

# 弯曲界面的纵波层析成像技术

王安飞

(南京交通运营管理集团有限公司,南京 211800)

**摘要:**大跨径铁路预应力混凝土连续梁桥0号块部位通常都设置有密集钢筋网、预应力管道、支座锚栓、防落梁挡块锚栓等构件,在进行0号块混凝土浇筑时,粗骨料不易透过钢筋网,造成0号块混凝土内部产生不密实等缺陷。弹性波层析成像技术能有效实现对0号块内部密实情况的检测,其检测效率及检测精度能满足工程要求,但传统弹性波层析成像技术只能应用于规则的矩形界面,无法对弯曲界面进行有效检测。在传统弹性波层析成像技术的基础上,根据工程实际提出弯曲界面层析成像技术,并通过实地检测对该技术进行了验证。

**关键词:**0号块;弹性波;层析成像;弯曲界面

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2022)01-0035-03

## Longitudinal wave tomography technology of curved interface

WANG Anfei

(Nanjing Transportation Operation Management Group Co., Ltd., Nanjing 211800, China)

**Abstract:**The zero block of a long-span railway prestressed concrete continuous beam bridge is usually equipped with dense steel mesh, prestressed pipes, support anchors, anti-falling beam stop anchors and other components. During the concrete pouring of zero block, the coarse aggregate is not easy to pass through the reinforcement mesh, resulting in non compactness and other defects in the concrete of zero block. Elastic wave tomography technology can effectively detect the internal noncompactness of block zero, and its detection efficiency and accuracy can meet the engineering requirements. However, the traditional elastic wave tomography technology can only be applied to the regular rectangular interface, and can not effectively detect the curved interface. Based on the traditional elastic wave tomography technology, this paper proposes the curved interface tomography technology according to the actual engineering, and verifies the technology through field testing.

**Key words:**zero block; elastic wave; tomography; curved interface

在进行大跨度铁路连续梁桥检测时发现,作为悬臂现浇结构,0号块浇筑过程中由于其致密钢筋网及振捣不充分的影响,内部较容易形成不密实区域,影响桥梁的结构安全。现今行业内主要采用雷达和弹性波检测技术对运营中的桥梁进行检测<sup>[1]</sup>。另外,通过现场检测发现,雷达检测技术对内部存在致密钢筋网的混凝土构件的检测效果较差,因此弹性波检测技术成为主要检测方法。目前行业内的弹性波检测仪适合用于检测规则的矩形构件,无法对曲面构件进行直接检测。笔者从工程实际出发,对检测过程中遇到

的曲面构件进行了弹性波层析成像研究,并对结果进行了反演成像及现场验证。

## 1 弹性波检测原理

应力波是应力和应变扰动的传播形式,而弹性波是应力波的一种,即扰动或外力作用引起的应力和应变在弹性介质中传递的形式,从波的传播方向和质点的振动方向来进行分类,主要分为纵波和横波,文章研究的对象为纵波。根据已有的研究可知,利用纵波声速来评价混凝土构件内部的密实质量具有明确的理论支撑<sup>[2-3]</sup>。LESLIE等提出的混凝土质量评价标准为:声速大于4 500 m·s<sup>-1</sup>为优;声速为3 600~4 500 m·s<sup>-1</sup>为好;声速为3 000~3 600 m·s<sup>-1</sup>为一般;声速为2 100~3 000 m·s<sup>-1</sup>为差;声速小于

收稿日期:2021-09-28

作者简介:王安飞(1987—),男,工程师,主要从事工程物探工作

通信作者:王安飞,523188707@qq.com

2 100 m·s<sup>-1</sup>为劣。杨武<sup>[4]</sup>介绍的混凝土质量评价标准为：声速大于4 120 m·s<sup>-1</sup>为优；声速为3 300~4 120 m·s<sup>-1</sup>为良好；声速为2 750~3 300 m·s<sup>-1</sup>为一般；声速为1 920~2 750 m·s<sup>-1</sup>为较差；声速小于1 920 m·s<sup>-1</sup>为很差。可见，纵波声速已被作为重要指标广泛应用于混凝土内部质量的评价中。

## 2 弯曲界面模型

使用传统弹性波法检测混凝土内部缺陷时，最常见的检测剖面为双面平行的矩形剖面和仅有两组对面平行的梯形剖面，由于在工程混凝土的检测中弯曲界面较少，且混凝土缺陷检测的相关规范中有关于平行检测面的强制要求，故目前对弯曲界面检测的研究不多。为了满足工程实际需要，文章以弯曲界面为模型进行检测研究。单弯曲界面检测剖面模型如图1所示（图中F1~F11为激震点，S1~S11为受信点）。

## 3 工程应用

### 3.1 传统弹性波 CT 检测

使用传统CT（电子计算机断层扫描）方法进行

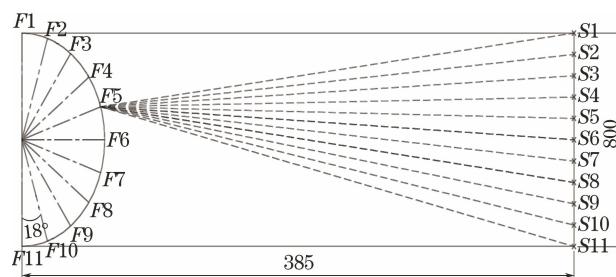


图1 单弯曲界面检测剖面模型

现场检测时，一般沿底板向上布置3个检测剖面，1#剖面距0号块底板8 cm，2#、3#剖面间隔10 cm依次向上布置。图2为1#剖面传统弹性波CT检测的结果（使用SCE-MATS型混凝土多功能检测仪数据处理软件，图中百分比为该波速区域的体积占比）。由图2可见，由于人孔内壁存在植入钢板和传统方法对较高波速反应不敏感（钢材中纵波声速 $\geq 5 900 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ），传统的弹性波CT检测模式已无法显示出人孔的位置。

### 3.2 曲面弹性波 CT 检测

针对该0号块的特点，采取分区检测的测区布置方式对其曲面进行弹性波CT检测，测区布置如图3所示。

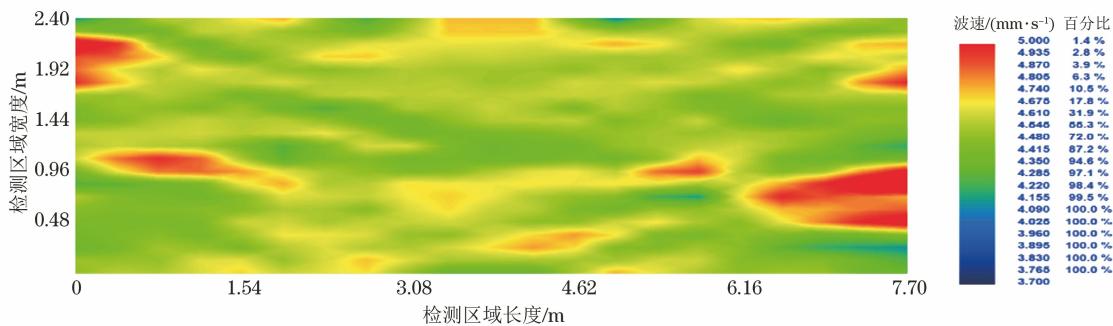


图2 1#剖面传统弹性波CT检测结果

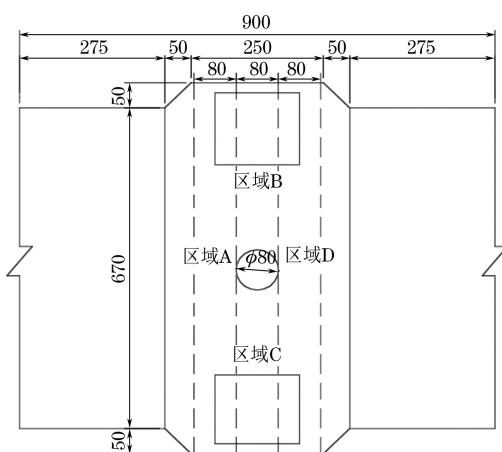


图3 曲面弹性波CT检测测区布置示意

图3中，测区A、D采用传统方法进行检测；测区B、C的检测方式如图1所示，检测得到11×11个声时数据。反演成像时，首先对该测区进行网格划分（等间隔划分），将测区划分为20×20个不规则的四边形单元，共21×21个节点，网格划分结果如图4所示。

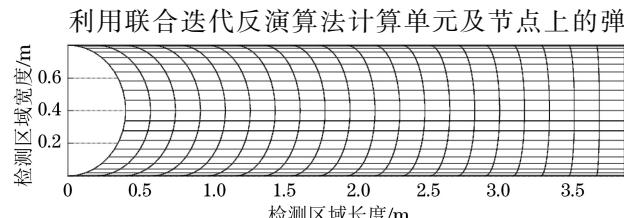


图4 反演成像时测区的网格划分结果

性波声速<sup>[5]</sup>，使用 MATLAB 软件编写反演程序对测区数据进行反演成像<sup>[6]</sup>。区域 C 的反演成像结果如图 5 所示。

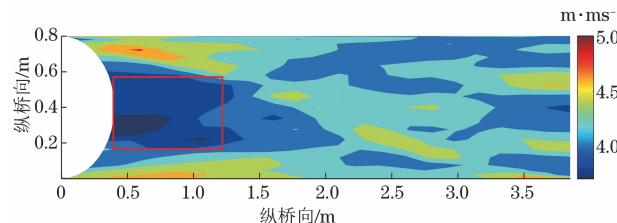


图 5 区域 C 的反演成像结果

由图 5 可知该测试剖面平均声速为  $4.237 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，混凝土内部整体密实性完好，但存在部分低速区域（图中线框所在区域），最低声速为  $3.167 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，疑似为不密实区域。后对该区域进行了现场钻孔，钻孔内窥检测结果如图 6 所示，可见，该区域混凝土确

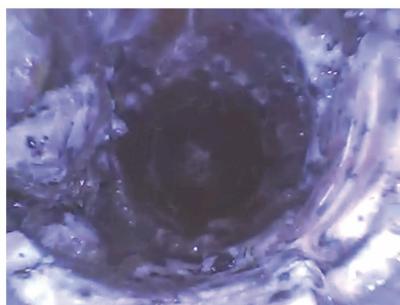


图 6 低声速区钻孔内窥检测结果

实存在不密实现象。

#### 4 结语

从工程实际出发，针对预应力混凝土连续梁 0 号块内部缺陷检测过程中，传统 CT 检测方法无法解决的问题，提出了曲面弹性波 CT 检测方法。利用联合迭代算法对检测结果进行了反演成像处理并进行现场验证，说明了该检测方法结果直观、可靠，具有指导意义。

#### 参考文献：

- [1] 陆林军,余海帆,乔丕忠.基于应力波传播机理的混凝土无损检测研究综述[J].力学季刊,2021,42(2):197-216.
- [2] 蔡长征.CT 图像迭代重建算法的研究与应用[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [3] 胡晓.基于超声横波的混凝土结构无损检测数据成像技术[J].无损检测,2020,42(6):17-21.
- [4] 杨武.波速与混凝土强度[J].岩土工程师,1997(3):52-55.
- [5] 朱翔,田超.基于射线模型的超声声速层析算法研究进展[J].应用声学,2021,40(4):639-648.
- [6] 李瑞菁.基于全波形反演的超声计算机层析成像算法研究[D].北京:北京交通大学,2020.

(上接第 28 页)

- [7] HANG J, ZHANG J Z, CHENG M, et al. An overview of condition monitoring and fault diagnostic for wind energy conversion system[J]. 电工技术学报,2013,28(4):261-271.
- [8] 刘向军.工程流体力学[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [9] 张鹏林,许亚星,桑远,等.磁记忆技术在风电塔筒检测中的应用[J].无损检测,2014,36(9):67-69.
- [10] 任吉林,林俊明,任文坚,等.金属磁记忆检测技术研究现状与发展前景[J].无损检测,2012,34(4):3-11.
- [11] 王威,易术春,苏三庆,等.金属磁记忆无损检测的研究现状和关键问题[J].中国公路学报,2019,32(9):1-21.
- [12] 王国庆,杨理践,刘斌.基于磁记忆的油气管道应力损伤检测方法研究[J].仪器仪表学报,2017,38(2):271-278.
- [13] ZHAO X R, SU S Q, WANG W, et al. Metal magnetic memory inspection of Q345B steel beam in

four point bending fatigue test [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 514: 167155.

- [14] CHEN H L, WANG C L, ZUO X Z. Research on methods of defect classification based on metal magnetic memory[J]. NDT & E International, 2017, 92:82-87.
- [15] 陈云程,陈孝耀.风力机设计与应用[M].上海:上海科学技术出版社,1990.
- [16] 冷建成.基于磁记忆技术的铁磁性材料早期损伤诊断方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [17] 孙海磊.风力发电机塔筒受力性能的试验研究[D].包头:内蒙古科技大学,2012.
- [18] LENG J C, XU M Q, ZHOU G Q, et al. Effect of initial remanent states on the variation of magnetic memory signals[J]. NDT & E International, 2012, 52:23-27.
- [19] 郭霞.奥氏体不锈钢磁记忆检测与研究[D].东营:中国石油大学(华东),2015.