

超声波CT在不规则混凝土结构内部缺陷检测的应用

韦丘德 吴维彬

广西交通工程检测有限公司 广西南宁 530012

摘要: 针对不规则混凝土结构内部质量的无损检测, 本文采用超声波CT技术, 得到了高精度的图像。在某桥梁基桩与墩柱衔接处的混凝土结构内部质量检测使用中, 后经过半破损方法进行验证, 证明该方法技术能对缺陷位置进行精准定位和定量分析。

关键词: 无损检测; 不规则混凝土结构; 超声波CT

引言:

混凝土结构是现代工程中发挥着不可或缺的作用, 在道路、桥梁、隧道、建筑等领域被广泛应用。但是在施工过程中, 由于诸多方面的因素, 钢筋混凝土可能产生离析、蜂窝、孔洞、低密度、低强度等质量缺陷, 从而导致其力学性能下降, 影响工程的安全性和耐久性。近年来CT层析成像法在混凝土质量无损检测中应用的越来越广泛, 以及模型实验和应用研究取得了非常不错的效果, 同时也存在不少的难题^[1]。

本文针对不规则混凝土结构缺陷的测试, 采用超声波CT法进行检测, 利用超声波传播的初至时间反演计算, 能够得到精确、直观地显示出混凝土测试断面内的缺陷和位置等信息。

一、方法原理

1. 超声波层析成像的理论基础

层析成像的数学理论基础是Radon的变换及逆变换(如式1), 其主要内容是利用外部投影来重建物体内部的参数分布^[2]。

$$\tau_i = \int_{L_i} \frac{1}{V_j(x, y)} dl = \int_{L_i} f_j(x, y) dl \quad (1)$$

式中: $V_j(x, y)$ 为第j个成像单元的超声波速; $f_j(x, y)$ 为第j个成像单元的慢度。电磁波层析成像分为走时层析成像和衰减层析成像, 无论走时层析成像还是衰减层析成像都遵循Radon变换。

层析成像是基于射线追踪理论的反演方法, 因此研究射线追踪是最重要内容之一。当测区内的相邻成像单元的速度差<15%, 波射线可认为是直线; 当速度差异较大时, 此时波射线将不再是直线而是曲线, 必须采用Huygen理论进行射追踪确定波射线^[3]。如何模

拟出超声波射线的真实行走路线的过程就是正演(即射线追踪)。

混凝土超声CT追踪应用比较广泛的两种方法有:

①根据发射和接收的位置与超声波在混凝土中的波速来求解其行走路径和走时;

②直接根据惠更斯原理或者费马原理对测区内的所有测线走时与路径进行计算。

一般把测区划分为k个网格, 每条单发—多收集方式的射线初至时等于各网格内射线长度与该网格慢度值的乘积的和, 则走时层析成像的本质为求解线性方程组:

$$\tau = F \times s \quad (2)$$

式中: τ —为 $n \times 1$ 的时间矩阵, 由n条射线的初至时组成;

F —为 $n \times k$ 的射线系数矩阵, 包含第 n_i 条射线在第 k_j 个网格单元中的射线长度;

s —为 $k \times 1$ 的慢度系数矩阵, 由k个网格内的慢度值组成。

由于Radon变换的方程组的解是超欠定或者欠定的, 是矛盾方程组, 测线走时测值不可避免地存在误差。因此需要将反问题的先验信息和对解估计的预期加入到反演计算中分别进行正则化处理和解估计的评价^[4]。

2. 层析成像反演算法

走时层析成像和衰减层析成像的基本方程式经过转换后均可展开为:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_{k-1} \\ \tau_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^1 & F_2^1 & \dots & F_{k-1}^1 & F_k^1 \\ F_1^2 & F_2^2 & \dots & F_{k-1}^2 & F_k^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ F_1^{n-1} & F_2^{n-1} & \dots & F_{k-1}^{n-1} & F_k^{n-1} \\ F_1^n & F_2^n & \dots & F_{k-1}^n & F_k^n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{k-1} \\ s_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

可以使用联合迭代重建法(SIRT)、共轭梯度法(CG)和最小二乘QR分解法(LSQR)等方法对该线性

作者简介: 韦丘德(1988-), 男, 壮族, 工程师, 硕士, 从事交通工程检测研究工作。

方程组进行求解^[5]。鉴于代数重建法（ART）不容易收敛；共轭梯度法（CG）中系数矩阵条件数很大时，收敛速度比较慢；而最小二乘QR分解法在同等条件下，占用计算内存量相对比较小，并且很稳定。因此本文采用最小二乘QR分解法（LSQR）进行层析成像反演计算。最小二乘QR分解法的计算流程为：

- 1) 在方程（3）内加入正则化参数和约束条件；
- 2) 构造最小二乘方程；
- 3) 循环计算；
- 4) 迭代计算，若迭代次数达到最大值或方程组的解随迭代次数无明显变化时则终止。

二、工程应用分析

某高速公路桥梁的基桩与墩柱衔接部位存在施工质量问题，为避免在运营期造成安全事故，需要对该桥梁的基桩与墩柱衔接部位进行质量检测与加固。

本次在该桥的观测系统中，按图2选取AC、DB剖面方向，在基桩与墩柱衔接面上上下各取不少于0.5m区域布设“十”字形超声波CT扫描剖面；建立直角坐标系，纵坐标为0处即是桩柱的衔接处，向上的墩柱段坐标为正，向下的基桩段坐标为负；检测声波换能器频率为50kHz，采样点间距为10cm，采样长度为1024个时间采样点，触发方式为连发，并采用一发多收声系。

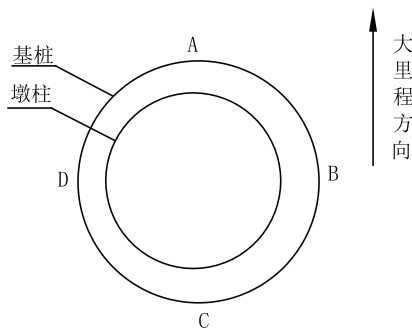


图1 基桩和墩柱平面示意图

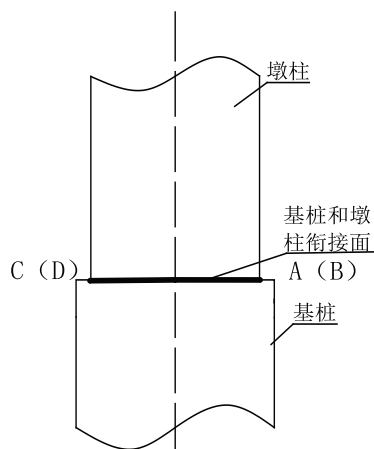


图2 基桩和墩柱A-C（B-D）方向断面示意图

桥墩与基桩衔接结构为不规则形状，其俯视图和断面图如图2~图3所示。在布置测点时，将在混凝土介质剖面中不能直线连接的收发测线删除，观测系统如图4所示。检测结果分析如下：

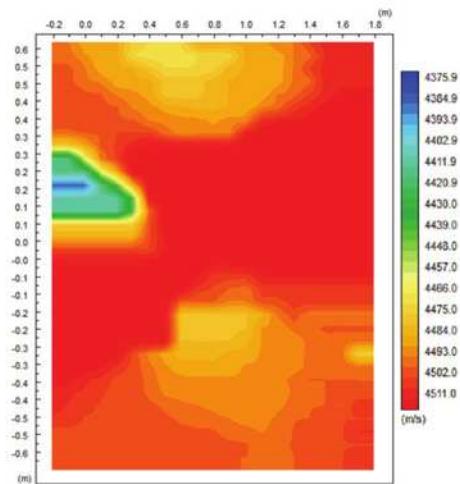


图3 1#墩A-C剖面成像图

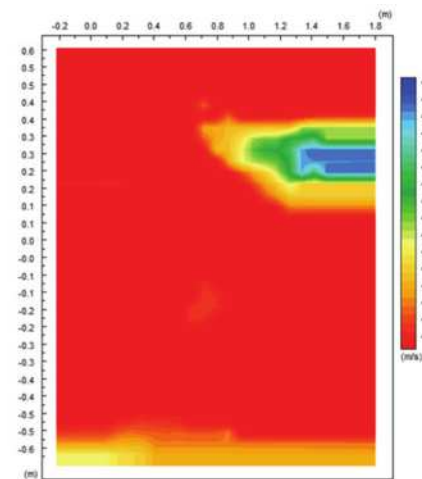


图4 1#墩B-D剖面成像图

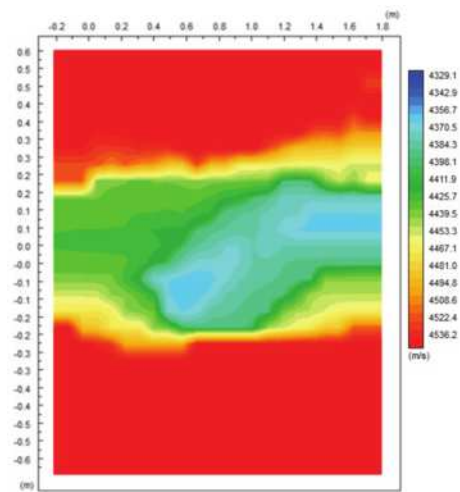


图5 2#墩A-C剖面成像图

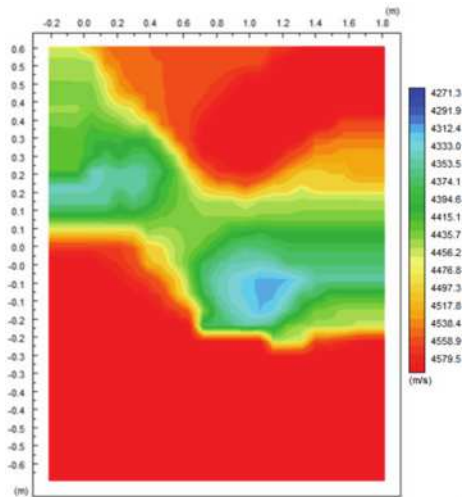


图6 2#墩B-D剖面成像图

1#墩：由AC剖面 and BD剖面成像图显示，超声波在混凝土中的速度在4510m/s左右。低速区分布特征为：异常存在于衔接处-0.15m~0.25m由D方向至A方向（顺时针），深度为从圆柱表面至内部0.20m左右存在低速异常，波速为4380m/s左右，推断该部位混凝土胶结不良或者夹泥。

2#墩：由AC剖面 and BD剖面成像图显示，超声波在混凝土中的速度在4490m/s左右。低速区分布特征为：异常存在于衔接处-0.20m~0.20m由B方向至D方向（顺时针方向），整个衔接横断面均存在低速异常，波速为4320m/s左右，推断该桩头部位混凝土胶结不良。

采用钻芯法对以上结构内部缺陷部位进行验证，结果发现其为桩头未凿干净的浮浆或胶结不良的混凝土，

与成像分析结果基本一致。检测剖面上下边界处的低速带和局部小区域出现低速区域判断是观测系统误差造成。

三、结语

(1) 本工作采用超声波CT技术对不规则混凝土结构进行检测，通过合理布置观测系统，能够清晰、高效、直观地反映出该桥梁桥墩混凝土质量分布情况，并对其缺陷进行量化地判别，为后期桥梁安全加固提供了可靠保障。

(2) 目前，混凝土超声波CT技术主要采用声时参数进行反演，在实践中由于存在观测系统模型误差和结构物内不确定因素的影响，不能辨别混凝土构件中的缺陷程度和缺陷缘由，仍需要进行验证才能确保检测结果的可靠性。

参考文献：

- [1]刘稳.混凝土介质隐患超声波CT探测技术研究[D].安徽理工大学, 2015: 3-5.
- [2]杨文采, 李幼铭等.应用地震层析成像[M].地质出版社, 1993.
- [3]张晓培.桥梁大型混凝土构件的超声波CT检测[J].无损检测, 2009, (8).
- [4]申永利, 孙永波.基于超声波CT技术的混凝土内部缺陷探测[J].工程地球物理学报, 2013, (4): 560-565.
- [5]彭永胜.基于漏磁检测机理的钢管小缺陷精确量化识别理论及系统研究[D].天津: 天津大学, 2005.