

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022030724061968

文章编号:1674-599X(2024)03-0074-08

引用格式: 娄玉鹏, 凌同华, 何文超, 等. 衬砌结构异形富水微裂缝模型试验与量化识别[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(3): 74-81.

Citation: LOU Yupeng, LING Tonghua, HE Wenchao, et al. Models test and quantitative identification of abnormal water-rich microcracks in lining structure[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 74-81.

衬砌结构异形富水微裂缝模型试验与量化识别

娄玉鹏, 凌同华, 何文超, 潘雪纯

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为探讨准确识别隧道衬砌结构中异形富水微裂缝的方法, 用探地雷达和F-K偏移法针对4种异形富水微裂缝模型进行检测试验及对雷达检测的特征信号进行偏移归位, 再用波形分析法和小波变换模极大值法对裂缝模型的位置和形态进行识别。研究表明: 异形富水微裂缝模型的雷达响应图像很难被直接识别, 通过F-K偏移归位处理后, 可识别裂缝模型的形态。小波变换模极大值法比波形分析法能更精确地实现异形富水微裂缝模型的量化识别; 微裂缝模型的二维轮廓重构图能够较好地拟合实体模型的形状。该结果可为隧道衬砌结构异形富水微裂缝的识别提供借鉴。

关键词: 探地雷达; 盾构隧道; 异形富水微裂缝; 小波变换模极大值法; 定位识别

中图分类号: U451

文献标志码: A

Models test and quantitative identification of abnormal water-rich microcracks in lining structure

LOU Yupeng, LING Tonghua, HE Wenchao, PAN Xuechun

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To investigate the identification of special-shaped water-rich micro-cracks in tunnel lining structures, ground-penetrating radar (GPR) was used to detect the water-filling models of four special-shaped micro-cracks. The F-K migration method was applied to offset and locate the radar characteristic signals of micro-cracks, with crack locations identified through waveform analysis and the wavelet modulus maximum algorithm. The results indicate that the radar response images of irregular micro-cracks are difficult to identify directly, while their morphology can be highlighted by the F-K migration method. Compared to waveform analysis, the wavelet modulus maximum algorithm provides more accurate positioning and identification of irregular micro-cracks. The two-dimensional contour reconstruction of the micro-fracture models fits the shape of the solid models. The research results provide a foundational basis for the identifying abnormal water-rich micro-cracks in tunnel lining structures.

Key words: ground-penetrating radar; shield tunnel; special-shaped water-rich micro-crack; wavelet modulus maximum algorithm; location recognition

收稿日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(5207081829)

通信作者: 凌同华(1968—), 男, 教授, 主要从事城市轨道交通工程、隧道与地下工程、岩土工程灾害监测与控制等方面的研究工作。E-mail: lingtonghua@163.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

隧道盾构施工速度快、机械化程度高且不受气候等因素的影响而被广泛地应用于交通工程建设中,然而受地质条件、施工工艺及循环荷载等因素影响,盾构隧道衬砌结构常出现不同程度的裂缝、空洞及脱空等质量问题。对于富水微裂缝,若任其发展,将严重影响盾构隧道衬砌结构的安全。为保证盾构隧道的安全运营,必须对隧道衬砌结构的缺陷进行及时检测和处理^[1-7]。在现有的无损检测方法中,探地雷达检测效果最好。然而,由于盾构隧道施工中的地质条件复杂,缺陷形态多样,在实际工程中对衬砌缺陷的检测和识别仍存在诸多难题^[8-13]。在应用探地雷达进行检测的研究中,王国群^[14]通过对已建成的工程实例进行总结,分析了多种工况下探地雷达裂缝检测的探测原理及图像特征。替月稳等^[15]将天线频率为300 MHz的车载探地雷达用在高铁隧道的病害探测和健康检测中,发现实测的探地雷达图像可反映隧道的病害、围岩衬砌的状态。LING等^[16]针对盾构隧道隐伏微裂缝在干扰信号下难以识别的问题,采用正交匹配追踪和希尔伯特变换综合法对其进行检测分析。高阳等^[17]采用探地雷达对重庆巫峡板壁岩危岩带进行探测,对危岩裂隙带探测结果进行推断,并通过钻孔摄像验证了推断结果的准确性。刘杰等^[18]以银西高铁某隧道为例,构建了高铁隧道衬砌结构模型,用中心天线频率分别为900、400 MHz的探地雷达对模型进行探测,发现可以通过雷达波形图像的振幅和频率特征识别衬砌质量缺陷,但缺陷量化识别的精度不高。目前的研究主要针对的是隧道衬砌内部密实度低、空洞和脱空等危害程度较大的质量缺陷,获得的成果也以隧道衬砌缺陷的识别、分类和评价为主,针对隧道衬砌裂缝缺陷识别的研究却鲜见。因此,本研究通过室内沙箱异形微裂缝模型试验,用F-K偏移法和小波变换模极大值法对雷达探测的异形富水微裂缝模型图像进行识别、定位和二维轮廓重构,以期为实际工程中的异形富水微裂缝识别提供参考。

1 基本原理

1.1 探地雷达工作原理

探地雷达的工作原理是用天线发射高频率电磁波和接收电磁波的反射波,通过分析电磁波在穿越不同介电常数的介质时,其路径、波形随介质的

介电常数、反射波的几何形状和电磁场强度等因素的改变来识别介质中的缺陷。根据接收到的电磁反射波的双程走时、振幅、相位等要素推断探测目标的位置和形态。探地雷达在介质中的传播应满足:

$$h = \frac{c\sqrt{\varepsilon_r}\Delta t}{2\varepsilon_r} \quad (1)$$

式中: h 为探测距离; c 为雷达电磁波在介质中的传播速度; ε_r 为介质的介电常数; Δt 为双程走时。

1.2 小波变换模极大值法

小波变换是一种变换分析方法,能提供随频率改变的“时间-频率”窗口,是进行信号时频分析和处理的理想工具。其主要特点是通过变换能充分突出信号的某些特征,并根据这些特征进行局部分析^[19]。

小波变换的公式为:

$$W_f(s, x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) s^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-x}{s}\right) dt \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 为初始信号函数; s, x 分别为尺度参数和平移参数,尺度参数和平移参数的值均是连续且可变的; ψ 为容许小波。

信号边缘的突变位置对应信号一阶导数(斜率)的极值点,而信号峰值的变化位置对应信号的极值点或二阶导数(曲率)极值点。这些变化点统称为奇异点。用李氏指数描述信号函数的奇异性,李氏指数 w 的定义为:

设 n 是一非负整数, $n < w \leq n + 1$,如果存在两个常数 A 和 $h_0 > 0$ 及 n 次多项式 $P_n(h)$,使得对任意的 $h \leq h_0$ 均有^[17]:

$$\left| f(x_0 + h) - P_n(h) \right| \leq A|h|^w \quad (3)$$

式中: x_0 为信号函数 $f(x)$ 中的任意一点。则在 x_0 处, $f(x_0)$ 为李氏指数 w 。

李氏指数与信号函数的光滑程度有关,越光滑的函数,李氏指数越大,反之越小。若李氏指数为1,则函数 $f(x)$ 在 x_0 处连续可微;若李氏指数大于0且小于1,则函数 $f(x)$ 在 x_0 处是奇异的。在采用小波变换分析信号函数的奇异性时,需要分析其局部奇异性。根据信号函数在 x_0 邻域内的特性和小波变换尺度来决定小波系数值。

$[a, b]$ 为 x 的某个邻域,若 $x \in [a, b]$,可设存在尺度参数 $s_0 > 0$,使得对 $\forall x \in [a, b]$ 和 $s < s_0$ 存在常数 $C > 0$,且 $f(x)$ 的连续小波变换系数满足^[20]:

$$\left| W_f(s, x) \right| \leq (Cs)^w \quad (4)$$

则 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 具有一致的李氏指数 w 。

若 $x \in [a, b]$,且满足:

$$|W_f(s, x)| \leq |W_f(s, x_0)| \quad (5)$$

则 $f(x)$ 在尺度参数 s 下的小波变换局部极值点为 x_0 。

2 模型试验与信号采集

2.1 模型制作

选用光敏树脂(SLA)作为材料,用3D打印机制作I形、Y形、S形和Z形4种异形模型,模型成品如图1所示。受3D打印工艺的限制,模型壁厚3.5 mm,内部空腔厚3.0 mm。用水充填模型以模拟富水微裂缝。裂缝模型尺寸见表1。

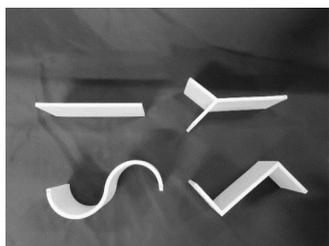


图1 裂缝模型

Fig. 1 Crack models

表1 裂缝模型尺寸

Table 1 Dimension of crack models

模型	长/cm	宽/cm	空腔厚/mm
I	30	20	3.0
Y	30	20	3.0
S	30	20	3.0
Z	30	20	3.0

2.2 探地雷达信号采集

本次试验所用探地雷达为意大利IDS公司生产的RIS-K2型探地雷达,天线频率为1 600 MHz,探测深度为0~50 cm。

试验中所用沙箱的尺寸为1.8 m(长) \times 1.3 m(高) \times 0.9 m(宽)。用探地雷达校准的沙箱模型中的电磁波的传播速度为0.185 2 m/ns。根据探测距离和介质的性质,设置探地雷达采样点为512个,采样时窗为10 ns。将4种充水的异形微裂缝模型分别埋置于沙箱中,埋深均为15.00 cm。模型实际埋深及特征点示意图如图2所示。在用探地雷达进行采样时,保持其天线的前进方向与沙箱侧面边缘平行,并从左向右沿沙箱侧面匀速扫过,所获得的原始雷达图像如图3所示。

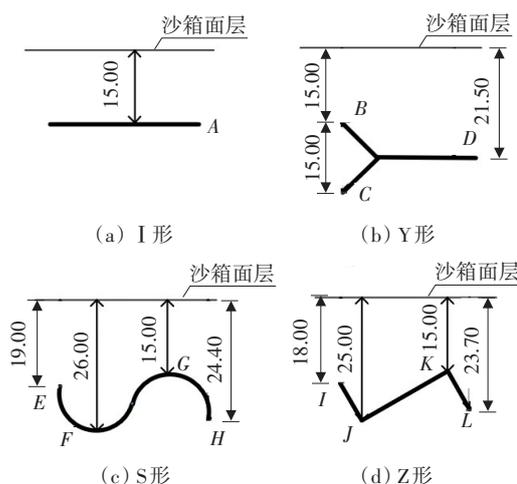
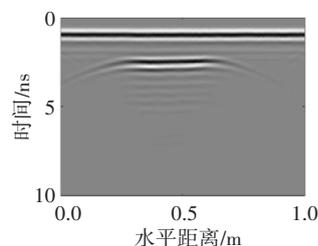
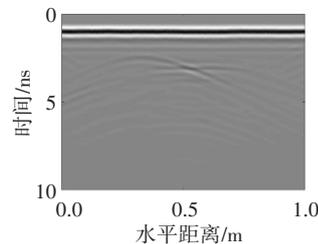


图2 模型特征点及其埋深(单位:cm)

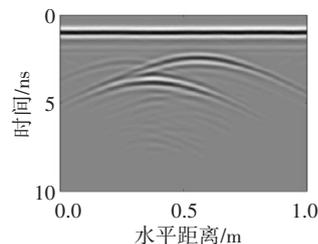
Fig. 2 Model feature points and their buried depth (unit: cm)



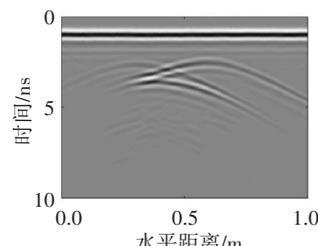
(a) I形



(b) Y形



(c) S形



(d) Z形

图3 裂缝模型原始雷达图像

Fig. 3 Original radar images of crack models

从图3可以看出,图像上方多条黑白相间的直线波为空气与沙箱界面上产生的直达波。在图3(a)中,I形裂缝形状规整,雷达图像为1条双曲线。在水平方向的双曲线中部有1条直线,其两端点为裂缝的端点,其在图像中的水平位置与实际埋置情况接近,水平方向的直线对应所测的裂缝模型。在图3(b)中,较为明显的双曲线有2条且相互交叉,推断该交叉点为Y形裂缝的分叉点。下分叉由于受到上方电磁波的干涉,部分波形隐没。图3(c)为S形裂缝图像,可以看到有3条明显的双曲线,右侧2条上下分布,双曲线的顶点位置与裂缝模型拐点的实际埋置情况较为接近。图3(d)中的双曲线图像与图3(c)中图像的相似度很高,同样是3条明显的双曲线且双曲线位置也接近,这和S形与Z形裂缝轮廓接近有关。

从图3还可以看出,沙箱面层下方均存在异常体,但是对异常体的形态仍难以判断。雷达图像与实际模型还存在一定差异,因此,需要用F-K偏移归位法对雷达图像进行偏移归位处理,以提高图像清晰度,增强裂缝模型图像的辨识度。

2.3 F-K 偏移归位处理

将雷达探测数据与F-K偏移程序分别输入MATLAB平台,以电磁波在沙箱中的传播波速0.185 2 m/ns为偏移速度,偏移归位处理后的雷达图像如图4所示。

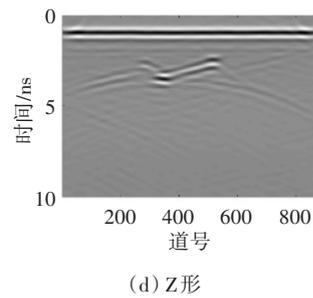
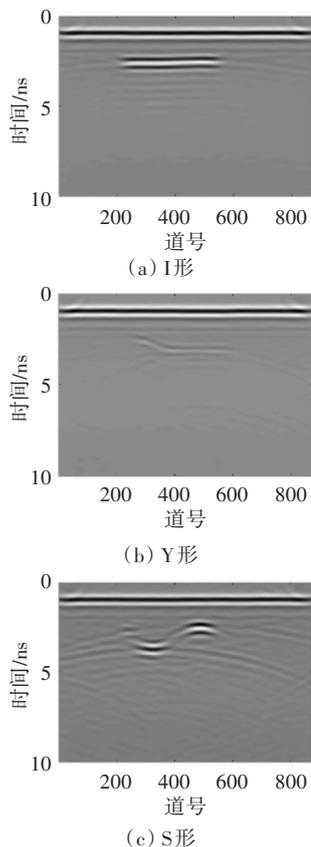


图4 偏移后裂缝模型图像

Fig. 4 Images of crack models after deviation

从图4可以看出,经过F-K偏移归位处理之后,各裂缝波形图像已经与预先埋置的裂缝模型轮廓基本一致。图4(a)中I形裂缝两端的绕射波已经收敛,整体呈现为I形;图4(b)为Y形裂缝模型波形图像,所测裂缝模型的轮廓已经显现,交叉点位置得到验证,其裂缝模型分叉中的下分叉受到上分叉的干扰,清晰度不够,但总体轮廓呈现为Y形;图4(c)与图4(d)分别为S形和Z形裂缝模型偏移归位处理后的波形图像。偏移处理前二者的图像形态较为接近,处理之后,这两种裂缝模型的形状呈现出初步轮廓,这是由于裂缝模型的走向较为复杂,所产生的绕射波仍然存在,尚未被完全处理。这表明:F-K偏移归位处理后的4种异形裂缝模型雷达图像更为清晰一些,绕射波得到一定程度的收敛。

3 裂缝的波形分析识别和二维重构

3.1 波形分析识别

根据偏移归位处理后的裂缝模型雷达图像对裂缝模型的位置进行波形分析识别。以I形裂缝模型为例,提取其特征点A的单道波形,如图5所示。

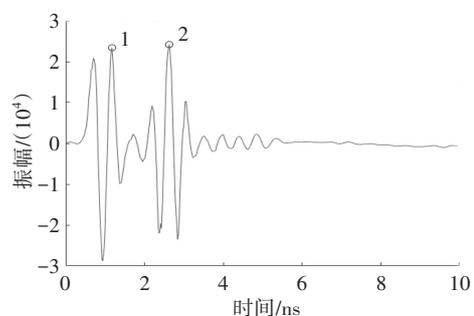


图5 特征点A的单道波形

Fig. 5 Single-channel waveform of feature point A

电磁波在穿越不同介质时,介质的介电常数的变化会导致电磁波信号发生突变,表现在波形上为一组突变相位,且振幅瞬时增强。当电磁波从低介

电常数的介质传播至高介电常数的介质时,会产生正相位反射波;反之,则产生负相位反射波。以图5中的正相位波峰为选择对象,选择波峰1与波峰2两个高振幅正相位反射波进行分析。因空气的介电常数要比沙的小,沙的介电常数又比水的小,可知波峰1代表空气与沙箱边缘交界处,波峰2代表裂缝模型与干沙介质交界处。波峰1处为1.174 ns,波峰2处为2.622 ns,根据电磁波在沙箱中的波速,通过式(1)进行计算,可以获得特征点A的埋深为13.41 cm,与实际埋深15.00 cm相比,相对误差为-10.60%。

采用波形分析法进行分析时,提取产生突变部位的波峰的双程走时,并通过式(1)计算出对应特征点的埋深。电磁波在介质中传播时容易受到周边环境的影响,因而常出现波形图上不同界面反射点的波峰难以被准确选择及计算结果误差较大的情况。

3.2 小波变换模极大值法定位识别

小波变换模极大值法是对探地雷达信号进行局部分析最有效的方法。小波变换模极大值法所选取的小波基函数与探地雷达信号的匹配度决定了最终信号分析的精确度。在已有的Db系和Bior系小波基中,Bior系小波基对探地雷达信号的重构效果更好,匹配度更高。因此,本研究选用Bior系小波基中函数图像更为光滑的Bior2.6小波基进行雷达信号处理^[20]。

为与波形分析法进行对比,同样以I形裂缝模型图像特征点A的单道信号为例。在提取单道信号之后,将其插入Bior2.6小波基中,用小波变换模极大值法进行3次分解。3次分解后得到 d_1 、 d_2 、 d_3 3个细节系数,其所对应的子信号如图6所示。从图6可以看出,细节系数 d_2 子信号局部波形的波动程度最大,且随着时间的推移,细节系数 d_2 的波形表现出了规律性的变化,该波形包含两个信号密集区,分别代表空气与沙箱交界面、沙与裂缝模型交界面。因此,对 d_2 信号做进一步的小波变换模极大值连续变换,结果如图7(a)所示。提取两峰值作为奇异点,分别为波峰1与波峰2,波峰1对应0.783 ns,波峰2对应2.348 ns。根据电磁波在沙箱中的传播波速0.185 2 m/ns,通过式(1)进行计算,可获得I形裂缝特征点A与沙箱表面的距离,为14.49 cm,其与实际埋深(15.00 cm)的相对误差为-3.40%。对Y形裂缝模型的特征点进行小波变换模极大值3次分解,其

结果如图7(b)、7(c)所示。对剩余裂缝模型的特征点同样分别进行小波变换模极大值3次分解,对其中规律性最好的细节系数进行小波变换模极大值连续变换,并通过式(1)进行计算,结果见表2。

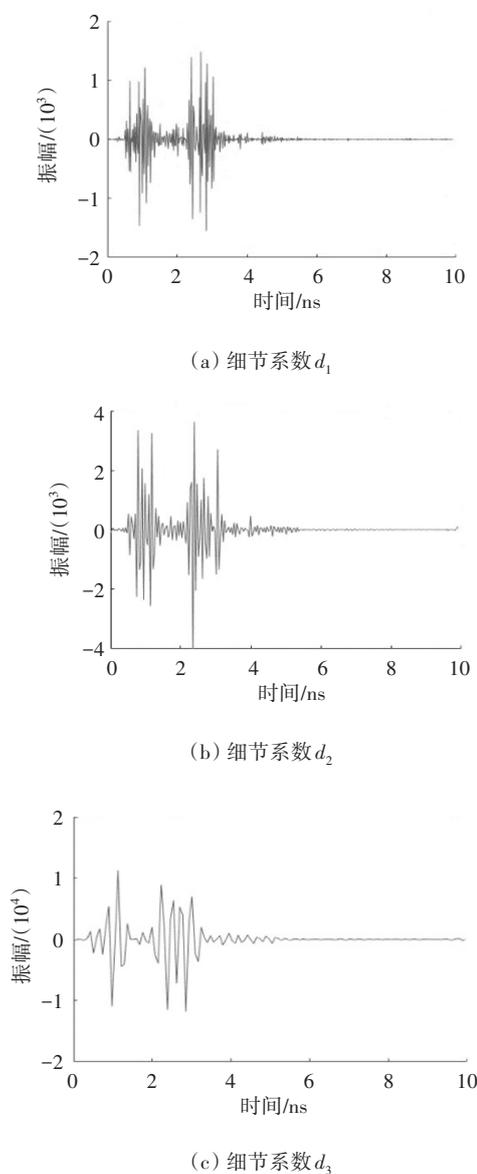
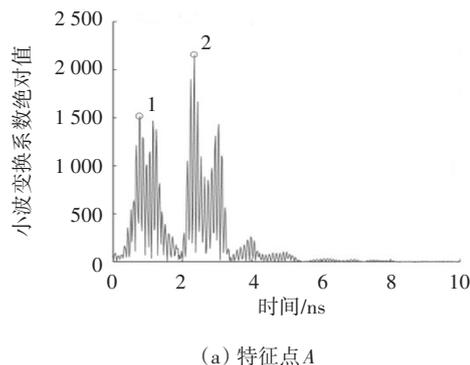


图6 小波分解

Fig. 6 Wavelet decomposition



(a) 特征点A

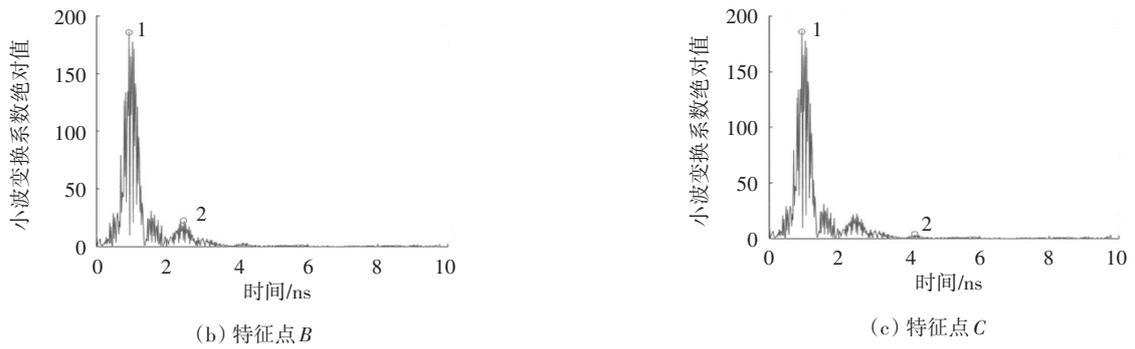


图7 小波变换模值

Fig. 7 Wavelet transform modulus

表2 各特征点小波变换模极大值法分析结果

Table 2 Analysis results of wavelet modulus maximum algorithm

项目	Y形				S形				Z形			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
检测值/cm	14.49	14.50	29.72	21.93	17.58	26.09	14.31	25.92	17.58	26.27	14.49	23.02
实际值/cm	15.00	15.00	29.40	21.50	19.00	26.00	15.00	24.40	18.00	25.00	15.00	23.70
相对误差/%	-3.40	-3.33	1.09	2.00	-7.47	0.35	-4.60	6.23	-2.33	5.08	-3.40	-2.87

采用小波模极大值法分析裂缝模型特征点的结果与实际值较为接近,相对误差的绝对值大多在3%左右,与波形分析法的计算结果相比,其精度有了很大的提高,可更准确地确定微裂缝的位置。

3.3 裂缝模型的二维重构

以Y形裂缝模型(测线长度为0.88 m,采集道数为875)为例,利用小波变换模极大值法对所有道号的奇异点进行识别,得到裂缝模型各特征点的坐标,将其输入Origin坐标系中,生成二维轮廓图,如图8所示。采用同样的方法对S形与Z形裂缝模型进行定位识别,所得二维轮廓图如图9~10所示。

从图8~10可以看出,重构的异形裂缝二维轮廓在个别细节之处仍存在误差,但是裂缝模型整体

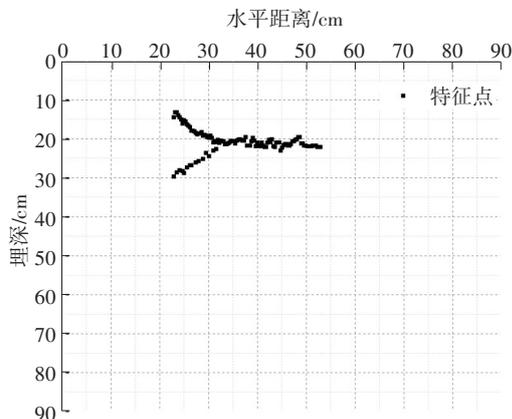


图8 Y形裂缝二维重构

Fig. 8 Two-dimensional reconstruction of Y-shaped cracks

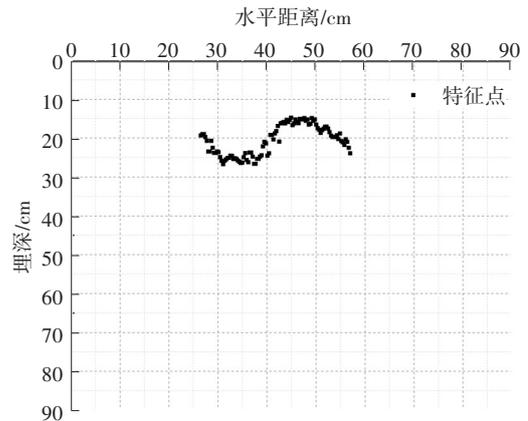


图9 S形裂缝二维重构

Fig. 9 Two-dimensional reconstruction of S-shaped cracks

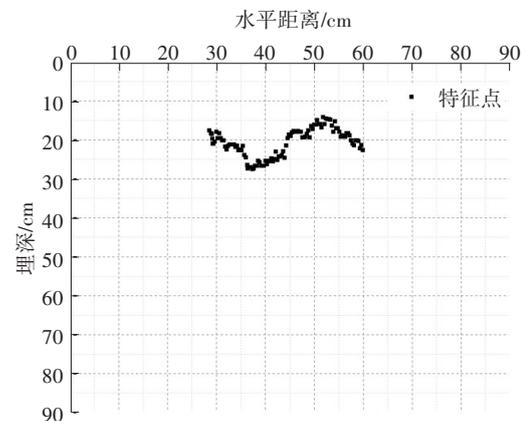


图10 Z形裂缝二维重构

Fig. 10 Two-dimensional reconstruction of Z-shaped cracks

轮廓与实际埋置的裂缝模型的轮廓已基本一致,可较好地拟合原裂缝模型的形状。与探地雷达所检测到的图像相比,二维轮廓重构后,可在坐标系中再现裂缝模型的走向和位置,并获得更多裂缝模型的信息,可为实际工程中的裂缝检测提供参考。

4 结论

本研究利用探地雷达进行室内异形富水微裂缝模型试验,通过分析雷达图像,并用F-K偏移方法和小波变换模极大值法对雷达测得的特征信号进行分析,对获得的异形裂缝模型图进行二维重构,得到结论为:

1) 在由异形富水微裂缝模型试验获得的雷达图像中,I形裂缝最容易被识别,Y形、S形和Z形裂缝雷达图像的干扰较多,难以被直接识别,通过F-K偏移归位处理后,裂缝模型的形态大部分可以被还原。

2) 分别用波形分析法和小波变换模极大值法处理雷达图像,通过小波变换模极大值法能够有效提取裂缝模型信号的奇异点,可以更准确地实现裂缝位置的量化分析。

3) 对定位识别之后的异形富水微裂缝模型进行二维轮廓重构,可以较好地拟合实体模型形状,能够获得更多裂缝模型的信息,为实际工程中的异形富水微裂缝检测提供可靠方法。

本研究只进行了4种富水微裂缝模型试验,在工程检测中,会遇到各种类型的裂缝和填充物,亟需对多种类型和不同填充物的裂缝模型进行研究。

参考文献(References):

- [1] 杨志刚,周智辉,凌同华,等.隧道衬砌裂缝对结构受力的影响规律研究[J].交通科学与工程,2020,36(4):43-53. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.007.
YANG Zhigang, ZHOU Zhihui, LING Tonghua, et al. Research on the influence law of tunnel lining cracks on structural forces [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (4) : 43-53. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.007.
- [2] 凌同华,张亮,谷淡平,等.背后存在空洞时盾构隧道管片的开裂机理及承载能力分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(9):2293-2300. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2018.09.016.
LING Tonghua, ZHANG Liang, GU Danping, et al. Analysis of cracking mechanism and bearing capacity of shield tunnel segment with voids behind [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15 (9) : 2293-2300. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2018.09.016.
- [3] 王石磊,高岩,齐法琳,等.铁路运营隧道检测技术综述[J].交通运输工程学报,2020,20(5):41-57. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.05.003.
WANG Shilei, GAO Yan, QI Falin, et al. Review on inspection technology of railway operation tunnels [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20 (5) : 41-57. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.05.003.
- [4] BIAN K, LIU J, XIAO M, et al. Cause investigation and verification of lining cracking of bifurcation tunnel at Huizhou Pumped Storage Power Station [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 54: 123-134. DOI: 10.1016/j.tust.2015.10.030.
- [5] 方勇,郭建宁,康海波,等.富水地层公路隧道衬砌背后空洞对结构受力的影响[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1648-1658. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0732.
FANG Yong, GUO Jianing, KANG Haibo, et al. Influence of voids behind lining on the mechanical behavior of lining structure of highway tunnel in watery strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1648-1658. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0732.
- [6] 赖金星,邱军领,潘云鹏,等.盾构隧道管片裂缝病害的综合监测与分析[J].现代隧道技术,2015,52(2):186-191. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2015.02.028.
LAI Jinxing, QIU Junling, PAN Yunpeng, et al. Comprehensive monitoring and analysis of segment cracking in shield tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52 (2) : 186-191. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2015.02.028.
- [7] 廖雅倩,凌同华.大跨度隧道塌方段施工方案比选[J].公路与汽运,2021(3):151-155. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.037.
LIAO Yaqian, LING Tonghua. Comparison and selection of construction schemes for collapse section of long-span tunnel [J]. Highways & Automotive Applications, 2021 (3) : 151-155. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.037.
- [8] 王睿,漆泰岳,雷波,等.隧道衬砌裂缝特征提取方法研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(6):1211-1217. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0930.
WANG Rui, QI Taiyue, LEI Bo, et al. Characteristic extraction of cracks of tunnel lining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (6) : 1211-1217. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0930.

- [9] 刘宗辉,刘毛毛,周东,等.基于探地雷达属性分析的典型岩溶不良地质识别方法[J].岩土力学,2019,40(8):3282-3290. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0796.
LIU Zonghui, LIU Maomao, ZHOU Dong, et al. Recognition method of typical anomalies in Karst tunnel construction based on attribute analysis of ground penetrating radar[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3282-3290. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0796.
- [10] 张胜,何文超,黎永索,等.基于小波变换时能密度法的隧道空洞充填物识别[J].煤炭学报,2019,44(11):3504-3514. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0921.
ZHANG Sheng, HE Wenchao, LI Yongsuo, et al. Identification of tunnel cavity fillings by time-energy density analysis based on wavelet transform[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3504-3514. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.0921.
- [11] 凌同华,杨宇,廖艳程.混凝土构件空洞模拟检测试验与ARMA功率谱分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(6):967-972,979. DOI: 10.13409/j.cnki.jpme.2018.06.010.
LING Tonghua, YANG Yu, LIAO Yancheng. Simulation test and ARMA power spectrum analysis for detection signal of cavity in concrete member[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 967-972, 979. DOI: 10.13409/j.cnki.jpme.2018.06.010.
- [12] KILIC G, EREN L. Neural network based inspection of voids and Karst conduits in hydro-electric power station tunnels using GPR[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 151: 194-204. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.02.026.
- [13] 陈婕,凌同华,刘浩然,等.探地雷达混凝土空洞目标正演模拟与试验分析[J].交通科学与工程,2018,34(3):31-37. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.03.006.
CHEN Jie, LING Tonghua, LIU Haoran, et al. Forward simulation and experimental analysis of ground penetration radar for the underground cavities[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(3): 31-37. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.03.006.
- [14] 王国群.不同成因地裂缝探地雷达图像特征[J].物探与化探,2009,33(3):345-349.
WANG Guoqun. Characteristic analysis of GPR images for underground cracks of different geneses[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(3): 345-349.
- [15] 胥月稳,苏国锋,魏文涛,等.高铁隧道车载探地雷达检测技术及其应用[J].现代隧道技术,2018,55(增刊2):1288-1294. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2018.S2.164.
ZAN Yuewen, SU Guofeng, WEI Wentao, et al. Detection technology and application of vehicle-mounted ground penetrating radar in high-speed railway tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(sup 2): 1288-1294. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2018.S2.164.
- [16] LING T H, ZHANG L, HUANG F, et al. OMHT method for weak signal processing of GPR and its application in identification of concrete micro-crack[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(11): 3057-3065. DOI: 10.1007/s11771-019-4236-y.
- [17] 高阳,彭明涛,杨培胜,等.三峡库区巫峡段高陡峡谷区危岩裂隙带探地雷达探测[J].物探与化探,2020,44(2):441-448. DOI: 10.11720/wtyht.2020.1259.
GAO Yang, PENG Mingtao, YANG Peisheng, et al. Geological radar detection for the fractures of dangerous rock body in the high-steep gorge area of Wuxia section in the Three Gorges Reservoir area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(2): 441-448. DOI: 10.11720/wtyht.2020.1259.
- [18] 刘杰,张千里,杜翠,等.含缺陷高铁隧道衬砌探地雷达检测模型试验[J].中国铁道科学,2021,42(5):103-111. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2021.05.12.
LIU Jie, ZHANG Qianli, DU Cui, et al. Model test of ground penetrating radar detection for high speed railway tunnel lining with defects[J]. China Railway Science, 2021, 42(5): 103-111. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2021.05.12.
- [19] 李夕兵,凌同华,张义平.爆破震动信号分析理论与技术[M].北京:科学出版社,2009.
LI Xibing, LING Tonghua, ZHANG Yiping. Analysis of blast vibration signals-theories and methods[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [20] 张亮.改进的小波提升算法及其在地质雷达信号精细化分析中的应用[D].长沙:长沙理工大学,2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000002.
ZHANG Liang. Improved wavelet lifting algorithm and its application in refined analysis of GPR signals[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000002.

(责任编辑:欧兆虎;英文编辑:陈成)