥了重要的作用^[5~9]。

青藏铁路格尔木-拉萨段自开通运营以来,在2008年夏季对沿线隧道首次采用地质雷达法进行了病害缺陷检测。检测过程中,主要对衬砌厚度,衬砌背后空洞,衬砌背后回填密实度进行了检测。通过对检测数据的分析,力求精确探测衬砌厚度,查明衬砌背后存在的空洞和回填不密实区域,得出结论

后为以后加固修复病害提供可靠依据。

2 地质雷达工作原理^[10, 11]

地质雷达作为工程物探检测的一项新技术,具有连续、无损、高效和高精度等优点。地质雷达由主机、天线及配套软件等部分组成,根据电磁波在有耗介质中的传播特性,以宽频带短脉冲的形式向介质内发射高频电磁波(数 MHz 至数 GHz),当其遇到不均匀体(界面)时会反射部分电磁波,其反射系数由介质的相对介电常数决定,通过对雷达主机所接收的反射信号进行处理和图像解译,达到识别隐蔽目标物的目的(图1)。

电磁波在特定介质中的传播速度 V 是不变的,因此根据地质雷达记录上的自激自收反射波的双程时间差 ΔT ,即可据下式算出异常的埋藏深度 H :

$$H = V \times \Delta T / 2 \quad (1)$$

式中, H 即为目标层厚度; V 是电磁波在地下介质中的传播速度,其大小由下式表示:

$$V = C / \sqrt{\epsilon} \quad (2)$$

式中, C 是电磁波在大气中的传播速度,约为 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; ϵ 为相对介电常数,取决于地下各层构成物质的介电常数。

雷达波反射信号的振幅与反射系数成正比,在以位移电流为主的低损耗介质中,反射系数 r 可表示为:

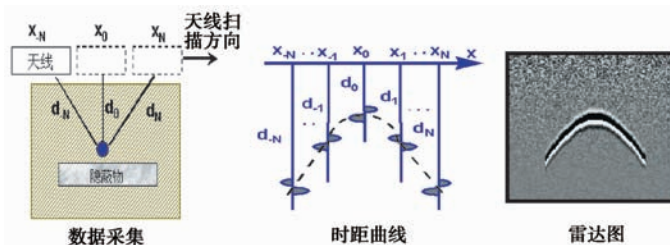


图1 地质雷达工作原理示意图

Fig. 1 Working principle schematic of ground penetratin gradar

$$r = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (3)$$

式中, ε_1 、 ε_2 为界面上、下介质的相对介电常数。

反射信号的强度主要取决于上、下层介质的电性差异,电性差异越大,反射信号越强。

雷达波的穿透深度主要取决于地下介质的电性和中心频率。导电率越高,穿透深度越小;中心频率越高,穿透深度越小,反之亦然。

3 地质雷达检测设备及其参数

3.1 检测设备

地质雷达采用意大利 IDS 公司生产的 RIS-K2 型地质雷达,天线选择 600MHz 中频屏蔽天线,它的波长约为 20cm,检测 10~30cm 厚的初期支护背后的空洞有足够的分辨率;采样最大时窗若为 40ns,可探测 1.5~2.0m 深,能够满足对隧道衬砌的检测要求。



图2 RIS-K2 型地质雷达主机

Fig. 2 The host of RIS-K2 GPR



图3 600MHz 中频屏蔽天线

Fig. 3 600MHz middle frequency radome antenna

3.2 设备参数

通过分析,本次检测过程选择的设备参数如下:

(1)扫描速度: $850 \text{ 扫} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2)脉冲重复频率: 400kHz(高速的脉冲重复频率使数据收集更快),最多可接 8 对单天线同时检测。

(3)时窗: 9999 nsec。

(4)采样点数: 128~8192。

(5)叠加数: 1~32768。

(6)分辨率: 5psec。

(7)信噪比: >160dB。

(8)工作温度: $-10 \sim 50^\circ\text{C}$ 。

(9)A/D 转换: 16bit。

3.3 雷达波速的测取

雷达波速是计算衬砌的最重要参数。因隧道衬砌的施工及用料情况以及钢拱架和钢筋网的密度不同,喷射混凝土中雷达的传播波速有一定的变化范围,因此,现场实测雷达波在隧道衬砌中的行走速度是重要的数据参数。

测波速的方法是:在已知隧道初期支护厚度处丈量实际衬砌厚度 D ,再作雷达短测线测取衬砌底面雷达反射波走时 Δt ,反算出 V 与 ε 。

$$V = 2D/\Delta t \quad (4)$$

$$\varepsilon = (C_0/V)^2 \quad (5)$$

式中: V 为实测的雷达波速; D 为衬砌实际厚度; Δt 为实测反射时间; C_0 为在空气中的雷达波速, $30 \text{ cm} \cdot \text{ns}^{-1}$; ε 为实测介电常数。

4 无损检测方法

4.1 检测方法

使用地质雷达对隧道衬砌进行检测,只需将雷达天线底面贴近隧道衬砌表面,然后,通过高空车将操作人员抬升到较高的位置,使得操作人员能够将天线靠近隧道衬砌的表面即可。然后高空车即可以 $3 \sim 5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度前进,一次可以完成对整条隧道拱顶或者拱腰部分隧道衬砌的探测。

一般隧道衬砌的检测需要采集拱顶、左右拱腰(距轨面 4.0m 高处)和左右侧墙(距轨面 1.5m)等 5 道测线(见图 4)数据。通过高空车配合完成拱顶和两拱腰的衬砌检测,而操作人员在地面上手持天线就可以完成对侧墙的衬砌检测。

在隧道衬砌表面比较光滑时可以直接使用测距轮进行测距,能够精确的定位和测距。在隧道衬砌表面凹凸不平时,可以采用测距线进行测距或时间

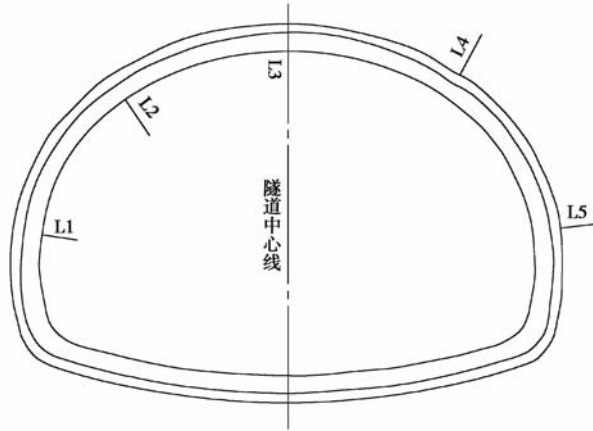


图4 地质雷达检测测线布置示意图

Fig. 4 Ground penetrating radar detection test line layout diagram

触发打标,同样能够准确地定位和测距。

通过以上探测方式,能够很好的探测到衬砌内1.5m以内的衬砌厚度和衬砌的脱空情况。雷达时间剖面上各测点的位置要和隧道里程相关联,为保证点位的准确,在隧道壁上每5m作一标志,标上里程。当天线对齐某一标记时,由找点人员通报雷达仪器操作员,操作员立即向仪器输入信号,在雷达记录中每5m或10m作一标记。

4.2 数据处理与分析

4.2.1 数据处理流程

地质雷达数据处理包括预处理和数据分析,处理流程如图5所示,其目的在于以尽可能高的分辨率在地质雷达图像剖面上显示反射波,突出有用的异常信息(包括电磁波速度,振幅和波形等)来帮助解释。

地质雷达所接收的是来自地下不同电性界面的反射波,其正确解释取决于检测参数选择合理、数据处理得当、模拟实验类比和读图经验等因素。

具体到本次检测数据处理,采用的是RIS-K2型地质雷达随机配备的GRESWIN2、IDSGRED后处理软件包处理的,按以下处理流程进行:数据输入→文件编辑→能量均衡→水平均衡→数字滤波→偏移→时深转换→图形编辑→注释→输出雷达剖面图。

4.2.2 数据分析

4.2.2.1 衬砌厚度分析

地质雷达检测时,仪器记录的是界面反射波的双程走时。根据前面求出的雷达电磁波在衬砌混凝土中传播的速度 V ,就可以计算出所检测的衬砌厚

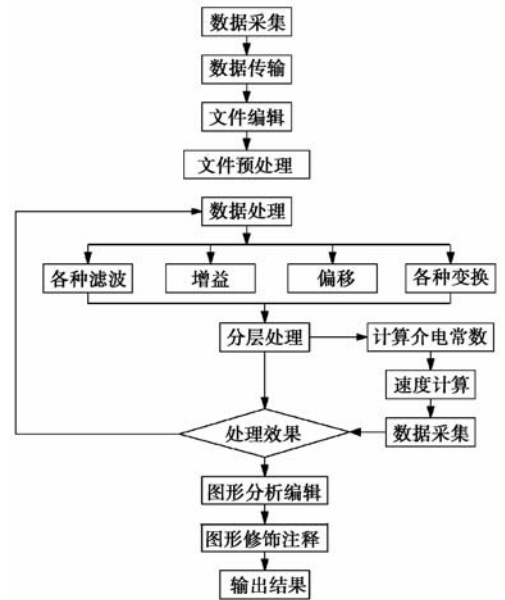


图5 地质雷达数据处理流程图

Fig. 5 GPR data processing flow chart

度 D 。厚度按下式计算:

$$D = (V \times t) / 2 \quad (6)$$

4.2.2.2 衬砌背后回填不密实及空洞的分析

地质雷达探测的物性特征是被测介质的介电常数存在一定的差异。衬砌背后存在空洞或回填不密实时,空隙里含有空气或水,而空气、水与混凝土、围岩的介电常数存在较大的差异(表1)。

表1 介电常数表

Table 1 Dielectric constant table

介质名称	空气	淡水	石灰岩	花岗岩	混凝土
相对介电常数	1	81	5~10	5	5~10

雷达发射波的发射系数的大小取决于相应介质的相对介电常数的差异。差异越大反射系数越大,探测效果越好。界面反射信号的强弱是判读空洞依据,反射波相位与直达波相位的关系是判读含水界面的依据。在雷达图像上,空洞表现为反射振幅较强、连续、呈弧状等特征;回填不密实指的是衬砌背后回填的片石不密实或没有注浆或者注浆不足,在雷达图像上反应为振幅不强、连续性差等特征。

4.2.2.3 衬砌安全等级评定

依据铁道部颁发的《铁路运营隧道衬砌安全等级评定暂行规定》^[12],按隧道道实际衬砌厚度与设计衬砌厚度之比,将隧道衬砌进行安全等级评定,分为:轻微、较严重、严重、极严重。

5 风火山隧道概况

风火山隧道全长 1338m, 是世界海拔最高的高原多年冻土隧道, 属于低高山区, 地形起伏较大, 地表冲沟较发育, 山顶基岩大部分裸露, 侵蚀、剥蚀作用强烈。隧道最大埋深约 100m, 山体为单斜山, 构造不甚发育, 岩层相对较完整(图 6)。

风火山隧道洞身全部位于冻岩之中, 隧道通过的基岩风化层厚度为 8 ~ 10m, 多年冻土上限约为 1.5m。

格尔木端洞口上部地层主要微坡积粉质黏土, 厚度约 1.0 ~ 3.0m, 下伏下第三系砂岩、泥岩, 泥岩成分较多, 全风化层厚度大于 20m, 多年冻土上限 1.2 ~ 1.5m, 泥岩顶部分布有 1.0 ~ 3.4m 的含冰土层, 以下基岩风化层中多分布有富冰冻土, 厚度 1.0 ~ 2.5m。

拉萨端洞口上部地层主要为坡积粉质黏土, 厚度约 2.1 ~ 2.4m, 下伏下第三系砂岩、泥岩, 全风化层厚度大于 20m, 多年冻土上限 1.45 ~ 1.8m, 在基岩风化层发育富冰、饱冰冻土, 厚度 1.75 ~ 4.0m。

6 检测结果

6.1 衬砌外观质量检测结果

由于冻融循环导致洞口段侧墙墙脚部位衬砌混凝土出现有渗水现象(图 7、8)。

6.2 衬砌背后密实度检测结果

当隧道衬砌背后回填不密实, 混凝土与围岩之间有空隙, 雷达波会在混凝土与空气之间产生强烈反射信号(图 9, 10)。



图 7 左侧墙脚部位衬砌渗水

Fig. 7 Water seepage in left foot of lining



图 8 右侧墙脚部位衬砌渗水

Fig. 8 Water seepage in right foot of lining

图中可见红框内清楚地显示深度范围分别为 15 ~ 85cm 和 10 ~ 120cm 的衬砌内部存在不密实现象。

红线显示为衬砌后的轮廓线, 可以清楚的看到在红线处仍有少量的脱空, 衬砌厚度很不均, 最薄处 33cm, 最厚处 80cm;

探地雷达对病害严重程度分级的特征主要借助



图 6 风火山隧道格尔木端洞口

Fig. 6 The Entrance to geermu of fenghuoshan tunnel

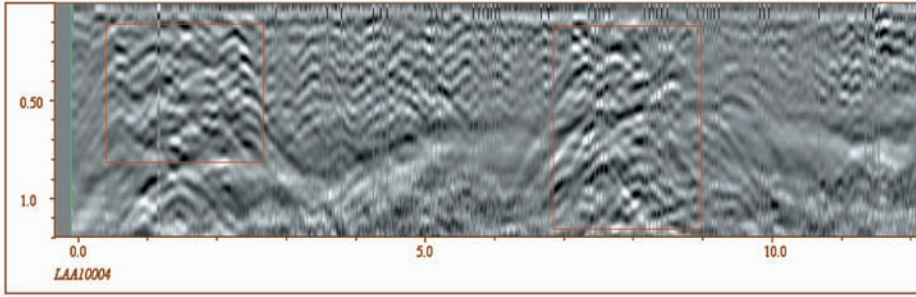


图9 拱顶衬砌不密实雷达检测图

Fig. 9 Undense radar detection map of vault lining

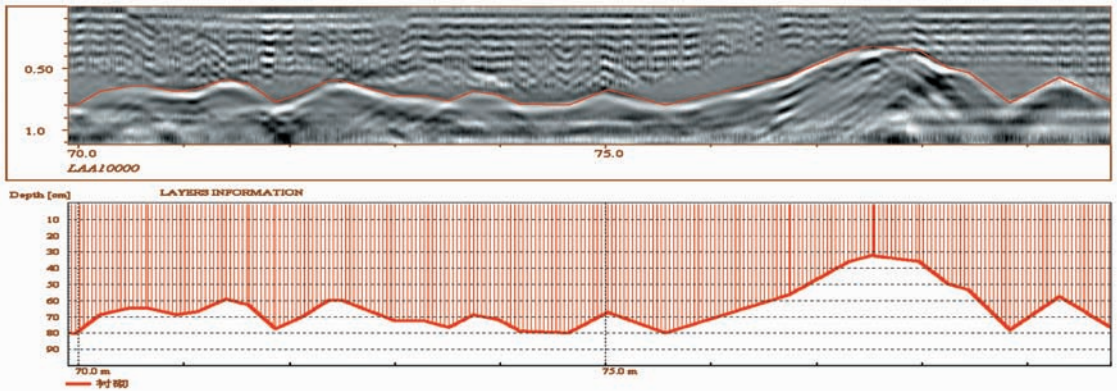


图10 拱顶衬砌不均雷达检测图

Fig. 10 Uneven radar detection map of vault lining

于自带的软件分析,然后对比文献[12]进行判断病害等级。

通过对地质雷达图像的分析,依据文献[12],对隧道衬砌厚度缺陷病害进行安全等级评定,分为:轻微、严重、较严重、极严重4种情况(表2)。

表2 风火山隧道衬砌厚度缺陷等级情况统计表(单位:m)

Table 2 Lining thickness defect level of statistical tables of fenghuoshan tunnel(unit:m)

缺陷等级	左侧墙	左拱腰	拱顶	右拱腰	右侧墙	合计
轻微	598	713	381	507	400	2599
较严重	0	0	0	0	0	0
严重	0	0	0	0	0	0
极严重	0	0	0	0	0	0

隧道衬砌背后部分存在回填不密实及空洞。依据文献[12]规定,对隧道衬砌背后空洞及回填不密实进行安全等级评定,分为:轻微、严重、较严重、极严重4种情况。衬砌背后空洞缺陷等级情况统计见表3。

衬砌背后回填不密实缺陷等级情况统计表4

表3 风火山隧道衬砌背后空洞缺陷等级情况统计表(单位:m)
Table 3 Empty defect level of statistical tables of behind lining(unit:m)

缺陷等级	左侧墙	左拱腰	拱顶	右拱腰	右侧墙	合计
轻微	0	0	0	0	1	1
较严重	0	2	6	6	0	14
严重	0	10	5	5	0	20
极严重	0	46	13	39	0	98

表4 风火山隧道衬砌背后回填不密实缺陷等级情况统计表(单位:m)

Table 4 Filling undense defect level of statistical tables of behind lining(unit:m)

缺陷等级	左侧墙	左拱腰	拱顶	右拱腰	右侧墙	合计
轻微	9	8	14	2	6	39
较严重	12	20	65	43	10	150
严重	0	10	31	0	0	41
极严重	0	33	0	0	0	33

7 结 论

通过对衬砌外观质量及检测数据的分析得出以

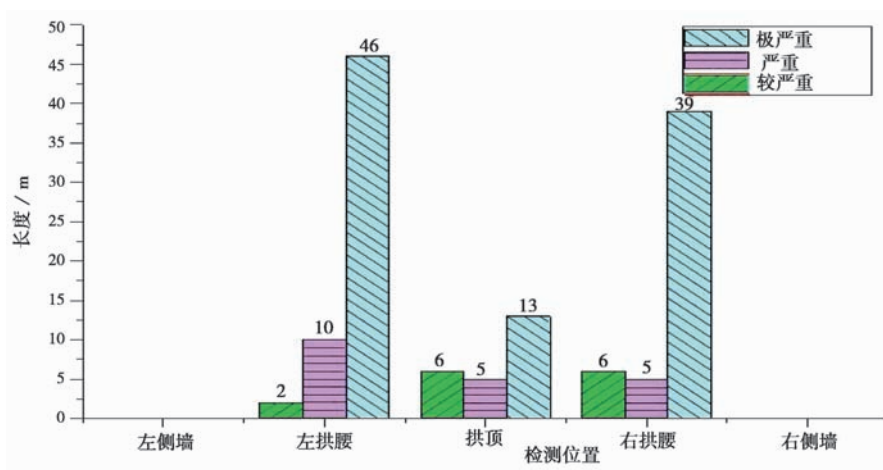


图 11 衬砌背后空洞缺陷检测分布情况

Fig. 11 Empty defect distribution chart of behind lining

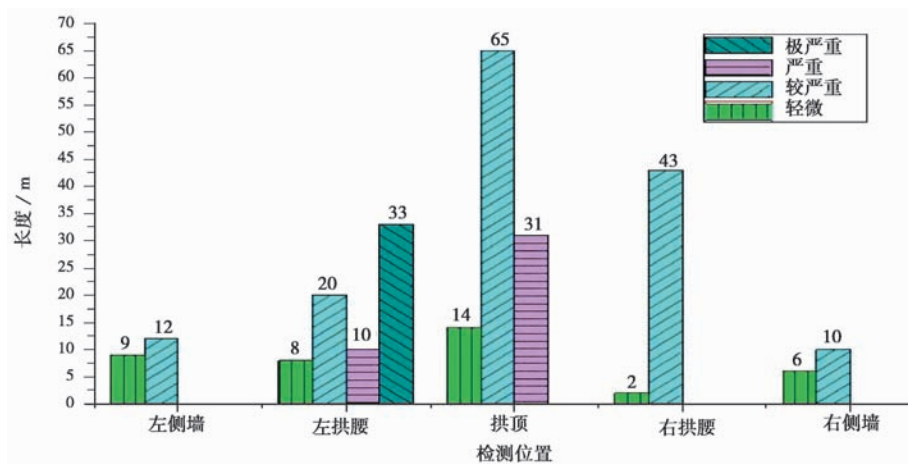


图 12 衬砌背后回填不密实缺陷检测分布情况

Fig. 12 Filling undense defect distribution chart of behind lining

下结论:

(1) 地质雷达是一种先进的无损检测仪器, 检测方法快速、简捷、无损、准确, 能够科学地检测隧道的病害, 特别是衬砌厚度, 空洞, 回填不密实等方面效果显著, 对客观评价隧道的安全性, 为隧道健康诊断能提供可靠的依据。

(2) 风火山隧道衬砌外观质量总体尚好, 主要问题是在两端洞口段存在渗水和衬砌酥裂现象。

(3) 衬砌背后存在空洞的测线长度为 133m, 占总测线长度的 1.99%。其中衬砌背后空洞缺陷等级为轻微地段测线长度为 1m, 占总测线长度的 0.01%; 衬砌背后空洞缺陷等级为较严重地段测线长度为 14m, 占总测线长度的 0.21%; 衬砌背后空洞缺陷等级为严重地段测线长度为 20m, 占总测线长度的 0.30%; 衬砌背后空洞缺陷等级为极严重地

段测线长度为 98m, 占总测线长度的 1.46% (图 11)。

(4) 衬砌背后回填不密实的测线长度为 263m, 占总测线长度的 3.93%。其中衬砌背后回填不密实缺陷等级为轻微地段测线长度为 39m, 占总测线长度的 0.58%; 衬砌背后回填不密实缺陷等级为较严重地段测线长度为 150m, 占总测线长度的 2.24%; 衬砌背后回填不密实缺陷等级为严重地段测线长度为 41m, 占总测线长度的 0.61%; 衬砌背后回填不密实缺陷等级为极严重地段测线长度为 33m, 占总测线长度的 0.49% (图 12)。

(5) 地质雷达无损检测方法作为一种的检测隧道工程质量的科学手段, 一改传统的、破坏式的检测方法, 是今后隧道质量检测的发展方向。目前, 地质雷达方法已被国际隧道协会确认为隧道快速检测技

术之一。随着技术的进步,地质雷达将广泛地应用于工程检测领域,从而发挥更大的效用。

参 考 文 献

- [1] 谢雄耀,李永胜,黄新才. 地质雷达检测在保护性建筑结构加固中的应用[J]. 同济大学学报, 2000, **28**(1):19~23.
Xie Xiong Yao, Li Yongsheng, Huang Xincan. Application of ground penetrating radar to historical building strengthening. Journal of Tongji University, 2000, **28**(1):19~23.
- [2] 马洪蛟,李宇,蔡辉,孙典红. 地质雷达探测抛填厚度研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, **28**(2):51~53.
Ma Hongjiao, Li Yu, Cai Hui, Sun Dianhong. The new application of geological radar detection technology to enclose tideland for cultivation to throw fill. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2004, **28**(2):51~53.
- [3] 苏红旗,杨峰,王均双,等. 地质雷达信号采样定时控制[J]. 中国铁道科学, 2005, **26**(3):59~63.
Su Hongqi, Yang Feng, Wang Junshuang, et al. Timing control of geological radar signals sampling. China Railway Science, 2005, **26**(3):59~63.
- [4] 刘传孝,蒋金泉,杨永杰. 地质雷达应用于探测拱桥空洞的效果验证[J]. 岩土力学, 2001, **22**(1):106~108.
Liu Chuanxiao, Jiang Jinquan, Yang Yongjie. Effects of the ground penetrating radar in probing arch bridge and cavity. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(1):106~108.
- [5] 罗方. 地质雷达在隧道健康诊断中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, **26**(3):51~54.
Luo Fang. Application of geological radar in health diagnosis of tunnel. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2006, **26**(3):51~54.
- [6] 祁明松. 地质雷达在隧洞内的探测[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1993, **18**(3):352~357.
Qi Mingsong. GPR sounding in tunnel. China University of Geosciences, 1993, **18**(3):352~357.
- [7] 郭有劲. 地质雷达在铁路隧道衬砌质量检测中的应用[J]. 铁道工程学报, 2002, **74**(2):71~74.
Guo Youjin. Exploratorion and application of geology radar for quality examination of railway tunnel lining. Journal of Rail Way Engineering Society, 2002, **74**(2):71~74.
- [8] 李晋平,邵丕彦,谷牧. 地质雷达在铁路隧道工程质量检测中的应用[J]. 中国铁道科学, 2006, **27**(2):56~59.
Li Jinping, Shao Piyan, Gu Mu. Application and analysis of GPR in railway tunnel engineering quality inspection. China Railway Science, 2006, **27**(2):56~59.
- [9] 雷刚,杨林德. 公路隧道衬砌质量检测中电磁波无损检测方法的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(增1):5081~5085.
Lei Gang, Yang Linde. Application study on nondestructive detection method of electromagnetic wave in road tunnel lining quality detection. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(s1):5081~5085.
- [10] 高鹤. 探地雷达在隧道混凝土衬砌检测中的应用[J]. 低温建筑技术, 2009, **8**,77~78.
Gao He. Ground penetrating radar applied in the detection of tunnel concrete. Low Temperature Architecture Technology, 2009, **8**,77~78.
- [11] 高鹤. 隧道混凝土衬砌质量检测方法研究[J]. 甘肃科技, 2009, **12**,127~129.
Gao He. The study of tunnel concrete lining quality detection method. Gansu Science and Technology, 2009, **12**,127~129.
- [12] 《铁路运营隧道衬砌安全等级评定暂行规定》(铁运函[2004]174号)[R].
Evaluation of safety classification for railway tunnel lining (Rail Transportation Letter[2004]. No. 174).