

文章编号: 1001-4888(2022)05-0657-12

基于超声相控阵和逆时偏移成像的 套筒灌浆饱满度无损检测方法^{*}

陈志杰¹, 李钊², 刘义捷¹, 刘海¹, 齐橡^{1,3}

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东广州 510006; 2. 济南轨道交通集团有限公司, 山东济南 250014;

3. 广州市妇女儿童医疗中心国家儿童区域医疗中心(中南), 广东广州 510620)

摘要: 灌浆套筒连接是装配式建筑应用主要的连接方式之一, 套筒的灌浆饱满度决定了装配式建筑的稳定性和抗震性。本文提出一种基于逆时偏移(RTM)成像算法的相控阵超声检测方法, 可对装配式套筒连接处可能存在的灌浆缺陷进行检测, 本文通过数值仿真试验和室内模型试验对所提方法的有效性进行了验证, 其中数值仿真结果表明: RTM 算法与传统超声全聚焦(TFM)算法相比, 具有更高的成像精度和清晰度, 能准确识别套筒内部的空洞、不密实等灌浆缺陷。室内试验结果表明: 在 RTM 重构图像中, 与灌浆密实套筒相比, 灌浆不密实套筒的反射信号会低 9dB, 此特征可以识别注浆缺陷。研究结果表明本文提出的相控阵超声成像方法适用于预制结构的套筒灌浆缺陷检测。

关键词: 装配式结构; 灌浆套筒; 无损检测; 超声成像; 逆时偏移

中图分类号: TU18 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-227

0 引言

楼板、梁、柱等节点是装配式建筑结构受力的关键部位, 节点连接的可靠性对装配式建筑结构的稳定性和抗震性具有重大影响^[1]。预制装配式结构节点连接形式分为干式连接和湿式连接。干式连接主要包括螺栓连接、焊接连接等。湿式连接方式主要包括浆锚连接、套筒灌浆连接以及现浇带连接^[2], 其中套筒灌浆连接技术具有性能可靠^[3,4]、适用性广和施工便捷等优点, 目前我国得到了广泛应用^[5]。灌浆套筒由预先埋设的套筒、钢筋和灌浆料构成, 通过在插入钢筋时同步注入快速凝固且无收缩的灌浆材料, 来保证套筒与钢筋之间的稳固连接^[2], 其现场施工图和连接示意图如图 1 所示。

由于灌浆套筒内部结构复杂, 且埋设在混凝土内部, 在现场施工时常由于灌浆套筒内部钢筋错位、灌浆孔阻塞等问题, 导致灌浆饱和度难以达到指标, 最终影响装配式混凝土结构的稳定性和抗震性能^[6,7]。因此, 需要开发有效的检测方法和设备, 对套筒灌浆质量进行高精度检测, 以保障灌浆施工质量, 并对存在问题的套筒进行二次补浆处理。目前国内外研究的套筒灌浆检测方法主要分为有损检测和无损检测。有损检测主要通过钻孔取芯对装配式建筑的灌浆套筒进行检测^[8]。孙彬等^[9]在灌浆套筒灌浆前预埋出浆口位置的检测通道, 并使用内窥镜对灌浆密实度进行探测。高润东等^[10]采用拉拔试验的方式, 对灌浆套筒的预设钢筋进行检测, 通过试验获取的拉拔荷载对其注浆密实度进行检测。Li 等^[11]利用灌浆套筒内部预埋的阻尼振动传感器, 获取灌浆过程中的振动周期和振幅变化, 并以此对灌

^{*} 收稿日期: 2021-09-23; 修回日期: 2021-10-28

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515011162, 2021A1515010881)

通信作者: 刘海(1986—), 男, 教授, 博导。主要研究领域为结构无损检测。Email: hliu@gzhu.edu.cn

浆套筒的注浆质量进行判断。虽然上述无损检测方法可以准确地对灌浆套筒的注浆密实度进行探测,但会对套筒的节点处造成不可逆的损伤,而这些损伤会对结构整体稳定性造成较大影响。因此,利用光、声、电磁等物理特性,在不破坏被测对象的前提下检测目标缺陷位置、大小的无损检测方法,近年来已成为套筒灌浆缺陷检测的研究重点。由于需要对钢套筒内部灌浆缺陷进行探测,但电磁波不能穿透金属进入套筒内部,因此一些传统的电磁检测方法,例如探地雷达(ground penetrating radar, 简称 GPR)将不适用^[12]。冲击回波法主要利用激振器在被测物体表面发射冲击波,通过振动传感器接收混凝土表面的冲击波,来分析振动信号频谱曲线的振幅、相位等信号差异,可对灌浆套筒内部注浆体是否存在缺陷进行定性检测^[13]。该方法快捷、高效,但是由于套筒构件尺寸相对较小,而测点间距越小,回波响应受表面波的影响越大,因此有必要对同类型的套筒进行定标试验,以便对灌浆缺陷的大小进行合理解译。声发射检测法需提前在被测物表面布置传感器,通过超声回波的差异定性检测灌浆套筒内部注浆不密实的情况^[14]。冲击回波与声发射 2 种检测方法仅能定性得到套筒内部是否存在缺陷,无法对缺陷的大小、位置等进行定量分析。工业 X 射线法具有高探测精度和穿透能力,可以对金属结构的内部结构形成高精度成像^[15],但由于 X 射线检测仪器通常拥有较大尺寸,需要在被测构件背面放置铅板,导致人工检测效率较低,且探测过程具有放射性,对检测人员身体造成伤害,因此难以在实际工程中推广应用。

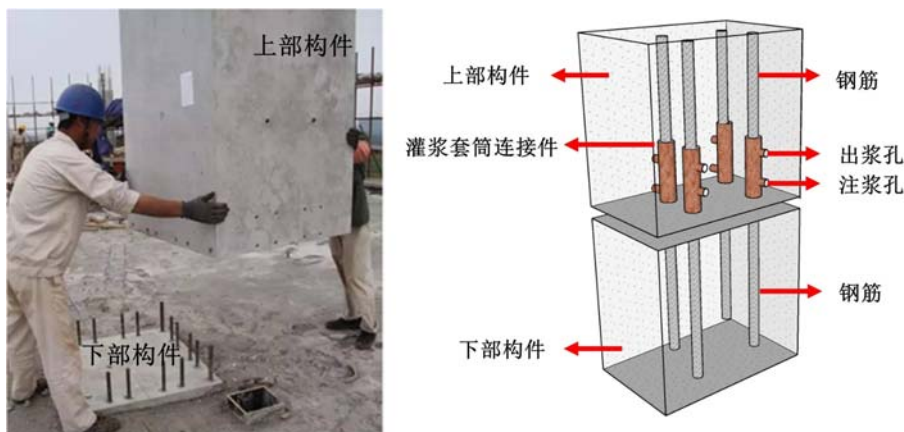


图 1 (a)灌浆套筒连接现场施工图;(b)预制结构连接示意图

Fig. 1 (a) a photo showing the connection of grouting sleeves; (b) a schematic drawing of the embedded sleeves

超声相控阵技术由于其高效率的检测速度,近年来被广泛应用于工程结构的缺陷检测。与传统的超声波检测方式相比,相控阵技术可以对焦点的尺寸及声束方向进行高精度优化,在探测分辨率及缺陷检出率等方面具有显著的优越性^[16, 17]。超声相控阵数据后处理方法及缺陷成像方法近年来发展迅速,合成孔径聚焦技术(synthetic aperture focusing technique, 简称 SAFT)^[18]、全聚焦方法(total focusing method, 简称 TFM)^[19, 20]、波数域成像^[21]等一系列成像算法都已被应用于相控阵超声成像。Li 等^[22]使用 SAFT 成像算法对混凝土试块中的圆形及矩形空气缺陷进行了成像,与常规的检测方法相比,该方法提高了信噪比和分辨率。张昊等^[23]利用全聚焦成像法对实验室内模型缺陷进行了成像,试验结果表明,检测的缺陷位置与试件上的真实情况相符,为相控阵的适用性提供了很好的支持。但是由于 SAFT 成像算法和 TFM 算法都是基于射线理论进行计算的,用于复杂结构(如装配式套筒)的成像时,受多次波和转换波等的影响,会存在成像精度严重不足的问题。

在地震勘探领域发展起来的逆时偏移(reverse time migration, 简称 RTM)算法基于双程波动方程进行波场逆时外推,并应用成像条件提取成像值,成像精度高且无倾角限制,因此也被广泛用于 GPR、光学成像以及超声检测领域^[24, 25]。该成像算法不仅可以较好地适应任意的复杂速度模型,亦很好地解决了传统成像算法难以应对倾角较大、结构复杂目标的成像难题^[26]。Liu 等^[27]提出了基于旅行时层析成像和逆时偏移算法的混凝土缺陷超声检测方法,并对钢管混凝土中的剥离缺陷进行了成像,在重构图

像中可获取混凝土内部缺陷的形状、大小等位置信息。

考虑到相控阵技术的优越性,以及传统相控阵成像算法的局限性,本文采用逆时偏移成像算法处理超声相控阵数据,对套筒灌浆的饱满度进行检测。如图2所示,本文采用超声反射波检测灌浆套筒内部的缺陷。在混凝土试块表面放置超声相控阵的探头,超声阵列垂直套筒布置,超声阵元轮流激励超声波信号,所有阵元接收来自注浆套筒的反射回波信号,获取的信号可构建全矩阵捕获数据集(full matrix capture, 简称 FMC^[21])。根据 FMC 数据集,通过逆时偏移成像算法重构套筒内部灌浆体的高精度成像图像,最终可实现装配式建筑灌浆套筒内部缺陷的可视化无损检测和缺陷识别。

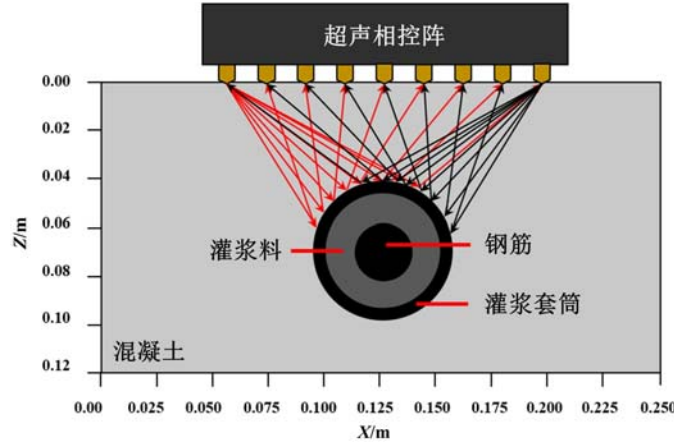


图2 灌浆套筒相控阵超声检测方法示意图

Fig.2 Schematic illustration of the phased-array ultrasonic method for grouted sleeve inspection

1 逆时偏移成像算法

1.1 声波波动方程

混凝土结构诸如梁、板和柱等,由于其检测方向远大于其他两个方向,因此在数值建模过程中,可以将其简化为二维平面模型。本文所研究的灌浆套筒在被检测的竖向尺寸远大于其横截面尺寸,假设本模型在套筒方向无限延伸,在横截面的声波波场计算中可采用一阶速度压力偏微分方程的方式进行求解^[28]:

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{\partial P}{\partial x} + f_x \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \frac{\partial P}{\partial y} + f_y \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= \lambda \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + g_p\end{aligned}\quad (1)$$

式中: ρ 为介质的密度; v_x 、 v_y 分别为速度分量; P 为压力; f_x 、 f_y 分别为压力源的密度分量; λ 为Lame常数; g_p 为应力的体积源密度。

研究声波在复杂介质中的传播规律时,需要利用数值方法对式(1)进行求解。时域有限差分法(finite difference time domain, 简称 FDTD)由于其形式简洁、计算效率高,对非均匀介质、复杂结构的散射问题的计算效果更加简便,目前已经成为正演仿真重要的方法,因此,本文采用时间和空间上均为二阶的 FDTD 方法求解式(1)中的声波波动方程。

1.2 时域有限差分法

有限差分法基于离散逼近的思想,用差分近似微分来求解连续偏微分方程。本文采用二阶中心差分格式对一阶声波和弹性波进行数值求解。中心差分方案中二阶偏导数的差分公式为^[29]

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v\left(i + \frac{1}{2}j\right) - v\left(i - \frac{1}{2}j\right)}{\Delta x} \right] = \frac{v(i+1, j) - 2v(i, j) + v(i-1, j))}{\Delta x^2}\quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v\left(i, j + \frac{1}{2}\right) - v\left(i, j - \frac{1}{2}\right)}{\Delta y} \right] = \frac{v(i, j+1) - 2v(i, j) + v(i, j-1)}{\Delta y^2} \quad (3)$$

式中: Δx 、 Δy 为直角坐标系中 x 、 y 方向的间距变化量; i 、 j 为离散后的波场。

1.3 逆时偏移成像算法

逆时偏移是通过求解双程波动方程,在时域中进行延拓的一种偏移成像方法^[30, 31]。与传统的偏移方法不同,逆时偏移的过程是沿时间反向进行的正演模拟,可以对不同类型的波进行仿真计算和成像,如在处理单程波偏移方法不能处理的回转波以及多次波成像过程中,没有倾角的限制且可以适用于任何介质。本文通过逆时偏移成像算法处理相控阵超声检测数据,对套筒灌浆缺陷进行检测,其算法流程如图 3 所示^[32]。

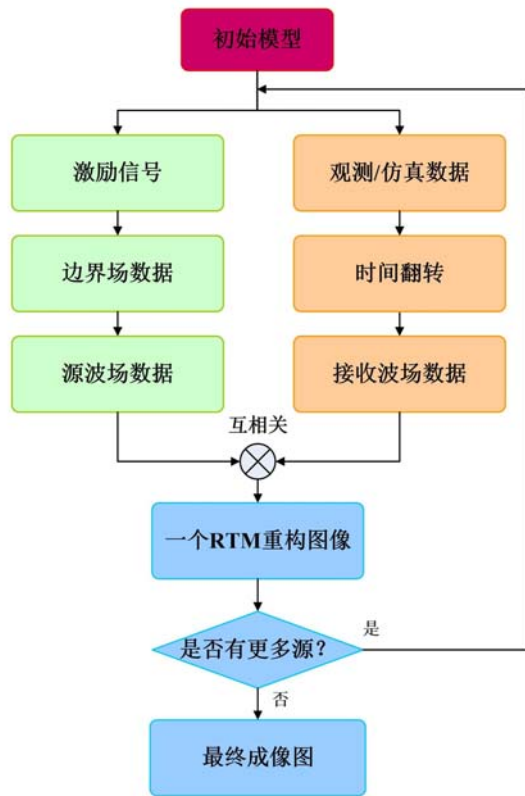


图 3 逆时偏移算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the RTM imaging algorithm

度随机分布的粗、细骨料介质 $\delta_m(\mathbf{x})$ 两部分构成,其数学表达式可表示为^[36]

$$s(\mathbf{x}) = s_b(\mathbf{x}) + \delta_m(\mathbf{x}) = s_b(\mathbf{x})[1 + f(\mathbf{x})] \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为空间的位置矢量; $f(\mathbf{x}) = \delta_m(\mathbf{x})/s_b(\mathbf{x})$ 为介质的相对扰动。

在建立二维模型时,不同水平、竖直方向的自相关程度被假设为 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{z}$, 相对扰动需满足如下条件:

$$\langle f(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \rangle = 0 \quad (6)$$

其方差 ϵ^2 为

$$\langle f^2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \rangle = \epsilon^2 \quad (7)$$

协方差函数 $C(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 为

$$C(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \langle f(\mathbf{x}_1, \mathbf{z}_1) f(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}, \mathbf{z}_1 + \mathbf{z}) \rangle \quad (8)$$

式中 $\mathbf{x}_1$ 、 $\mathbf{z}_1$ 为某一空间位置矢量。

通常采用自相关函数来产生随机介质模型,对空间尺度和密度的相对扰动进行定量描述。本文采用 Von Karman 型函数进行随机介质的建模,其中 ϵ^2 取值为 0.015,其自相关函数 $\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 为^[37]

逆时偏移算法包括源波场的正向传播、接收波场的反向传播以及使用互相关成像条件重构图像 3 个部分。为节约计算内存,在源波场的正向传播步骤中,需用 FDTD 进行两次正演计算^[33, 34]。本文使用的接收波场归一化互相关成像条件表达式如下^[35]:

$$I(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_t S_i(t, \mathbf{x}, \mathbf{z}) R_i(t, \mathbf{x}, \mathbf{z})}{\sum_t R_i^2(t, \mathbf{x}, \mathbf{z})} \quad (4)$$

式中: $S_i(t, \mathbf{x}, \mathbf{z})$ 为第 i 个超声传感器获得的源波场激励信号数据; $R_i(t, \mathbf{x}, \mathbf{z})$ 为第 i 个超声传感器对应的接收波场数据; $I(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 为重构图像。

2 套筒灌浆缺陷检测的仿真试验

2.1 随机介质模型

施工过程中所用的混凝土为非均匀介质,有随机分布的粗、细骨料,非均匀介质的骨料在很大程度上会影响声波的传播和反射。为了与实际情况相符合,数值仿真模型通过随机介质来对混凝土进行建模。随机介质模型 $s(\mathbf{x})$ 主要由混凝土均匀介质 $s_b(\mathbf{x})$ 以及不同程度随机分布的粗、细骨料介质 $\delta_m(\mathbf{x})$ 两部分构成,其数学表达式可表示为^[36]

$$s(\mathbf{x}) = s_b(\mathbf{x}) + \delta_m(\mathbf{x}) = s_b(\mathbf{x})[1 + f(\mathbf{x})] \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为空间的位置矢量; $f(\mathbf{x}) = \delta_m(\mathbf{x})/s_b(\mathbf{x})$ 为介质的相对扰动。

在建立二维模型时,不同水平、竖直方向的自相关程度被假设为 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{z}$, 相对扰动需满足如下条件:

$$\langle f(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \rangle = 0 \quad (6)$$

其方差 ϵ^2 为

$$\langle f^2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \rangle = \epsilon^2 \quad (7)$$

协方差函数 $C(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 为

$$C(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \langle f(\mathbf{x}_1, \mathbf{z}_1) f(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}, \mathbf{z}_1 + \mathbf{z}) \rangle \quad (8)$$

式中 $\mathbf{x}_1$ 、 $\mathbf{z}_1$ 为某一空间位置矢量。

通常采用自相关函数来产生随机介质模型,对空间尺度和密度的相对扰动进行定量描述。本文采用 Von Karman 型函数进行随机介质的建模,其中 ϵ^2 取值为 0.015,其自相关函数 $\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 为^[37]

$$\varphi(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{z}) = C(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{z}) / \varepsilon^2$$

(9)

2.2 套筒灌浆缺陷检测仿真试验

为了验证基于相控阵超声和逆时偏移成像的套筒灌浆缺陷检测方法的有效性,本文建立了如图 4 所示的 3 个随机介质模型,分别为 3/4 注浆模型、全注浆模型以及无注浆模型。其中 3/4 注浆模型用于模拟实际施工中常见的灌浆不饱满现象,另外两个模型用于对比。3 个模型的尺寸均为 0.2m×0.15m。模型中间设置一个钢套筒,其内径和外径分别为 46mm 和 58mm,套筒中部有一根直径 25mm 的钢筋,背景介质中随机分布的骨料尺寸为 5~10mm。材料的声波波速和密度见表 1,由表可以明显看出空气(注浆缺陷)的超声波波速远小于其他材料,这意味着空气-灌浆料以及空气-钢筋界面会存在很强的阻抗差异,入射超声波在这些截面处会发生强反射,从而有利于缺陷检测。仿真所用的超声阵列由 24 个传感器均匀排列组成,阵元间距为 6mm。本文采用点力源进行激励,激励的波形选用中心频率为 500kHz 的布莱克曼-哈里斯窗(Blackman-Harris Window, 简称 BHW)函数的一阶导函数^[31],其波形与频谱如图 5 所示。该激励源的中心频率能满足探测深度的要求,并能保证较好的分辨率。数值模型的网格尺寸为 0.2mm×0.2mm,模型边界设置厚度为 15 个网格的完美匹配层边界(PML),以吸收传播至边界上的声波。仿真的时间步长和总时窗分别为 1.8ns 和 117μs。通过使用时域有限差分法对每个数值模型进行仿真,得到对应的全矩阵数据。本文分别使用了超声相控阵数据理常用的标准方法——TFM 方法和本文提出的逆时偏移方法进行成像,并对比分析 2 种不同成像方法的成像效果。

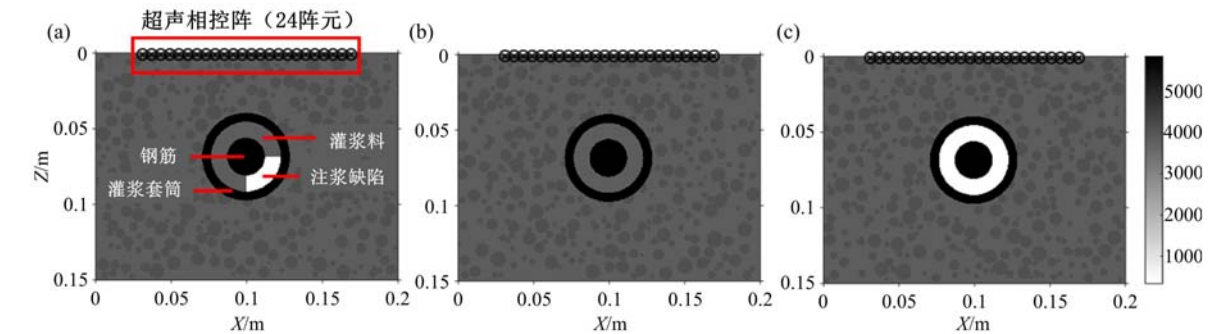


图 4 套筒灌浆数值模型:(a)3/4 注浆模型;(b)全注浆模型;(c)无注浆

Fig. 4 Numerical models of the grouted sleeve in concrete: (a) three-quarter grouted model; (b) fully-grouted model; (c) non-grouted model

表 1 仿真模型的介质参数^[38]

Tab. 1 Parameters of the media in the simulation models^[38]

介质	超声波速/(m/s)	密度/(kg/m ³)
混凝土	3850	2000
空气	343	1
钢筋/套筒	5879	7980
细骨料	4100	2100
粗骨料	4200	2200
灌浆料	3850	2000

图 6 为 TFM 方法计算得到的重构图像,重构所采用的速度模型为均匀模型,速度采用混凝土中的声波波速,即 3850m/s。从重构图像中可以识别套筒顶部的强反射和钢筋顶部的微弱反射信号,但是无法获得注浆体的内部结构信息,这是因为 TFM 方法是一种基于射线理论的图像重构方法,并没有考虑复杂结构内部存在的多次反射,而套筒的左右边界也由于 TFM 算法的倾角局限性无法呈现。从上述 3 种灌浆模型的 TFM 成像结果中难以识别套筒内部的灌浆缺陷,因此,用 TFM 算法处理灌浆套筒的相

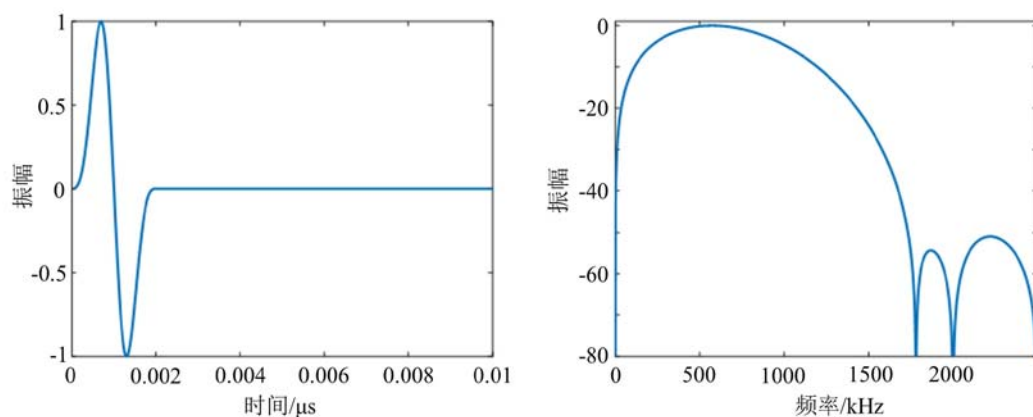


图 5 中心频率为 500kHz 的 BHW 子波

Fig. 5 BHW wavelet with a central frequency of 500kHz

控阵超声现场实测数据,难以实现其内部灌浆缺陷高精度成像检测的目的。

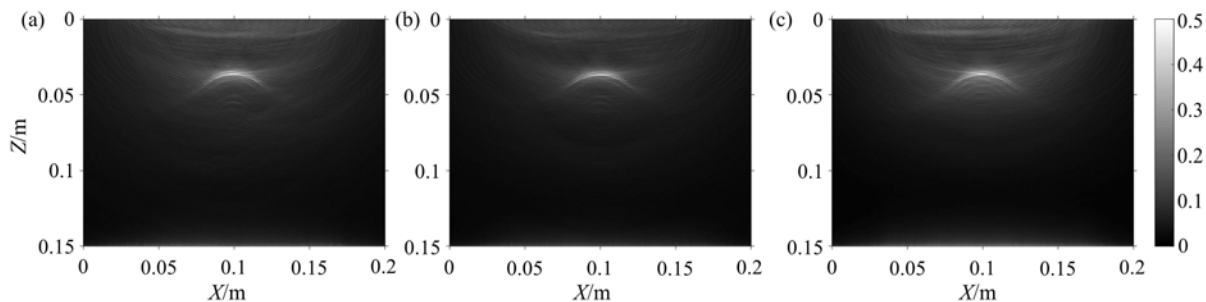


图 6 TFM 算法得到的仿真数据重构图像:(a)3/4 注浆模型;(b)全注浆模型;(c)无注浆模型

Fig. 6 Reconstructed images by the TFM algorithm from the synthetic acoustic data:

(a) the three-quarter grouted mode; (b) the fully-grouted model; (c) the non-grouted model

由本文提出的 RTM 算法计算得到的重构图像如图 7 所示。与 TFM 方法相比,RTM 算法展现了更高的分辨率和成像精度。对于 3 种模型,套筒的内外壁能够清晰地识别,其原因是 RTM 算法能够利用套筒内外壁之间的多次反射波进行成像,从而提高分辨率。同时,套筒左右边界也能在 RTM 重构图像中很好呈现,这是因为 RTM 算法不受倾角的限制,3 幅重构图像中提出的套筒外径与内径分别为 58mm、46mm,与仿真模型吻合。对于 3/4 注浆模型,由于空气缺陷与注浆体界面处的声阻抗不匹配,在重构图像中会形成一个强反射界面。RTM 算法可清晰检测出位于套筒内右下方的空气缺陷,其水平边界也能准确地被识别;垂直界面的反射相对比较微弱,但也可进行识别。全注浆模型(图 7(b))中,由于钢制的套筒和钢筋与灌浆料声速差异较小,超声波在传播过程中损失的能量也较小,可穿透整个套筒,因此套筒内外壁、钢筋均能清晰地识别。无注浆模型(图 7(c))与其他两个模型相比,其套筒内壁顶部有着最强的反射信号,注浆体和钢筋区域内的能量很弱,这是因为在套筒顶部的空气-套筒界面反射了更多的入射超声波能量,只有小部分能量透射进入空气缺陷中,使得套筒下半部分的反射能量十分微弱,因此成像图中无法显示套筒下半部分的结构特征。

总的来说,由 RTM 算法获得的重构图像可以清楚地对套筒内的空气缺陷进行成像,通过观察套筒内壁的反射信号强度大小可以区分套筒-灌浆料界面与套筒-空气界面,同时也可以通过注浆体和钢筋位置的反射信号大小来判断是否有注浆缺陷的存在,因此用 RTM 算法处理灌浆套筒的相控阵超声检测数据,可以实现注浆缺陷高精度成像和检测。

鉴于商用混凝土超声相控阵扫描仪的中心频率均为 20~100kHz,本文进行了第二组仿真试验,建立了包括全注浆与无注浆 2 种工况的均质模型,超声阵列由 8 个传感器组成,阵元间距为 30mm,激励

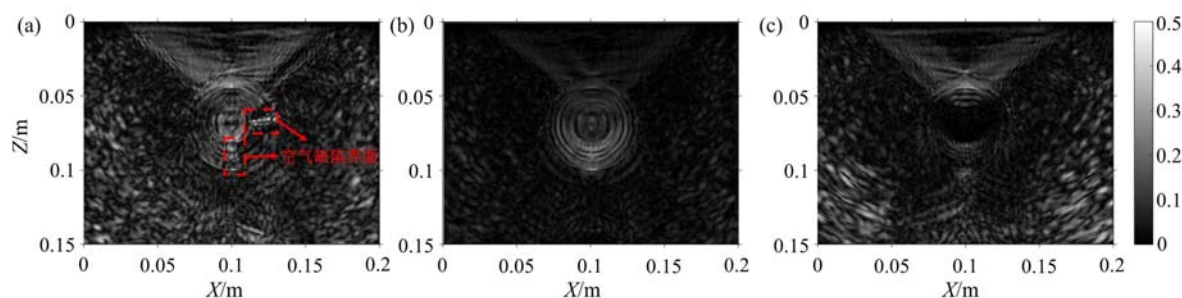


图7 使用本文所提逆时偏移算法所得重构图像:(a)3/4 注浆;(b)全注浆;(c)无注浆

Fig. 7 Reconstructed images by the proposed RTM algorithm: (a) the three-quarter grouted model; (b) the fully grouted model; (c) the non-grouted model

信号采用中心频率为 50kHz 的 BHW 子波,其中心频率与瑞士 Proceq 公司生产的 1020 MIRA-Lite 型超声波混凝土断层扫描仪一致。数值仿真模型及结果如图 8 所示,2 幅重构图像中均可清晰识别套筒的位置,而无注浆模型的成像结果中套筒处反射的能量比全注浆模型中的更强,这是因为超声波在套筒-空气界面的阻抗差异更大,界面反射了更多超声波能量。

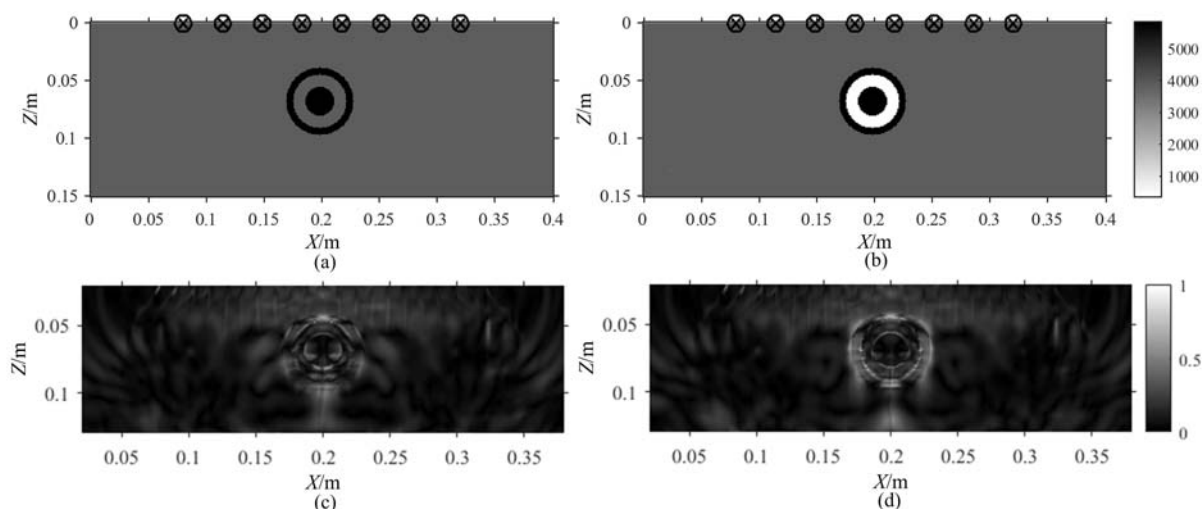


图8 超声相控阵阵元数为 8,激励源中心频率为 50kHz 的数值模型及重构图像:

(a)全注浆模型;(b)无注浆模型;(c)全注浆重构图像;(d)无注浆重构图像

Fig. 8 Numerical models and reconstructed images with an 8-element ultrasonic array and 50kHz excitation source wavelet: (a) full-grouting model; (b) non-grouting model; (c) reconstructed image of full-grouting model; (d) reconstructed image of non-grouting model

3 套筒灌浆缺陷检测室内试验

3.1 室内试验模型及仪器

为了进一步验证所提相控阵超声成像检测方法的有效性,本文开展了室内模型试验。试验模型如图 9(a)所示,该模型尺寸为 $0.6\text{m} \times 0.42\text{m} \times 0.18\text{m}$,模型内部包含 2 个直径为 76mm 的套筒,混凝土保护层厚度为 4cm,套筒内部有一根直径为 25mm 的钢筋。2 个套筒一个注浆密实,另一个注浆不密实。在制作室内试验模型时,将灌浆料注入灌浆仪器,并通过仪器注入灌浆套筒,在一个套筒注浆饱满后停止注浆,在另一个套筒注入 1/2 的灌浆料后也停止注浆,因此,可定义灌浆不密实套筒为半灌浆状态。模型浇筑完成后养护 28d,进行检测试验。尽管如前文所述,对于套筒灌浆质量的检测,理想的超声探头中心频率在 500kHz 左右,但现有的商业超声相控阵探头均为检测常规的大尺寸混凝土结构缺陷所设计的,中心频率较低,无法提供套筒灌浆缺陷检测所需的分辨率,因此本文仅通过现有的商用系统

对方法的可行性进行验证。本文试验采用的 1020 MIRA-Lite 型超声波混凝土断层扫描仪,中心频率为 50kHz;其相控阵超声阵列含有 8 个传感器,可以采集包含 56 道回波信号的全矩阵数据。检测过程中,将该仪器垂直于套筒进行布置,如图 9(b)所示。

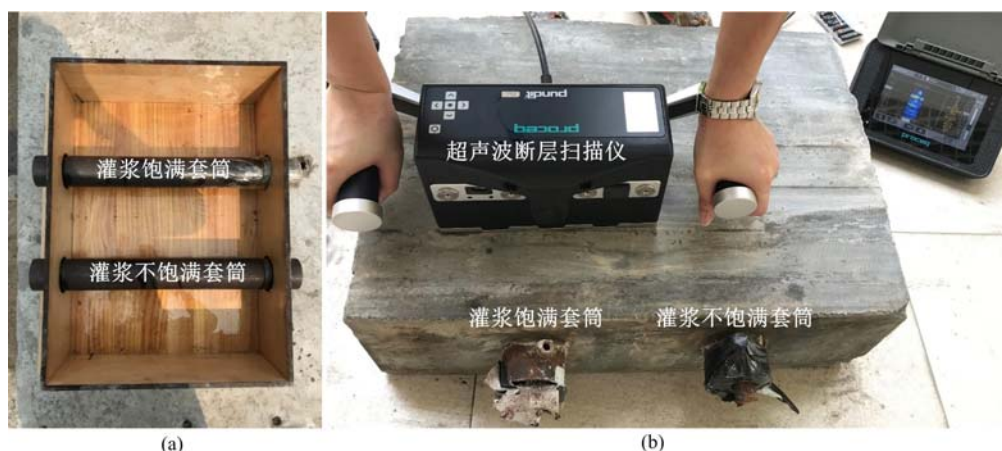


图 9 室内试验模型图:(a)浇筑前;(b)浇筑后

Fig. 9 Laboratory experiment model: (a) before pouring concrete; (b) after pouring concrete

3.2 室内试验结果

将仪器垂直于注浆密实和不密实套筒采集全矩阵捕获(FMC)超声回波数据,采集的超声原始波形及频谱如图 10 所示(以第一阵元激励为例),然后使用逆时偏移成像算法计算重构图像。重构图像如图 11所示,由图可以清晰地看到注浆不密实套筒相比于注浆密实套筒反射信号更强,注浆不密实套筒比注浆密实套筒反射信号强度高 9dB。这是由于注浆不密实套筒内部空气-套筒界面的声阻抗差异大于注浆密实套筒内部的灌浆料-套筒界面,会产生更强的反射信号。这一结果与数值仿真试验相吻合,从而进一步验证了相控阵超声成像方法用于套筒灌浆缺陷检测的有效性。

与第一组仿真试验相比,室内试验的成像结果分辨率较差,无法区分出套筒内外壁以及内部钢筋的反射。主要是由于室内试验的超声相控阵的中心频率是 50kHz,而仿真选用的中心频率是 500kHz,因此较低的中心频率无法满足检测分辨率的要求。

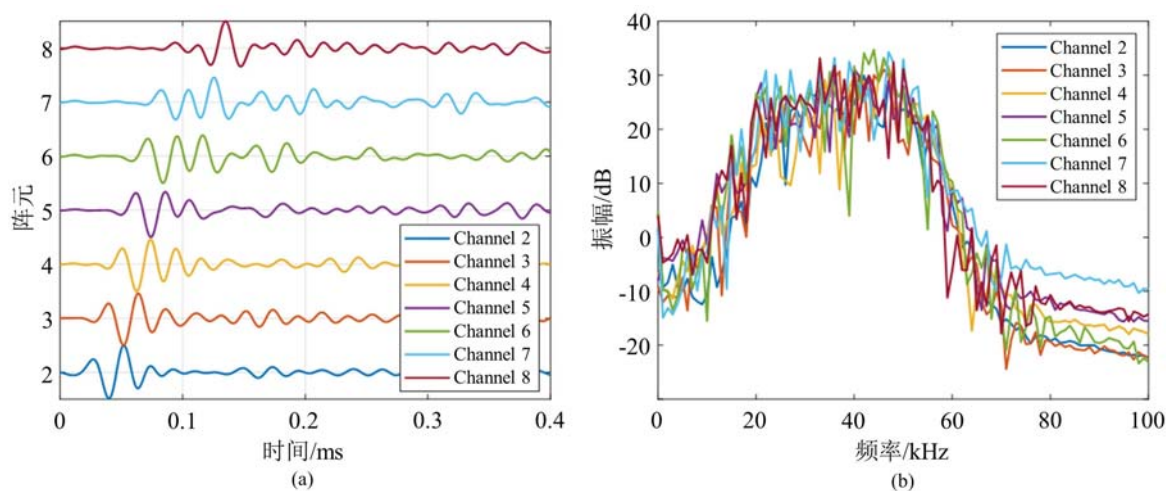


图 10 采集的超声原始波形,以第一阵元激励为例:(a)时域信号;(b)频谱图

Fig. 10 The recorded ultrasonic echo signal, which are emitted from the first element:

(a) time domain signal; (b) frequency spectrum

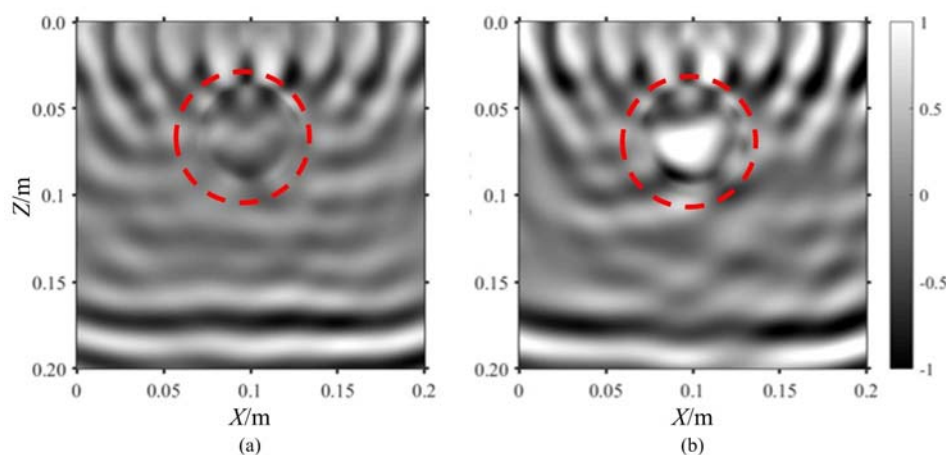


图 11 灌浆套筒模型的超声重构图像:(a)注浆密实套筒;(b)注浆不密实套筒
套筒位置用虚线标出,注浆不密实套筒的反射强度比密实套筒大了约 9dB^[39]

Fig. 11 Reconstructed images of grouting sleeves model:

(a) the fully grouting sleeve; (b) the insufficiently-grouted sleeve

The insufficiently-grouted sleeve results in a reflection 9 dB stronger than the fully-grouted one^[39]

4 结论

本文针对装配式建筑套筒灌浆中可能存在的密实度缺陷问题,提出了一种基于相控阵超声逆时偏移成像的灌浆套筒缺陷检测方法,并通过数值仿真试验与室内试验验证了其有效性。主要得出以下结论:

(1) 由于 TFM 算法基于射线理论,无法计算成像域中的多次反射,只能重构套筒上的界面反射,无法对套筒内部结构进行有效成像。

(2) 数值仿真试验结果验证了超声成像方法用于套筒灌浆缺陷检测的有效性。相对于灌浆密实的装配式套筒,内部存在灌浆不密实缺陷的套筒会由于灌浆料-空气缺陷界面的声阻抗不匹配,产生更强的反射,在超声重构图像中呈现出清晰的高能量反射界面,从而可以获取空气缺陷的位置和尺寸信息。

(3) 室内试验结果表明,注浆不密实套筒相比于注浆密实套筒反射信号更强,注浆不密实套筒反射信号强度约高 9dB,从而进一步验证了所提出检测方法的可行性。

(4) 综合仿真试验与室内试验结果,证明了所提方法相较于 TFM 算法具有更高的分辨率和成像精度,RTM 算法可对套筒内部的灌浆情况进行有效的可视化检测。

由于室内试验所用仪器中的频率较低,重构图像分辨率不足,无法对套筒内部结构进行精确成像,因此未来我们将设计适用于套筒灌浆质量检测的专用相控阵超声探头,优化其工作频率和阵元布局,并开展大量模型试验,研究不同程度灌浆缺陷的重构图像特征。此外,由于本文所提的 RTM 算法所需计算时间较长(1.5h),后续将优化其算法框架,利用并行计算及硬件加速以节约计算时间,缩短计算用时,提高实际工程检测效率。

参考文献:

- [1] 吴刚, 冯德成. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(2):1-16 (WU Gang, FENG Decheng. Research progress on fundamental performance of precast concrete frame beam-to-column connections[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(2):1-16 (in Chinese))
- [2] 韩超, 郑毅敏, 赵勇. 钢筋套筒灌浆连接技术研究与应用进展[J]. 施工技术, 2013, 42(21):113-116 (HAN Chao, ZHENG Yimin, ZHAO Yong. Research and application development of grout sleeve splicing for reinforcement[J]. Construction Technology, 2013, 42(21):113-116 (in Chinese))
- [3] 郑永峰, 郭正兴. 变形灌浆套筒连接性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3):94-102 (ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing. Experimental study and finite element analysis on behavior of deformed

- grout-filled pipe splice[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3):94—102 (in Chinese))
- [4] 钱稼茹, 韩文龙, 赵作周, 等. 钢筋套筒灌浆连接装配式剪力墙结构三层足尺模型子结构拟动力试验[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3):26—38 (QIAN Jiaru, HAN Wenlong, ZHAO Zuozhou, et al. Pseudo-dynamic substructure test on a 3-story full-scale model of prefabricated concrete shear wall structure with rebars splicing by grout sleeves[J]. Journal of Building Structure, 2017, 38(3):26—38 (in Chinese))
- [5] 周若涵, 翁雯. 钢筋套筒灌浆接头的质量监督及检测研究[J]. 质量检测, 2018, 36(10):1—3 (ZHUO Ruohan, WENG Wen. Study on quality supervision and quality inspection with rebar sleeve grouting connection joint[J]. Quality Inspection, 2018, 36(10):1—3 (in Chinese))
- [6] 齐宝库, 王丹, 白庶, 等. 预制装配式建筑施工常见质量问题与防范措施[J]. 建筑经济, 2016, 37(5):3—8 (QI Baoku, WANG Dan, BAI Shu, et al. Common quality problems and preventive measure of prefabricated construction[J]. Construction Economy, 2016, 37(5):3—8 (in Chinese))
- [7] 常春光, 王嘉源, 李洪雪. 装配式建筑施工质量因素识别与控制[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2016, 18(1):58—63 (CHANG Chunguang, WANG Jiayuan, LI Hongxue. Identification and control of quality elements for prefabricated concrete constructions[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Social Science Edition), 2016, 18(1):58—63 (in Chinese))
- [8] 李向民, 高润东, 许清风, 等. 钻孔结合内窥镜法检测套筒灌浆饱满度试验研究[J]. 施工技术, 2019, 48(9):6—9 (LI Xiangmin, GAO Rundong, XU Qingfeng, et al. Experimental study on testing grouting plumpness of sleeve by hole-drilling method combined with endoscopy[J]. Construction Technology, 2019, 48(9):6—9 (in Chinese))
- [9] 孙彬, 毛诗洋, 王霓, 等. 预成孔法检测装配式结构套筒灌浆饱满度的试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(23):1—4 (SUN Bin, MAO Shiyang, WANG Ni, et al. Experimental study on the preformed aisle method for inspecting the grouting fullness of sleeve of prefabricated structures[J]. Building Structure, 2018, 48(23):1—4 (in Chinese))
- [10] 高润东, 李向民, 王卓琳, 等. 基于预埋钢丝拉拔法的套筒灌浆饱满度检测技术研究[J]. 施工技术, 2017, 46(17):1—5 (GAO Rundong, LI Xiangmin, WANG Zhuolin, et al. Research on testing technology of grouting plumpness of sleeve based on embedded steel wire drawing method[J]. Construction Technology, 2017, 46(17):1—5 (in Chinese))
- [11] Li Xiangmin, Gao Rundong, Wang Zhuolin, et al. Research on the applied technology of testing grouting compaction of sleeves based on damped vibration method [C]. 2nd International Conference on Civil, Transportation and Environmental Engineering, 2017:317—323.
- [12] 李嘉, 郭成超, 王复明, 等. 探地雷达应用概述[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2):629—637 (LI Jia, GUO Chengchao, WANG Fuming, et al. The summary of the surface ground penetrating radar applied in subsurface investigation[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2):629—637 (in Chinese))
- [13] 顾轶东, 林维正, 苏航. 冲击回波法在混凝土无损检测中的应用[J]. 无损检测, 2004, 26(9):468—472 (GU Yidong, LIN Weizheng, SU Hang. Nondestructive testing for concrete by impact-echo method [J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(9):468—472 (in Chinese))
- [14] Parks J E, Papulak T, Pantelides C P. Acoustic emission monitoring of grouted splice sleeve connectors and reinforced precast concrete bridge assemblies[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122:537—547.
- [15] 张富文, 李向民, 高润东, 等. 便携式 X 射线技术检测套筒灌浆密实度研究[J]. 施工技术, 2017, 46(17):6—10 (ZHANG Fuwen, LI Xiangmin, GAO Rundong, et al. Study on detection of grouting compactness of grout sleeve by portable X-ray technology[J]. Construction Technology, 2017, 46(17):6—10 (in Chinese))
- [16] 王炯耿, 姚晖, 罗宏建, 等. 铝制容器焊缝超声阵列成像方法研究[J]. 实验力学, 2018, 33(4):517—524 (WANG Jiongeng, YAO Hui, LUO Hongjian, et al. Study of ultrasonic array imaging method for weld seam of aluminum vessel[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4):517—524 (in Chinese))
- [17] 高鹏, 李法新. 非线性超声相控阵无损检测系统及实验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(1):1—11 (GAO Peng, LI Faxin. Nonlinear ultrasonic phased array nondestructive testing system and performance study[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1):1—11 (in Chinese))
- [18] 孙宝坤, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(一)[J]. 应用声学, 1992, 12(3):43—48 (SUN Baokun, SHEN

- Jianzhong. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (I)[J]. *Applied Acoustics*, 1992, 12(3):43—48 (in Chinese))
- [19] 周正干, 彭地, 李洋. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(10):1—7 (ZHOU Zhenggan, PENG Di, LI Yang. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(10):1—7 (in Chinese))
- [20] Holmes C, Drinkwater B W, Wilcox P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation[J]. *NDT and E International*, 2005, 38(8):701—711.
- [21] Hunter A J, Drinkwater B W, Wilcox P. The wave number algorithm for full matrix imaging using an ultrasonic array[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control*, 2008, 55(11):2450—2462.
- [22] Li Changzheng, Zhang Bixing, Shi Fangfang, et al. Research on the imaging of concrete defect based on the pulse compression technique[J]. *Applied Geophysics*, 2013, 10(3):337—348.
- [23] 张昊, 陈世利, 贾乐成. 基于超声相控阵的缺陷全聚焦三维成像[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(7):992—999 (ZHANG Hao, CHEN Shili, JIA Lecheng. Three-dimensional total-focus imaging based on ultrasonic linear phased array[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(7):992—999 (in Chinese))
- [24] 傅磊, 刘四新, 刘澜波, 等. 机载探地雷达数值模拟及逆时偏移成像[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(5):1636—1646 (FU Lei, LIU Sixin, LIU Lanbo, et al. Airborne ground penetrating radar numerical simulation and reverse time migration[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5):1636—1646 (in Chinese))
- [25] Müller S, Niederleithinger E, Bohlen T. Reverse time migration: a seismic imaging technique applied to synthetic ultrasonic data[J]. *International Journal of Geophysics*, 2012, 11: 1—7.
- [26] McMechan G A. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values[J]. *Geophysical Prospecting*, 1983, 31(3):413—420.
- [27] Liu Hai, Qi Yuan, Chen Zhijie, et al. Ultrasonic inspection of grouted splice sleeves in precast concrete structures using elastic reverse time migration method[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 148:1—11.
- [28] Sakuma T, Sakamoto S, Otsuru T. Computational simulation in architectural and environment acoustic: methods and applications of wave-based computation[M]. Tokyo: Springer Japan, 2014.
- [29] Graves R W. Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(4):1091—1106.
- [30] Whitmore N D. Iterative depth migration by backward time propagation[C]. 1983 SEG Annual Meeting, 1983: 382—385.
- [31] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C. Reverse time migration[J]. *Geophysics*, 1983, 48(11):1514—1524.
- [32] Liu Hai, Xia Huiyan, Zhuang Mingwei, et al. Reverse time migration of acoustic waves for imaging-based defects detection for concrete and CFST structures[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117:210—220.
- [33] 刘守伟, 王华忠, 陈生昌, 等. 三维逆时偏移 GPU/CPU 机群实现方案研究[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(10): 3487—3496 (LIU Shouwei, WANG Huazhong, CHEN Shengchang, et al. Implementation strategy of 3D reverse time migration on GPU/CPU clusters[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(10): 3487—3496 (in Chinese))
- [34] 王保利, 高静怀, 陈文超, 等. 地震叠前逆时偏移的有效边界储存策略[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(7):2412—2421 (WANG Baoli, GAO Jinghuai, CHEN Wenchao, et al. Efficient boundary storage strategies for seismic reverse time migration[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(7):2412—2421 (in Chinese))
- [35] Liu Hai, Long Zhijun, Han Feng, et al. Frequency-domain reverse-time migration of ground penetrating radar based on layered medium Green's Functions[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(8):2957—2965.
- [36] 顾元. 三维非平稳随机介质建模与参数估计[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013 (GU Yuan. Numerical modeling and parameter estimation for 3D non-stationary random medium[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013 (in Chinese))
- [37] 李灿苹, 王南萍, 李志宏. Von Karman 型自相关函数模拟随机介质[J]. *物探与化探*, 2010, 34(1):98—102 (LI Canping, WANG Nanping, LI Zhihong. The application of Von Karman type autocorrelation function to modeling

- random media[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1):98—102 (in Chinese))
- [38] Boresi A P, Schmidt R J. Advanced mechanics of materials[M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [39] 齐椽. 基于超声相控阵和逆时偏移成像的套筒灌浆缺陷检测方[D]. 广州: 广州大学, 2020 (QI Yuan. Ultrasonic inspection of grouted splice sleeves based on reverse time migration imaging method[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020 (in Chinese))

Imaging-based inspection of grouted splice sleeves by reverse-time migration using an ultrasonic phased array

CHEN Zhijie¹, LI Zhao², LIU Yijie¹, LIU Hai¹, QI Yuan^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China; 2. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China; 3. Guangzhou Women and Children's Medical Center National Children's Medical Center for South Central Region, Guangzhou 510620, Guangdong, China)

Abstract: Grouted sleeve has become one of the most important methods for connecting the prefabricated construction (PC) components. The compactness of the grouted sleeves plays a critical role in the structural safety and earthquake resistance for prefabricated construction. In this paper, an ultrasonic imaging method is proposed for the inspection of the compactness of grouted splice sleeves in PC structures by reverse time migration (RTM) using a phased array. Numerical and laboratory experiments are carried out to assess the feasibility of the proposed method. Numerical results show that the proposed RTM method can reconstruct images of the buried sleeves with a higher resolution and a greatly-improved accuracy, compared with the total focusing method (TFM). In the laboratory experiment, the insufficiently-grouted sleeve has a reflection, which is about 9 dB stronger than the fully-grouted one. The proposed ultrasonic imaging method has a great potential for inspecting the grouting quality of splice sleeves in PC constructions in the near future.

Keywords: precast concrete structure; grouted splice sleeve; non-destructive testing (NDT); ultrasonic imaging; reverse time migration