

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.019



混凝土构件深浅埋钢筋模拟检测试验与 偏移分析

杨宇¹, 凌同华¹, 廖艳程²

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410114; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广州 510000)

摘要:应用地质雷达进行混凝土构件缺陷检测时,浅埋钢筋会对层下钢筋及目标物的探测造成干扰,对其原因进行分析并采取有效的手段去除干扰具有重要意义。通过理论计算设计了检测试验方案,在沙槽中埋设不同埋深钢筋模拟混凝土中钢筋的检测,运用多种偏移手段对检测信号进行处理。结果表明:浅层钢筋对深层钢筋检测的干扰,与地质雷达探测区域覆盖的浅层钢筋的长度有关;相较于绕射叠加偏移、Kirchoff 偏移、F-K 域偏移等方法,Tau-p 域偏移能够更好地对钢筋检测信号进行偏移处理,钢筋的位置被更为准确地识别,偏移后的地质雷达三维图像变得平坦、干净。结合工程实例,对地质雷达数据进行了偏移分析,取得了良好的效果。

关键词:混凝土构件;地质雷达;钢筋检测;偏移分析

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)06-0139-07

Simulation test and migration analysis for detection signal of deep and shallow reinforcement in concrete member

Yang Yu¹, Ling Tonghua¹, Liao Yancheng²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China;
2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd, Guangzhou 510000, P. R. China)

Abstract: The detections of reinforcement and target are affected by shallow buried reinforcement in concrete member with ground penetrating radar(GPR) testing defects. It is of great importance to study the cause and elimination of the interference. Based on the theoretical calculation, the numerical experimentations were designed, and the reinforcement detection was simulated by embedding reinforcement of different depths in the sand tank. Moreover, the signal was processed by various migration methods. The results show that the interference is relevant with the length of shallow reinforcement within GPR detection area. By comparing with diffraction stack, Kirchoff and F-K migration methods, Tau-p domain migration can deal with the reinforcement detection signal better. The position of reinforcement is more accurately identified. The 3D image of GPR become flat and clean through Tau-p domain migration. Finally, the GPR data in a practical project was well analyzed by Tau-p migration.

Keywords: concrete member; ground penetrating radar; reinforcement detection; migration analysis

收稿日期:2017-12-28

基金项目:国家自然科学基金(51678071,51608183)

作者简介:杨宇(1992-),男,主要从事城市轨道交通方面研究,E-mail:yangyu1949@163.com.

Received:2017-12-28

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51678071,51608183)

Author brief:Yang Yu (1992-), main research interest: urban rail transit, E-mail:yangyu1949@163.com.

目前,中国工程建设速度和规模居于世界前列,确保工程安全对基础设施建设具有重大意义^[1]。而混凝土作为土木工程建设中不可缺少的部分,其内部钢筋参数不满足设计要求,锈蚀、断裂等问题会导致混凝土构件在长期荷载作用下产生裂缝及渐近性破坏,进而导致结构整体性退化^[2],影响工程的运营,减少使用寿命,造成严重经济损失。

鉴于地质雷达法直观、无损等特点,科研人员主要将其应用于混凝土厚度、缺陷、钢筋间距等短距离探查^[3]。李术才等^[4]应用地质雷达探测隧道中衬砌开裂、不密实等病害。朱自强等^[5]、刘斌等^[6]应用地质雷达探测隧道裂隙流水通道。杨艳青等^[7-8]对铁路隧道衬砌试件进行检测试验,分析了衬砌背后空洞等异常情况。科研人员应用探地雷达进行钢筋检测,大多集中于密排钢筋网中钢筋的深度、间距及其下病害的检测^[9]。近几年,有学者应用地质雷达检测混凝土中钢筋的锈蚀情况^[10-11]。黎霞等^[12]认为钢筋对电磁波全反射,对雷达波在混凝土中钢筋间的传播速度进行了计算。陈培^[13]进行了钢筋互相干扰的检测试验,得到钢筋对下层目标物屏蔽作用大的结论。张家松^[14]总结了混凝土结构缺陷的数据处理方法,选用FK偏移与希尔伯特变换去除钢筋网的干扰。实际上,浅层钢筋会对深层钢筋的检测造成强烈干扰,影响电磁波的传播,甚至不利于整体混凝土构件病害的检测,因此,对其进行分析并提出合理的解决方案显得至关重要。

采用模型试验的方法对混凝土构件中受到浅层钢筋干扰的深层钢筋的检测进行探讨,通过理论计算确定试验方案。结合试验结果分析了浅层钢筋对深层钢筋的影响,应用偏移方法去除了大部分由浅层钢筋产生的干扰,达到准确检测深层钢筋的目的。最后在工程实例中应用该分析方法,提高了混凝土内部深浅埋钢筋的可视化程度。

1 钢筋检测试验

1.1 试验方案设计及模型制作

干沙是很好的均匀介质,其相对介电常数(4~6)与混凝土较为接近(4~8)。相较于钢筋混凝土结构,沙槽的制作工艺简便,钢筋布置灵活,且可以简化电磁波的传播过程^[15]。采用充满干砂的沙槽作为试验装置,模拟混凝土构件中钢筋的检测,见图1。

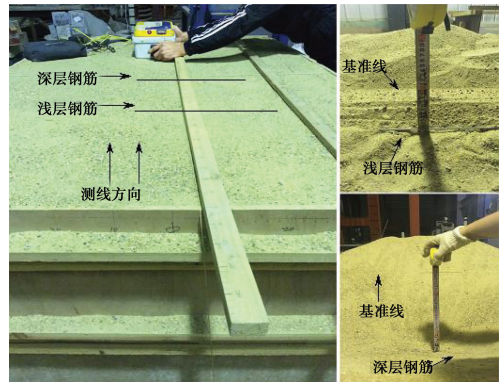


图1 实验模型及测线布置

Fig. 1 Experimental model and line layout

沙槽长 2.5 m,宽 1.5 m,高 1 m,沙槽表面拉设基准线。地质雷达探测的有效区域与传播介质的相对介电常数及探测深度有关。探测有效区域水平投影呈现一个椭圆形的“足印”,其半长轴 a 的计算公式为^[16]

$$a = \frac{\lambda}{4} + \frac{\text{depth}}{\sqrt{(\epsilon - 1)}} \quad (1)$$

式中: ϵ 为介质相对介电常数; λ 为波长。

电磁波波长的计算公式如

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2)$$

式中: v 为电磁波传播速度; f 为地质雷达天线频率。

计算电磁波在干砂中的传播速度 v ,在沙槽中心一定深度埋设平整钢板,应用地质雷达在其正上方紧贴沙槽表面以连续测量方式多次测量,数据处理时记录钢板处反射信号的到达时间 t ,计算多次测量的平均时间 t' ,电磁波速 v 的计算式为

$$v = \frac{2h}{t'} \quad (3)$$

式中: h 为钢板埋置深度, t' 为钢板反射弧顶点到达的平均时间,为双程走时。

经过计算,电磁波在试验模型中的传播速度为 0.150 8 m/ns,波长为 0.564 m。当探测深度为 10 cm 时,探测区域半长轴 a_1 大小为 18.607 1 cm,为保证试验效果取 20 cm。探测深度 40 cm 时, a_2 为 32.023 5 cm,取 34 cm。为研究浅层钢筋对地质雷达检测深层钢筋的影响,设计试验时,地质雷达“足印”应从只能探测到浅层钢筋过渡到同时探测到深浅层钢筋,试验模型剖面见图 2。

两根光圆钢筋埋深分别为 10、40 cm,均布置于沙槽中心且与沙槽短边方向平行,长 50 cm,直径

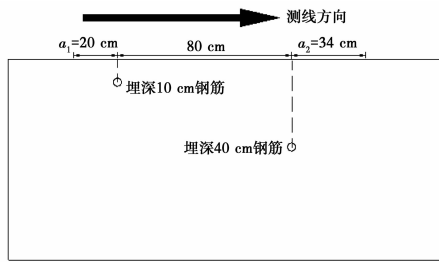


图 2 试验模型剖面
Fig. 2 Test model profile

8 mm。试验过程中,地质雷达测线用白色细线固定,用木尺与细线平齐,地质雷达沿木尺滑动来保证测线的稳定以及每一点“足迹”的准确。测线方向与钢筋走向呈 90°水平投影角度,共 11 条测线,测线间隔 5 cm,测线长 135 cm。

1.2 仪器参数设置

试验中的仪器为瑞典 MALA 公司的 RAMAC 系列地质雷达,选用 800 MHz 天线。采样点数为 512,采样间隔 1 cm。时间窗大小为 22.02 ns。

1.3 试验及结果分析

原始雷达图像(图 3)中,第 1-2 条测线雷达图像一致,T-D 剖面图上只显示浅层钢筋反射弧,弧顶为钢筋所在位置。第 3 条测线开始出现深层钢筋及多次波信号,但信号强度微弱。位于钢筋正上方的第

4~8 条测线,受到浅层钢筋的影响,深层钢筋上方出现多次波,且随着雷达探测区域覆盖的浅层钢筋的长度的增加,多次波信号变强,见图 3(3)。第 9~11 条测线中,浅层钢筋和深层钢筋反射弧均可见,且无多次波干扰。

浅层钢筋对深层钢筋探测的干扰与地质雷达探测区域覆盖的浅层钢筋长度有关;探测区域内的浅层钢筋长度越长,深层钢筋上方的多次波信号越强,浅层钢筋对深层钢筋探测的干扰越大,越难以判断钢筋位置。为了减少浅层钢筋的干扰,有必要对原始雷达图像运用偏移方法进行处理。

2 Tau-p 域偏移分析原理

在处理地质雷达数据的过程中,偏移方法可以使由钢筋产生的绕射双曲线收敛,绕射波能量汇聚于双曲线的顶点,压制多次波能量,突出钢筋层下的微弱异常信号。传统的偏移处理方法有绕射叠加偏移、Kirchoff 偏移、F-K 域偏移等^[17-19],但这些方法都存在其自身的缺点,对多次波反射能量的压制有限,效果不甚理想。Tau-p 域偏移方法自引入地球物理领域以来,取得了很大的进展,多被应用于地震数据处理,可以实现各种干扰波的压制、滤波、各种波的分离等^[20-21]。该算法具有高效、准确的特点,本文尝试应用该方法处理地质雷达钢筋检测信号,取得了良好的效果。Tau-p 域偏移分析原理如下。

2.1 τ - p 正、反变换

若原始信号记录为 $\varphi = (t, x)$, $t-x$ 域中投影的截距为 τ (与时间轴),斜率为 p ,则正变换为沿直线 $t = \tau + px$ 的积分,即

$$\varphi(\tau, p) = \int_l \varphi(t, x) dl = \int_l dx \varphi(\tau + px, x) \quad (4)$$

简单的 τ - p 反变换式可以定义为

$$\varphi(t, x) = \int \varphi(t - px, p) dp \quad (5)$$

2.2 偏移方程的推导

从二维波动方程出发,利用傅氏变换和投影定理,导出需要的偏移方程,对二维波动方程

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2(z)} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

作关于空间 x ,时间 t 的二维 FT,得

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \left[\frac{\omega^2}{c^2(z)} - k_x^2 \right] U = 0 \quad (7)$$

由傅氏投影定理,令 $k_x = p\omega$,那么

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \left[\frac{1}{c^2(z)} - p^2 \right] \omega^2 \right\} U(\omega, p\omega, z) = 0 \quad (8)$$

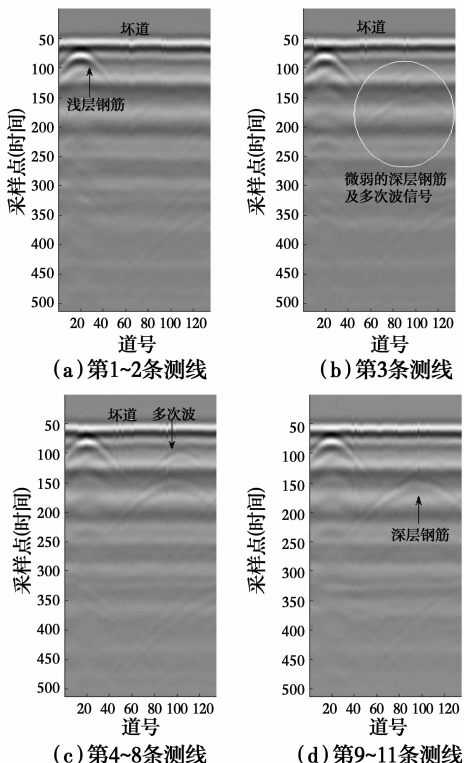


图 3 不同测线的原始雷达图像

Fig. 3 Original radar image of different survey line

令

$$S(\omega, p, z) = U(\omega, p\omega, z) \quad (9)$$

则式(8)为

$$\frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + \left[\frac{1}{c^2(z)} - p^2 \right] \omega^2 S = 0 \quad (10)$$

解得

$$S(\omega, p, z) = S(\omega, p, 0) \exp \left\{ -i\omega \int_0^z \left[\frac{1}{c^2(z)} - p^2 \right]^{1/2} dz \right\} \quad (11)$$

对上式 ω 作反傅氏变换有

$$U(x, z, t = 0) = \int d\omega |\omega| \int dp S(\omega, p, z = 0) \cdot \exp \left\{ -i\omega \int_0^z \left[\frac{1}{c^2(z)} - p^2 \right]^{1/2} dz + ip\omega x \right\} \quad (12)$$

式(12)即 τp 资料的偏移成像公式。

3 检测信号的偏移分析

3.1 原始雷达图像的域偏移分析

正常的钢筋反射信号为倒立的双曲线弧形,弧顶即为钢筋所在位置。工程中要识别钢筋间距等参数,只需确定弧顶位置。因此,双曲线弧形越短,其对周围钢筋检测的干扰越小。偏移方法可以使得双曲线收敛,绕射波能量汇聚于弧顶,突出钢筋位置信息。为了探寻最适于原始雷达图像的偏移方法,分别应用绕射叠加偏移、Kirchoff 偏移、F-K 偏移及 Tau-p 域偏移对图 3(c)原始雷达图像进行处理。地质雷达数据偏移结果见图 4, X 轴为道号, Y 轴为采样点数,对其进行分析,结论如下:

1)对比原始图像图 3(c)可知,4 种偏移方法都可以使绕射双曲线收敛,绕射波能量都较好地汇聚于双曲线顶点。但 F-K 域偏移和 Tau-p 域偏移方法使得绕射双曲线收敛的更为紧密,钢筋弧尾部信号更微弱,绕射波能量更好地汇聚于双曲线的顶点;这对于识别钢筋位置和减少干扰波十分有利。

2)由图 4 可知,相较于前两种方法,F-K 域偏移和 Tau-p 域偏移方法可以更好地削弱多次波能量。然而,F-K 域偏移后多次波的范围为 $\Delta X=33, \Delta Y=55$,见图 4(c)虚线处。而 Tau-p 域偏移后多次波的范围为 $\Delta X=16, \Delta Y=20$,且更为微弱,见图 4(d)虚线处。这说明经过 Tau-p 域偏移,多次波被更好地压制;F-K 域偏移后深层钢筋双曲线范围为 $\Delta X=50, \Delta Y=90$ 。而 Tau-p 域后钢筋弧范围为 $\Delta X=30, \Delta Y=41$ 。由此可知,Tau-p 域偏移更好地减小了钢筋弧形的范围,抑制了其周围钢筋检测的干扰,使

得钢筋的位置信息更为突出。

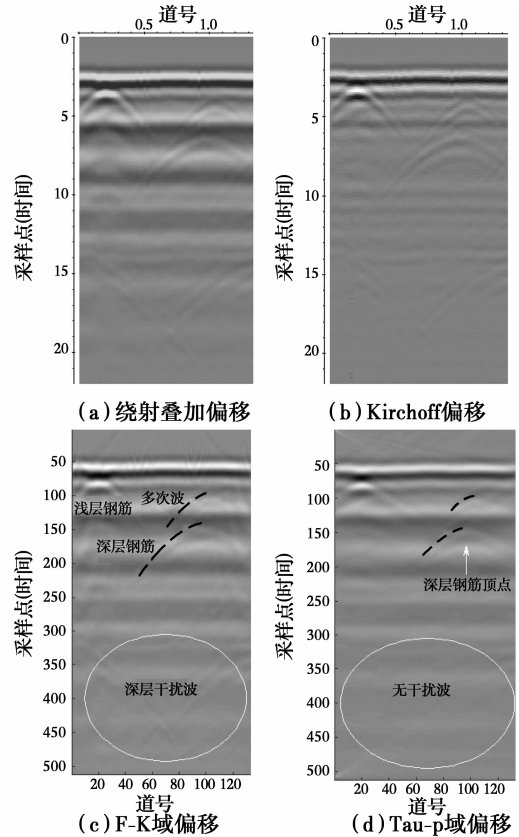


图 4 地质雷达数据偏移结果

Fig. 4 Results of GPR data migration

3)原始图像中,多次波顶点的幅值为 1.45×10^4 ,Tau-p 域偏移后为 0.94×10^4 。原始图像中深层钢筋弧形顶点的幅值为 1.11×10^4 ,Tau-p 域偏移后为 1.23×10^4 。这说明多次波能量变弱,深层钢筋信号变强;Tau-p 域偏移可以更好的判断深层钢筋和浅层钢筋位置。

4)相较于前 3 种偏移方法,Tau-p 域偏移不仅有效地去除了浅层多次波,也有效地去除了由浅层和深层钢筋共同产生的深层干扰波。这也使得偏移后的雷达图像更干净,深、浅层钢筋和沙槽表面信号清晰可见,见图 4(d)。

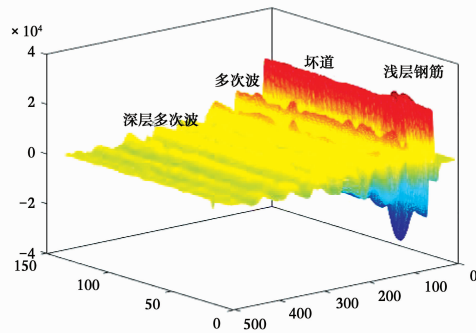
5)图 3 原始雷达图像中,多处位置存在坏道现象,这是由于仪器元器件老化产生激变电压所致。4 种偏移方法都在一定程度上去除了坏道,但是,Tau-p 偏移更好地消除了坏道,使原始图像变得完整,无坏道痕迹。

3.2 原始数据偏移后的三维图像

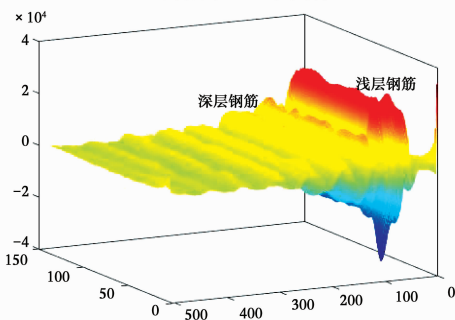
对图 3(3)所示图像进行三维显式,以采样点数为 X 轴坐标,道号为 Y 轴坐标,每个采样点处的幅度值为 Z 轴坐标,见图 5(a)。对该数据进行 Tau-p

偏移处理并三维显式,见图 5(b)。对其进行分析,结论如下:

1)对比两个三维图像可以更直观地看出,偏移后钢筋绕射双曲线收敛的更紧密,能量更好地汇聚于双曲线的顶点。Tau-p 域偏移处理使得多次波幅值降低,更为准确地判断了深层钢筋和浅层钢筋位置。



(a) 原始雷达三维图像



(b) Tau-p域偏移后三维图像

图 5 地质雷达数据三维图像

Fig. 5 3D image of GPR data

2)原始图像第 26、53 和 84 道信号中,深层多次波顶点处幅值分别为 4 047、3 664 和 4 781,偏移后为 2 412、1 519 和 2 967。说明 Tau-p 域偏移不仅压制了浅层多次波,也明显压制了深部多次波,使得偏移后的雷达图像更为平坦,突出了钢筋层下的奇异信号;同时,该方法很好地消除了坏道,偏移后的图像更为完整、干净,异常信息清晰可见。

4 钢筋检测信号实例分析

云桂铁路 YGT-3 阿卡黑隧道段位于云南省广南县珠琳镇,为了解该隧道段二次衬砌混凝土质量和钢筋分布情况,使用地质雷达对其进行无损检测。在隧道拱顶、左拱腰、右拱腰、左边墙和右边墙 5 个位置布置地质雷达纵向测线。

4.1 仪器参数设置

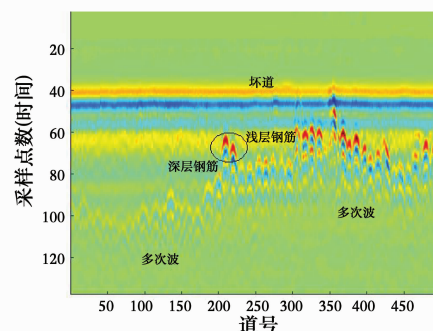
采用瑞典 MALA 公司生产 RAMAC/GPR 探

地雷达,配以 500 MHz 的屏蔽天线。采样频率 1 100 MHz,以点测方式采集数据。

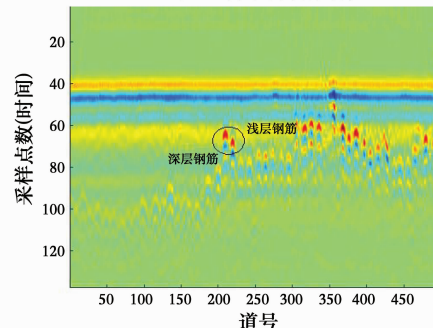
4.2 钢筋检测信号 Tau-p 域偏移分析

选取阿卡黑隧道段左边墙位置的测线数据,进行 Tau-p 域偏移处理,原始图像和偏移后的图像分别见图 6(a)、(b)。

1)以图中椭圆标注的钢筋为例,Tau-p 域偏移使得钢筋绕射双曲线收敛得更为紧密,钢筋弧尾部信号变弱,能量更好地汇聚于双曲线顶点,这使得钢筋的位置被更为准确地识别。经过偏移分析,提高了地质雷达信号解释的精度,处理结果与基底下实际的钢筋布置情况较为一致。



(a) 隧道衬砌原始图像



(b) 隧道衬砌偏移后图像

图 6 隧道衬砌地质雷达数据

Fig. 6 GPR data of tunnel lining

2)原始图像存在多次波干扰和坏道现象,Tau-p 域偏移处理后多次波能量被很好地压制。突出了钢筋及异常信号,消除了坏道,偏移后的雷达图像变得更为清晰。

3)由偏移后的图像更为明显地看出,图像右侧能量更强,且存在较多的杂乱反射。分析原因为右侧钢筋周围存在较多空隙,地质雷达波在钢筋表面和空隙面多次反射所致。而左侧钢筋则与混凝土结合得更为紧密,无杂乱反射现象。该隧道段钢筋布置情况相较于室内模型试验,其钢筋数量更多、间距更密,但也取得了良好的效果,提高了混凝土构件内部钢筋的可视化程度。

5 结论

1)通过理论计算设计了钢筋检测试验,分析结果表明:浅层钢筋对深层钢筋检测的干扰,与地质雷达探测区域覆盖的浅层钢筋的长度有关;探测区域内的浅层钢筋长度越长,深层钢筋上方的多次波信号越强,浅层钢筋对深层钢筋探测的干扰越大。

2)相较于绕射叠加偏移、Kirchoff 偏移、F-K 域偏移等方法,Tau-p 域偏移能移使得绕射双曲线收敛得更为紧密,绕射波能量更好地汇聚于双曲线顶点;经过 Tau-p 域偏移,多次波被更好地压制,原始雷达图像由原来多次波能量强于深层钢筋,变换为深层钢筋能量更强,这些都有利于突出异常信号和准确识别钢筋位置。

3)对比原始和 Tau-p 域偏移后的地质雷达三维图像,可以更直观地看出,Tau-p 域偏移方法不仅有效去除了浅层干扰波,也有效地去除了由浅层和深层钢筋产生的深层干扰波;偏移处理使得多次波的幅值降低,雷达图像变得平坦;结合试验和工程实例中原始雷达数据的偏移结果,Tau-p 域偏移有效地消除了原始数据中的坏道,压制了多次波的干扰,突出了钢筋及异常信号;偏移后的雷达剖面图更为干净、清晰,提高了混凝土构件内部钢筋的可视化程度。

4)分析方法及结论同样适用于盾构隧道管片式衬砌、山岭隧道衬砌、城市基础设施及基坑等土木工程中钢筋的检测。

参考文献:

- [1] 陈祖煜,程耿东,杨春和. 关于中国重大基础设施工程安全相关科研工作的思考[J]. 土木工程学报,2016(3): 1-5.
CHEN Z Y, CHENG G D, YANG C H, et al. Research work on construction safety of major infrastructures in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016 (3):1-5. (in Chinese)
- [2] ZHANG Z, MANSOOR Y A. Evaluating the strength of corroded tunnel lining under limiting corrosion conditions [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2013, 38 (3):464-475.
- [3] 凌同华,张胜,李升冉. 地质雷达隧道超前地质预报检测信号的 HHT 分析法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31 (7):1422-1428.
LING T H, ZHANG S, LI S R. Hilbert- Huang

transform for detection signal of tunnel geological prediction using ground penetrating radar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (7):1422-1428. (in Chinese)

- [4] LI Y, LI S C, LIU B, et al. Imaging method of ground penetrating radar for rock fracture detection based on improved back projection algorithm [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016.
- [5] ZHANG J S, ZHU Z Q, LU G Y, et al. Application of migration and Hilbert transform on exploration of karst fractured ground water channel in the tunnel with GPR [J]. Progress in Geophysics, 2012, 28 (43): 2722-2728.
- [6] 刘斌,李术才,李树忱,等. 复信号分析技术在地质雷达预报岩溶裂隙水中的应用研究[J]. 岩土力学,2009, 30 (7):2191-2196.
LIU B, LI S C, LI S C, et al. Study of application of complex signal analysis to predicting karst-fractured ground water with GPR [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (7):2191-2196. (in Chinese)
- [7] YANG Y Q, HE S H, JIANG B, et al. Simulation test of GPR detection of integral lining of railway tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 30 (9): 1761-1771.
- [8] YANG Y Q, HE S H, LIU J R, et al. Research on detection equipment for the state of railway tunnel lining [J]. Advanced Materials Research, 2011, 317-319 :2421-2426.
- [9] 徐浩,刘江平,范承余,等. 隧道衬砌病害的探地雷达波场模拟与特征分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013(11):4581-4587.
XU H, LIU J P, FAN C Y, et al. Forward modeling of tunnel lining diseases ground penetrating radar wave field and characteristics analysis [J]. Journal of Central South University, 2013 (11):4581-4587. (in Chinese)
- [10] HONG S X, WIGGENHAUSER H, HELMERICH R, et al. Long-term monitoring of reinforcement corrosion in concrete using ground penetrating radar [J]. Corrosion Science,2017,114:123-132.
- [11] KALOGEROPOULOS A, KRUK J V D, HUGENSCHMIDT J, et al. Full-waveform GPR inversion to assess chloride gradients in concrete [J]. Ndt & E International, 2013, 57 (6):74-84.
- [12] 黎霞,高燕希,宁黎磊,等. 隧道衬砌介电常数试验与理论分析[J]. 中国公路学报,2008,21(5):70-74.
LI X, GAO Y X, NING L L, et al. Experimental and theoretical analysis on permittivity of tunnel lining [J].

- China Journal of Highway and Transportl, 2008, 21 (5):70-74. (in Chinese)
- [13] 陈培. 混凝土结构中缺陷的雷达成像技术研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.
CHEN P. The radar imaging technic research applied to the detection in defect of concrete structure [D]. Changsha : Hunan University, 2012. (in Chinese)
- [14] 张家松. 钢筋混凝土结构缺陷检测中 GPR 数据处理方法研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
ZHANG J S. GPR data processing for defaults detecting in concrete [D]. Changsha :Central South University, 2013. (in Chinese)
- [15] JOL H M. Ground penetrating radar theory and applications [M]. Elsevier Science, 2009.
- [16] 杨峰. 地质雷达探测原理与方法研究[M]. 北京:科学出版社,2010.
YANG F. Principles and methods of geological radar detection [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [17] CHEN C S, YANG J. Nonlinear data processing method for the signal enhancement of GPR data [J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 75 (1):113-123.
- [18] JEANREMI D, MAKSIM B. Topographic migration of GPR data : examples from chad and mongolia [J]. Comptes Rendus Geosciences, 2013,345 (2):73-80.
- [19] BUSCHE A, SEYFRIED D, SCHMIDT-THIEME L. Hough transform and Kirchoff migration for supervised GPR data analysis [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [20] ZHOU H, SATO M, LIU H. Migration velocity analysis and prestack migration of common-transmitter GPR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2005, 43 (1):86-91.
- [21] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社,2015.
HU G S. Modern signal processing course [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)

(编辑 胡玲)