

文章编号: 1001-1749(2023)03-0368-04

隧道衬砌混凝土龄期对地质雷达探测深度影响的研究

刘愿愿, 连晨龙

(机械工业勘察设计研究院有限公司, 西安 710000)

摘要: 地质雷达探测深度主要决定于两个因素:①雷达波传播介质的电特性;②探测所用天线的中心频率。通常认为隧道衬砌混凝土成分固定,电属性参数基本固定,只能通过降低探测天线的中心频率来提高隧道衬砌地质雷达无损探测中的探测深度。但是随着天线中心频率的降低,探测分辨率也随之下降,衬砌轻微缺陷将会被忽视,为后期交通安全埋下隐患。通过研究发现,隧道衬砌混凝土龄期不足会影响混凝土的含水率进而影响地质雷达的探测深度,随着衬砌混凝土龄期的增长,含水率逐渐降低,地质雷达探测深度逐渐增加。

关键词: 混凝土龄期; 隧道衬砌; 地质雷达; 探测深度

中图分类号: P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-1749.2023.03.11

0 引言

地质雷达探测深度主要决定于两个因素,雷达波传播介质的电特性与探测所用天线的中心频率,其中雷达传播介质的介电常数对于雷达探测深度起着决定性的作用^[1]。在隧道衬砌地质雷达无损探测中认为,混凝土成分固定,电属性参数基本固定,一般都是通过降低探测天线的中心频率来提高地质雷达的探测深度^[2]。但是天线的中心频率降低后,地质雷达探测分辨率也随之下降,隧道衬砌某些轻微缺陷会被忽视,通车运行后漏掉的轻微缺陷随着时间推移和行车影响,逐渐发展为衬砌病害,为行车安全埋下隐患。虽然隧道衬砌混凝土成分固定,但是随着混凝土龄期的增加,水化反应进行的更为彻底,且混凝土内部的游离水逐步蒸发,混凝土内部的含水率逐渐降低,水分对雷达波的影响逐渐减弱,地质雷达的探测深度会逐渐增加^[3]。

笔者通过分析隧道衬砌混凝土中影响地质雷达

探测深度的因素,从理论上阐明了混凝土含水率对地质雷达探测深度的影响,并通过探测实验验证了混凝土龄期不足影响混凝土含水率进而影响地质雷达探测深度。

1 地质雷达法探测原理

地质雷达法作为隧道质量无损探测的一项新技术,具有连续、高效、高精度等优点。地质雷达法以电磁波反射为原理,由一台外部 PC 机、控制单元、发射机、接收机组成。它通过发射机把高频电磁波(隧道衬砌探测工作中天线主频一般在 10^8 Hz ~ 10^9 Hz 之间)以宽频带短脉冲的形式发射入混凝土中,该脉冲在混凝土中传播,在不同介质的物性分界面(衬砌界面、内部钢筋、衬砌缺陷等)发生反射,接收机接收相应的反射信号,记录它并把它显示在计算机屏幕上。通过连续的信号采集,在计算机屏幕上形成的地质雷达波形图或者灰度图,可以形象直观地反映出隧道衬砌的信息特征^[4-5](图 1)。

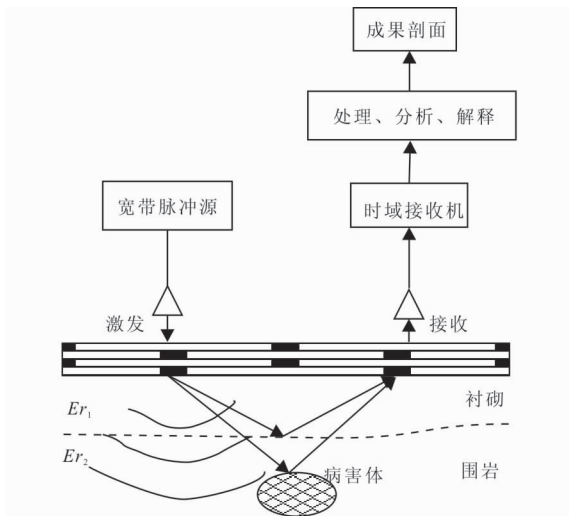


图1 地质雷达法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of geological radar method

2 影响地质雷达探测深度的因素

普通介质的电特性主要包含三个参数:①介电常数 ϵ ;②磁导率 μ ;③电导率 σ 。在隧道衬砌混凝土结构以及隧道周边环境内,一般不存在磁性很高的物体或者介质的干扰,所以磁导率 μ 可以忽略不计。混凝土中的钢筋作为良性导体,使得电磁波几乎全反射而无法向下传播;水是自然界介电常数最大的物质,混凝土中的水不但影响着电磁波的传播速度,同样影响着电磁波的衰减速度和穿透深度^[6-7]。

2.1 钢筋的影响

地质雷达反射系数公式为式(1)。

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

其中: r 为反射系数; ϵ_1 、 ϵ_2 分别为上、下介质的介电常数。

当地质雷达的发射波在隧道衬砌混凝土中传播中遇到钢筋时,混凝土的介电常数 ϵ_1 为7~9,而钢筋属于良导体,介电常数 ϵ_2 为 ∞ ,由式(1)可知,反射系数 r 接近于-1。地质雷达发射的高频电磁波传播至混凝土-钢筋界面时,反射几乎为全反射,因此通过钢筋接收到的地质雷达反射波能量非常强。而在隧道衬砌混凝土中,纵向主筋与定位箍筋排列十分密集,至少都是25 cm × 25 cm的方形网格状,几乎形成一个屏蔽网,因此钢筋背后的情况对于地质雷达是一个盲区。

2.2 水分的影响

电磁波的传播速度公式为式(2)。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

其中: v 为电磁波在介质中的传播速度; c 为电磁波在真空中的传播速度; ϵ 为传播介质的介电常数。

隧道衬砌混凝土的介电常数为7~9,水的介电常数为81。当混凝土含水率较大时,混凝土的介电常数会升高,根据式(2),电磁波在混凝土的传播速度会降低。

另外,电磁波在传播介质中的衰减因子可近似表示为式(3)^[8]。

$$\alpha = \frac{1.69 \times 10^3 (\sigma_{dc} + 2\pi f \epsilon'' \epsilon_0)}{\sqrt{\epsilon'}} \quad (3)$$

其中: α 为电磁波衰减因子; σ_{dc} 为传播介质的直流电导率; f 为工作频率; ϵ'' 为含水介质的弛豫效应因子; ϵ_0 为真空的介电常数; ϵ' 为传播介质相对复介电常数的实部。

根据式(3),不同电导率下,电磁波在传播介质中的衰减因子 α 与工作频率 f 的关系如图2所示。

根据公式(3)和图2可以得出,当其他参数一定时,电导率增加,衰减因子线性增加。因此,当隧道衬砌混凝土龄期不足时,混凝土的自由水和游离离子结合导致电导率升高,电磁波衰减速度增加,探测深度降低。

由图2可以看出,当工作频率高于100 MHz时,衰减因子急剧上升,这主要是因为介质所含水分在高于100 MHz电磁场作用下,产生了所谓的弛豫效应,使衰减因子急剧偏离平衡态的缘故。为了保证探测分辨率,用于隧道衬砌探测的天线中心频率一般在 10^8 Hz~ 10^9 Hz之间,混凝土中的水分会使

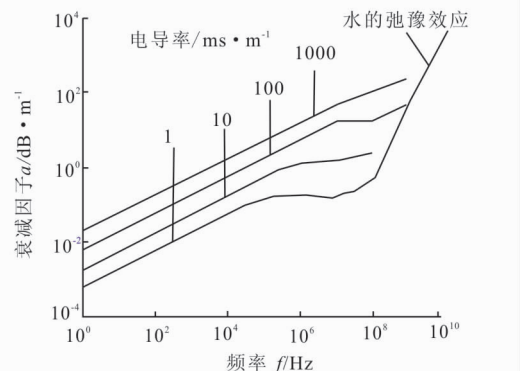


图2 不同电导率下频率与衰减因子的关系

Fig. 2 Relationship between frequency and attenuation factor under different conductivity

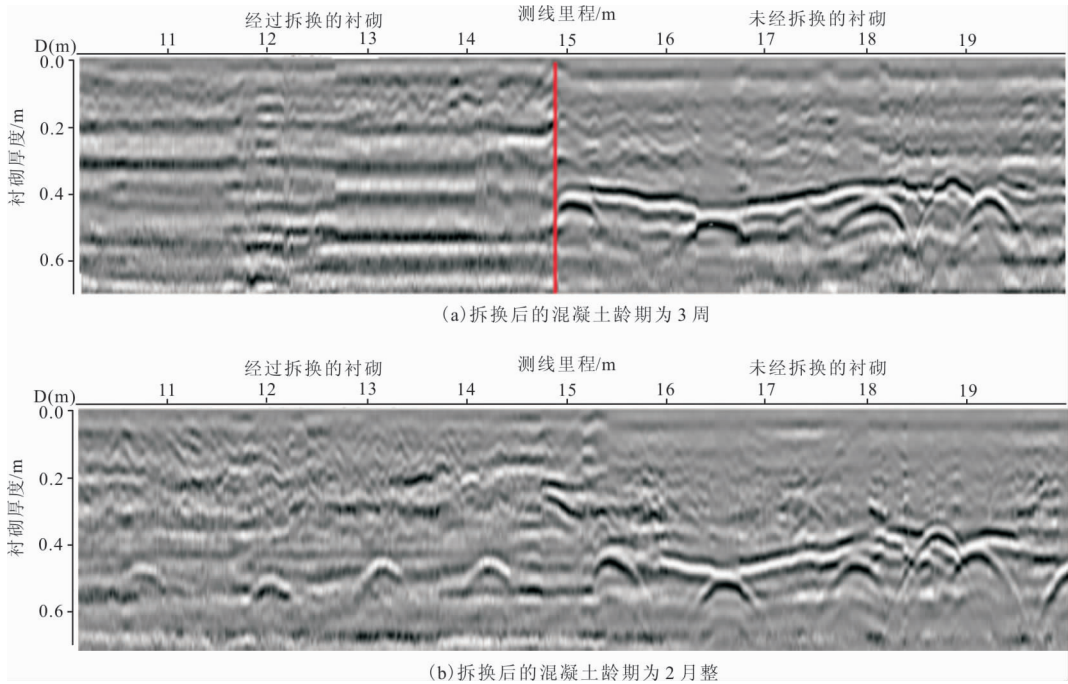


图 3 同一处衬砌不同龄期时地质雷达图像

Fig. 3 GPR image of the same lining at different ages

使得地质雷达发射的电磁波急剧衰减,极大地降低地质雷达的探测深度。当进行隧道衬砌地质雷达无损探测工作时,混凝土中的水分会通过降低电磁波传播速度、增加电磁波衰减速度来显著降低地质雷达的探测深度。当隧道衬砌混凝土龄期不足时,混凝土含水率较高,地质雷达探测深度较小。随着龄期的增长,混凝土内部水化反应进行的更为彻底,消耗了混凝土中的自由水。同时,混凝土中的游离水逐步向空气中蒸发,进一步减少了混凝土中的含水率,使得地质雷达探测深度逐渐增加。

3 探测实例

对于正常探测工作而言,施工的连续性使混凝土龄期逐步递减,因此龄期对地质雷达探测深度的影响,在探测结果中呈现出渐进递减的状态,无法形成直观简洁的对比。笔者在改建铁路阳安线增建第二线项目中新分水岭隧道修建时,因偶然因素对隧道衬砌混凝土局部进行了拆换处理。在拆换后不同的龄期范围内,采用瑞典的 X3M 型地质雷达主机与 800 MHz 屏蔽天线进行了多次探测,探测效果对比图如图 3 所示。

由图 3 可以看出,经过拆换的混凝土和未经拆换的隧道衬砌混凝土地质雷达图像对比明显(图 3(a)),拆换边缘可以轻易从图像中获得。未经拆换的衬砌,800 MHz 屏蔽天线的有效探测深度可以达

到 50 cm 以上,衬砌界面与衬砌背后钢架清晰可见,而经过拆换后龄期不足的混凝土,由于混凝土含水率较高,800 MHz 天线有效探测深度只有 20 cm 左右,20 cm 以下的深度中地质雷达图像信号都是低频多次反射信号,无任何有效信号。

由图 3(b)可以看出,拆换与未拆换衬砌的图像几乎一致,仅可以通过未拆换的衬砌中初支与二衬之间存在一定程度的不密实可以判断拆换边缘。拆换与未经拆换的衬砌中,地质雷达探测深度都可以达到 50 cm,衬砌界面与衬砌背后钢架均清晰可见。

对比可见,隧道衬砌混凝土龄期不足对于地质雷达的探测深度影响十分显著,对于龄期 3 周的混凝土,瑞典 mala 厂家的 800 MHz 天线最大探测深度只有 20 cm 左右,而当龄期超过两月时,800 MHz 天线最大探测深度可以达到 50 cm 以上。

由于各地气候条件相差较大,且就同一地方,由于旱季雨季等季节差别引起的空气湿润度不同,以及不同隧道内温度差异较大,衬砌养护措施差异较大,所以无法得出一个可供行业参考的、对地质雷达探测深度影响较小的龄期临界值,笔者建议按照强度龄期 56 d 开展隧道衬砌地质雷达无损探测工作。

4 结论

笔者从地质雷达原理出发,归纳了隧道衬砌混凝土中影响地质雷达探测深度的材料介质,阐明了

不同材料影响地质雷达探测深度的相关机理,并通过检测实例验证了理论的正确性,得出了如下结论:

1)混凝土中的水分对于地质雷达探测深度影响较大。水分不但会降低电磁波的传播速度,而且会增加电磁波的衰减因子,极大地减少地质雷达的探测深度。

2)当地质雷达用于隧道衬砌质量无损探测时,应当考虑龄期对于地质雷达探测深度的影响,最好在龄期满足要求的基础上开展地质雷达探测工作,以确保最佳探测深度。

参考文献:

- [1] 汪谋. 影响地质雷达探测效果因素的研究[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(1): 177—180.
WANG M. Research on Influencing factors of GPR's detection effectiveness[J]. Radar Science and Technology, 2007, 19(1): 177—180. (In Chinese)
- [2] 李二兵, 谭跃虎, 段建立. 地质雷达在隧道工程检测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 267—270.
LI E B, TAN Y H, DUAN J L. Application of ground probing radar in tunnel engineering detection[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(2): 267—270. (In Chinese)
- [3] 杨显衡, 董嘉. 隧道衬砌混凝土龄期对地质雷达测试影响研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S1): 185—189.
YANG Y H, DONG J. Study on influence of tunnel lining concrete age on geological radar testing[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S1): 185—189. (In Chinese)

- [4] 薄会申. 铁路隧道衬砌质量检测与评价地质雷达技术实用手册[M]. 北京:地质出版社, 2006.
BO H S. Practical manual of geological radar technology for detection and evaluation of railway tunnel lining quality [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006. (In Chinese)
- [5] 谢迎春. 地质雷达在铁路隧道衬砌质量检测中的应用[J]. 西部探矿工程, 2017, 29(01): 183—184+187.
XIE Y C. Application of ground penetrating radar in detection of the tunnel lining quality[J]. Radar Science and Technology, 2017, 29(01): 183—184+187. (In Chinese)
- [6] 崔广炎. 隧道衬砌典型病害无损检测辨识方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
CUI G Y. Study on the non-destructive testing and identification method for typical diseases of tunnel lining[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (In Chinese)
- [7] 申耀伟, 尤哲敏. 高铁运营隧道衬砌质量地质雷达检测技术[J]. 铁道建筑, 2012, 000(012): 57—60.
SHEN Y W, YOU Z M. Detection technology using geological radar for inspecting of lining quality of tunnel on high speed railway[J]. Railway Engineering, 2012, 000(012): 57—60. (In Chinese)
- [8] 李大洪. 影响地质雷达工作频率选择的若干因素[J]. 矿业安全与环保, 2000(S1): 29—30+15—148.
LI D H. Some factors affecting the selection of working frequency of geological radar[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2000(S1): 29—30+15—148. (In Chinese)

Study on the influence of the age of tunnel lining concrete on the detection depth of geological radar

LIU Yuanyuan, LIAN Chenlong

(China—Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co, Ltd, Xian 710000 China)

Abstract: The detection depth of geological radar mainly depends on two factors: the electrical characteristics of the radar wave propagation medium and the center frequency of the antenna used for detection. It is generally believed that the composition of tunnel lining concrete is fixed, and the electrical property parameters are fixed. Therefore, the detection depth in tunnel lining geological radar nondestructive detection can only be improved by reducing the central frequency of the detection antenna. However, with the decrease of the central frequency of the antenna, the detection resolution will also decline, and the slight defects of the lining will be ignored, laying hidden dangers for later traffic safety. Through the research, it is found that the insufficient age of tunnel lining concrete will affect the detection depth of geological radar by affecting the moisture content of concrete. With the growth of lining concrete age, the moisture content gradually decreases, and the detection depth of geological radar gradually increases.

Keywords: concrete age; tunnel lining; geological radar; detection depth