

文章编号: 1001-1749(2023)05-0625-10

隧道衬砌质量的地质雷达电磁波 反射特征分析及应用

胡汛训¹, 李理², 付小念³, 付代光³, 张杨³

(1. 湖北省水利水电规划勘测设计院, 武汉 430064;

2. 长江设计集团长江岩土工程有限公司, 武汉 430010;

3. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

摘要: 针对乌尉高速公路天山胜利隧道衬砌施工中出现的脱空、厚度不足和不密实等质量问题, 采用基于时域有限差分(FDTD)的模拟方法, 对隧道衬砌中常见的缺陷进行正演模拟, 正演结果与实测数据反射剖面的地球物理特征一致性吻合较好。其次, 本研究对于典型缺陷或标志物与之对应的地质雷达电磁波反射特征进行了总结和归纳, 结果表明, 隧道衬砌典型缺陷或标志物地质雷达电磁波, 具有振幅突变、电磁波同相轴畸变、波形极性反转等特征, 这些特征对于现场检测人员快速判读、解译采集的雷达数据有重要参考作用, 也对目标地质体和隧道衬砌缺陷快速准确识别有较大帮助, 有助于提高一线作业人员的检测效率, 确保隧道整体稳定性及安全运营。

关键词: 隧道衬砌; 时域有限差分; 缺陷; 电磁波反射波特征

中图分类号: P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.05.09

0 引言

隧道衬砌的质量关系到隧道整体稳定性及隧道的安全正常运营, 加强隧道施工过程中衬砌质量检测具有重要意义。目前的检测内容主要针对衬砌厚度不足、空洞、衬砌脱空、不密实、钢筋缺失、钢拱架间距偏大等质量问题。传统的检测方法主要有现场开凿法、电磁感应法和冲击回波法。其中: ①现场开凿法是最直观和准确的方法, 但对隧道具有一定的破坏性, 在实际检测中只在特殊情况下使用; ②电磁感应法具有造价低和使用方便等优点, 但检测精度较低; ③冲击回波法具有检测精度高的优势, 但是检测效率偏低。地质雷达以高频电磁波为场源, 以电磁波传播理论为基础, 利用发射天线发射电磁波, 电

磁波经隧道结构的反射被接收天线所接收, 对接收的反射电磁波信号进行数据处理, 根据数据分析判读隧道病害情况。地质雷达无损检测技术具有检测效率高、操作简便、分辨率高等优势, 在公路、铁路及水工隧道中有着广泛的应用。

王华牢等^[1]对衬砌厚度不足的问题利用数值仿真的方法对衬砌安全性的影响做出评估; 张鸿飞等^[2]对隧道衬砌检测中常见的几种空洞模型进行正演模拟, 得出模拟波形和图谱, 并与实测隧道衬砌空洞的探地雷达波形和图谱进行对比; 喻军等^[3]介绍了地质雷达的原理和常见图像的识别判断, 如空洞、不密实、衬砌厚度、锚杆、钢筋网和钢拱架间距; 刘新荣等^[4]对隧道衬砌内的空洞进行正演模拟, 得到其相应的正演合成三维剖视图及切片图, 实现雷达数据三维正演可视化, 探讨空洞的三维图谱特性; 张素

收稿日期: 2023-04-11

第一作者: 胡汛训(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工结构研究工作, E-mail: 105730326@qq.com。

通信作者: 付小念(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地球物理正反演等领域的研究工作, E-mail: fuxiaonian_geo@126.com。

磊^[5]通过理论分析、数值计算、室内相似模型试验和现场检测相结合的方法对隧道衬砌结构缺陷进行评定。尽管这些研究取得了很多有价值的成果,但仍有一些关键问题没有被充分讨论,比如衬砌中钢筋的模拟研究大多只是针对固定间距的单层钢筋,对双层钢筋和间距过小情况的研究较少;对于空洞的研究模型过于单一,针对不同形状、大小不等空洞的探测研究较少;目前的研究中关于正演成果较多,实证验证相对较少;另外,二衬缺陷的探地雷达图像判译过度依赖于探测人员的解译经验,尚未构建起针对各类型缺陷的系统性的解译标志,无法保证解译结果的客观性^[6-8]。

笔者在总结前人研究成果的基础上,①对隧道初支、二衬中常见的缺陷类型进行时域有限差分法(Finite difference time domain, FDTD)数值模拟,使用频率 400 MHz、1 000 MHz 雷达天线对衬砌中不同间距的单双层钢筋缺失、不同厚度、不同形状脱

空和不密实等缺陷进行地质雷达探测正演模拟;②通过正演模拟结果,分析隧道衬砌缺陷的地质雷达电磁波反射波特征和某工程实测结果,证明数值模拟结果的有效性,总结、分析了衬砌缺陷的地质雷达电磁波反射特征及解译标志。

1 隧道初支衬砌结构模型

根据隧道初支标志物物理性质及几何特征,建立如图 1 所示的隧道含缺陷初支几何模型:模型长为 9 m,垂向厚度为 0.9 m,纵向厚度为 0.01 m,包含 7 榀宽为 0.4 m,厚为 0.06 m 的钢拱架,第三榀和第四榀拱架、第五榀和第六榀拱架之间有柱形空洞。

正演参数^[9-16]:激发子波为雷克子波,子波频率为 1 000 MHz,差分网格大小为 0.01 m×0.01 m×0.01 m,天线步长为 0.01 m,采集时窗为 30 ns,具体模型参数如表 1 所示。

表 1 隧道初支几何模型及正演参数一览表

Tab. 1 List of geometric modeling and forward modeling parameters of tunnel primary support

模型类别	名称	描述
几何模型参数	地质体尺寸	9 m * 0.9 m * 0.01 m
	钢拱架尺寸	0.4 m * 0.06 m(7 榀)
	缺陷 1	直径为 0.12 m;高度为 0.01 m 的圆柱体空洞
	缺陷 2	高度为 0.01 m 的三棱柱空洞
正演模型参数	子波类型及主频	雷克子波, 1000 MHz
	差分网格及边界条件	0.01 m×0.01 m×0.01 m, UPML 边界条件
	时窗	30 ns
	介质 1	混凝土 相对介电常数: 7 电导率/S·m ⁻¹ : 0.001
	介质 2	工字钢 相对介电常数: ∞ 电导率/S·m ⁻¹ : 0.01

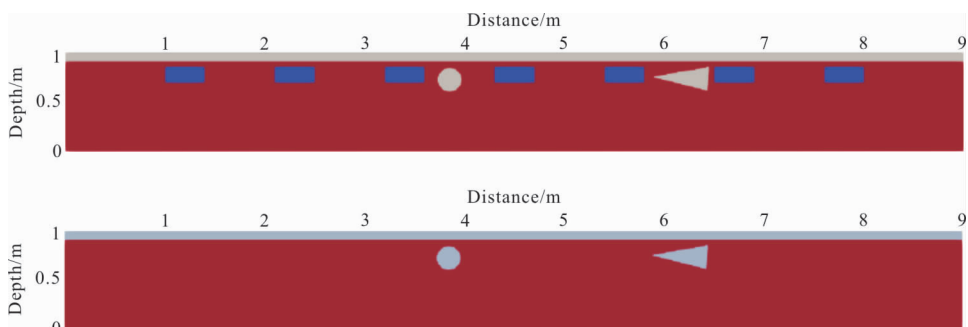


图 1 隧道初支含缺陷几何模型

Fig. 1 Geometric modeling of tunnel primary support with defects

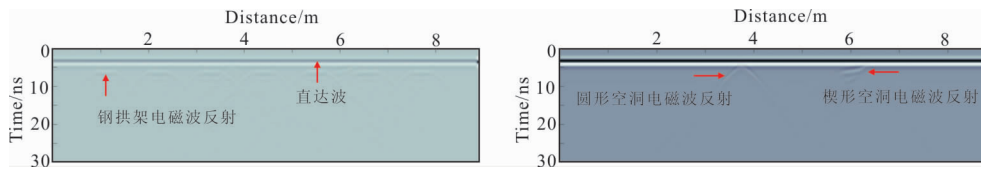


图 2 隧道初支含缺陷模型正演模拟

Fig. 2 Forward modeling of tunnel initial support with defects

表 2 隧道二衬几何模型及正演参数一览表

Tab. 2 List of geometric modeling and forward modeling parameters of tunnel secondary lining

模型类别	名称	描述	
几何模型参数	地质体尺寸	2.5 m × 0.6 m × 0.01 m	
	钢筋尺寸	半径 0.02 m	
	缺陷 1	二维剖面三角形空洞	
	缺陷 2	宽为 0.02 m 的结构缝	
	缺陷 3	矩形不密实	
	缺陷 4	倒三角形脱空	
正演模型参数	缺陷 5	圆形空洞	
	子波类型及主频	雷克子波, 1000 MHz	
	差分网格及边界条件	0.01 m × 0.01 m × 0.01 m, UPML 边界条件 ^[15-16]	
	时窗	30 ns	
	介质 1	混凝土	相对介电常数: 7 电导率/S · m ⁻¹ : 0.001
	介质 2	钢筋	相对介电常数: ∞ 电导率/S · m ⁻¹ : 0.01
	介质 3	空气	相对介电常数: 1 电导率/S · m ⁻¹ : 0.001
	介质 4	不密实混凝土	相对介电常数: 5 电导率/S · m ⁻¹ : 0.001

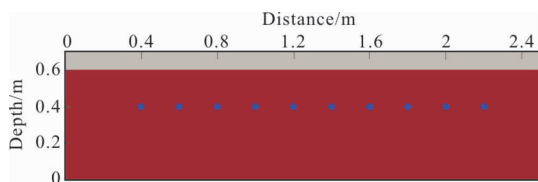


图 3 隧道二衬单排钢筋几何模型

Fig. 3 Geometric modeling of single row reinforcement for tunnel secondary lining

波反射同相轴错乱, 出现较强振幅反射^[17]。无缺陷部位和有缺陷部位电磁反射波波场特征有明显差异。

2 隧道二衬结构模型

根据隧道二衬标志物物理性质及几何特征, 建立如图 3 所示的隧道二衬含几何缺陷模型: 模型长为 2.5 m, 垂向厚度为 0.6 m, 纵向厚度为 0.01 m, 包含半径为 0.02 m 的钢筋。

正演参数: 激发子波为雷克子波, 子波频率为 1 000 MHz, 差分网格大小为 0.01 m × 0.01 m × 0.01 m, 天线步长为 0.01 m, 采集时窗为 30 ns, 具体模型参数如表 2 所示。隧道二衬单排钢筋模型正

通过图 2 的正演模拟结果可以看出, 钢拱架对雷达信号产生较强能量的反射, 反射振幅较大, 原始正演雷达剖面上钢拱架对应位置弧形反射明显, 第三榀和第四榀拱架, 第五榀和第六榀拱架之间, 电磁

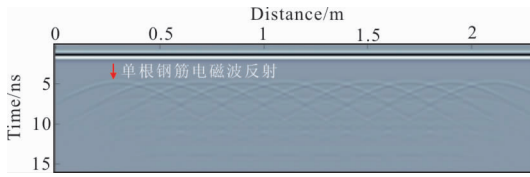


图 4 隧道二衬单排钢筋模型正演模拟

Fig. 4 Forward simulation of single row steel bar model for tunnel secondary lining

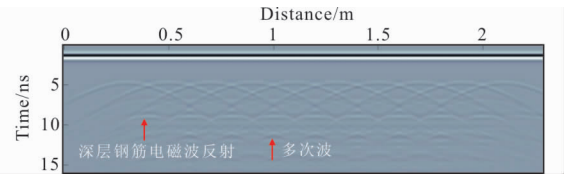


图 8 隧道二衬梅花形排布双排钢筋模型正演模拟

Fig. 8 Forward simulation of a double row steel bar model with plum blossom arrangement in the secondary lining of a tunnel

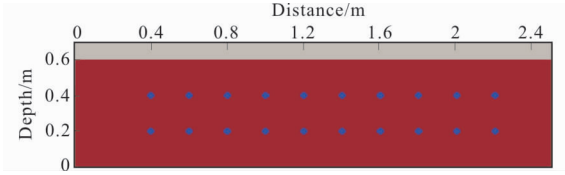


图 5 隧道二衬对称排布双排钢筋几何模型

Fig. 5 Geometric modeling of symmetrical arrangement of double row reinforcement in tunnel secondary lining

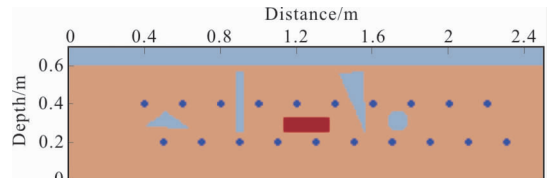


图 9 隧道二衬含缺陷几何模型

Fig. 9 Geometric modeling of tunnel secondary lining with defects

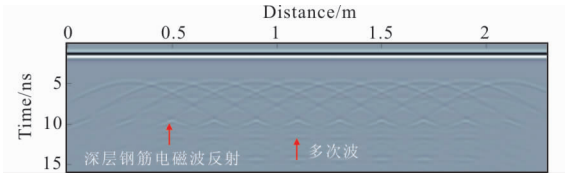


图 6 隧道二衬对称排布双排钢筋模型正演模拟

Fig. 6 Forward simulation of a symmetrical arrangement of double row steel bars model for tunnel secondary lining

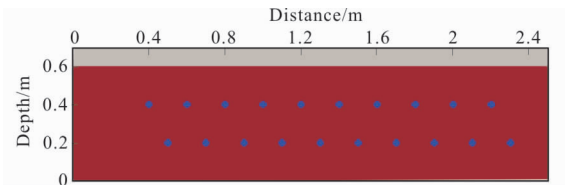


图 7 隧道二衬梅花形排布双排钢筋几何模型

Fig. 7 Geometric modeling of double row reinforcement in quincunx arrangement for tunnel secondary lining

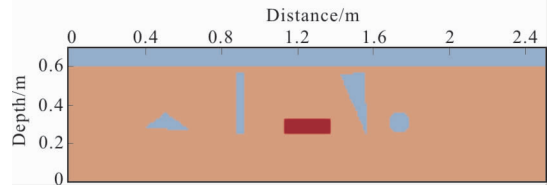


图 10 隧道二衬含缺陷模型正演模拟

Fig. 10 Forward simulation of tunnel secondary lining with defects model

演模拟结果如图 4 所示。

分别设计了如图 5、图 7 所示的隧道二衬对称排布双排钢筋几何模型和隧道二衬梅花形排布双排钢筋几何模型,对比分析两种模型的正演模拟结果(图 6 和图 8)可知,需要进一步的信号处理^[17-20],才能准确解译出深层钢筋信息。

图 9 为隧道二衬含缺陷模型,图 10 为隧道二衬含缺陷模型正演模拟结果,从模拟结果可以看出,PVC 管、预埋件、结构缝、混凝土振捣不均匀、混凝

土裂缝等原因产生的二衬脱空、不密实等缺陷在雷达反射剖面上表现为强振幅反射,反射波相位为负,而钢筋反射的相位一般为正;浅层钢筋及部分缺陷容易辨别,未经处理的原始剖面不易辨识模型深部信息。

3 实测案例分析

3.1 工程概况

天山胜利隧道是 G0711 乌鲁木齐至尉犁段高

速公路建设项目的重要控制性工程,建成后将打通天山南北的交通运输屏障,成为连接北疆、南疆之间的安全、舒适、快捷、高效公路运输通道。隧道两端位于乌鲁木齐县萨尔达坂乡 216 国道旁以及和静县乌鲁斯台查汗村乌斯托车站附近 S301 省道 K217+400-600 北侧;天山胜利隧道设计为分离式隧道,净空 11.0 m(宽)×5.0 m(高),隧道采用主洞+服务隧道的“三洞”形式,共设置 4 处通风井,每处由两座竖井组成。左线隧道长度为 22 105.00 m,隧道最大埋深约 1 115.03 m;右线隧道长度为 22 006.7 m,隧道洞底最大埋深约 1 122.024 m;服务隧道长度为 22 054.5 m。

3.2 初支实测案例

天山胜利隧道自 2020 年 5 月开工以来,隧道衬砌施工质量一直备业主和各参建单位的关注。对隧

道 ZK76+419~ZK76+434 段初支质量采用 Sir-4000 型雷达,400 MHz 天线进行无损检测,测量时窗为 40 ns,测量模式为连续测量。该施工段初支设计参数为: $\Phi 22L=3.0$ m 药卷锚杆,C25 喷射砼厚为 28 cm,22b 型工字钢支护,工字钢间距为 100 cm。

图 11 为隧道 ZK76+419~ZK76+424 左拱腰处初支检测地质雷达反射剖面,由图可以看出,钢拱架处电磁波相位反转,弧形反射明显,深层部位电磁波同相轴较连续,表明该段初支质量良好,无明显缺陷。

图 12 为隧道 ZK76+419~ZK76+424 右拱腰处初支检测地质雷达反射剖面,由图 12 可以看出,第 3 榀和第 4 榀钢拱架之间电磁波反射同相轴连续性较差,层间波形杂乱,局部呈蜂窝状,部分位置出现相位反转,推测为不密实。

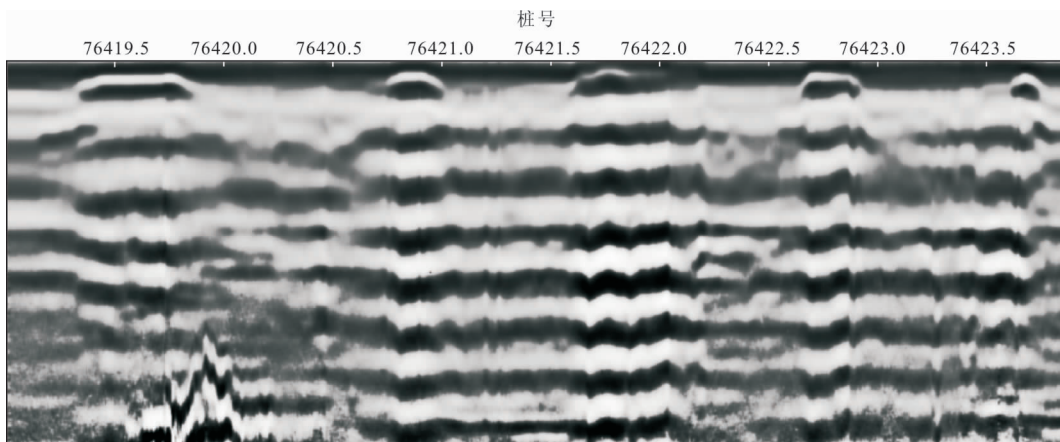


图 11 隧道初支无缺陷雷达反射剖面

Fig. 11 Defect free radar reflection profile for initial tunnel support

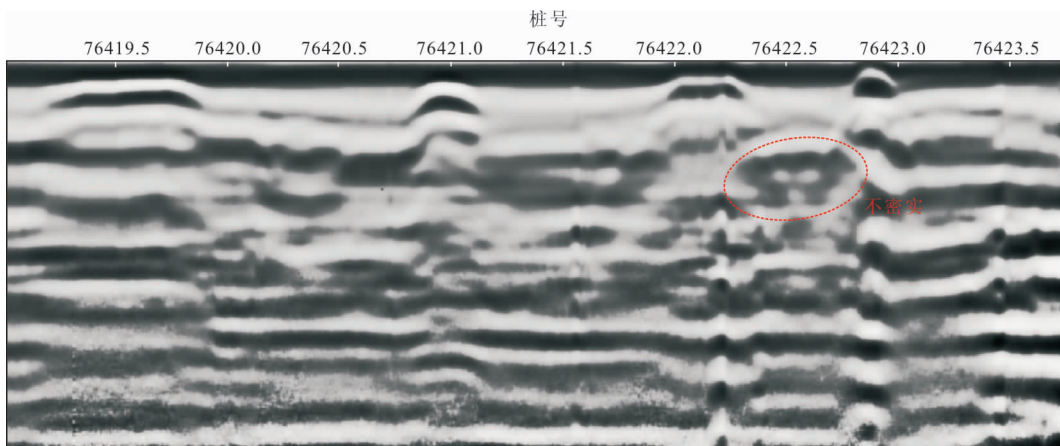


图 12 隧道初支右拱肩不密实缺陷雷达反射剖面

Fig. 12 Radar reflection profile of incomplete defects in the right arch shoulder of the initial support of the tunnel

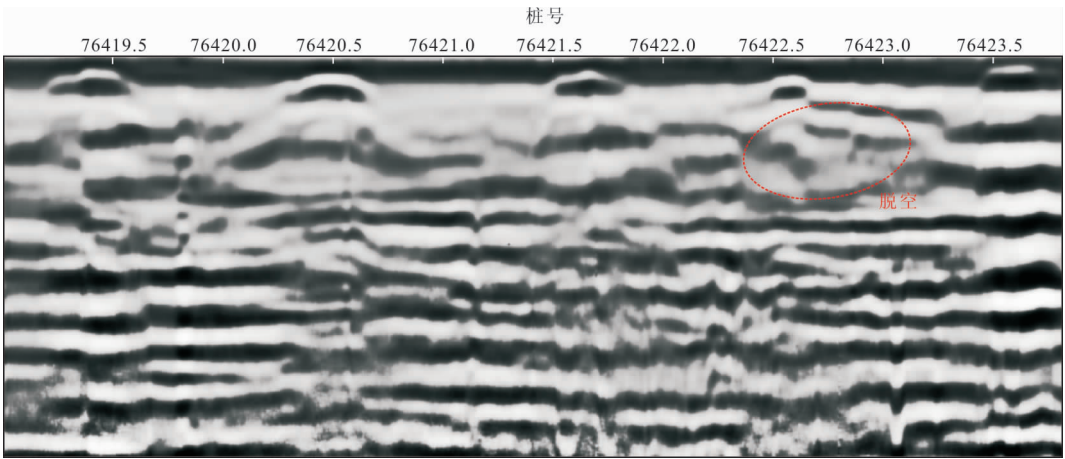


图 13 隧道初支拱顶脱空缺陷雷达反射剖面

Fig. 13 Radar reflection profile of the first support arch roof void defect in the tunnel



图 14 隧道初支脱空缺陷开孔验证

Fig. 14 Verification of hole opening for void defects in tunnel primary support

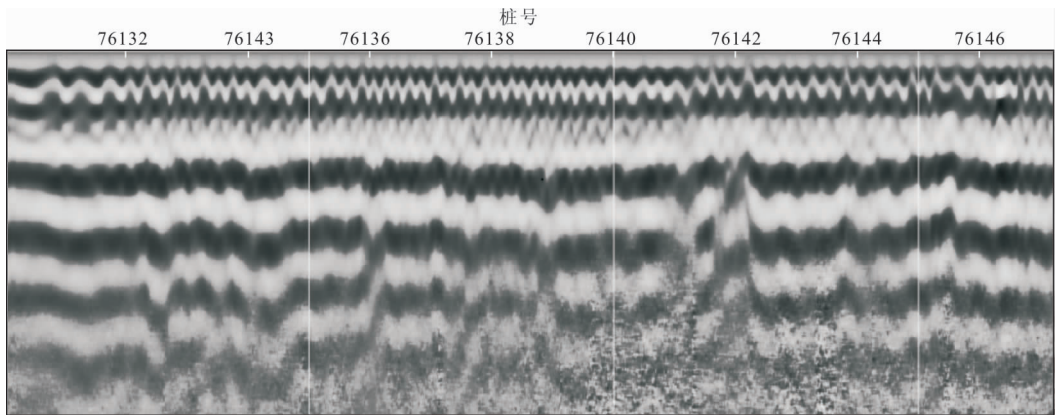


图 15 隧道二衬实测无缺陷剖面

Fig. 15 Measured defect free profile of tunnel secondary lining

图 13 为隧道 ZK76+419~ZK76+424 拱顶处初支检测地质雷达反射剖面,从图 13 可以看出,第 4 榀和第 5 榀钢拱架之间电磁波反射同相轴明显错断,层间波形杂乱,多次反射特征明显,同相轴振幅异常增大或减小,与正演模拟结果图 2 中的电磁波反射特征较一致,推测为局部脱空,脱空区间为

ZK76+422.4~ZK76+423.4。

图 14 为脱空位置 ZK76+423 钻孔验证记录,顶拱位置检测结果与钻孔结果揭露的脱空位置及深度完全吻合,证明了雷达反射剖面解译的可靠性。

3.3 二衬实测案例

对天山胜利隧道 YK76+130~YK76+245 段

二衬质量采用 Sir-4000 型雷达,400 MHz 天线对该隧道初支质量进行无损检测。隧道二衬设计参数为:采用 C22 型钢筋支护,钢筋间距为 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$,二衬厚度为 40 cm。图 15 为某工地隧道二衬实测无缺陷剖面,该剖面反映二衬钢筋弧形反射明显,无明显缺筋情况,反射剖面深度调零校正后,深度满足设计要求。

图 16 红色方框 YK76+187.2~YK76+188.4 内反射信号突然增强,同相轴错乱,局部呈带状或三角形展布,深部伴有多次反射信号,与正演模拟结果图 2 中的电磁波反射特征较一致,推测为脱空。

3.4 小结

对于隧道衬砌而言,雷达扫描介质常见的有混凝土、钢筋、钢拱架、电缆、裂隙水等,对于已知的介质模型,可认为雷达扫描的是各向同性介质,综合隧道衬砌质量正演模型及实测剖面地质雷达电磁波反射特征,现场检测人员能够对这些反射特征有充分的认识,根据实时检测显示剖面快速判断缺陷类型精确定位缺陷位置,将大大提高检测效率。笔者整理出隧道衬砌典型缺陷或标志物地质雷达电磁波反射特征对照表(表 3),可根据雷达剖面异常反射特征性质定性判断标志物类别或缺陷类型。

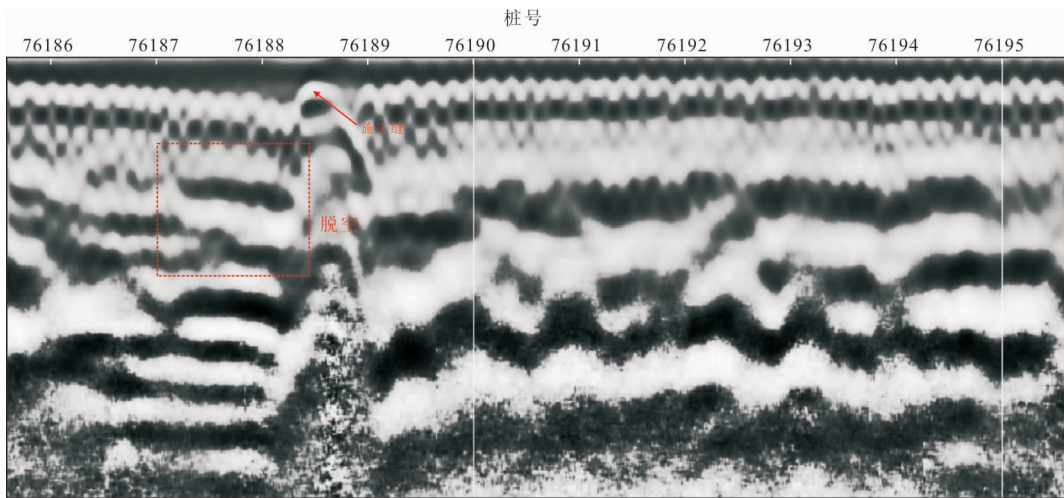


图 16 隧道二衬含缺陷剖面

Fig. 16 Section with defects in the secondary lining of the tunnel

表 3 隧道衬砌典型缺陷或标志物地质雷达电磁波反射特征对照表

Tab. 3 Comparison table of typical defects or markers in tunnel lining and geological radar electromagnetic wave reflection characteristics

典型缺陷或标志物类型	地质雷达电磁波反射特征
混凝土块体	无明显层间反射,反射波振幅均匀,同相轴连续
横向电缆干扰	反射信号大部分被屏蔽,剖面竖纹明显
横向结构缝	反射剖面同相轴间断
裂隙水	反射波振幅增强,剖面出现明显“亮点”
不规则脱空	弧形反射明显,反射波振幅增强,弧形边界为空洞边界,层间同相轴错乱畸变
不密实	视不密实情况而定,主要表现为波形极性反转,层间同相轴错乱
钢拱架、钢筋等金属物	开口向下的双曲线弧形或月牙形反射明显,反射波振幅增强
Pvc 预埋管	弧形反射明显,展布清晰,反射波振幅增强,弧形边界为空洞边界,层间同相轴错乱畸变

4 结论

笔者针对隧道衬砌中常见的缺陷类型,结合实际情况利用高阶 FDTD 法建立隧道初支、二衬正演模型,结合地质雷达实测数据及验孔结果得出以下结论:

1)利用高阶 FDTD 法对隧道衬砌质量地质雷达探测进行了二维正演模拟,并结合实测数据进行了对比分析,验证了高阶 FDTD 法的有效性,加深了对 GPR 电磁波在地下介质中的传播规律的理解和掌握,有助于更好地指导地质雷达资料的判读及解译。

2)初支正演模拟和实测资料的雷达反射剖面显示,钢拱架对雷达信号产生较强能量的弧形反射,电磁波反射同相轴错乱,深部多次波反射较明显。有缺陷部位同相轴错乱、层间波形杂乱,部分位置出现相位反转。

3)二衬正演模拟和实测资料的雷达反射剖面显示,凝土块体层间无明显反射,而钢筋网对雷达信号产生较强能量的反射,反射振幅较大,在雷达剖面上表现为向下弯曲的双曲线型弧形反射,弧形顶部为钢筋顶部所在的位置,浅层钢筋及部分缺陷容易辨别,未经处理的原始剖面不易辨识模型深部信息。PVC 管、预埋件、结构缝、混凝土振捣不均匀、混凝土裂缝等原因产生的二衬脱空、不密实等缺陷在雷达反射剖面上表现为强振幅反射,反射波相位为负,而钢筋反射的相位一般为正。

4)根据多年隧道衬砌质量检测工作经验及正演模拟结果,总结了隧道衬砌典型缺陷或标志物的电磁波反射特征,这些特征对于现场检测人员快速判读、解译采集的雷达数据有重要参考作用,有助于提高一线作业人员的检测效率,该工作也为后续机器学习自动判读隧道衬砌缺陷类型和位置打下了基础。

参考文献:

[1] 王华牢,李宁,褚方平.公路隧道衬砌厚度不足对衬砌

安全性影响[J].交通运输工程学报,2009,9(02):32-38.

WANG H L, LI N, CHU F P. Effect of lining thickness lack on lining safety for highway tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(02):32-38. (In Chinese)

[2] 张鸿飞,程效军,高攀,等.隧道衬砌空洞探地雷达图谱正演模拟研究[J].岩土力学,2009,30(09):2810-2814+2842.

ZHANG H F, CHENG X J, GAO P, et al. Research on forward simulation of tunnel lining cavity GPR images [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(09): 2810-2814+2842. (In Chinese)

[3] 喻军,刘松玉,童立元.地质雷达在隧道初衬质量检测中的应用研究[J].岩土力学,2008,29(S1):303-306.

YU J, LIU S Y, TONG L Y. Research on application of GPR to quality detection of first lining of tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 303-306. (In Chinese)

[4] 刘新荣,舒志乐,朱成红,等.隧道衬砌空洞探地雷达三维探测正演研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(11):2221-2229.

LIU X R, SHU Z L, ZHU C H, et al. Study of forward simulation for ground penetrating radar three-dimensional detection of tunnel lining cavity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11):2221-2229. (In Chinese)

[5] 张素磊.隧道衬砌结构健康诊断及技术状况评定研究[D].北京交通大学,2012.

ZHANG S L. Study on health diagnosis and technical condition assessment for tunnel lining structure [D]. Beijing Jiaotong University, 2012. (In Chinese)

[6] 李道欣.公路隧道支护质量无损检测技术研究[D].长安大学,2014.

LI D X. Highway tunnel supporting quality nondestructive testing technology research [D]. Chang'an University, 2014. (In Chinese)

[7] 吕高,李宁,刘新星,等.公路隧道衬砌缺陷几何形态及填充物 FDTD 正演分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(07):1415-1423.

- LV G L I N, LIU X X, et al. FDTD forward modeling of geometric shape and fillings of lining defects of highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(07): 1415—1423. (In Chinese)
- [8] 刘涛. 基于 GPRMAX 的隧道二次衬砌病害检测技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
- LIU T. Research on detection technology of tunnel secondary lining disease based on GPRMAX [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (In Chinese)
- [9] 孙鹏博. 基于 FDTD 的探地雷达管线探测正演模拟研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020.
- SUN P B. Forward modeling research of ground penetrating radar pipeline detection based on FDTD [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020. (In Chinese)
- [10] 李静, 曾昭发, 黄玲, 等. 三维探地雷达数值模拟中 UPML 边界研究[J]. 物探化探计算技术, 2010, 32(1): 6—12.
- LI J, ZENG Z F, HUANG L et al. Study of UPML boundary for three dimensional GPR simulation[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 32(1): 6—12. (In Chinese)
- [11] 冯彦谦, 王银, 刘四新. 基于 FDTD 的探地雷达数值仿真与成像研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(06): 17—20.
- FENG Y Q, WANG Y, LIU S X. Research on the numerical simulation and imaging of GPR based on the FDTD[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(06): 17—20. (In Chinese)
- [12] 梁小强, 杨道学, 张可能, 等. FDTD 数值模拟在 GPR 管线探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1803—1807.
- LIANG X Q, YANG D X, ZHANG K N, et al. Application of FDTD numerical simulation of ground penetrating radar in pipeline detection[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1803—1807. (In Chinese)
- [13] 王敏玲, 王洪华. 探地雷达波动方程数值模拟方法研究进展综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 1974—1984.
- WANG M L, WANG H H. Review of wave equation numerical simulation methods for ground penetrating radar[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 1974—1984. (In Chinese)
- [14] 刘四新, 佐藤源之. 时间域有限差分法(FDTD)对井中雷达的数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003(04): 545—550.
- LIU S X, SATO Motoyuki. Numerical simulation for borehole radar by FDTD[J]. Journal of Jilin University (Earth science edition), 2003(04): 545—550. (In Chinese)
- [15] 张湘桂, 邹明, 刘宗辉, 等. 隧道衬砌后方隐伏洞穴地质雷达响应特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(05): 1598—1605.
- ZHANG X G, ZOU M, LIU Z H, et al. Technology of detection and identification of hidden caves behind tunnel lining by GPR[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(05): 1598—1605. (In Chinese)
- [16] 尹涛, 王瑞燕, 高鹏, 等. 基于探地雷达技术的隧道二衬缺陷探测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S1): 220—226.
- YIN T, WANG R Y, GAO P, et al. Defects detection in tunnel secondary lining based on GPR [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 220—226. (In Chinese)
- [17] 周斌, 赵峰, 江剑, 等. 探地雷达在隧道衬砌缺陷检测中的应用[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(05): 40—44.
- ZHOU B, ZHAO F, JIANG J, et al. Application of ground penetrating radar in detecting defect of tunnel lining [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(05): 40—44. (In Chinese)
- [18] SEMICHAEVSKY, A, AKYURTLU. A new uniaxial perfectly matched layer absorbing boundary condition for chiral materials[J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, 2005, 4: 51—54.
- [19] TAN, LEONG E. Acceleration of LOD—FDTD Method Using Fundamental Scheme on Graphics Processor Units[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2010, 20(12): 648—650.

- [20] 雷林林,刘四新,傅磊,等. 基于全波形反演的探地雷达数据逆时偏移成像[J]. 地球物理学报,2015,58(09): 3346—3355.
- LEI L L,LIU S X,FU L,et al. Reverse time migration

applied to GPR data based on full wave inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics,2015,58(09): 3346—3355. (In Chinese)

Geological radar electromagnetic wave reflection characteristics of tunnel lining quality Analysis and Application

HU Xunxun¹, LI Li², FU Xiaonian³, FU Daiguang³, ZHANG Yang³

(1. Hubei Provincial Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute,Wuhan 430064, China;

2. Changjiang Geotechnical Engineering Co.,Ltd.,CISPDR Corporation,Wuhan 430010, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute,Wuhan 430010, China)

Abstract: For the quality problems such as debonding, insufficient thickness, and uncompactness in the lining construction of the Tianshan Shengli Tunnel of Wuyu Expressway. The geo—radar detection method based on the finite difference in the time domain (FDTD) is used to simulate the common defects in tunnel lining orthorectified, and the orthorectified results are in good agreement with the geophysical characteristics of the reflection profile of the measured data. Secondly, this study summarizes the geo—radar electromagnetic wave reflection characteristics of typical defects or markers, and the results show that the geo—radar electromagnetic waves of typical tunnel lining defects or markers have characteristics such as abrupt change in amplitude, in—phase axis distortion, waveform polarity reversal, etc. These characteristics are essential for the field inspectors to quickly interpret and decipher the collected radar data and the target geological. It also helps to identify the target geology and tunnel lining defects quickly and accurately, which helps to improve the detection efficiency of front—line operators and ensure the overall stability and safe operation of the tunnel.

Keywords: tunnel lining; time—domain finite difference; defects; electromagnetic wave reflection wave characteristics