

文章编号:1003-1995(2018)12-0006-06

铁路隧道衬砌缺陷检测中地质雷达法和冲击回波法的联合应用研究

姜 勇¹, 吴佳晔^{2,3}, 冯 源²

(1. 中国铁路总公司 工程质量监督管理局, 北京 100038; 2. 四川升拓检测技术股份有限公司, 四川 成都 610045;
3. 四川轻化工大学 土木工程学院, 四川 自贡 643000)

摘要 铁路隧道衬砌质量关系到列车的行车安全, 一直受到各方的高度重视。目前, 主要依靠地质雷达法, 部分辅以人工敲击的方法(打声法)进行检测, 但其固有技术缺陷也日趋显著, 急需引入新的方法。本文在比较地质雷达法和冲击回波法对缺陷的理论识别能力的基础上, 结合隧道衬砌质量巡检对 2 种方法的检测效果进行了对比和验证, 说明地质雷达法和冲击回波法在隧道衬砌质量检测中联合应用效果显著, 值得推广。此外, 简要介绍了冲击声频回波法, 该方法兼有打声法和冲击回波法的优点, 应用前景广阔。

关键词 隧道衬砌; 无损检测; 冲击回波法; 地质雷达法; 试验验证

中图分类号 U45 **文献标识码** A **DOI**: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.12.02

隧道衬砌的主要质量问题有强度、厚度不足, 整体性缺陷(如脱空、空洞)等。在山体应力、冻融、列车风压等作用下, 初期的质量问题会随着铁路运营时间的推移而逐渐放大, 最后可能导致衬砌脱落等严重病害。1999 年 6 月日本山阳新干线的福冈隧道就发生了衬砌混凝土脱落(见图 1), 脱落的混凝土块(约 2.0 m×0.5 m×0.5 m)砸在高速运行的列车(新干线光号)顶部, 造成重大事故。我国在 2017 年某客运专线隧道发生了衬砌拱顶掉块, 也给铁路隧道的质量、安全敲响了警钟。



图 1 山阳新干线衬砌脱落

现行的 TB 10223—2004《铁路隧道衬砌质量无损检测规程》^[1]规定: 铁路隧道衬砌“检测内容包括衬砌的厚度、强度、背后回填密实度和内部缺陷”(第 1.0.2

收稿日期: 2018-08-12; 修回日期: 2018-09-26

第一作者: (姜勇 1963—), 男, 高级工程师。

E-mail: 13991858823@163.com

条); “地质雷达法和声波法可根据不同的检测内容和要求选用”(第 1.0.3 条); “地质雷达法适用于检测衬砌厚度、衬砌背后的回填密实度和衬砌内部钢架、钢筋等分布”(第 4.1.1 条)而“(声波)反射法适用于检测隧道衬砌混凝土厚度、内部缺陷等”(第 5.1.1 条)。由此可见, 在现行规程中已经要求地质雷达法和声波法联合应用, 而对于衬砌混凝土本身的缺陷要求采用声波法检测。

但是, 由于技术等方面的原因, 声波法在铁路隧道衬砌缺陷的检测中几乎没有得到应用, 而地质雷达法因为具有无损、快速、稳定等优点成为几乎唯一的选择。然而, 该方法存在一定的检测盲区(如双层钢筋网或钢筋保护层厚度较薄), 以及钝感区域(如表层脱空、脱空层厚度较小、不密实缺陷等), 因此经常造成缺陷漏判或误判。为此, 铁路部门引入了敲击法(也称打声法、声振法等)检测衬砌混凝土缺陷, 但由于敲击法过分依靠作业人员的主观判断、难以定量、测试深度浅等原因, 该方法的应用也面临诸多问题。

近年来, 冲击弹性波法的技术和设备发展迅速, 并在土木工程无损检测中得到广泛应用。其中, 冲击回波(Impact Echo, IE)法作为其代表方法之一, 在混凝土内部缺陷检测中发挥了重要作用^[2-6]。该方法对材料的力学特性敏感, 受混凝土内钢筋、水的影响较小, 适合于隧道衬砌的质量检测。实际上, 冲击弹性波法即为 TB 10223—2004 中声波法的一个分支。

本文首先分析了地质雷达法和冲击回波法的基

本原理,然后比较了 2 种方法对衬砌脱空的敏感性,再结合隧道衬砌巡检对 2 种方法进行了全面的比较和验证,论证 2 种方法的联合应用可以有效提高对衬砌缺陷的检出率。最后,还简要介绍了正在研究开发中的冲击声频回波法 (Impact Acoustic Echo, IAE) 法。

1 地质雷达法及冲击回波法的测试原理

1.1 地质雷达法原理

地质雷达法是利用介质对电磁波的反射特性,对介质内部的构造和缺陷(或其他不均匀体)进行探测的一种无损检测方法。当发射天线发射的电磁波遇到介电常数不同的界面时,产生反射回波,由接收天线对反射回波进行接收,通过分析接收到的反射回波的时间和形式来确定反射界面距顶面的距离及判定反射体的可能性质^[7-8]。

决定反射与否的因素取决于材料的介电常数 ϵ (或者波速) 的变化。同时,电磁波的频率也影响探测深度和分辨率。通常,频率越低,探测深度越深而分辨率越低。

1.2 冲击回波法原理

冲击回波法是 20 世纪 80 年代末发展起来的,针对结构内部缺陷的一种非常有效的检测手段。Carino and Sansalone(1984)通过对各类技术手段的对比,认为基于冲击弹性波的检测技术由于波长较长且能够反映力学特性而适合用作混凝土缺陷检测。其研究成果则由于冲击回波法而广为人知。1997 年,Sansalone 和 Streett 发表的著作中全面阐述了冲击回波法的理论、室内和现场试验结果。在此基础上,20 世纪 90 年代末期,NIST 和康奈尔大学共同发布了冲击回波法的标准草案,并于 1998 年成为 ASTM 标准 (ASTM C 1383)。

冲击回波法所采用的媒介为冲击弹性波^[2](通常采用其中的 P 波成分),由激振装置在固体表面击打而产生弹性波。可以由人工击打也可以用电磁、机械式装置激发,如图 2 所示。

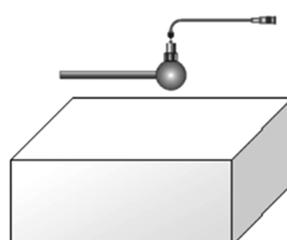


图 2 击打产生弹性波

冲击回波法(见图 3)的一大特点是利用弹性波在被测体中多次反射的特性,通过频谱分析的手段来获取结构的厚度、材质和缺陷信息。

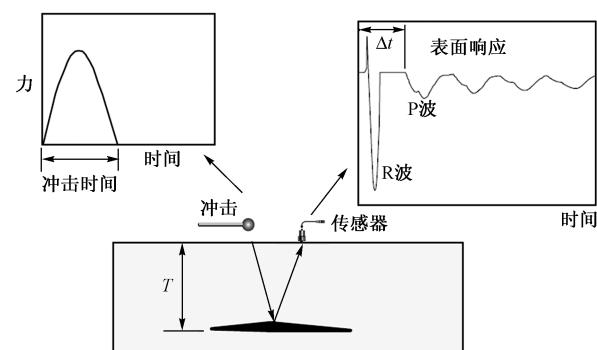


图 3 冲击回波法的基本概念

通常,冲击回波法采用 FFT(快速傅里叶变换)作为频谱分析的手段。为了提高分辨率同时兼顾稳定性,开发了 MEM(最大熵法)并取得了良好的成效^[2]。

冲击弹性波是否产生反射取决于材料的机械阻抗 z 的变化。

2 针对脱空等缺陷的检测分辨率

如前所述,无论地质雷达还是冲击回波法,都要依靠缺陷处的反射信号的有无以及强弱来识别缺陷。入射信号的反射率越高则检测分辨率越高。

2.1 不同介质条件下反射率的理论分析

根据波动理论,传播的波(无论是电磁波还是弹性波)在遇到不同介质的交界面时,会发生反射和折射。

对于双层介质,当波从介质 1 传播到介质 2 时,其反射率 R 计算式为

$$R = \frac{|z_1 - z_2|}{z_1 + z_2} \quad (1)$$

式中: z_1, z_2 分别为介质 1、介质 2 的阻抗;对于电磁波,
 $z = v \approx \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$, ϵ_r 为介质的相对介电常数;对于弹性波,
 $z = \rho v$ (ρ 为介质的密度, v 为波速)。

对于有夹层的情况,如图 4,反射率计算式见式(2)。

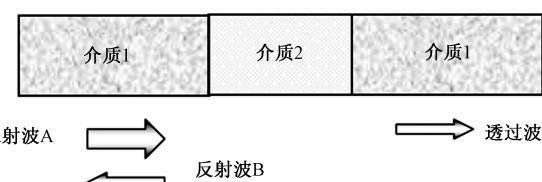


图 4 有夹层时波的传播与反射

$$R = \frac{|(z_1^2 - z_2^2) \sin(k_2 L)|}{\sqrt{4z_1^2 z_2^2 \cos^2(k_2 L) + (z_1^2 + z_2^2)^2 \sin^2(k_2 L)}} \quad (2)$$

式中: k_2 为介质 2 中的波数, $k_2 = 2\pi f/v_2$, f 为频率; v_2 为介质 2 中的波速; L 为介质 2 的长度。

2.2 对混凝土缺陷检测分辨率的理论分析

混凝土中的缺陷,其介质主要是水和空气。表 1 比较了电磁波和弹性波的阻抗。表 2 比较了从混凝土入射到其他介质时的反射系数。

表 1 电磁波和弹性波的阻抗

介质	电磁波/(m/μs)	弹性波/[Mkg/(m²·s)]
混凝土	67~120	7~11
金属	0	41
空气	300	0.000 3
水	33	1.4

表 2 混凝土中电磁波和弹性波的反射系数

介质	电磁波	弹性波
金属	1	-0.58~-0.70
空气	-0.43~-0.63	0.999 9
水	0.34~0.57	0.67~0.77

由表 1、表 2 可以看出:

1) 金属对电磁波以及空气对弹性波是全反射,因此,地质雷达发射的电磁波对钢筋、弹性波对空气(空洞、脱空)更为敏感;

2) 空气和水对电磁波的反射信号的相位是相反的,因此,地质雷达在遇到空气、水的混合体时,其反射信号会相互抵消,进而削弱检测分辨率。而空气和水对弹性波的反射相位相同,不存在降低分辨率的问题。

更一般地,下文对混凝土结构中不同脱空厚度对弹性波和电磁波的反射率进行分析。

以混凝土强度为 C50, 脱空层厚度 0.01 mm 为例, 用不同激振锤在同一脱空区域进行测试, 计算不同激振锤产生的弹性波在脱空区域的反射率, 见表 3。可以看出, 即使是 0.01 mm 的脱空厚度, 其反射率也接近全反射。

表 3 典型条件下不同频率弹性波在脱空区域的反射率

激振锤大小	激振频率/KHz	脱空层厚度/mm	脱空层反射率/%
D6	48.54	0.01	0.999 95
D10	29.12	0.01	0.999 85
D17	17.13	0.01	0.999 58
D30	9.70	0.01	0.998 70
D50	5.82	0.01	0.996 40

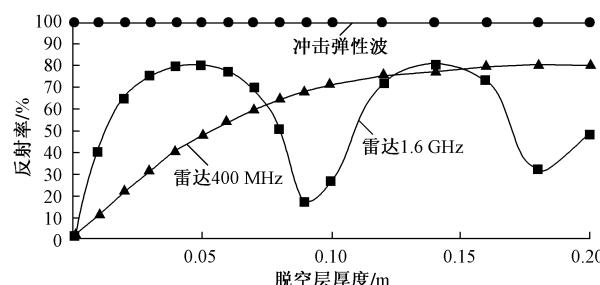


图 5 脱空厚度对微波雷达以及冲击弹性波反射率的影响

同样对电磁波进行计算。图 5 给出了 1.6 GHz 和 400 MHz 天线的雷达在不同厚度脱空层时的反射率,并与冲击弹性波反射率予以对比。其中,微波波速取 100 m/μs。可见,地质雷达对脱空的识别能力受脱空厚度的影响很大。在某些条件(特定的厚度,水、气共存)下,甚至会出现检测盲区。

3 隧道衬砌检测中 2 种方法的应用比较

结合隧道衬砌施工质量巡检,对地质雷达法和冲击回波法的联合应用进行了探索,并对 2 种方法的优缺点进行了比较和验证。

对于同样的测线分别采用地质雷达法和冲击回波法(见图 6)予以检测,缺陷的检出情况见表 4。可见,尽管对于大多数缺陷(约 78%),2 种方法均可检出,但仍有 22% 左右的缺陷地质雷达法无法检出。



图 6 地质雷达现场检测 冲击回波法现场检测

表 4 2 种方法隧道衬砌检测缺陷判定结果对比

缺陷判定一致	冲击回波法判定而地质雷达法未判定	地质雷达法未判定而开孔验证有缺陷
73 处	20 处	12 处/11 处

3.1 典型对比实例及验证

3.1.1 拱顶衬砌混凝土不密实(雷达信号不明显)

1) 实例 1(K771—K773)

图 7(a) 为地质雷达模拟图像(横轴为测点距离,纵轴为深度或反射时间),图中无明显缺陷反射,且衬砌层厚度并不明显。图 7(b) 为冲击回波法检测结果(MEM 频谱云图,横轴为反射时间,纵轴为测点距

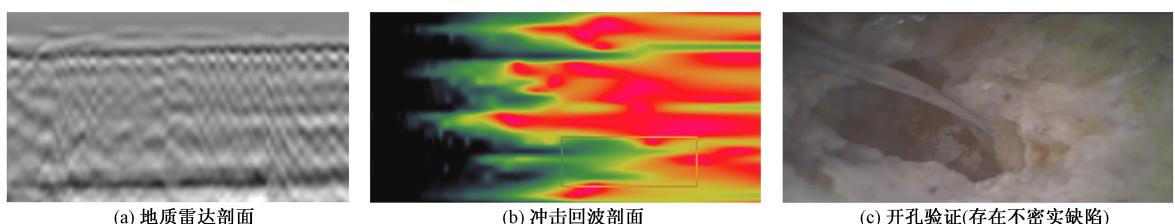
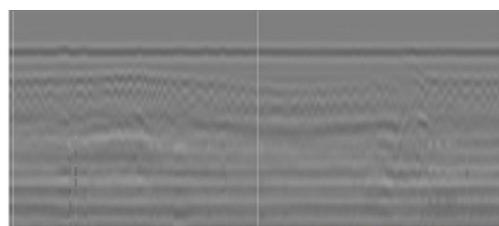


图 7 K771—K773 段检测结果及验证情况

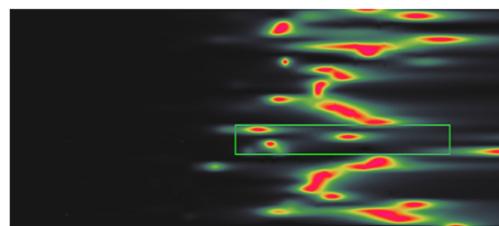
离)。图中方框内弹性波反射时间明显滞后,故判定为不密实缺陷。经开孔验证,该处确实存在不密实缺陷,见图 7(c)。

2) 实例 2(K888)

如图 8(a)所示,K888 处地质雷达剖面上缺陷不明显,无法判定是否存在缺陷,而冲击回波剖面(图 8(b))中弹性波反射位置杂乱,为不密实缺陷。经钻孔验证该处为不密实缺陷。



(a) 地质雷达剖面



(b) 地质雷达剖面

图 8 K888 处检测结果

3.1.2 钢筋网下混凝土不密实(雷达信号受钢筋屏蔽严重)

1) 实例 1

如图 9 所示,K779—K783 段雷达波信号被钢筋网屏蔽,信号在钢筋保护层间多次反射,无法有效对钢筋网下结构进行有效检测。冲击弹性波信号受钢筋影响小,能准确反映衬砌层厚度及缺陷位置。

2) 实例 2

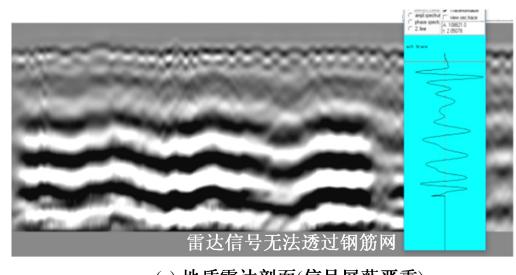
如图 10 所示,K792—K794 段雷达信号无法透过钢筋,而冲击回波剖面中反射波有明显滞后现象且在边界上突变,故排除衬砌厚度变化的情况判定为不密实缺陷。

3.1.3 拱顶衬砌脱空

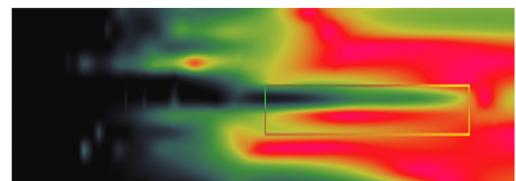
1) 实例 1

如图 11 所示,K798 拱顶冲击回波剖面反映该处

存在脱空,现场验证时施工方确认该处为空洞,而地质雷达法检测未判出此处空洞。

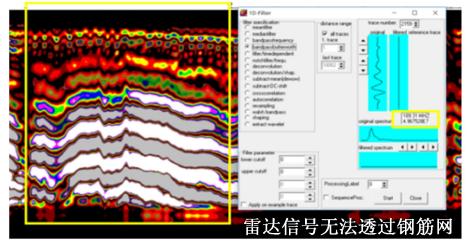


(a) 地质雷达剖面(信号屏蔽严重)

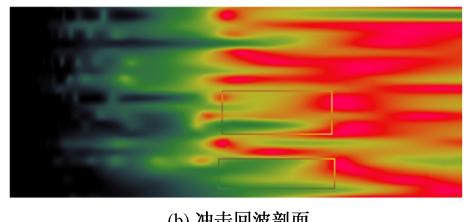


(b) 地质雷达剖面

图 9 K779—K783 段检测结果



(a) 地质雷达剖面



(b) 地质雷达剖面

图 10 K792—K794 段检测结果

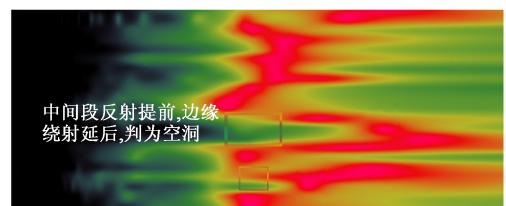
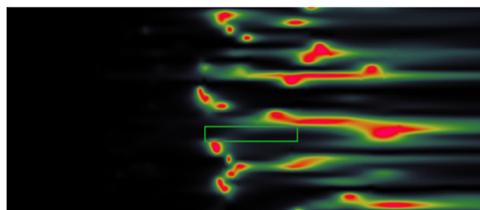


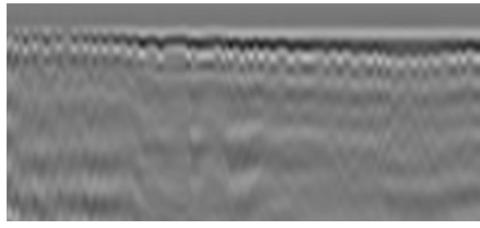
图 11 K798 拱顶冲击回波检测结果

2) 实例 2

如图 12 所示, K556—K557 段弹性波图中波形滞后, 经敲击验证后确认为表层脱空。而第三方用地质雷达法检测未判定此处缺陷。



(a) 冲击回波剖面



(b) 地质雷达剖面

图 12 K556—K557 段拱顶

3.2 2 种检测方法的对比分析

通过本次的对比验证, 可以得到:

1) 超过 70% 的缺陷, 地质雷达法和冲击回波法的判定结果一致。

2) 地区雷达法的优势在于检测效率高, 每分钟可测 10 m 左右, 还可以透过防水板, 测试初期支护的状况。其劣势在于受钢筋网的影响大, 对表层脱空、薄层脱空、混凝土不密实以及水、气共存时的缺陷不敏感。

3) 冲击回波法的优缺点恰好与地质雷达法互补, 其受钢筋、水分影响小, 对脱空及缺陷的检测分辨率高。但由于采用固定式的信号接收方法, 使得测试效率低, 同时受防水板的影响, 难以测试初期支护及背后岩体状况。

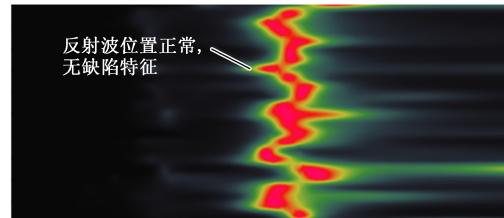
4 声频检测技术——冲击声频回波法

在隧道衬砌检测中, 尽管冲击回波法显示了其对缺陷的检出分辨率高等特点, 但其问题也非常突出。最大的问题在于需要将传感器固定在衬砌表面, 使得: ①测试效率低下, 每分钟仅可测试五六个点; ②传感器的固定状态对测试结果影响大, 特别是当衬砌表面不平、有泥皮时影响更大; ③传感器系统本身有共振周期, 当反射信号的周期与其接近时, 会扭曲频谱图形, 造成误判。

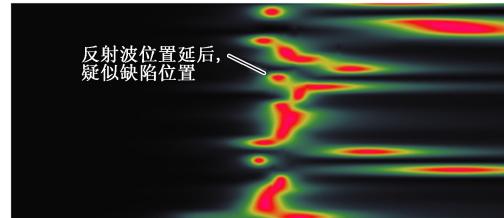
因此, 结合敲击检测(打声法)与冲击回波法的长处, 研究开发了一种全新的无损检测技术, 称之为冲击声频回波法(IAE)。

IAE 法最大的特点是采用特制的声频接收装置, 通过换算可以非接触地采集激振产生的振动信号, 并用于与冲击回波法同样的分析。由于拾音器探头与衬砌表面不接触, 因此可以用于移动式检测, 从而提高测试效率, 并避免测试表面不平整、泥皮等的影响, 有助于提高检测精度。

在巡检中, 也对开发的 IAE 原型机进行了适用性验证。图 13 是对同一条测线, 分别采用 IAE 法和 IE 法测试分析得到的图像。



(a) IAE 法剖面



(b) IE 法剖面

图 13 IAE 法和 IE 法测试结果

可以看出, IAE 法与 IE 法成像反映的变化规律基本一致, 而 IAE 法的锐度、稳定性均优于 IE 法。需要指出的是, 里程桩号 K939 处, IE 法及地质雷达法均判定该处为脱空缺陷。而在 IAE 法中该处无缺陷特征, 经钻孔验证, 该处无明显缺陷。

尽管 IAE 法作为一种崭新的无损检测方法, 还存在着许多需要改进的地方, 但其体现出的优越性使其在隧道衬砌检测中具有巨大的发展潜力。

5 结论

1) 通过理论分析和现场应用、验证, 论证了在隧道衬砌质量检测中, 联合应用地质雷达法和冲击回波法对提高衬砌(特别是二次衬砌)内缺陷的检出率有利。同时, 对现行的《铁路隧道衬砌质量无损检测规程》的贯彻也有相应的推进作用。

2) 地质雷达法测试效率高, 是铁路隧道衬砌无损检测中最常用的技术手段, 但其受钢筋、水影响大, 对小、薄及表层缺陷不敏感。而冲击回波法可以有效弥补地质雷达法的上述缺点, 在明显缺陷上 2 种检测方法可相互印证。

3) 针对冲击回波法的一些固有缺点, 开发了一种

全新的无损检测方法——冲击声频回波法。该方法吸取了冲击回波法和打声法的优点,在初步验证中取得了良好的效果,有望成为新一代隧道衬砌无损检测技术。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国铁道部.铁路隧道衬砌质量无损检测规程:TB 10223—2004[S].北京:中国铁道出版社,2004.
- [2] 吕小彬,吴佳晔.冲击弹性波理论与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程:JGJ T411—2017[S].北京:建筑工业出版

社,2017.

- [4] 吴佳晔,安雪晖,田北平.混凝土无损检测技术的现状和进展[J].四川理工学院学报(自然科学版),2009,22(4):4-7.
- [5] 朱威,张远军.冲击弹性波在衬砌脱空检测中的应用[J].四川理工学院学报(自然科学版),2017,30(3):62-66.
- [6] 孙其臣.冲击弹性波技术在水工混凝土结构无损检测中的应用研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.
- [7] 钟世航,王荣.地质雷达检测隧道衬砌中的几个问题[J].物探与化探,2002,26(5):403-406.
- [8] 李孟娟,李川.地质雷达检测隧道衬砌厚度的研究[J].物探与化探计算技术,2008,30(3):231-234.

Study on Combined Application of Geological Radar Method and Shock Echo Method in Defect Inspection of Railway Tunnel Lining

JIANG Yong¹, WU Jiaye^{2,3}, FENG Yuan²

(1.Engineering Quality Supervision Administration, China Railway Corporation, Beijing 100038, China; 2.Sichuan Central Inspection Technology Co.Ltd., Chengdu Sichuan 610045, China; 3.School of Civil Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong Sichuan 643000, China)

Abstract The quality of railway tunnel lining is related to the safety of trains and has been highly valued by all parties. At present, the inspection of tunnel lining quality mainly relies on the geological radar method, and some of it is supplemented by the method of manual tapping (sounding method), but the inherent technical defects of these methods are becoming more and more obvious, and it is urgent to introduce new methods. In this paper, the theoretical recognition abilities of geological radar method and impact echo method to the defects were compared, and on this basis, combined with the patrol inspection, the inspection effects of these two methods were compared and verified. The results show that the combined application of geological radar method and impact echo method in defect inspection of tunnel lining quality is significant and worth being promoted. At the same time, this paper also briefly introduced the impact acoustic echo method, which has the advantages of sounding method and impact echo method, and has broad prospects.

Key words Tunnel lining; Nondestructive inspection; Impact echo method; Geological radar method; Experimental verification

(责任编辑 李付军)