

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.06.015

隧洞衬砌内部缺陷探地雷达正演模拟与应用

陶金¹, 张盛行², 官福海², 蔡付林¹, 汤雷²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 混凝土衬砌脱空等内部缺陷一直是水工隧洞的“伴生”病害, 对工程的安全运行产生不利影响。探地雷达具有高效无损的特点, 被广泛用于结构内部缺陷探测。受限于内部缺陷的复杂性, 缺陷不同形状及类型与探测雷达图谱特征形成机制仍不明确, 易引起误判。基于时域有限差分法开展规则和 irregular 脱空含空气、含水缺陷的正演模拟, 对雷达图谱、时域、频域响应特征进行分析, 并结合雷达波传过程分析其响应机制。结果表明, 不规则缺陷使得雷达信号回波形态畸变, 出现“多弧状”特征; 脱空含水缺陷相较于含空气缺陷雷达回波出现相位反转, 上下边界反射信号时间间隔延长, 主频向低频偏移。将上述规律应用于某实际隧洞工程探测解译中, 准确鉴别出了缺陷类型和尺寸。

关键词: 水工隧洞; 探地雷达; 无损检测; 时域有限差分法; 正演模拟; 时频分析

中图分类号: TU528.01

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0106-07

Forward Simulation and Application of Ground Penetrating Radar on Internal Defects of Tunnel Lining

TAO Jin¹, ZHANG Shenghang², GUAN Fuhai², CAI Fulin¹, TANG Lei²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: Internal defects such as concrete lining empties have always been associated diseases of hydraulic tunnels, which have complex impacts on the safe operation of the project. Ground penetrating radar (GPR) has been widely used to detect internal defects of structures because of its high efficiency and non-destructive characteristics. Due to the complexity of internal defects, the formation mechanism of different shapes and types of defects and detection radar map features is still unclear, which is easy to cause misjudgment. The forward simulation of air and water containing defects in regular and irregular cavitation is carried out based on finite-difference time-domain method. The response characteristics in time domain and frequency domain are analyzed, and the response mechanism is analyzed according to the radar wave transmission process. The results show that the irregular defects make the radar signal echo shape distorted and appear "multi-arc" characteristics. Compared with air-containing defect radar, the phase inversion occurs, the time interval of the upper and lower boundary reflection signal is longer, and the main frequency shifts to the low frequency. The above rules are applied to the detection and interpretation of a real tunnel project, and the defect type and size are accurately identified.

Keywords: hydraulic tunnel; ground-penetrating radar; nondestructive testing; finite difference time domain method; forward simulation; joint time-frequency analysis

收稿日期: 2024-08-17

修稿日期: 2024-09-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC3000103); 广东省水利科技创新项目 (2023-02); 中央公益性科研院所基本科研业务项目 (Y422010, Y422009)

作者简介: 陶金 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工结构无损检测。E-mail: taojinhu@163.com

通讯作者: 汤雷 (1972—), 男, 正高级工程师, 博士生导师, 主要从事水工结构病害诊断等方面工作。E-mail: ltang@nhri.cn

水工隧洞除承受较大的围岩压力外,还要承受较高的外水压力和内水压力^[1],隧洞内部缺陷极易发展导致衬砌破坏^[2],因此,快速探明隧洞衬砌内部缺陷对工程长久安全服役具有重要意义。探地雷达技术具有连续、无损、速度快、精度高等优点^[3],在工程内部病害无损探测领域得到广泛应用。朱兆荣等^[4]采用探地雷达对不同位置隧洞脱空进行检测,分别对比探地雷达图谱,分析各因素之间的影响关系。Noshahri等^[5]运用探地雷达开展地下管道周围空隙的探测,将空隙模拟为半径为20 mm的圆形空洞,探讨不同探测情况下对空隙的识别效果差异。李世念等^[6]对道路病害体开展三维探地雷达模拟,将充水型和充气型空洞病害体模拟为0.5 m的正方体,研究测线不同方向充水和充气两种空洞模型的三维探地雷达数据和图像特征。Luo等^[7]采用正演模拟定量研究了不同水平宽度孔隙的探地雷达响应,将城市地下空洞模拟为高度从0.4 m~1.25 m的不同立方体,发现随着空隙扩展,雷达信号呈现不同的图案,这些图案可以作为空隙识别的依据。Xie等^[8]运用时域有限差分方法模拟了钢筋混凝土结构孔洞的探地雷达探测,在模型中嵌入了三个不同尺寸及埋深的矩形空洞,分别讨论了多次波对探地雷达图像的影响,经过采集数据、提取特征等步骤,可以自动识别探地雷达图像中的空洞。

水工隧洞内部缺陷多为不规则几何体,缺陷介质多为填充水或者空气。但当前,探地雷达正演模拟多采用规则几何体,与工程实际差别较大;对内部缺陷为含水、含空气的判据仍然缺乏。针对这两方面问题,本文拟建立隧洞衬砌内部不规则缺陷模型,并采用时域有限差分法进行正演模拟,对比分析规则与不规则含水、含空气缺陷的探地雷达信号时域和频域响应特征,并通过波传过程进一步解释响应机理。依据正演响应特征,对某隧洞工程实际探测结果进行解译,以期取得较好判断的结果。

1 探地雷达及正演模拟原理

1.1 探地雷达原理

探地雷达方法原理是在工作时发射天线向待测体发射电磁波,遇到有电性差异的不同介质交界处、缺陷时会产生可被接收天线接收的反射波,最终由雷达主机进行处理,记录反射波到达时间及相关信息,进而组成横坐标为天线在待测体表面测线上的

位置,纵坐标为雷达脉冲从发射天线出发经界面反射回到接收天线的双程走时的探地雷达时间剖面图^[9-12]。其工作原理如图1所示。

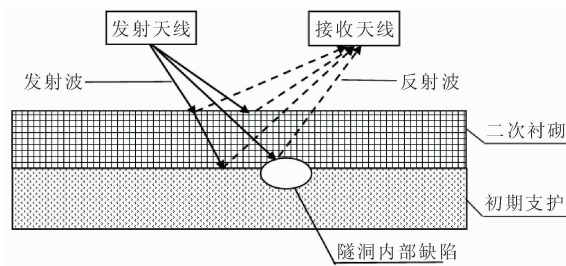


图1 探地雷达工作原理图

1.2 正演模拟原理

正演模拟是一种基于Yee^[13]在1966年提出的时域有限差分法求解三维麦克斯韦方程组的方法^[14]。本质上是通过网格单元和基本时间增量对连续的空间和时间进行离散化^[15-16],通过对电磁场分量的位置分配适当的本构参数,将复杂形状的目标纳入模型,使得数值解可直接在时间域内以迭代的方式得到^[17-19],Yee网格空间离散见图2。

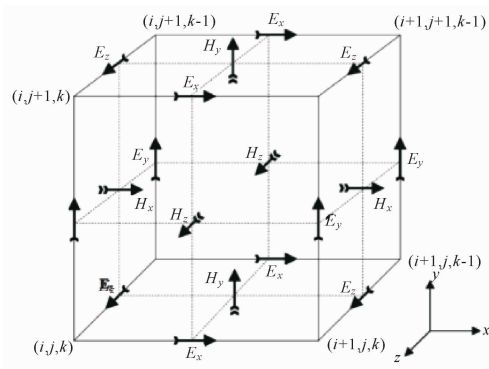


图2 时域有限差分算法空间Yee网格

2 隧洞病害检测正演模拟

2.1 模型建立

文中隧洞衬砌内部缺陷分为脱空含空气、含水这两种情况。为确保正演模拟的过程中,雷达波不会因为水平边界不足而导致波形不完整从而影响判断且模型深度尽可能与实际工程中隧洞的围岩、初衬、二衬的总厚度一致。因此,在平距为2.8 m(x 轴方向),深度为1.2 m(y 轴方向)的混凝土板正演模型中分别建立上述两种情况规则及不规则的模型。正演模型相关介质电性参数选取如表1所示^[20-21]。

表 1 介质电性参数

	相对介电常数	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
空气	1	0
围岩	7	1×10^{-3}
初衬	6	1×10^{-5}
二衬	9	1×10^{-5}
淡水	81	5×10^{-4}

2.2 隧洞衬砌规则脱空含空气与含水正演模拟

规则脱空含空气与含水正演模型见图 3。在混凝土板中设置沿测线方向为 0.2 m, 纵向为 0.2 m 的矩形脱空含空气缺陷和尺寸、大小与脱空含空气缺陷一致的脱空含水缺陷。源选择天线中心频率为 900 MHz 的 ricker 子波, 发射天线与接收天线中间的距离为 0.1 m。

规则脱空含空气与含水正演模拟 B-Scan 图如图 4 所示。从上述两图中可以看出, ①区域电磁波遇到规则含空气区和规则含水区时均出现层理均匀的抛物线状反射信号, 含水区电磁波反射信号相位为负相位-正相位-负相位, 与直达波相比产生相位反转; 抛物线顶部均有一处步长为 20 的汇聚信号, 对应的实际长度为 0.2 m, 与所设定的缺陷 x 方向边长一致; 电磁波经过脱空含空气缺陷上边界和下边界的双程走时分别为 4.81 ns 和 6.15 ns, 经过脱空含水缺陷上边界和下边界的双程走时分别为 5.01 ns 和 17.24 ns。

电磁波传播速度计算公式为:

$$v = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (1)$$

电磁波传播距离计算公式为:

$$H = \frac{vt}{2} \quad (2)$$

式中: v 为电磁波传播速度, m/ns; ε 为介质的介电常数; C 为电磁波在空气中的传播速度, m/ns, 文中取 0.3 m/ns; H 为电磁波在介质中传播距离, m; t 为电磁波双程走时, ns。

式(1)^[22]可计算出电磁波传播速度分别为 0.3 m/ns 和 0.033 m/ns, 式(2)^[23]可得电磁波在缺陷介质中传播距离均为 0.2 m, 与所设定的缺陷 y 方向边长一致; ②区域为雷达探测到的初衬与二衬分界面。③区域为雷达探测到的围岩与初衬分界面, 相较于②区域信号较弱, 与此处分界面的位置较深有关。④区域脱空含水区同样存在较强的反射振幅且形状也为抛物线状, 为规则含水缺陷下边界反射信号。

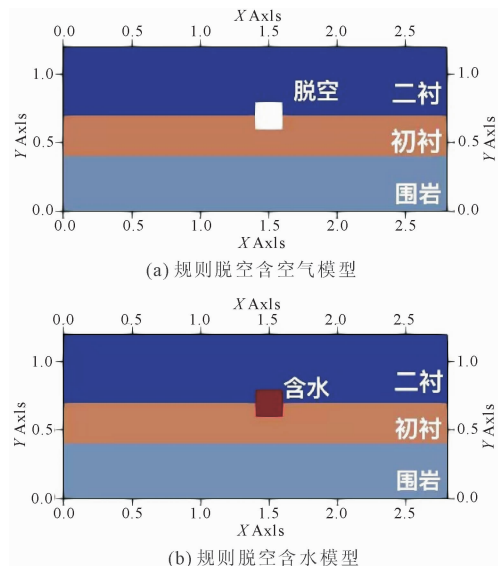


图 3 衬砌规则脱空含空气与含水正演模型

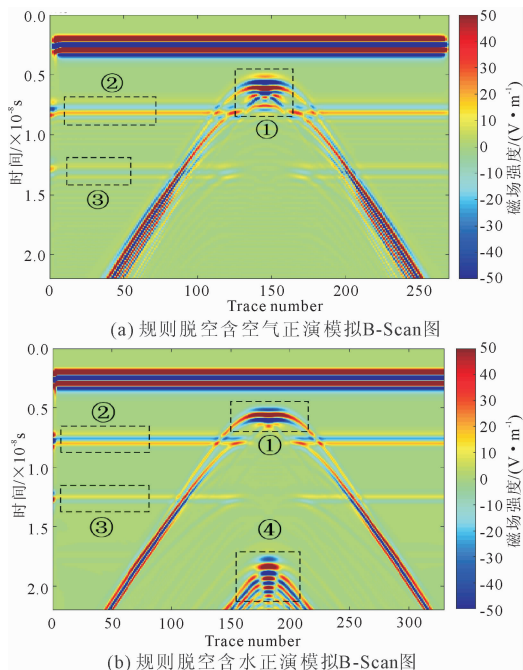


图 4 衬砌规则脱空含空气与含水正演模拟结果

2.3 隧洞衬砌不规则脱空含空气与含水正演模拟

为使得正演模拟更贴近实际工程中水工隧洞脱空形状, 建立衬砌不规则脱空含空气与含水模型如图 5 所示。

不规则衬砌脱空含空气与含水正演模拟 B-Scan 图如图 6 所示。从图中可以看出, ①区域电磁波强反射同相轴均为抛物线状, 不规则含水缺陷该区域电磁波反射信号相位为负相位-正相位-负相位, 与直达波相比出现相位反转现象; 由于缺陷上界面不规则, 当信号经过不规则区域时反射时间存在

差异,抛物线信号均出现畸变,表现为多个不同的抛物线交替叠加即“多弧状”;根据定量判定规则脱空含空气与含水缺陷的方法同样可以判定不规则缺陷 x 、 y 方向的尺寸;③区域为雷达探测到的围岩与初衬分界面,相较于②区域信号较弱,与此处分界面的位置较深有关;④区域与规则脱空含水缺陷相同,同样存在较强的反射振幅且形状也为抛物线状,但是出现畸变,表现为多个不同的抛物线交替叠加即“多弧状”。

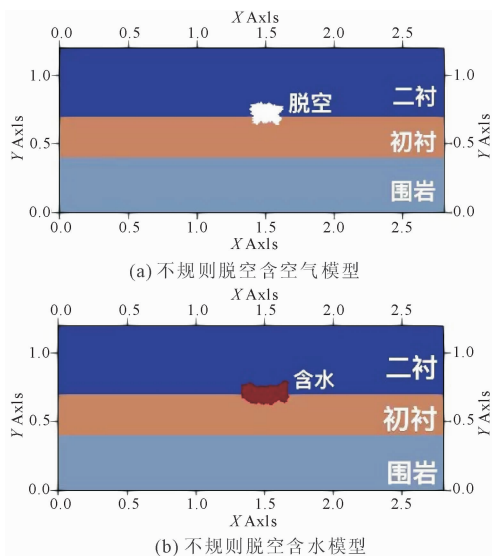


图 5 衬砌不规则脱空含空气与含水正演模型

3 分析与讨论

3.1 时频分析

分别提取无缺陷、脱空含空气、含水的单道信号进行时域分析,时域分析如图 7 所示,图 7(a)为无缺陷部位单道信号时域图。从图中可以看出,①区域为探地雷达直达波信号,相位为正相位-负相位-正相位。图 7(b)和图 7(c)分别为脱空含空气和含水部位单道信号时域图。从图中可以看出,①区域均为探地雷达直达波信号,相位为正相位-负相位-正相位。②、③区域分别为脱空含空气和含水部位上、下界面反射信号,脱空含空气区上下界面相位与直达波信号相位相同;脱空含水部位上、下界面反射信号相位为负相位-正相位-负相位,与直达波信号相位相反,存在相位反转现象。图 7(d)为无缺陷、脱空含空气、含水时域对比图。对比三种情况时域图可以看出,①区域为探地雷达直达波信号,三种情况下探地雷达直达波一致。②区域无缺陷部位无反射信号,脱空含空气与含水部位均存在反射信号。由于信号在空气中传播速度较快,传播阻碍较小,因此信号从脱空含空气区上界面传播至下界面反射时间间隔较短。③区域只有含水缺陷存在信号反射,为含水部位下界面;与脱空不同,含水部位上下界面反射信号时间间隔较长,由于信号在含水区传播速度较慢,对信号传播阻碍较大,因此含水区上下界面信号反射时间间隔较长。

分别提取脱空含空气和含水电磁波强反射同相轴抛物线顶点步长的单道信号,采用傅里叶变换得出脱空含空气与含水频谱对比图,如图 8 所示。从图 8 中可以看出,由于选用的探地雷达天线为 900 MHz,因此无论是脱空含空气还是含水频谱图,900 MHz 主频均居于图像中间;脱空含空气反射波的主频在 863 MHz 左右,含水反射波的主频在 772 MHz 左右,含水反射波主频向低频偏移。这是由于水对高频电磁波的衰减较大,高频反射波能量较低,出现低通滤波的效果;李尧等^[24]在开展衬砌渗漏水模型中,对比无水通道、含水通道频谱时也指出了类似结论,该特征可用作区分脱空含空气、含水缺陷的评判依据。

3.2 波传过程

为进一步探明及验证脱空含空气与含水缺陷信号的评判依据,开展含空气与含水缺陷雷达波快照的研究。波传过程如图 9 所示,图 9(a)为无缺陷雷达波场快照,A 处雷达波以球面波的形式从发射源

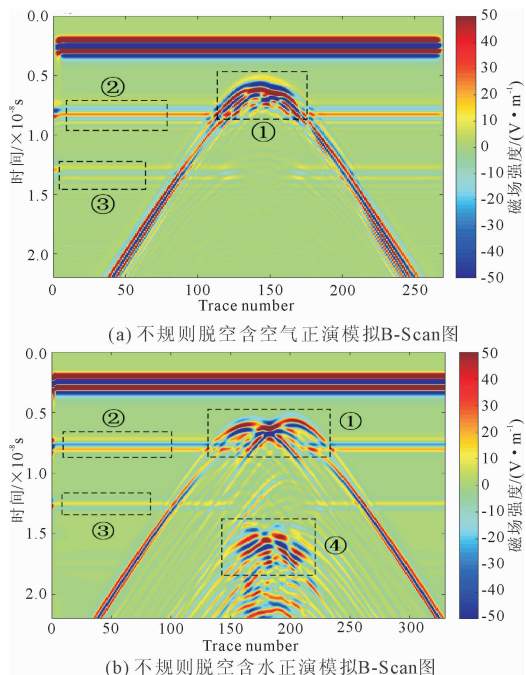


图 6 衬砌不规则脱空含空气与含水正演模拟结果

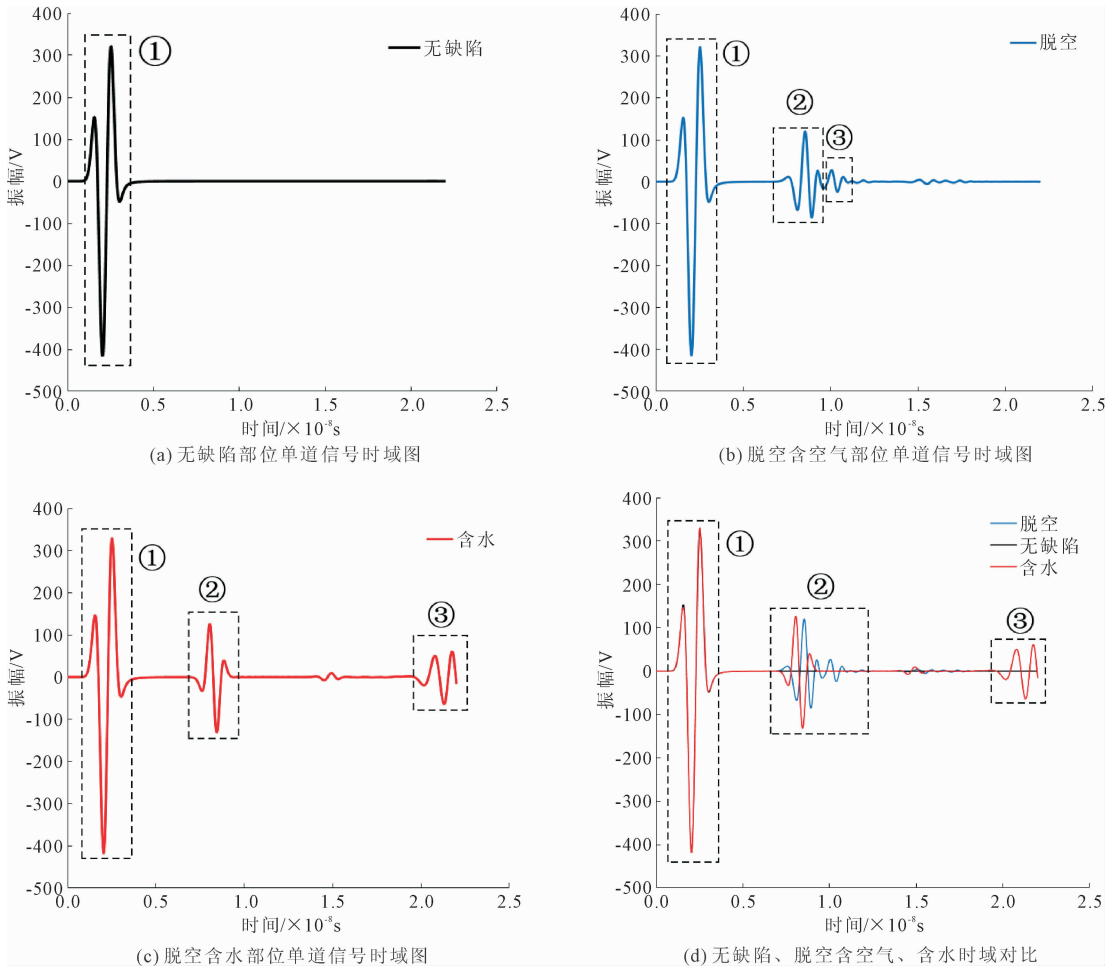


图 7 时域分析示意图

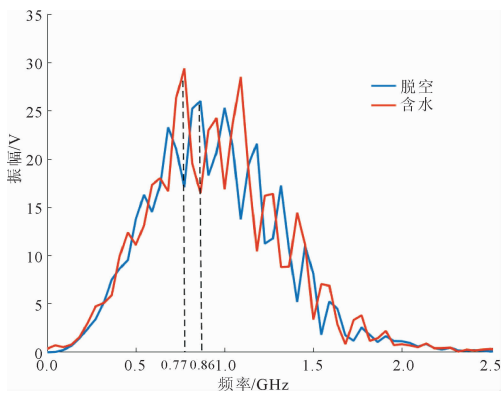


图 8 脱空与含水频谱对比图

扩散,由于在均匀介质中,介电常数及电导率无差异,探地雷达信号层理均匀、边界清楚。图 9(b)和图 9(c)分别为脱空含空气区和含水区发射天线在缺陷中间部位第 7 ns 时雷达波场快照。信号通过脱空含空气和含水缺陷上、下界面时,一部分信号作为反射波 B1、C1 和 B2、C2 以球面波形式反射回接收天线,由于信号在空气中传播速度较快,因此上、

下界面反射波 B1、C1 反射间隔存在较小差异;水对于电磁波传播强弱产生较大影响,当电磁波在含水区传播时,传播速度变慢,所以含水缺陷上、下界面反射波 B2、C2 反射时间间隔较长。另一部分作为透射波 A1 和 A2 继续在介质中传播,由于所设定的混凝土介质与脱空含空气和含水处介质存在较大的电性差异,透射波 A1 和 A2 在通过脱空含空气区向混凝土介质继续传播时,波速降低,与原雷达波产生球形波错断现象。

3.3 隧洞内部缺陷探地雷达探测信号解译依据

(1) 电磁波遇到规则与不规则缺陷均出现抛物线状反射信号。不规则缺陷与规则缺陷相比探地雷达信号形态出现畸变,表现为多个不同的抛物线交替叠加即“多弧状”,与缺陷上界面不规则有关。

(2) 与脱空含空气缺陷相比,含水缺陷上下界面信号反射时间间隔较长且含水区域电磁波反射信号相位为负相位-正相位-负相位,与直达波相比出现相位反转现象。

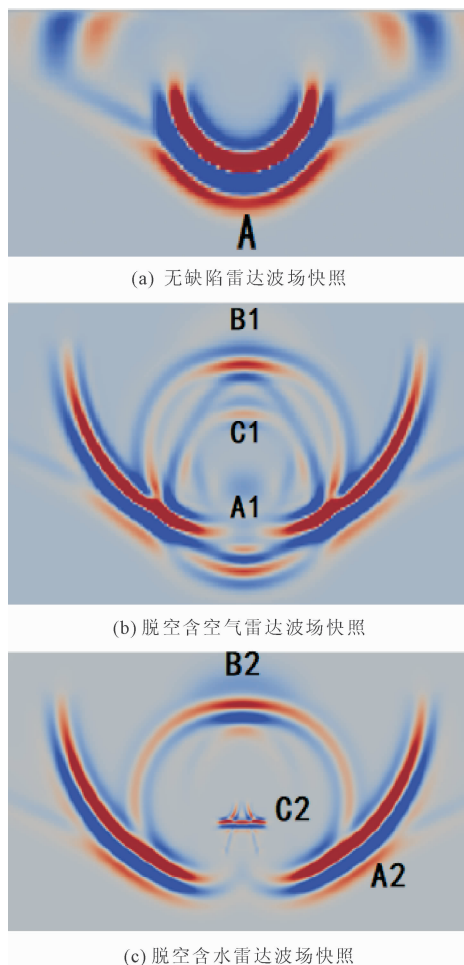


图9 波传过程示意图

(3) 基于提取的脱空含空气、含水缺陷异常信号的水平步长及缺陷处上下界面电磁波双程走时,可根据波速和距离公式定量确定缺陷的尺寸。

(4) 对于围岩、初衬、二衬的分界面,探地雷达信号均产生反馈。随着深度增加,信号强度逐渐减弱,可为实际工程中区分不同分界面提供依据。

4 实测分析

某水资源配置工程建设线路中外衬采用盾构管片,内衬采用无粘结预应力混凝土的结构型式,现浇混凝土厚度0.6 m。在衬砌浇注过程中,衬砌台车的钢模板与管片作为衬砌结构的支撑模板,但现浇混凝土层浇筑过程中较难完全把控,现浇混凝土层与管片之间易形成“脱空”。故需进行现场实测,准确检测出隧洞脱空病害并及时进行修复。

开展实际工程检测前,在实验室制作配筋参数、混凝土配合比以及脱空腔体内介质以及厚度方向的尺寸与工程原型完全相同的衬砌标准体,内部缺陷脱空是矩形几何形态,如图10(a)所示。通过在标

准体开展探地雷达检测试验,获得雷达检测结果的标准图谱,如图10(b)所示。从图中可以看出,缺陷处雷达信号产生同相轴断裂的现象且呈现抛物线状,并且缺陷上下界面雷达信号时间间隔较短,基本与上文正演模拟试验中所总结得出的规则脱空含空气区雷达信号形态一致,从而验证探地雷达对脱空缺陷准确识别是具备可行性的。此外,衬砌标准体的建立保证了试验所测试的基准与实际工程完全一致,进一步提高在实际工程中运用探地雷达检测脱空缺陷的准确程度。

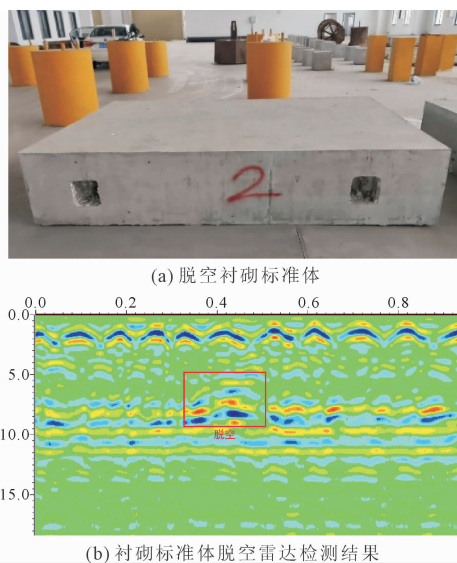


图10 衬砌标准体及雷达检测图谱

利用探地雷达对该工程进行实际检测,某浇筑段顶拱检测结果如图11(a)所示。可见存在一处异常,特征为同相轴中断,雷达信号呈现抛物线状,且上、下边界抛物线状信号时间间隔较短,推测该部位存在局部脱空且空腔内为空气。其余部位同相轴完整,胶结良好,推测为无缺陷。电磁波经过脱空含空气缺陷上界面的双程走时为11.68 ns,下界面电磁波的双程走时为12.21 ns,由式(1)可得电磁波在含空气区传播速度为0.3 m/ns,式(2)可得脱空含空气区厚度为7.9 cm。针对探测出的脱空含空气缺陷,使用钻孔内窥镜法对该处缺陷进行孔内摄像,以验证探测结果可靠性。将内窥镜镜头伸入孔内观察,拍摄异常部位见图11(b)。可见隧洞初衬与二衬之间存在约7.5 cm脱空含空气区,与实际定量计算结果存在0.4 cm的误差。这是由于混凝土是由水泥、砂石等介质组成的混合物,介电常数沿深度方向并非均匀分布,且该衬砌内部含有钢筋等,对电磁波传播造成一定干扰,故计算结果存在一定误差,但

已能满足工程应用的要求。

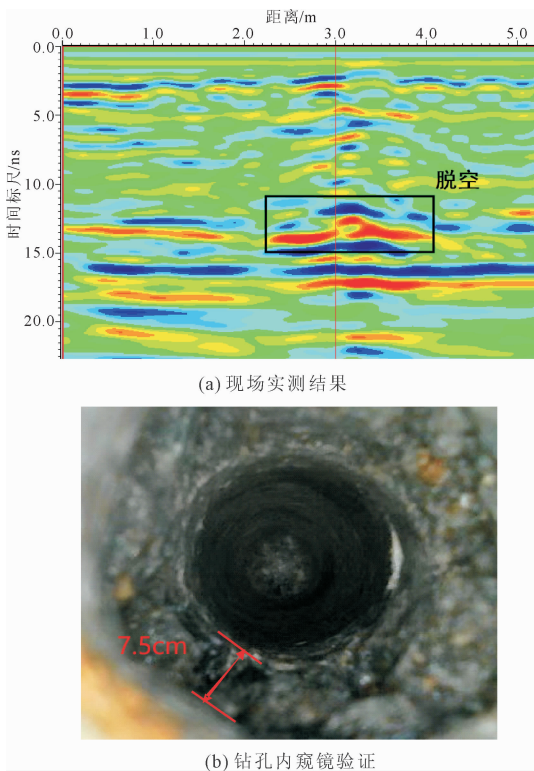


图 11 现场实测及验证

5 结 论

通过开展隧洞衬砌内部缺陷正演模拟、时频分析、波传过程的研究,得出以下结论:

(1) 通过脱空正演模拟和模型试验,总结了缺陷处雷达图谱的典型特征。缺陷处雷达信号产生同相轴断裂的现象且呈现抛物线状;不规则缺陷使雷达波形发生“畸变”,出现“多弧状”特征。

(2) 结合探地雷达波传过程分析了其时频域响应机制。脱空含水缺陷相较于含空气缺陷雷达回波出现了相位反转,上下边界反射信号时间间隔延长,主频向低频偏移。基于此特征可判别缺陷内介质性质,并可对脱空尺寸进行定量计算。

(3) 提出了隧洞内部缺陷探地雷达探测信号解译依据,并在实际工程进行应用。通过对探测结果进行钻孔内窥镜验证,该方法对缺陷定位误差较小,能够满足工程需要。

参考文献:

[1] 汤雷,谢炆,宋人心,等. 水工隧洞衬砌混凝土质量检测与安全分级评价[J]. 水利水电技术,2018,49(4):203-209.

- [2] 洪开荣. 我国隧道及地下工程发展现状与展望[J]. 隧道建设(中英文),2015,35(2):95-107.
- [3] 杜豫川,岳光华,刘成龙,等. 探地雷达多特征融合的城市空洞自动识别方法[J]. 中国公路学报,2023,36(3):108-119.
- [4] 朱兆荣,赵守全,秦欣,等. 探地雷达隧道衬砌空洞探测效果模型和现场实体试验研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(S1):132-137.
- [5] Noshahri H, Meijde M V D, Léon olde Scholtenhuis. GPR surveys in enclosed underground sewer pipe space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022,129:104689.
- [6] 李世念,王秀荣,林恬,等. 基于GprMax的道路空洞三维探地雷达正演数值模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(3):132-138.
- [7] Luo T X H, Lai W W L, Giannopoulos A. Forward modelling on GPR responses of subsurface air voids[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,103:103521.
- [8] Xie Xiongyao, Qin Hui, Yu Chao, et al. An automatic recognition algorithm for GPR images of RC structure voids[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013,99:125-134.
- [9] Apaydn O, Seven T, Tr Y, et al. Extracting tomographic images of interior structures of cylindrical objects and trees using Ground Penetrating Radar method[J]. Results in Engineering, 2022,14(6):100410.
- [10] 刘澜波,钱荣毅. 探地雷达:浅表地球物理科学技术中的重要工具[J]. 地球物理学报,2015,58(8):2606-2617.
- [11] Maierhofer C. Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003,15(3):287-297.
- [12] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [13] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on antennas and propagation, 1966,14(3):302-307.
- [14] Craig W, Antonios G, Iraklis G. GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar[J]. Computer Physics Communications, 2016,209:163-170.
- [15] Giannopoulos A. Modelling ground penetrating radar by GprMax[J]. Construction & Building Materials, 2005,19(10):755-762.

- 凝土管管道结构设计规程:CECS 140—2011[S].北京:中国计划出版社,2011.
- [11] 预应力钢筒混凝土管道技术规范:SL 702—2015[S].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [12] 预应力钢筒混凝土管:GB/T 19685—2017[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [13] 给水排水管道工程施工及验收规范:GB 50268—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [14] 石油化工设备和管道涂料防腐蚀设计标准:SH/T 3022—2019[S].北京,中国石化出版社,2019.
- [15] 水利水电工程地质勘察规范:GB 50487—2008[S].北京,中国计划出版社,2008.
- [16] 武扬,吴文婧,李劲松,等.基于分布式光纤传感器的损伤监测研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):208-212,221.
- [17] 孙绍平,萧岩,王光明.PCCP保护层应力分析[J].特种结构,2005,22(3):62-64.
- [18] 赵毅,滕建强,杨耀辉,等.管道悬空灾害的分布式光纤实时监测方法研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(1):103-108.
- [19] 张晓威,刘锦昆,陈同彦,等.基于分布式光纤传感器的管道泄漏监测试验研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):1-6.
- [20] Hajali M, Alavinasab A, Shdid C A, et al. Effect of the location of broken wire wraps on the failure pressure of prestressed concrete cylinder pipes[J]. Structural concrete: Journal of the FIB, 2015,16(2):297-303.
- [21] 中华人民共和国中央人民政府.生产安全事故报告和调查处理条例[EB/OL]. [2007-04-19]. https://www.gov.cn/zhengce/2007-04/19/content_2602474.htm.
- [22] Rohrmann B. Verbal qualifiers for rating scales: Sociolinguistic considerations and psychometric data[J]. Project Report, University of Melbourne/Australia, 2007.
- [23] 赵忠刚,姚安林,李又绿,等.油气管道可接受风险标准值的界定研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(2):147-150,199.

(上接第 112 页)

- [16] Luo T X H, Lai W W L, Giannopoulos A. Forward modelling on GPR responses of subsurface air voids [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,103:103521.
- [17] 武贤龙,包小华,陈湘生,等.基于 gprMax 的衬砌脱空三维正演分析[J].深圳大学学报(理工版),2023,40(2):127-135.
- [18] 张迪,莫其妙.基于 GprMax 的地下管线探地雷达图像正演模拟[J].工程地球物理学报,2022,19(2):168-182.
- [19] 舒志乐,王杰,吴瑞,等.预应力管道灌浆密度探测地雷达模型试验及正演模拟[J].混凝土,2021(2):136-140.
- [20] 徐磊,吴海波.管道渗漏区探地雷达响应特征分析[J].水电能源科学,2023,41(3):124-127.
- [21] 宋福彬,杨杰,程琳,等.地质雷达正演在隧洞衬砌病害识别中的应用[J].现代隧道技术,2021,58(4):48-56.
- [22] Davis J L, Annan A P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy [J]. Geophysical Prospecting, 1989,37(5):531-551.
- [23] Conyers L B. Ground penetrating radar, 2nd edition [J]. Geoarchaeology, 2006,21(7):763-764.
- [24] 李尧,李术才,徐磊,等.隧道衬砌病害地质雷达探测正演模拟与应用[J].岩土力学,2016,37(12):3627-3634.